

УДК 577.3:616.1

О. А. Джафарова, Л. А. Новожилова

(Новосибирск)

**ПРОГНОЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ
МЕТОДА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ
НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Описана математическая модель и создаваемая на ее основе компьютерная система, разрабатываемые для прогнозирования эффективности лечения методами биологической обратной связи (БОС). Обсуждается понятие эффективности курса БОС-тренинга.

Введение. В последние годы в физиологических и клинических исследованиях все шире стали применяться кибернетические методы и подходы. Использование математического моделирования для решения физиологических задач позволило довольно точно оценивать качественные и количественные характеристики многих процессов, происходящих в целостном организме человека, с одной стороны, а с другой — дало возможность экстраполировать динамику показателей и предсказывать ход физиологического процесса в различных гипотетических и реальных ситуациях.

Метод биологической обратной связи (БОС) представляет собой комплекс процедур, при проведении которых человеку посредством цепи внешней обратной связи преимущественно на базе компьютерной техники подается информация о текущем состоянии управляемой физиологической функции, помогающая развить навыки самоконтроля, обучиться саморегуляции и позволяющая впоследствии изменять эту функцию произвольно.

Изучением метода БОС коллектив Института медицинской и биологической кибернетики занимается в течение 10 лет. Реализация основанной на нем лечебной процедуры ставит перед исследователем проблемы в области как физиологии, психологии, электроники, так и кибернетики, статистики.

Математическая модель динамики регулируемого показателя и создаваемая на ее основе компьютерная система представляют собой часть программы повышения эффективности курса лечебных процедур, проводимых по методу биологической обратной связи (курса БОС-тренинга). Основными направлениями работы по этой программе являются:

разработка математических моделей и алгоритмов классификации пациентов по типу регулирования функций сердечно-сосудистой системы в режиме биологической обратной связи с учетом параметров электромиограммы, частоты сердечных сокращений, пульсового объема, дермальной температуры;

создание блоков прогностических программных средств для оценки эффективности лечения методами и средствами биологической обратной связи.

Основные предположения. Тренировки по методу БОС проводятся с целью обучения испытуемого или пациента, если говорить о терапевтическом воздействии, изменять мониторируемый показатель в заданном направлении. Достигнутые изменения регулируемого показателя (РП) в течение одного сеанса по мере увеличения числа сеансов закрепляются, «запоминаются». Как показано в ряде работ [1—5], наблюдается достоверное изменение показателя по окончании курса тренинга.

В настоящее время широко обсуждается понятие эффективности БОС-тренинга [2—4]. Мы будем рассматривать эффективность как способность вырабатывать устойчивые изменения регулируемого показателя по окончании курса БОС-тренинга.

Основной целью создания математической модели динамики регулируемого показателя является решение следующих задач [6]:

- количественное и качественное описание динамики показателя в режиме БОС;
- определение оптимального количества сеансов для достижения относительно стойких изменений показателя;
- определение продолжительности терапевтического эффекта.

Иными словами, предлагаемая математическая модель позволяет предсказывать динамику РП по результатам нескольких первых сеансов тренинга, эффективность и необходимость последующих, изменения показателя после окончания курса.

Динамика РП имеет различную направленность в зависимости от цели терапевтического воздействия. В дальнейшем будем считать, что целью тренинга является понижение РП (применение ЭМГ-БОС для лечения головной боли, связанной с мышечным напряжением). На некоторых особенностях процесса обучения в случае повышения уровня показателя остановимся отдельно.

При построении модели исходим из того, что саморегуляция осуществляется по одному какому-либо показателю, хотя остальные показатели мониторируются параллельно. Их взаимные влияния и корреляции могут быть изучены на основе экспериментальных материалов с применением статистических методов.

Курс БОС-тренинга состоит из N сеансов, длительность каждого составляет 30 мин, частота — 1—3 раза в неделю [1, 3]. Таким образом, в данной модели фактически результат тренинга не связан с длительностью сеанса как такового (фиксировано 30 мин). Как показали предварительные исследования, сеанс длительностью более 30 мин приводит к утомлению пациента. Напротив, увеличение промежутков между сеансами может приводить к полному исчезновению «следовых изменений» (терминология Мейерсона) параметра, достигнутых на предыдущих сеансах.

Предварительно, до начала курса, регистрируется исходный уровень РП, т. е. стационарное фоновое значение, вокруг которого имеются естественные колебания параметра, связанные с адаптивными реакциями в ответ на внешние раздражения. Перед началом каждого сеанса регистрируется базовый уровень РП, по окончании — посттренинговый (рис. 1).

Естественно предположить, что обучение происходит только в течение сеанса, когда испытуемый старается понизить базовый уровень РП. В промежутках между сеансами обучения не происходит, имеет место только процесс «забывания», когда РП стремится к своему исходному значению, т. е. достигнутые на прошлом сеансе изменения, развитие навыки саморегуляции

частично теряются [7, 8]; предполагаем, что к началу следующего сеанса сохраняется лишь некоторая доля этих изменений. Считаем, что скорость регресса зависит от величины изменений РП по сравнению с исходным уровнем. Но с течением времени по мере

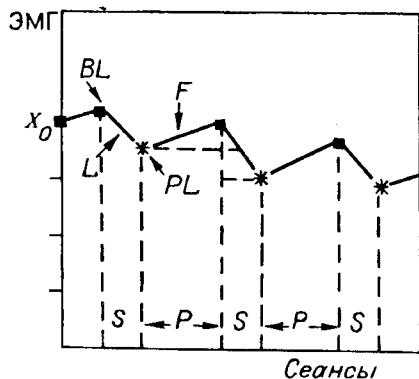


Рис. 1. Динамика регулируемого показателя в режиме БОС:

ЭМГ — электромиограмма — регулируемый параметр;
 X_0 — начальный уровень регулируемого параметра (РП);
 S — сеанс БОС-тренинга; P — перерыв между сеансами;
 BL — уровень РП перед сеансом; PL — уровень РП после сеанса; L — процесс обучения; F — процесс забывания

увеличения числа сеансов все большая доля изменений остается в памяти, и после достаточного большого количества сеансов она приближается к пределу насыщения (максимально возможной изменчивости показателя). Запоминаемая доля изменений описывается в математической модели «функцией забывания», возрастающей от нуля до единицы (рис. 2, а).

Результатом обучения на сеансе БОС-тренинга является посттренинговый уровень РП, который достигается в два этапа (см. рис. 1). Вначале обучаемый восстанавливает эффект, полученный на предшествующем сеансе. И только затем он понижает РП ниже этого уровня, таким образом происходит совершенствование навыка саморегуляции, или «обучение» [7].

К усложнению модели приводит попытка учесть предельные возможности обучаемого человека за один сеанс. В нашей модели имеется следующее предположение: испытуемый способен «вспомнить» не более определенного количества «информации», приобретенной на прошлом сеансе, т. е. понизить (или повысить) значение РП не более чем на заданную величину.

Эффективность висцерального и моторного обучения, под которой понимаем способность изменения параметра ниже (выше) уровня, полученного на предыдущем сеансе (приращение РП на рис. 1), зависит от номера сеанса. Если в начальные сеансы она растет, то с некоторого момента начинает понижаться (в отличие от когнитивного обучения). Поскольку мы предполагаем, что существует некоторый предельный уровень РП, определяемый гомеостазом, ниже (или выше) которого изменить его нельзя, то, очевидно, что эффективность обучения после достаточно большого количества сеансов должна снижаться до нуля. При этом процесс забывания практически прекращается, а РП, приблизившись к своему предельно возможному значению, почти не изменяется.

Эффективность обучения в математической модели описывается с помощью «функции обучения» (рис. 2, б). Параметры этой функции вместе с интенсивностью забывания определяют динамику РП в БОС-тренинге.

Математическая модель. Обозначим: k — номер сеанса, $k = 1, \dots, N$, где N — количество сеансов в курсе; $X(t)$ — уровень РП в произвольный момент времени t ; T_k — момент k -го сеанса; X_k — базовый уровень РП перед k -м сеансом; Y_k — посттренинговый уровень РП; X_0 — исходный уровень РП.

От сеанса к сеансу происходит забывание $Y_k \rightarrow X_{k+1}$, описываемое функцией $F(k, T_k, T_{k+1})$:

$$X_{k+1} - X_0 = (Y_k - X_0)F(k, T_k, T_{k+1}). \quad (1)$$

Считаем, что скорость забывания изменений регулируемого показателя по сравнению с исходным уровнем $Z(t) = X(t) - X_0$ на интервале (T_k, T_{k+1}) между двумя последовательными сеансами БОС-тренинга есть функция, отрицательная по Z и убывающая при возрастании числа сеансов.

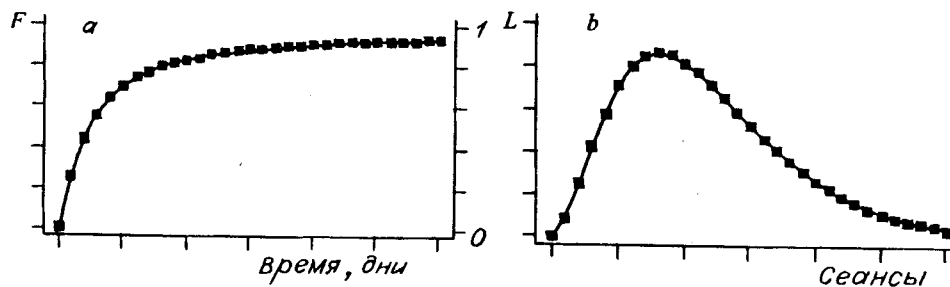


Рис. 2. Функции забывания (а) и обучения (б)

Тогда процесс забывания на интервале (T_k, T_{k+1}) подчиняется дифференциальному уравнению

$$dZ/dt = -R(Z)\varphi(k),$$

где $R(Z) > 0$ и $d\varphi(t)/dt < 0$. В модели будем рассматривать: $R(Z) = \alpha Z$ и $\varphi(k) = 1/k$. Тогда функция забывания имеет вид:

$$F(k, T_k, T_{k+1}) = \exp\{-\alpha(T_{k+1} - T_k)/k\}.$$

Эта функция, описывающая долю запоминаемых изменений РП, изменяется от нуля до единицы (см. рис. 2):

$$0 < F < 1, F \rightarrow 1 \text{ при } k \rightarrow \infty.$$

Обучение на k -м сеансе $X_k \rightarrow Y_k$ описывается уравнением

$$Y_k = X_k - L(k) - \min(M, X_k - Y_{k-1}), \quad (2)$$

где $L(k)$ — функция обучения; M — параметр, определяющий предельные возможности обучаемости человека за один сеанс.

Разность $(X_k - \min(M, X_k - Y_{k-1}))$ отражает процесс восстановления результатов предыдущего сеанса. Вводя $L(k)$, описываем обучение развитию навыка саморегуляции РП.

Функция $L(k)$ обладает следующими свойствами (рис. 3):

- 1) $L(k) \rightarrow 0$ при $k \rightarrow \infty$;
- 2) $L(0) = 0$;
- 3) $L(k) > 0$ при $k > 0$.

В частности, она может иметь показательную-степенную зависимость от номера сеанса:

$$L(k) = Ak^a e^{-\lambda k}, \quad k > 0.$$

Уравнения (1) и (2) составляют основу математической модели динамики РП в курсе БОС-тренинга [6].

Из уравнений (1) и (2) и свойств функций F и L следует, что значения РП X_k и Y_k ограничены и снизу, и сверху. Иными словами, изменения РП происходят в полосе значений, определяемой параметрами математической модели.

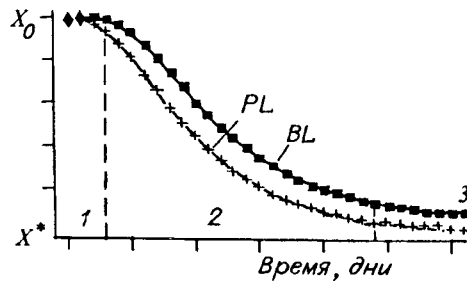


Рис. 3. Математическая модель динамики РП в БОС-курсе:

X^* — предел насыщения. Расписание: регулярные сеансы

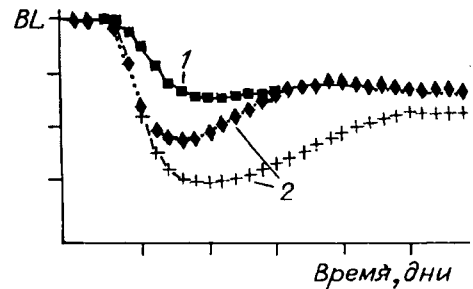


Рис. 4. Зависимость базового уровня РП от параметров функции обучения

Неограниченное уменьшение (увеличение) РП в курсе БОС-тренинга невозможно. Кроме того, существует предельное значение X^* , называемое «пределом насыщения», к которому стремится уровень РП после проведения достаточно большого количества сеансов тренинга. Эти выводы вполне согласуются с предположениями, заложенными в модель.

Компьютерный анализ модели показал, что динамика РП в курсе БОС описывается S-образной кривой (см. рис. 3). Обозначим следующие фазы кривой процесса обучения: 1 — начальное плато, 2 — этап эффективного обучения, 3 — этап стабилизации или неэффективного обучения.

«Начальное плато» кривой характеризует инерционность процесса обучения. В рамках математической модели могут быть описаны различные динамические режимы РП. На рис. 4 представлено изменение формы кривой процесса обучения от аperiodической (1) до колебательной (2). Рис. 5 иллюстрирует возможность описания в модели вариации длительности начального плато кривой, ее угла наклона и продолжительности фазы эффективного обучения до стабилизации. При введении неодинаковых промежутков между сеансами гладкий характер процесса обучения нарушается, возникает так называемый эффект «пилы» (рис. 6).

На основании построенной модели эффективность БОС-тренинга предлагается оценивать отношением

$$E = 1 - |X^* - X_{N+1}| / X^*,$$

где X_{N+1} — уровень РП, измеряемый после проведения курса. При увеличении числа сеансов в курсе, очевидно, эффективность повышается, при этом временные промежутки между занятиями не должны быть слишком велики.

Аналогичного эффекта можно добиться и соответствующим выбором расписания занятий в курсе, сокращая или увеличивая интервалы между сеансами. Таким образом, достижение максимальной эффективности курса БОС-тренинга за наименьшее число сеансов по расписанию, удобному как пациенту, так и врачу, является задачей оптимизации курса. Эту проблему помогает решать описываемая авторами математическая модель динамики регулируемого показателя в курсе БОС-тренинга.

Компьютерная система прогноза эффективности БОС-тренинга. Для облегчения работы врача, проводящего БОС-терапию, на основе описанной выше математической модели создается компьютерная система предсказания результатов БОС-тренинга (BFBF-system). Работа с системой не требует от врача специальных знаний по программированию и математике. Система рассчитана для работы на компьютерах, совместимых с IBM PC/XT/AT. Существующая версия включает в себя блок работы с данными и блок прогноза.

Результаты сеансов тренинга заносятся в компьютер. Необходимы: дата сеанса (T_k), базовый уровень РП перед началом сеанса (X_k), посттренинговый

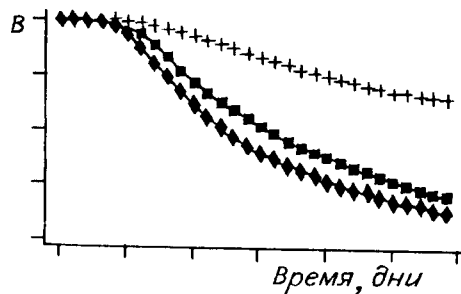


Рис. 5. Зависимость базового уровня РП от параметров математической модели

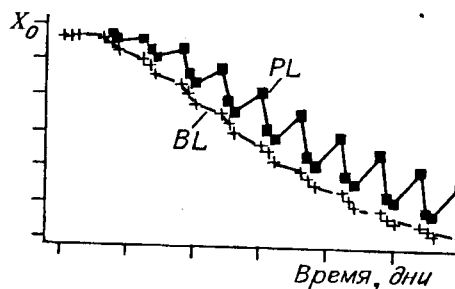


Рис. 6. Динамика РП при нерегулярных сеансах. Расписание: нерегулярные сеансы

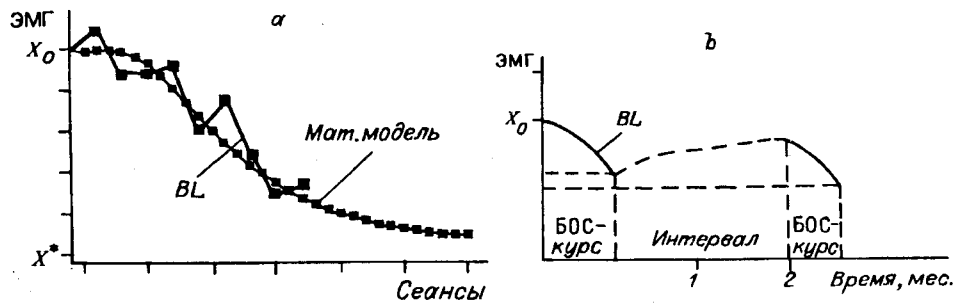


Рис. 7. Прогноз текущего курса (а) и предсказание следующего курса (б):

X_* — предел насыщения

уровень РП (Y_k), исходный уровень РП (X_0). Также следует указать сведения о пациенте, его диагноз и желаемое направление изменения РП в процессе тренинга (повышение/понижение).

По результатам начальных пяти—шести сеансов строятся оценки параметров математической модели. Система позволяет делать прогноз текущего курса БОС-тренинга (рис. 7, а). Предусмотрена возможность выбора расписания занятий в курсе. Длительность курса может быть определена врачом и в автоматическом режиме. Иными словами, система помогает врачу подобрать оптимальное количество и частоту сеансов в курсе. Кроме того, система предлагает выбрать интервал между окончанием текущего курса и началом следующего с предсказанием базового уровня РП (рис. 7, б).

Параметры модели оцениваются по методу наименьших квадратов, вычислительная процедура организована по методу Марквардта [9]. Проблема статистической оценки параметров модели по реальным данным имеет некоторые трудности. Сходимость вычислительной процедуры неустойчива, поскольку индивидуальные значения РП имеют большой разброс, тогда как оценка параметров по однородной группе значительно уменьшает дисперсию РП, что приводит к лучшей сходимости вычислительной процедуры.

Развитие работ в данном направлении ориентировано на автоматизацию выбора режима терапевтического воздействия, учитывающего индивидуальные типы регулирования в режиме биологической обратной связи, и прогнозирование клинического эффекта курса.

Планируется провести клинические испытания системы на группах пациентов с нарушениями регуляции на различных уровнях (вегетосудистая дистония, гипертоническая болезнь и др.), по результатам которых будут выявлены физиологические и психологические факторы, статистически достоверно влияющие на индивидуальные изменения регулируемых показателей в режиме биологической обратной связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сохадзе Э. М., Шульман Е. И., Штарк М. Б. Психофизиологические исследования методом биологической обратной связи по времени распространения пульсовой волны // Биоуправление: теория и практика.—Новосибирск: Наука, 1988.
2. Nakagava-Kogan H., Garber A. Self-managment of hypertension: predictors of success in diastolic blood pressure reduction // Research in Nursing & Health.—1988.—11.—P. 105.
3. Штарк М. Б., Сохадзе Э. М. и др. Биотехнический тренинг на базе микроЭВМ и КАМАК // Биоуправление: теория и практика.—Новосибирск: Наука, 1988.
4. Сороко С. И., Кутуев В. Б. Методика оценки, контроля и коррекции функциональных состояний человека с помощью устройства многопараметрической обратной связи // Там же.

5. Айвазян Т. А. Релаксационная терапия с использованием биологической обратной связи в лечении больных гипертонической болезнью // Там же.
6. *Mathematical Modelling in Biofeedback Training* /Ed. M. B. Shtark & L. V. Nedoresov.— Novosibirsk: Inst. Clin. & Exper. Medicine, 1992.
7. *Нормальная физиология* /Под ред. А. В. Коробкова.—М.: Наука, 1980.
8. Анохин П. К. Узловые вопросы теории функциональных систем.—М.: Наука, 1980.
9. Демиденко Е. З. *Линейная и нелинейная регрессия*.—М.: Наука, 1981.

Поступила в редакцию 6 января 1993 г.

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!