

Обработка различных сигналов сопровождает многие области общественной жизни и экономики, науки и здравоохранения во всех развитых странах мира.

В Республике Беларусь обработке и анализу биоэнергетических сигналов в медицине с целью диагностики состояния и лечения заболеваний уделено огромное внимание. Среди государственных программ научных исследований, направленных на информационное обеспечение в здравоохранении, можно выделить ГКПНИ «Современные технологии в медицине» (2006 – 2010 гг.), включающую комплекс заданий, цель которых – обработка и анализ биоэлектрических сигналов в норме и при различных патологических состояниях. Выполнение этих заданий позволит улучшить диагностику и лечение социально значимых заболеваний в республике.

С 2010 по 2012 год будет выполняться национальная программа «Инновационные биотехнологии», в которой ключевое место занимают задания, направленные на анализ биоэлектрических сигналов в организме человека и животных с целью коррекции патологических состояний.

УДК 616.073.7

АНАЛИЗ МЫШЕЧНЫХ БИОПОТЕНЦИАЛОВ НА ОСНОВЕ СПЕКТРОГРАММ

канд. техн. наук, доц. А.Н. ОСИПОВ, В.В. КОВАЛЕВ

(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск);

канд. мед. наук, доц. Ю.Г. ДЕГТЯРЕВ

(Белорусский государственный медицинский университет, Минск);

чл.-кор. НАН Беларуси, д-р мед. наук, проф. В.А. КУЛЬЧИЦКИЙ

(Институт физиологии НАН Беларуси, Минск)

Рассматриваются особенности обработки и анализа биоэлектрических сигналов, отображающих деятельность определенных мышц человека. При этом используется метод частотно-временного представления сигналов электромиограмм. Проведены спектральные исследования электромиограмм пациентов с различными патологиями и выявлены особенности в их структуре. Приведенные качественные оценки полученных спектрограмм дают возможность объективно анализировать биоэлектрические сигналы, отображающие процессы функционирования двигательных систем организма. Полученные результаты позволяют конкретизировать характер патологических изменений в нервно-мышечной ткани. Даны рекомендации по применению и дальнейшему развитию предложенного метода.

Введение. В функциональной диагностике широкое распространение получила электромиография (ЭМГ) – метод электрофизиологической диагностики состояния нервно-мышечной системы. Традиционный анализ ЭМГ включает оценку формы, амплитуды и длительности потенциалов действия отдельных мышечных волокон, возникающих при мышечном сокращении [1, 2]. Оценивается частота следования потенциалов, характеризуется особенность группирования потенциалов, ритмичность соответствующих групп и частоты их следования и т.д. Однако подобный анализ не позволяет в полной мере оценить процесс сокращения мышц. Также с помощью данной методики затруднительна диагностика состояния мышц в реальном масштабе времени. Сегодня развитие электромиографии осуществляется по пути использования спектральных методов анализа стационарных и нестационарных биоэлектрических сигналов [3 – 5]. Для повышения информативности результатов исследований, а также более точной оценки ЭМГ в данной статье проведен анализ мышечных биопотенциалов на основе спектрограмм.

Предлагается использовать частотно-временное представление сигнала. Это достигается использованием оконных (кратковременных) преобразований Фурье [6]. Полный временной интервал сигнала

разделяется на подинтервалы – временные окна; преобразование проводится последовательно для каждого окна в отдельности.

Оконное преобразование Фурье выполняется в соответствии с выражением:

$$S(\omega, b_k) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t)W(t-b_k)\exp(-j\omega t)dt, \quad (1)$$

где $S(t)$ – исходный сигнал ЭМГ; $W(t-b_k)$ – функция окна сдвига преобразования по координате t (параметром b задаются фиксированные значения сдвига); индекс k показывает порядковый номер сдвига окна. В качестве окна преобразования используется весовое окно Хэннинга, обеспечивающее малое искажение спектра за счет граничных условий вырезки оконных отрезков сигнала [7].

После выполнения оконного преобразования выполняется возведение в квадрат действительной части (амплитуды) оконного преобразования Фурье, тем самым получая участок амплитудной спектрограммы для анализируемого окна:

$$\text{Спектрограмма } S(t) = |S(\omega, b_k)|^2. \quad (2)$$

Затем окно преобразования $W(t-b_k)$ сдвигается по времени и производится оконное преобразование для следующего временного отрезка, тем самым анализируя следующий интервал сигнала [8]. Подобным образом анализируются все подинтервалы сигнала ЭМГ и строится спектрограмма сигнала.

При построении спектрограммы в данной работе использовано 50-процентное перекрытие окон, т.е. сдвиг окна по времени составляет половину размера окна (8192 отсчета). Это позволяет в 2 раза повысить временное разрешение спектрограммы, вычисляемое по формуле:

$$T_r = S_f(P_o/100)/F_{sr}, \quad (3)$$

где T_r – временное разрешение спектрограммы; S_f – размер окна для преобразования Фурье; P_o – процент перекрытия окон; F_{sr} – частота дискретизации. В нашем случае (при $S_f = 16384$, $P_o = 50\%$, $F_{sr} = 48000$ Гц) T_r составляет 0,17 с, что сопоставимо с длительностью сокращения скелетной мышцы, т.е. достаточно для анализа процессов сокращения и расслабления мышц.

Методика исследования

Проведены исследования ЭМГ больных с различными дисфункциями мышц анальных сфинктеров у детей. Исследования проводились на базе Детского хирургического центра 1-й клинической больницы г. Минска. У группы пациентов с различными патологиями анальных сфинктеров регистрировались электромиограммы. Запись проводилась при поступлении больных в процессе физиотерапевтического лечения (электростимуляция), а также после окончания курса лечения.

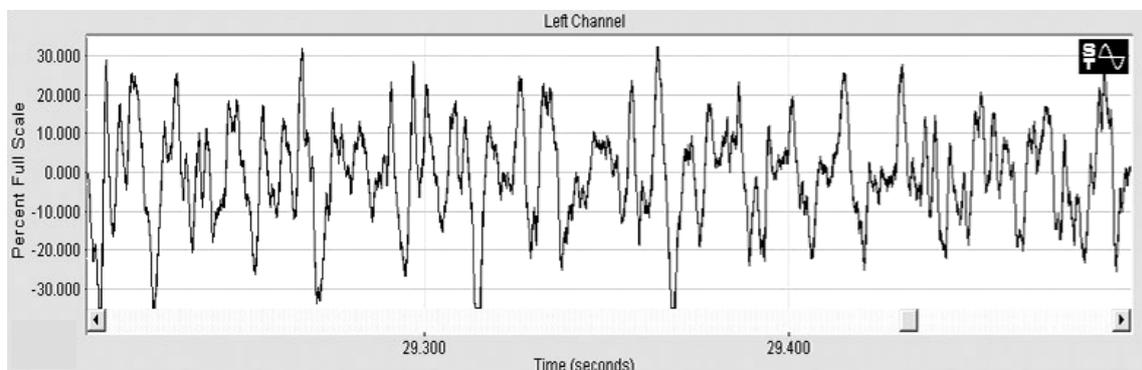
В процессе проведения экспериментальных исследований обработке и анализу подверглись электромиограммы, полученные в клинических условиях с использованием разработанного нами многофункционального комплекса [9, 10], адаптированного для спектральной обработки нелинейных сигналов, отображающих биопотенциалы мышц.

Методика проведения исследования заключалась в следующем: пациенты по команде врача осуществляли произвольное сокращение мышц сфинктеров, удержание их в сокращенном состоянии несколько секунд и далее, по команде, расслабление. Во время сокращения сигнал электрической активности мышц с электродов, подключенных к пациенту, поступает через усилитель и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) в ПК и подвергается спектральной обработке. Сигнал ЭМГ, проходя через усилитель, непрерывно оцифровывается с частотой 48 000 Гц и разрядностью 16 бит. В качестве аналого-цифрового преобразователя использован внешний модуль «SB Live! 24-bit», подключенный к ПК по интерфейсу USB. Модуль обеспечивает отношение сигнал/шум 92,5 дБ, гармонические искажения не более 0,007 % и позволяет производить оцифровку сигнала по двум каналам с частотой до 96 кГц при разрядности 24 бита [11].

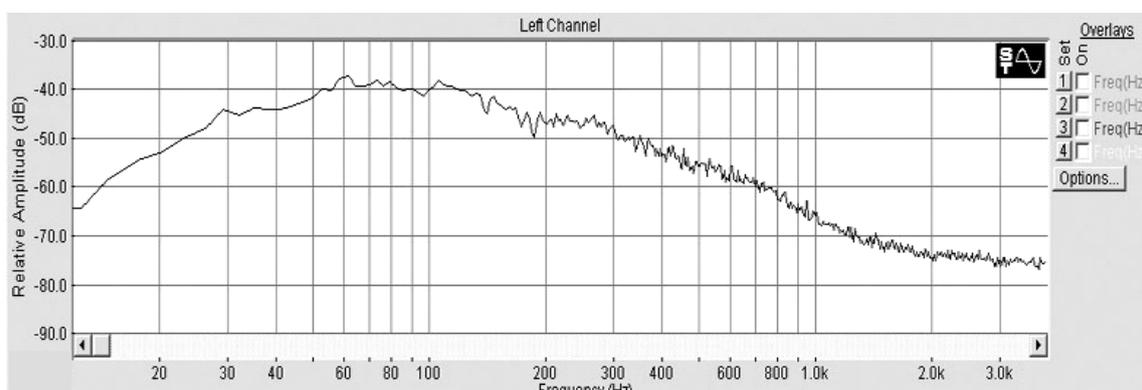
Для записи и обработки сигнала ЭМГ использован программный комплекс SpectraPRO v 3.32.17. Данный программный комплекс обеспечивает двухканальную запись сигналов и их спектральную обработку. Имеется возможность применения различных фильтров, выбора размера быстрого преобразования Фурье (БПФ), выбора окна для него, усреднения результатов, вычисления спектра отношения двух сигналов, выбора перекрытия окон и других параметров [12].

Спектральная обработка проводилась в режиме реального времени, при этом пациенты на экране монитора оценивали представленную в иллюстративной цветной форме силу сокращений мышц, их спектр и/или спектрограмму. Сигнал ЭМГ, регистрируемый у пациентов, имеет вид, представленный на рисунке 1, а. Спектр сигнала, вычисляемый с помощью БПФ, показан на рисунке 1, б. Спектрограмма сигнала ЭМГ, записанного в течение 4-х секунд представлена на рисунке 1, в.

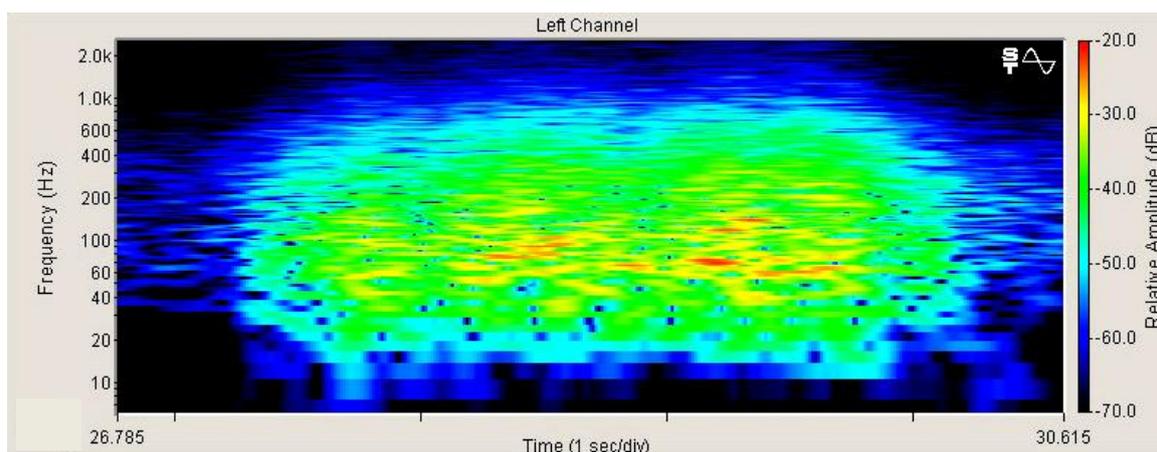
Сокращение мышц анального сфинктера, удержание мышцы в сокращенном состоянии и её расслабление производилось пациентом по команде врача. На спектрограмме по оси абсцисс указано время в секундах, по оси ординат – частота в герцах, цвет указывает на уровень сигнала на данной частоте. Шкала соответствия цвета уровню сигнала приведена в правой части рисунка (по мере увеличения сигнала цвет изменяется от темно-синего (внизу, -70 dB) до красного (вверху, -20 dB)).



а)



б)



в)

Рис. 1. Сигналы ЭМГ:

а – временное представление сигнала ЭМГ; б – спектр сигнала ЭМГ; в – спектрограмма сигнала ЭМГ

Результаты и их обсуждение. Как следует из анализа спектра (см. рис. 1, в), при сокращениях мышц наиболее высокий уровень сигнала ЭМГ наблюдается на частотах от 50 до 150 Гц.

Результаты исследований (полученные спектрограммы) позволили в процессе курса лечения оценить изменение состояния мышц. Также исследования показали, что использование спектрограмм для

анализа процесса сокращения мышц позволяет оценить особенности сигнала ЭМГ на протяжении всего цикла сокращения мышц (сокращение, удержание в сокращенном состоянии, расслабление), что важно для реальной оценки динамики процесса.

На рисунке 2 приведены примеры спектрограмм ЭМГ больных с различными нарушениями функции сфинктеров прямой кишки. Показаны 2 цикла «сокращение – расслабление», каждый длительностью около 4-х с.

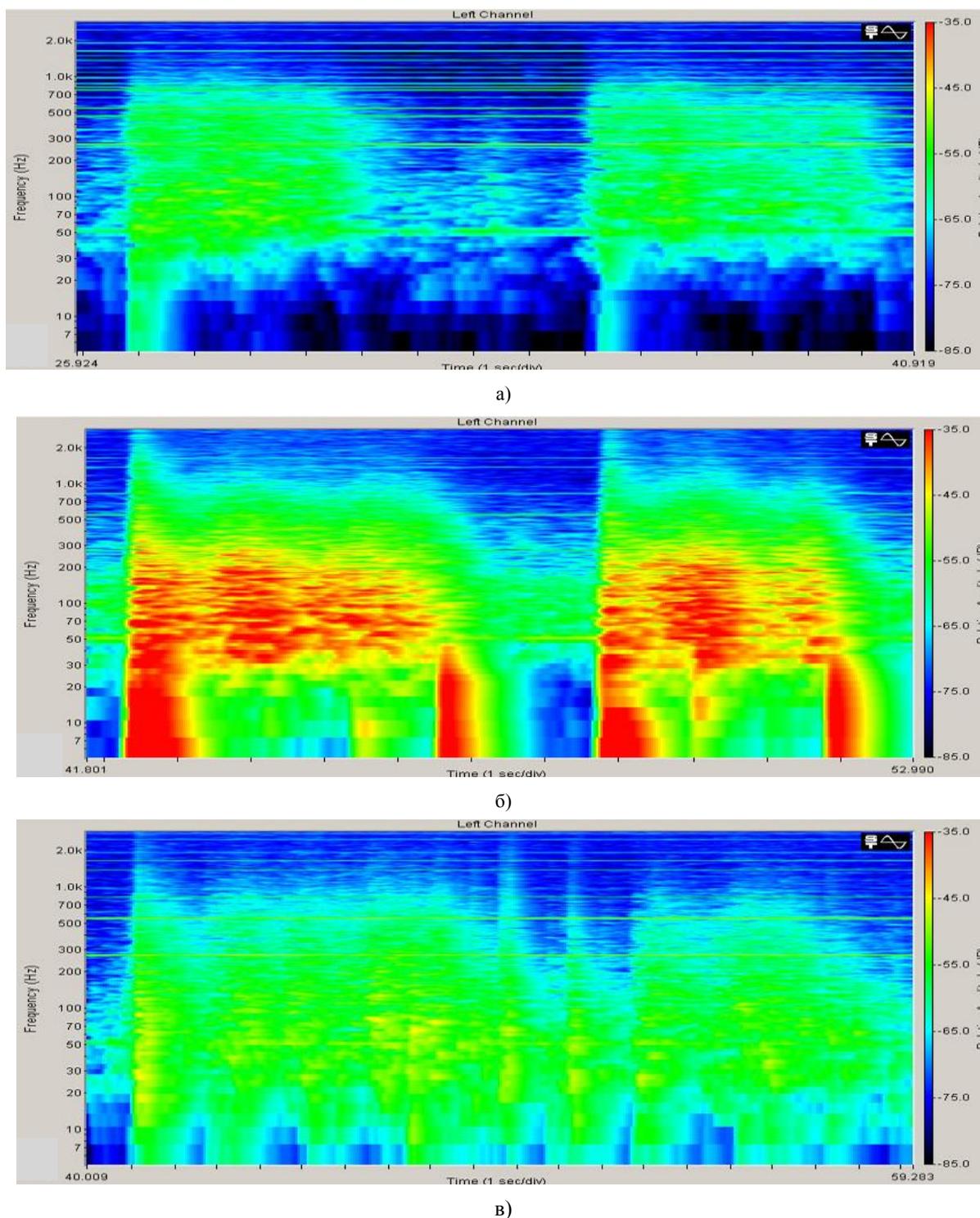


Рис. 2. Спектрограммы ЭМГ больных с различными патологиями:
 а – функциональный мегаколон; б – болезнь Гиршпрунга; в – атрезия прямой кишки

На рисунке 2, а приведен пример спектрограмм сокращений мышц анального сфинктера пациентом с функциональным мегаколоном. Начало сокращения хорошо выражено, затем амплитуда сокращения уменьшается, о чем свидетельствует уменьшение частот верхней и нижней границ спектра. Расслабление мышц также хорошо выражено.

На рисунке 2, б показана спектрограмма пациента с болезнью Гиршпрунга. Явно выражено начало сокращения, наблюдается весьма сильная амплитуда сигнала в области низких частот в момент начала сокращения и начала расслабления мышц. Во время удержания мышц в сокращенном состоянии амплитуда падает, наблюдаются спастические колебания уровня. Расслабление мышц прослеживается хорошо, о чем свидетельствует малая амплитуда колебаний в межсократительный период.

На рисунке 2, в приведен пример спектрограммы пациента после операции по поводу атрезии прямой кишки. Сокращение носит спастический характер, отсутствует четкое начало сокращения. Во время «удержания» наблюдаются значительные колебания верхней и нижней границ спектра, а также амплитуды, что свидетельствует о невозможности пациента контролировать усилие на одном уровне. На этапе расслабления амплитуда спектра изменяется незначительно, что свидетельствует об отсутствии расслабления мышц. Развиваемое усилие характеризуется нестабильностью амплитуды и частотных границ спектра.

Следует отметить, что характер спектрограмм зависит от типа патологических изменений, а также от индивидуальных особенностей пациентов. На приведенных спектрограммах можно заметить, что при разных патологиях весь процесс сокращения мышц происходит с различными спектрами. Отличия наблюдаются на всех этапах: сокращение, удержание в сокращенном состоянии, а также расслабление мышц. В настоящее время ведется работа по выявлению особенностей видов спектрограмм и реальных физиологических параметров в нормальном состоянии и при различных патологических состояниях.

Как видно по результатам исследований, переход к частотно-временному представлению сигнала ЭМГ позволяет достаточно точно локализовать информативные особенности сигнала и по времени, и по частоте. Данное представление позволяет выделять на координатной оси и анализировать особенности биомедицинских сигналов, таких как ЭМГ, т.е. объективизировать процесс обработки ЭМГ в реальном масштабе времени.

Выводы. Проведенные исследования показали, что метод оценки спектрограмм ЭМГ дает возможность объективно анализировать биоэлектрические сигналы, отображающие процессы функционирования двигательных систем организма. Полученные результаты позволяют конкретизировать характер патологических изменений в нервно-мышечной ткани. Таким образом, данный метод может быть применен в реальном масштабе времени для экспресс-диагностики заболеваний, сопровождающихся нарушением контроля произвольных и тонических сокращений мышц сфинктеров. Кроме того, визуализация результатов исследований в виде спектрограмм позволит использовать данный метод в системах с биологической обратной связью. Результаты данной работы представляют интерес для разработчиков автоматизированной аппаратуры исследования биоэлектрических сигналов и врачей реабилитологов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ронкин, М.А. Функциональная диагностика нервных болезней / М.А. Ронкин, Л.Р. Зенков. – М.: Медицина, 1991. – 623 с.
2. Электромиография в диагностике нервно-мышечных заболеваний / Б.М. Гехт [и др.]; под общ. ред. Б.М. Гехта. – Таганрог: 1997. – 370 с.
3. Сидоренко, А.В. Нелинейный анализ электромиограмм на основе вейвлет-преобразования / А.В. Сидоренко, А.П. Селицкий // Докл. БГУИР. – 2008. – № 2(32). – С. 12 – 18.
4. Сидоренко, А.В. Нелинейный анализ электромиограмм / А.В. Сидоренко, В.И. Ходулев, А.П. Селицкий // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2006. – № 11. – С. 53 – 60.
5. Wavelets and self-organising maps in electromyogram (EMG) analysis / D. Moshou [et al.]. – Heverlee (Belgium): Katholieke Universiteit Leuven, 2000.
6. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 751 с.
7. Павлейно, М.А. Спектральные преобразования в MatLab / М.А. Павлейно, В.М. Ромаданов. – СПб., 2007. – 160 с.
8. Давыдов, А.В. Цифровая обработка сигналов: лекции и практикум на ПК / А.В. Давыдов [Электронный ресурс]. – 2005. – Режим доступа: <http://prodav.narod.ru/dsp/index.html>. – Дата доступа: 02.10.2008.
9. Ковалев, В.В. Комплекс для электроимпедансных исследований биотканей / В.В. Ковалев, М.В. Давыдов // Молодежь в науке-2004: материалы междунар. науч. конф. молодых ученых. – Минск: НАНБ, 2004. – Т. 5. – С. 115 – 121.

10. Ковалев, В.В. Комплекс биологической обратной связи на основе стандартно выпускаемых электро-стимуляторов / В.В. Ковалев, Ю.Г. Дегтярев, А.Н. Осипов // Современная радиоэлектроника: научные исследования, подготовка кадров: сб. материалов. – Минск: МГВРК, 2006. – 380 с.
11. Кузнецов, Р. Техническое описание и тестирование карты Live! 24-bit / Р. Кузнецов, М. Лядов [Электронный ресурс]. – 2004. – Режим доступа: <http://www.ixbt.com/multimedia/creative-live!24bit.shtml>. – Дата доступа: 17.10.2008.
12. SpectraPRO manual [Electronic resource] / Sound Technology info Center. – Mode of access: <http://www.soundtechnology.com/SpectraSlide.html>. – Date of access: 09.11.2008.

Поступила 17.02.2008