

УДК 615.851.015.4 : 612.013.1

В. А. Дебелов, О. Г. Донская, В. С. Иутин, А. С. Малахин, Е. А. Тарасов,
Ю. А. Ткачев, М. Б. Штарк, Е. И. Шульман

(Новосибирск)

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИГРЫ

Обосновывается актуальность создания компьютерных игр для обучения саморегуляции с помощью метода биологической обратной связи. Рассматривается концепция разработки такой игры, и описывается реализованная в соответствии с ней программная система «Гребной канал». Приводятся данные тестирования системы в лабораторных условиях, показывающие положительные результаты ее применения.

Введение. Несмотря на значительное количество научных исследований в области биологической обратной связи (БОС) и доказанную теоретическую значимость метода БОС для профилактики и лечения различных заболеваний человека [1—4], его практическое использование в настоящее время имеет ряд ограничений. Одно из наиболее серьезных препятствий на пути превращения этого метода в рутинную клиническую процедуру, выполняемую по назначению врача, подобно, например, физиолечению, состоит в том, что методика БОС-тренинга предполагает проведение ряда повторяющихся однообразных сессий, длящихся в общей сложности до часа и более [5]. Другое по значимости препятствие заключается в значительной отдаленности «конечного» результата, для получения которого необходимо многократное, изо дня в день, повторение тренинга.

В настоящее время наметился путь преодоления этих препятствий. Широкое распространение персональных компьютеров и быстрое развитие средств мультимедиа привели к всеобщему увлечению компьютерными играми. Это наводит на мысль о том, что объединение БОС-тренинга и компьютерной игры в рамках одного метода позволило бы в значительной степени избавиться от указанных отрицательных свойств БОС-метода.

Концепция компьютерной игры для БОС-тренинга. Наиболее близкой к компьютерным играм является методика визуального БОС-тренинга, в основе которой лежит непрерывное отслеживание одного из психофизиологических показателей человека и изображение (например, на экране монитора) измеренных (или вычисленных) значений этого показателя и того уровня, к достижению которого он должен стремиться в процессе сессии тренинга. Концепция компьютерной игры для БОС-тренинга опирается на следующие основополагающие свойства визуального БОС-тренинга:

1. Отражение на экране в каком-либо виде текущих измерений (чаще всего это делается с помощью столбцов, высота которых пропорциональна значению показателя) и требуемого уровня (обычно горизонтальная линия).

2. Повторение сессии (до восьми—десяти в одном сеансе тренинга) с усложнением задачи (перемещение горизонтальной линии).

3. Повторение сеансов тренинга с целью закрепления достигнутых результатов.

Очевидно, что третье свойство присуще и играм, второе — цикличность — также характерно для многих игр (от самых простых до самых сложных). И только первое свойство вызывает затруднения при попытке проектирования игры для БОС-тренинга. Из всего спектра компьютерных игр этим свойством в достаточной мере обладает группа игр, показывающих спортивные единоборства. В большинстве из них поведением спортсмена управляют клавиатурой, джойстиком или «мышью» (устройство управления) и, следя за ходом состязания на экране монитора, стремятся улучшить достигнутый ранее свой же результат или опередить соперников. Такими являются, например, программы Winter и Formula фирмы "Accolade, Inc." (США).

Модификация игр этой группы для БОС-тренинга сводится к тому, чтобы успех в состязании поставить в зависимость не от способности быстро реагировать на складывающуюся ситуацию и использовать устройство управления, а от умения изменять в нужном направлении один (в простом случае) из психофизиологических показателей. Выбор же конкретного показателя и вида спортивного состязания определяется постановкой психофизиологической задачи, решаемой в рамках БОС-тренинга. Работая много лет с показателями сердечно-сосудистой системы [5, 6], мы остановили свой выбор на длительности кардиоцикла и времени распространения пульсовой волны. Оба показателя не управляются произвольно, но, как известно, посредством БОС-тренинга можно научиться их направленному изменению в определенных пределах [5, 6]. Такое увеличение первого или второго показателя, достигаемое в процессе БОС-тренинга, должно не только отражаться на кардио- и гемодинамике тренирующегося, приводя к нормализации ударного и минутного объемов крови, среднего артериального давления, но и сопровождаться изменением психоэмоционального состояния, значительной мышечной релаксацией. Характерный для этих показателей параметр — их дискретность. При непрерывности сигналов, из которых они вычлняются, их новые значения вычисляются примерно один раз в секунду. Поэтому наиболее подходящими для использования этих показателей в качестве «устройств управления» являются игры, основанные на ритмических видах спортивных состязаний, например, плавании, гребле, конном спорте. Исходя из соображений необходимости зрелищности, мы остановили свой выбор на гонках лодок, воплотив вышеизложенное в реализации программной системы «Гребной канал».

Главный элемент концепции, положенной в основу этой системы, состоит в том, что она ориентирована на применение в домашних условиях. Такие условия в отличие от условий научно-исследовательской лаборатории или медицинского учреждения, по нашему мнению, оптимальны для БОС-тренинга, поскольку являются привычными и позволяют проводить сеансы в удобное время и в соответствии с психоэмоциональным состоянием.

Важно отметить, что описываемая концепция предполагает возможность сбора данных у пользователей системы (например, путем обмена на новую версию программы и т. п.) и их слияние в единую базу данных для последующего лабораторного анализа с целью оценки эффективности и научных исследований. Созданный инструмент для обработки данных, полученных при использовании системы «Гребной канал», представляет собой автономную программную систему, ориентированную на применение в лабораторных условиях.

Для измерения указанных показателей в Институте медицинской и биологической кибернетики СО РАМН разработаны специальные приборы «Монитор пульсовой волны» и «Детектор пульса», благодаря которым процесс наложения и фиксации измерительных датчиков предельно облегчен и не требует специальных знаний и каких-либо расходных материалов. Первый из них регистрирует электрокардиограмму и фотоплетизмограмму, отводимые с датчиков, два из которых закрепляются с помощью «лигучек» на указательном и среднем пальцах левой руки, а третий — на указательном пальце правой. Второе устройство регистрирует только фотоплетизмограмму и поэтому располагает единственным датчиком, вмонтированным в устройство наподобие клавиши «мышь». Во время сеанса БОС-тренинга устройство размещается на

ладони так, чтобы датчик оказался прижатым указательным пальцем руки. При этом замыкается цепь, в которую включена батарейка, и устройство после кратковременного переходного процесса начинает работать. «Монитор пульсовой волны» питается от аккумуляторного элемента, рассчитанного на 10 ч работы, после чего требуется подзарядка.

В обоих устройствах предусмотрена связь с компьютером через последовательный порт. «Монитор пульсовой волны» оснащен аналого-цифровым преобразователем и передает в компьютер оцифрованные сигналы, а в «Детекторе пульса» реализованы автоматическое распознавание пульсовой волны и передача в компьютер момента достижения волной датчика. Подсчитываемое программно время между двумя такими событиями является, строго говоря, не длительностью кардиоцикла, а межпульсовым интервалом, величина которого зависит не только от величины кардиоинтервала, но и от времени распространения пульсовой волны. Таким образом, регистрируемый с помощью «Детектора пульса» показатель отражает функционирование как сердца, так и сосудистой системы.

Описание программной системы «Гребной канал». При разработке системы были приняты во внимание следующие обстоятельства:

1. Достаточно распространенным на сегодняшний день домашним компьютером можно считать персональный компьютер на базе процессора Intel-386 с графическим адаптером VGA. Именно на такую конфигурацию и рассчитана программа. Использование менее мощных компьютеров нежелательно, поскольку в процессе игры требуется обработка в реальном масштабе времени сигналов, поступающих от устройства ввода. Недостаток вычислительной мощности может приводить к потерям критичных данных и, следовательно, к искажению измерений в процессе БОС-тренинга.

2. Наиболее распространенной операционной системой является MS DOS фирмы "MicroSoft Corporation". Поэтому созданная система работает под ее управлением.

Очевидно, что при моделировании на экране монитора гребного канала с соревнующимися лодками должны удовлетворяться следующие условия:

А. Изображения на экране картина и происходящие на нем события должны быть достаточно приближены к реальным условиям гребных соревнований. Изображения гребного канала, лодок с участниками, электронного табло с результатами гонок не должны быть слишком схематичными.

Б. Измерение сигналов, их обработка с целью вычисления управляющего показателя, запись массивов измеренной информации на жесткий диск компьютера для последующей обработки не должны отражаться на качестве картины, демонстрируемой тренирующемуся.

В. Измеренная информация записывается на жесткий диск в формате, пригодном для последующего анализа.

Для выполнения первого из перечисленных условий предпочтительно такое изображение на экране монитора, которое соответствует трансляции соревнований по телевидению. Это означает, что необходимо моделировать движение видеокамеры параллельно каналу в темпе происходящих гонок таким образом, чтобы лодки участников все время находились в ее поле зрения. При этом для поддержания эффекта «участия» изображение лодок не должно быть слишком мелким.

Процедура БОС-тренинга начинается с наложения датчиков и запуска описываемой системы. После кратковременной экспозиции заставки с названием программы на экран монитора выводится картина, приведенная на рис. 1. Тренирующийся считается участником гонок: он может зарегистрироваться, введя фамилию, имя, возраст, пол и страну, или, если это уже было сделано ранее, просто выбрать себя в списке участников. Затем можно выбрать дистанцию из вариантов — 1000, 2000 и 4000 м (это соответствует 2-, 4- и 6-минутным сессиям-гонкам при частоте сердечных сокращений 60 ударов в мин). После этого можно выбрать соперника из заранее созданного списка (нижняя часть рисунка), его скорость во время гонки будет задаваться компьютером. Такой список существует для четырех категорий участников:

Registered players				Distances	
name	country	age	sex	1000 m	
Mama	Russia	30	Female	2000 m	
Papa	Russia	32	Male	4000 m	
				Enter ACCEPT	
				Parameter	Value
				SD	
				DD	
				BR	
				RS EDIT Enter ACCEPT	
				DEVICE	
				Макс. разница	300
				Время сна	500
				Время отсутствия	2000
				RS EDIT Ins View Enter ACCE	
Ins NEW; Del DELETE; DS EDIT; Enter ACCEPT					
name	country	short	medium	long	
Gerhard Doring	Germany	01:59.5	04:57.8	07:15.6	
Robert Anderson	USA	02:01.1	03:51.2	07:48.4	
Rolf Becker	Germany	02:01.2	03:51.1	07:42.2	
Naomi Hayashida	Japan	02:03.4	04:04.9	07:51.2	
Bertram Meyl	Germany	02:03.4	03:55.5	07:23.2	
Unni Riis	United Kingdom	02:04.5	04:07.8	08:06.7	
Nestor Hansen	Poland	02:05.0	04:02.9	08:12.6	
Jodi Slattey	Australia	02:07.8	04:02.3	07:37.4	
Oleg Pletnev	Israel	02:08.9	04:09.9	07:58.9	
Peter Ddugs	Germany	02:10.0	04:00.0	07:50.0	
Martin Lyttek	Canada	02:13.1	03:49.2	07:47.9	
Aleksandr Kirillov	Russia	02:18.6	04:05.2	07:32.1	
Robin Wolf	USA	02:18.7	03:52.1	07:56.5	
Enter ACCEPT					
Player: Papa Distance: 1000 Opponent: Rolf Becker					
F1 HELP; F2 PLAYER; F3 DIST; F4 RIVAL; F5 DATA; F6 RR; F7 RM; F8 MM; F9 DEVICE; Esc EXIT					

Рис. 1. Экран перед началом гонки.

Таблицы на экране служат для идентификации участника гонки, выбора дистанции и соперника

мужчин, женщин, мальчиков и девочек — и содержит рекордные результаты соперников для всех трех дистанций. Если соперник заканчивает гонку с результатом, превосходящим тот, который занесен в список, то его рекорд обновляется. Соперники расположены в списке в порядке ухудшения рекордов. Соревнования проводятся по олимпийской системе и начинаются с 1/32 финала. По мере приближения участника к финальной гонке этот список все более сокращается путем удаления из него соперников с наиболее слабыми личными рекордами. Дойдя до финала, участник должен соревноваться с соперником, занимающим верхнюю строку в списке, т. е. имеющим наилучший личный рекорд. После выбора дистанции можно вызвать на экран список десяти лучших участников на данной дистанции, а после выбора соперника — начать гонку.

Выигрыш в 1/32 финала выводит участника в следующий круг (1/16 финала), и после выбора очередного соперника можно начинать следующую гонку. В случае проигрыша в любом круге соревнований участник может продолжить игру только с 1/32 финала. Одержав победу в шести гонках подряд, участник получает право соревноваться на следующем канале (в другой стране), начиная опять с 1/32 финала и т. д.

При начале гонки на экран выводится картина, изображающая лодки, расположенные перед стартовой линией. В нижней левой части экрана (на графическом табло) выводятся график значений показателя, являющегося управляющим (его значением и определяется скорость во время гонки), и график предполагаемой скорости соперника, представляющий собой горизонтальную линию, высота которой пропорциональна скорости, с которой соперник начнет гонку. В 1/32 финала эта скорость определяется его рекордным результатом, а в последующих кругах соревнований — результатом участника, достигнутым в предыдущем круге. Таким образом, для того, чтобы выйти в следующий круг, участник должен улучшить свое время прохождения

дистанции. При каждом сокращении сердца на обоих графиках скоростей появляются новые точки как в предстартовом периоде, так и во время гонки.

На цифровом (электронном) табло в правой нижней части экрана текущие значения скоростей участника и соперника приводятся в числовом виде. Над графическим табло изображены клавиши управления, позволяющие на время прервать игру или начать гонку заново.

Старт дается в момент достижения графиками скоростей белой вертикальной линии на графическом табло. В процессе гонки на цифровом табло отображаются расстояния от лидера до финиша и от лидера до аутсайдера. Здесь же показаны время, прошедшее с момента старта, личные рекорды соперника и участника, а также «мировой рекорд» на этой дистанции.

Скорость участника в каждый момент времени прямо пропорциональна предшествующей этому моменту величине регистрируемого показателя. Стратегия выбора скорости соперника основана на следующих условиях:

— соперник должен поддерживать начальную скорость на протяжении всей гонки, если не нарушается какое-либо другое из перечисленных ниже условий;

— соперник должен изменять скорость, если расстояние между ним и участником превышает некоторую пороговую величину D ;

— если участник отстал от соперника более чем на D , то последний должен уменьшать скорость для того, чтобы поддерживать у него интерес к продолжению гонки;

— если соперник отстал от участника более чем на D , то он должен увеличивать скорость для того, чтобы поддерживать у него интерес к продолжению гонки;

— при любых изменениях скорости соперника она должна в конечном итоге стремиться к величине, зафиксированной перед стартовой линией, если это не противоречит какому-либо из приведенных выше условий;

— скорость соперника увеличивается или уменьшается за одну секунду на $1/10$ величины разности скоростей участника и соперника.

В ходе гонки осуществляется плавный сдвиг пейзажа при достижении одной из лодок правой границы экрана. Изображение в нижней части экрана остается неподвижным. При отображении процесса гонки используется следующий прием. Адаптер VGA переводится в режим отображения 320×240 пикселей с возможностью одновременного изображения 256 цветов. Хотя этот режим не является стандартным, именно он чаще всего используется при создании динамических игр, так как, наряду с достаточно большим количеством одновременно отображаемых цветов, обеспечивает наибольшую скорость доступа к видеопамяти, а значит, и возможность быстрого обновления экрана.

Для достижения максимального эффекта используются три элемента:

1. Циклическое изменение палитры. Таким образом моделируются волны на поверхности воды.

2. Сдвиг всего изображения. Пейзаж в верхней части экрана сдвигается целиком на один пиксел, когда одна из лодок достигает его правой границы. Для этого используется комбинация аппаратных и программных сдвигов изображения. При программном сдвиге влево освободившееся место заполняется изображением непосредственно из файла. Благодаря этому есть возможность работы с практически не ограниченными по площади изображениями.

3. Спрайты. Последовательные кадры, изображающие фазы движения каждого гребца, включая положения тела, весел, а также конфигурации волн на корпусах лодок, оформлены в виде спрайтов, которые перемещаются по экрану, сменяя друг друга.

При использовании устройства «Детектор пульса» управляющим показателем является межпульсовый интервал. Программа подсчитывает интервал времени между каждой парой соседних событий: приемом сигнала в последовательном порту, посылаемого прибором в момент регистрации пульсовой волны. Вычисленный интервал служит для подсчета скорости участника, которая сохраняется до регистрации следующей пульсовой волны.

Прибор «Монитор пульсовой волны» оцифровывает электрокардиограмму и фотоплетизмограмму. Программа анализирует отсчеты сигналов и выявляет в них R-зубцы и моменты начала подъема пульсовой волны. Для этого используется алгоритм, описанный в [7]. Выбор в качестве управляющего параметра длительности кардиоинтервала или времени распространения пульсовой волны зависит от настройки, которая выполняется заранее.

Все значения управляющего показателя, измеренные в процессе каждой гоночки, записываются в базу данных, имеющую структуру Paradox фирмы "Borland, Inc". Списки участников, их рекордов, дат гонок и результатов также хранятся в базах данных и могут быть использованы для последующей обработки.

Обработка результатов БОС-тренинга. Концепция обработки результатов БОС-тренинга опирается на представление о том, что тренирующихся привлекает собственно процесс тренинга и, возможно, связанное с ним улучшение психоэмоционального состояния, а не его численный результат, выраженный в удлинении кардиоинтервалов или увеличении времени распространения пульсовой волны. Очевидно, что оптимальные условия для тренинга обеспечивает домашняя обстановка, когда тренирующийся сам определяет подходящие ему ситуацию и время. Однако анализ проведенных при этом измерений психофизиологических показателей как конкретного тренирующегося, так и группы тренирующихся в целом должен проводиться в исследовательском центре (например, в научной лаборатории), располагающем более мощными вычислительными средствами по сравнению с наиболее распространенными домашними компьютерами. Поэтому созданный инструмент для обработки данных, полученных при использовании системы «Гребной канал», представляет собой автономную программную систему для применения в лабораторных условиях, работающую под управлением операционной среды Windows 95 фирмы "MicroSoft Corporation" и состоящую из двух приложений — «Анализатор данных» и «Графики».

Первое приложение организует работу с базами данных, в которых хранятся измеренные психофизиологические показатели, и обработку этих измерений, а второе работает с графическими представлениями данных. Связь между приложениями осуществляется с помощью протокола DDE (динамический обмен данными между приложениями).

Посредством механизма DDE результаты обработки передаются в приложение «Графики». С помощью меню и панели кнопок можно управлять способом представления графика, записывать и читать его с диска, переносить данные в буфер Clipboard Windows. Каждый график помещается в отдельное окно, которое можно масштабировать, перемещать, минимизировать, максимизировать, каскадировать, располагать мозаикой.

Результаты использования системы. Лабораторные испытания БОС-тренинга по длительности кардиоинтервалов с использованием компьютерной игры «Гребной канал» проводились с ноября 1995 г. по февраль 1996 г. Цель этих испытаний состояла в том, чтобы получить ответ на вопрос о практической возможности самообучения человека управлению сердечным ритмом посредством компьютерной игры, а также оценить качество используемой программной системы реального времени и при необходимости внести в нее изменения.

В испытаниях принимали участие 10 человек. Каждый испытуемый получал инструкцию, согласно которой он должен был удобно расположиться в кресле перед экраном монитора, расслабиться, насколько это возможно, и, следя за ходом соревнований, найти такую стратегию поведения, которая позволила бы ему добиться успеха в игре. Все испытуемые принимали участие в десяти сеансах тренинга, состоящих из восьми гонок.

Для каждого испытуемого строились графики динамики средних значений длительностей кардиоинтервалов от сессии к сессии, полученных путем усреднения по всем сеансам. На рис. 2, *a* показан такой график, усредненный по результатам всех испытуемых, на рис. 2, *b, c* — результаты такого же усреднения по начальной части сеансов (*c* первого по пятый) и по конечной (*c*

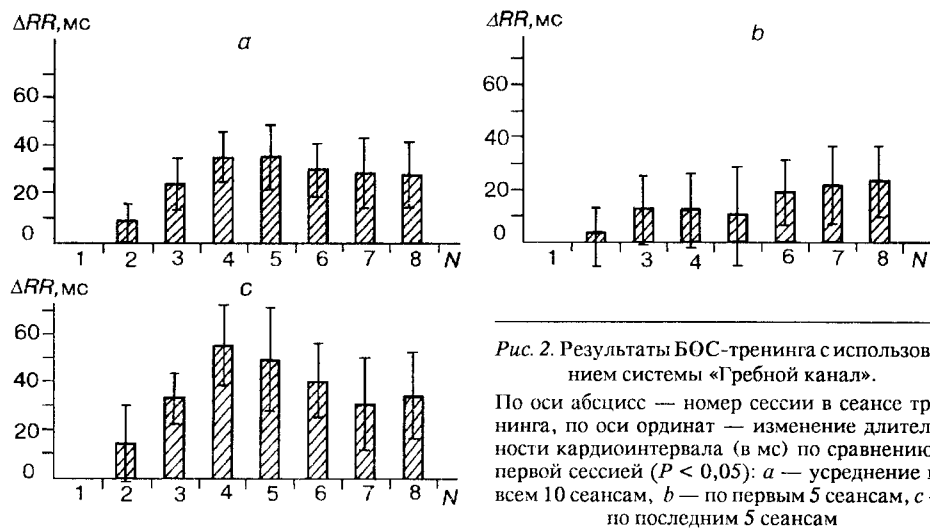


Рис. 2. Результаты БОС-тренинга с использованием системы «Гребной канал».

По оси абсцисс — номер сессии в сеансе тренинга, по оси ординат — изменение длительности кардиоинтервала (в мс) по сравнению с первой сессией ($P < 0,05$): *a* — усреднение по всем 10 сеансам, *b* — по первым 5 сеансам, *c* — по последним 5 сеансам

шестого по десятый) соответственно. Приведенные на рисунках графики отражают динамику длительностей кардиоинтервалов от сессии к сессии и от начальных сеансов к конечным.

Анализ графиков всех испытуемых показывает, что все они успешно справились с поставленной перед ними задачей: увеличением длительности кардиоинтервалов во время сеанса тренинга. На начальном этапе у большей части испытуемых не происходит плавного увеличения этого показателя от сессии к сессии, а на конечном этапе такое увеличение составляет от 5 до 12 %. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что у некоторых испытуемых, показывающих способность увеличивать длительность кардиоинтервалов от сессии к сессии, в двух—трех последних сессиях проявляется обратная динамика. Такое последовательное ухудшение результатов у части испытуемых может быть следствием наступившего утомления.

Для определения специфичности длительности кардиоинтервала как сигнала обратной связи и формы его представления в виде спортивного состязания была проведена контрольная серия исследований с шестью испытуемыми. В этой серии в качестве сигнала обратной связи использовали величину дыхательной аритмии сердечного ритма, а в качестве формы представления — вертикальные столбцы, высота которых пропорциональна вычисляемым значениям дыхательной аритмии. Методика исследований в точности повторяла методику основной серии. Троем из шестерых испытуемых удалось научиться увеличивать дыхательную аритмию, а динамика длительностей кардиоинтервалов показывает их увеличение в процессе тренинга лишь у двоих испытуемых, у остальных этот показатель не изменялся или даже незначительно уменьшался.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о том, что все десять испытуемых в процессе игрового БОС-тренинга научились увеличивать длительность кардиоинтервалов. Такой результат, как показывает контрольная серия, обусловлен использованием этого показателя в качестве сигнала обратной связи и формой его представления на экране монитора.

Заключение. Из проведенных испытаний программной системы «Гребной канал», созданной для метода БОС-тренинга, следует, что после нескольких начальных сеансов у испытуемых проявляется способность увеличивать длительность кардиоинтервалов от сессии к сессии. Это означает, что методика игрового БОС-тренинга по длительности кардиоинтервалов может быть использована наряду с другими общепризнанными методиками БОС-тренинга.

Полученные результаты позволяют полагать, что примененная при лабораторных испытаниях программная система «Гребной канал» вместе с прибо-

ром «Детектор пульса» может быть рекомендована в качестве новой методики БОС-тренинга для использования в домашних условиях. Процесс тренинга при этом сводится к немонотонному и более приятному по сравнению с традиционным БОС-тренингом «участию» в спортивных состязаниях. Применение же этой системы с прибором «Монитор пульсовой волны» в исследовательских лабораториях позволит изучить влияние игрового тренинга на время распространения пульсовой волны, а также оценить возможность его использования в качестве сигнала обратной связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Evaluation of Clinical Biofeedback /Ed. W. Ray, J. Razinski, T. Pogers, W. Kimball. N. Y.; L.: Plenum Press, 1977.
2. Биоуправление-2. Теория и практика /Под ред. М. Б. Штарка, Р. Колла. Новосибирск: ИМиБК СО РАМН, 1993.
3. Biobehavioral Self-Regulation/ Ed. T. Kikuchi, H. Sakuma, I. Saito, K. Tsuboi. Tokyo: Springer-Verlag, 1995.
4. Biofeedback. A Practitioner's Guide. Second Edition /Ed. M. Schwartz. N. Y.; L.: The Gilford Press, 1995.
5. Сохадзе Э. М., Штарк М. Б., Шульман Е. И. Биологическая обратная связь в научных исследованиях и клинической практике // Бюл. СО АМН СССР. 1985. № 5. С. 78.
6. Сохадзе Э. М., Штарк М. Б., Шульман Е. И. Микрокомпьютерная система биотехнической обратной связи // Вестник АМН СССР. 1989. № 3. С. 75.
7. Шульман Е. И. Метод обнаружения R-зубца ЭКГ в реальном масштабе времени // Автоматизированные системы реального времени для эргономических исследований. Тарту: ТГУ, 1988.

Поступила в редакцию 19 сентября 1996 г.

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!