

МОДЕЛЬ ОБУЧЕНИЯ И БИОУПРАВЛЕНИЕ (СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ)

О.А.Джафарова, И.О.Изарова, Н.Ю.Иванова

Институт медицинской и биологической кибернетики СО РАМН, Россия

ВВЕДЕНИЕ

Процесс биоуправления характеризуется активным и сознательным участием человека (испытуемого, пациента), его основными принципами являются автономность, самоэффективность и самообучаемость. В связи с этим приобретает особую актуальность изучение модели обучения в процессе биоуправления.

Некоторые исследователи, пользуясь очевидной (и действительно имеющей место) аналогией систем биоуправления с кибернетическими системами с обратной связью, рассматривают обучение в процессе биоуправления с позиций теории оптимального управления [1, 2]. Такой подход дает адекватное описание процесса в течение непрерывного интервала времени, соответствующего одному сеансу биоуправления, но при усложнении структуры времени, когда кроме периодов обучения присутствуют несравнимо более длительные периоды отдыха, забывания, он недостаточен. Если длительность сеансов измеряется в минутах (как правило 20-30 минут), то промежутки между ними обычно составляют не менее 1-2 суток. Такая временная структура характерна для традиционного обучения (школа, университет), изучаемого обычно с помощью методов статистического анализа. В работе [3] проведен компьютерный анализ модели обучения в процессе биоуправления, учитывающей временную структуру, что послужило поводом для более детального изучения модельных представлений, используя массивы данных, полученных в результате тренинга методами биоуправления у пациентов с различными формами патологии.

Отличие обучения в процессе биоуправления от когнитивного обучения состоит в том, что основной задачей является обучение человека необходимому изменению физиологического состояния, а отличием от схемы оперантного обуславливания — выраженным влиянием психической компоненты. Через приобретение навыков саморегуляции формируются новые связи, восстанавливаются скрытые, но генетически детерминированные механизмы управления физиологическими функциями, при этом улучшается восприятие и понимание внутренних взаимосвязей физиологических и психических процессов.

Общую динамику обучения можно разделить на несколько стадий. Обычно психологи выделяют четыре [4]. Первая стадия - *неосознанное незнание*. Человек не только не знает, как сделать что-то, но также не знает, что он этого не знает. Вторая — *стадия осознанного незнания*, во время которой человек некомпетентен в выполняемых действиях, ищет необходимые пути для его выполнения. Этот этап приводит к третьей - *осознанному знанию*. Человек может выполнять необходимое действие, знает, как его выполнить, но концентрирует на этом все свое внимание, еще не полностью овладев мастерством. Наконец на четвертой стадии *неосознанного знания* умение становится неосознаваемым, задача может выполняться подсознательно. В терминах теории функциональных систем вторую-четвертую стадии можно назвать ориентировочно-исследовательским поисковым поведением, автоматизацией поведенческого акта.

Определение количественных характеристик модели, отражающих общие закономерности обучения на различных стадиях процесса биоуправления, методами статистического анализа — основная задача проведенного исследования. Следует заметить, что использование большого разнообразия методов статистической обра-

ботки фактического материала привело к тому, что настоящая статья приобрела характер описательный, феноменологический, построение математических моделей и их теоретический анализ предстоит осуществить в дальнейшем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе были использованы данные температурно-миографического тренинга при лечении эссенциальной гипертонии (60 больных клиники Института общей патологии и экологии человека СО РАМН, по 10-12 сеансов каждый), тренинга по длительности кардиоинтервалов в группе практически здоровых людей (20 добровольцев по 10 сеансов), электроэнцефалографического альфа-тета тренинга при лечении аддиктивных расстройств (в анализ было включено 25 амбулаторных пациентов, страдающих алкоголизмом или морфинно-опиумной наркоманией, прошедших не менее 10 сеансов). Все виды тренинга проводились специалистами Института медицинской и биологической кибернетики СО РАМН в течение 1994-1997 годов с использованием созданных в нем программно-аппаратных комплексов (компьютерные интерфейсы I33R PHA, PNM с программным обеспечением БОСЛАБ, компьютерные игровые системы биоуправления по длительности кардиоинтервала с программным обеспечением — компьютерной игрой «Гребной канал») и американской компанией J&J Engineering (компьютерный интерфейс I300 с программным обеспечением USE).

Для статистического анализа были использованы данные динамики кожной температуры, электромиограммы, ЭЭГ альфа-активности, усредненные по 30-32 секунды после удаления артефактов, а также ряды кардиоинтервалов, очищенные от артефактов, без усреднения. Применялись методы кластерного анализа (метод нечетких множеств, метод пороговых расстояний), анализа фазовых диаграмм (scatterplot). В частности, использовался алгоритм кластеризации размытых множеств (Данна-Беждека) [5], позволяющий не только разделить массив на определенное количество групп, но и определить степень принадлежности (от 0 до 1) каждой точки к группе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как правило, человек, впервые приступающий к БОС-тренингу — лечебным или профилактическим процедурам, проводящимся с использованием методов биоуправления, мало знаком с принципами саморегуляции. Поэтому ему необходимо сформировать новую функциональную систему поведения [6], обеспечивающую, например, способность произвольно повышать кожную температуру.

В процессе обучения биоуправлению объективно зафиксировать возможно лишь физиологические показатели, изменения которых отражают процесс формирования функциональной системы. Так, при проведении температурно-миографического тренинга, необходимым поведением является повышение температуры кончиков пальцев и снижение напряжения лобных мышц. Во всех исследуемых группах было прослежено изменение этих показателей от первого сеанса к десятому-двенадцатому, проведен кластерный анализ каждого сеанса тренинга и выделены по три группы (класса) в каждом сеансе, различающихся по успешности обучения, т.е. эффективности биоуправления.

В качестве критериев для кластерного анализа были использованы следующие вычисляемые параметры:

- показатель хаотичности, отражающий однородность изменений управляемого сигнала в сеансе тренинга;
- время (в процентах), в течение которого амплитуда сигнала превышала (или была ниже) заданный процент от начального уровня;

- размах: разность между базовым уровнем сигнала и максимально достигнутым в результате проведенного сеанса;
- эффективный результат: устойчивое значение регулируемого показателя, которое удавалось удерживать длительное время в течение сеанса;
- а также различные коэффициенты эффективности биоуправления.

Основное внимание было уделено разработке статистических характеристик, отражающих общие закономерности процесса обучения, универсальные для всех видов тренинга, специфика учитывалась при выборе их коэффициентов.

На примере температурно-миографического тренинга опишем выбор критериев и их коэффициентов. Первоначально исследовался температурный тренинг и были выбраны следующие показатели: момент достижения порогового значения температуры (90F или 93F), размах, время превышения порогового уровня. Деление проводили на две, три, четыре группы (класса) методом нечетких множеств и пороговых расстояний. Выбор порогового значения равным 90F был неудачным, т.к. группы, получающиеся в результате кластеризации различных сеансов, были перемешаны, невозможно было проследить динамику групп от первого-второго сеансов к шестому-седьмому и далее, поскольку температура 90F достигалась легко. При выборе 93F и разделении на три группы групповая динамика прослеживалась четко. Пациенты, оказавшиеся в «хорошей» группе при кластеризации по начальным сеансам, и при кластеризации сеансов второй половины курса оставались в ней, аналогичные результаты наблюдались для «средней», «плохой» групп (кто в конце курса был в «плохой» группе, тот и в начале находился в ней; обратное, в общем случае, неверно). Метод размытых множеств при задании количества классов выделял такие же группы, что и метод пороговых расстояний. Поэтому в дальнейшем анализе мы остановились на вероятностном методе, поскольку учитывали размытую природу большинство реальных классов в том смысле, что переход от принадлежности к не-принадлежности для этих классов скорее постепенный, чем скачкообразный.

Для анализа температурно-миографического тренинга уточнили критерии кластеризации. Размах заменили на индекс хаотичности H (рис. 1), более объективно отражающий качество обучения и слабо учитывающий влияние внешних условий.

Вместо момента достижения порогового значения температуры использовали эффективный результат сеанса (рис. 2), поскольку первый имел выраженную немонотонность в нуле. Аналогичные критерии были выбраны для сигнала ЭМГ. Таким образом, кластерный анализ с разбиением на три группы проводился по следующим критериям:

1. Индекс хаотичности ЭМГ.
2. Время (в процентах), когда ЭМГ была ниже порогового уровня (2 мВ).
3. Эффективный результат сеанса по ЭМГ.
4. Индекс хаотичности температуры.

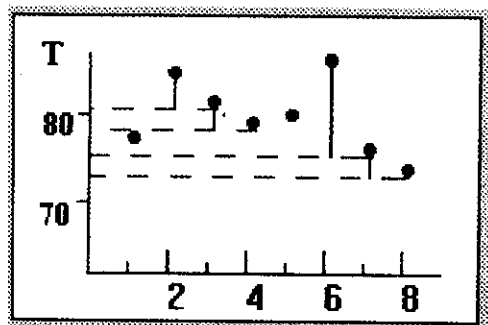


Рис. 1. Индекс хаотичности H

Fig. 1. Chaos index H .

$$H = \frac{\sum_{i=1}^m (T_{k_i} + T_{k_{i+1}})}{m}, \text{ где } k_i \text{ индекс усредненного за 30}$$

секунд значения температуры (или ЭМГ), T_{k_i} которое подчиняется следующему условию нерегулярности -

$$T_{k_{i+1}} < T_{k_i} \text{ для температуры (или } T_{k_{i+1}} > T_{k_i} \text{ для ЭМГ).}$$

m - общее количество таких точек.

$$H = \frac{\sum_{i=1}^m (T_{k_i} + T_{k_{i+1}})}{m} \text{ where } k_i \text{ is the index of the tempera-}$$

ture (or EMG) value, T_{k_i} which obey the following condition of irregularity- $T_{k_{i+1}} < T_{k_i}$ for temperature (or $T_{k_{i+1}} > T_{k_i}$ for EMG); m - the total amount of such points.

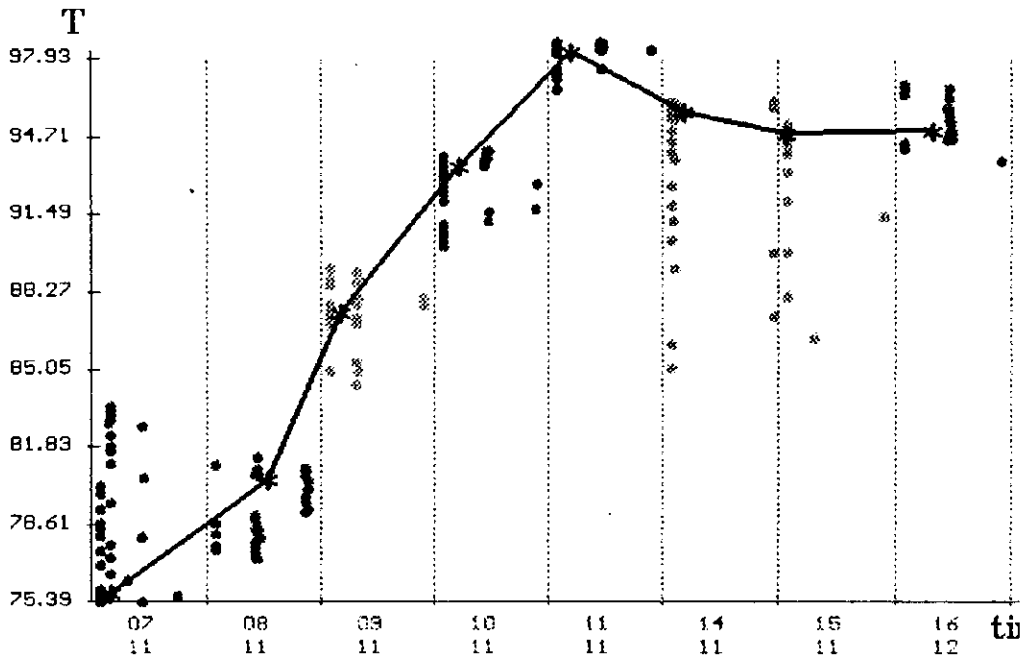


Рис. 21. Пример динамики «эффективного результата» в курсе БОС-тренинга (каждая точка соответствует значению температуры, усредненному за 30 сек.)

* - значение «эффективного результата», достигнутого по температуре за сеанс.
 В каждой полосе, соответствующей одному сеансу, значение сигнала ЭМГ меняется от минимума до максимума слева направо.

Fig. 2. An example of «essential results» trend (each dot corresponds to temperature value averaged over 30 sec).

* - value of the essential temperature result of the session.
 In each stripe which is corresponding to one session EMG varies from min (left) to max (right) value.

5. Время (в процентах) превышения температурой порогового уровня (93F).
6. Эффективный результат сеанса по температуре.

Классификация на «хорошую», «среднюю» и «плохую» группы по качеству обучения в курсе выявила, за исключением первых двух сеансов, где различия между группами были не значимы, увеличение процента людей, относимых к группе удачного тренинга, и снижение доли неуспешной группы (см. рис.3). Были построены тренды проекций центров классов на соответствующие критерии, т.е. графики зависимостей от номера сеанса средних значений показателей, выбранных в качестве критериев для кластерного анализа, определенных по группам пациентов, отне-

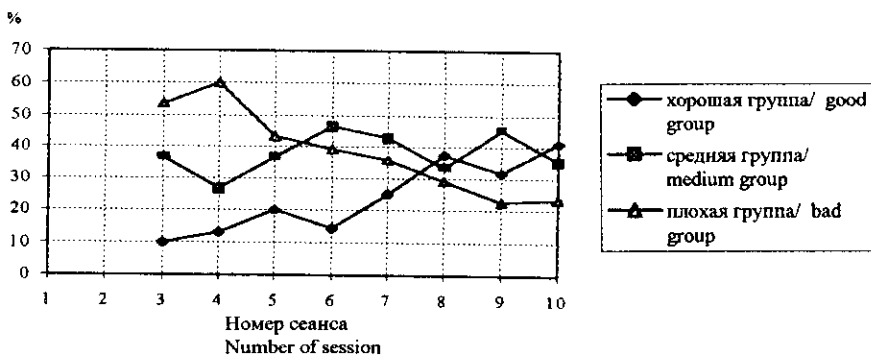


Рис. 3. Процентное соотношение групп успешности тренинга (динамика по сеансам).
 Fig. 3. Proportion of groups with different type of training success (Trend over sessions)

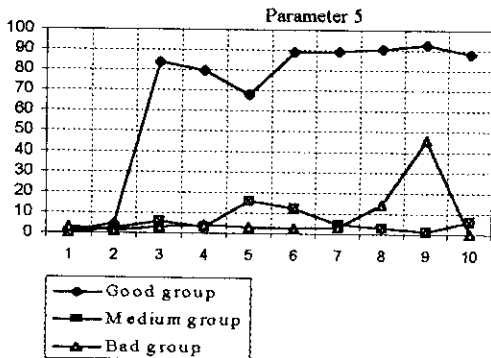
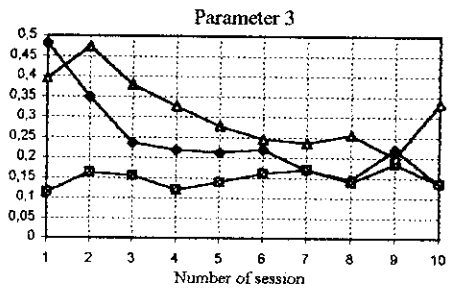
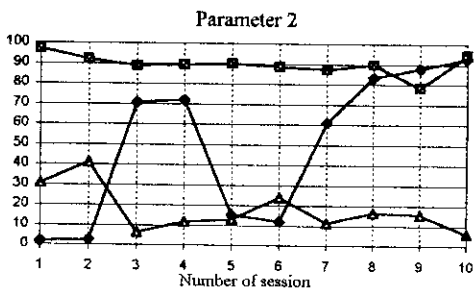


Рис. 4. Тренды проекций центров классов.
 Критерий 2 - Время (в процентах), когда ЭМГ была ниже порогового уровня (2 мВ).
 Критерий 3 - Эффективный результат сеанса по ЭМГ.
 Критерий 5 - Время (в процентах) превышения температурой порогового уровня (93F).
 Fig. 4. Trends of projections of classes centers.
 Parameter 2 - The time (%) during which EMG value was below 2 mV.
 Parameter 3 - The essential result of the session in EMG.
 Parameter 5 - The time (%) during which amplitude of temperature surpassed 93F.

сенных в результате кластеризации к различным классам. Как видно из рисунка 4, во всех классах наблюдается положительная динамика, улучшение характеристик классов. Наибольший вклад в классификацию внес критерий 5, по которому четко выделилась хорошая группа. С третьего сеанса в этом классе очевидны результаты обучения регуляции кожной температуры - соответствующие графики для критериев 4-6 достоверно отличаются от графиков остальных классов. Было получено, что индексы хаотичности как для ЭМГ, так и для температуры снижаются в течение курса. Это соответствует снижению затрат на достижение необходимого результата тренинга, так как изменения управляемого сигнала становятся более направленными. По критериям, связанным с электромиограммой, выделилась «плохая» группа.

Был проведен одновременный анализ критериев 2 и 5 (см. рис.5). В «хорошей» группе после шестого сеанса направленные изменения регулируемых показателей синхронизируются: увеличению кожной температуры соответствует

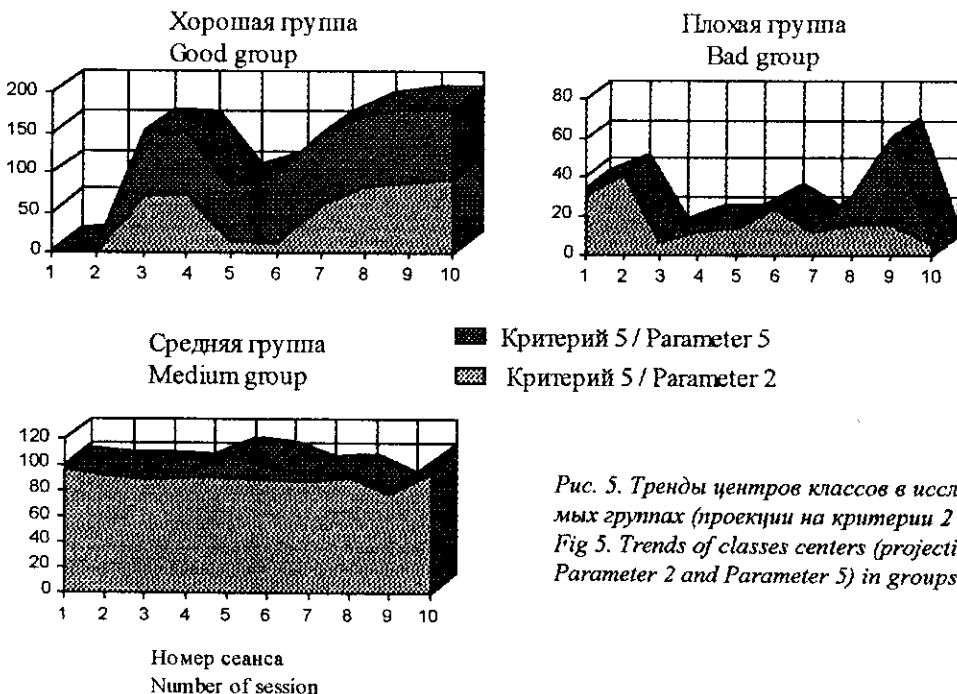


Рис. 5. Тренды центров классов в исследуемых группах (проекции на критерии 2 и 5)
 Fig 5. Trends of classes centers (projections on Parameter 2 and Parameter 5) in groups.

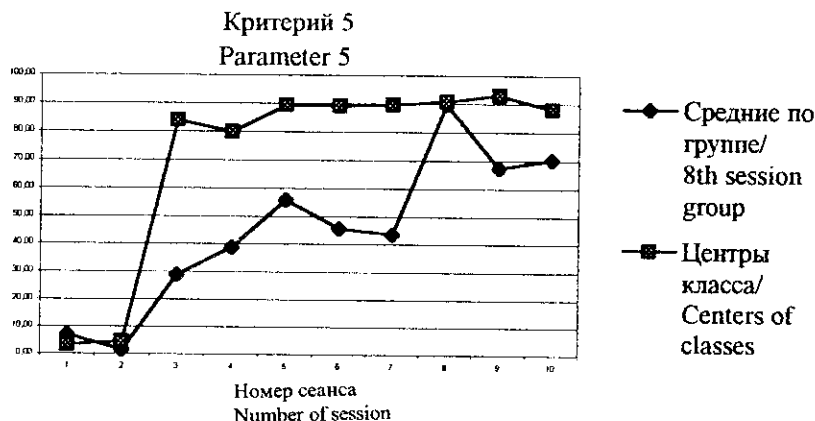


Рис. 6. Сравнение динамики центров «хорошего» класса и средних по сеансам «хорошей» группы, выбранной на 8-м сеансе (проекции на критерий 5).
 Fig. 6. Significant difference in trends of Parameter 5 in groups.

снижение напряжения лобных мышц, тогда как в середине курса повышение температуры сопровождалось увеличением миограммы (см. провал в середине графика «хорошей» группы на рисунке 5). Такое поведение является отличительной чертой эффективного температурно-миографического тренинга. «Средняя» группа, которая отличалась хорошими показателями ЭМГ (почти во всех сеансах ее значения были ниже 2 мВ), не продемонстрировала сколь либо значительных успехов в температурном тренинге (максимально достигнутые значения не превышали 90F). В «плохой» группе наблюдалось незначительное улучшение показателей температуры, при этом показатели миограммы не менялись. Такая картина динамики обучения хорошо согласуется с результатами, полученными Шубиной О.С. [7].

Следует отметить, что персональный состав классов не был постоянным, поэтому мы выбрали группы, полученные в результате кластерного анализа восьмого сеанса, в них вычислили средние значения всех критериев по всем сеансам. Сравнение тренда группы, выделенной на восьмом сеансе из «хорошего» класса, и соответственно тренда центров «хорошего» класса выявило их достоверное отличие ($p < 0.05$) (см. рис.6). Ретроспективный анализ зависимостей группы, объявленной «плохой», подтвердил неуспешный характер обучения этой группы, в ней значения электромиограммы не опускались ниже 2мВ. Но персональный состав этой группы не совпадал со списками плохих классов начальных сеансов. С другой стороны, в группе, выделенной на восьмом сеансе в качестве «хорошей», начиная с третьего сеанса, наблюдался достоверное увеличение процента времени, в течение которого значения температуры превышали 93F, что аналогично динамике кластеров. Мы считаем,

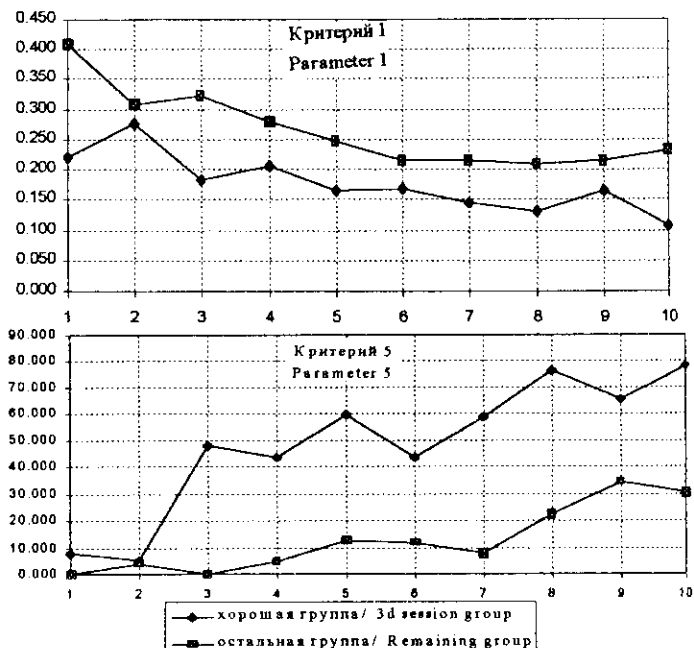


Рис. 7. Тренды различных показателей в группах сравнения.
 Критерий 1 - Индекс хаотичности по ЭМГ.
 Критерий 5 - Время (в процентах) превышения температурой порогового уровня (93F).
 Fig. 7. Trends of different parameters in comparison groups.
 Parameter 1 - Chaos index for EMG
 Parameter 5 - The time (%) during which amplitude of temperature surpassed 93F.

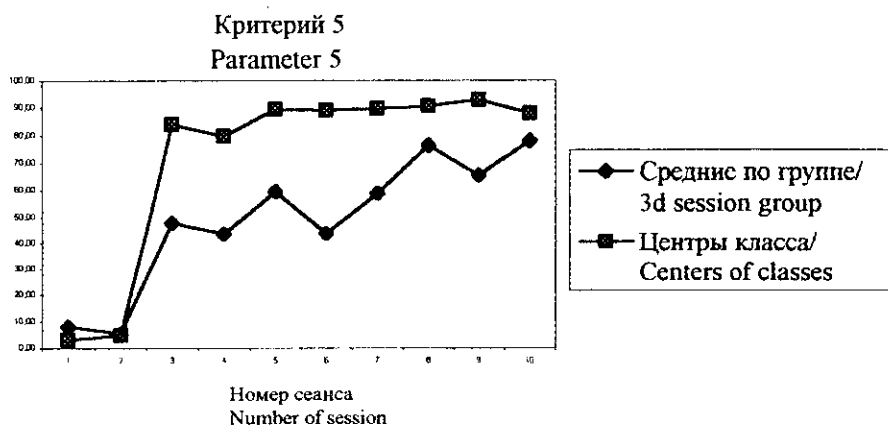


Рис. 8. Сравнение динамики центров «хорошего» класса и средних по сеансам «хорошей» группы, выбранной на 3-м сеансе (проекции на критерий 5).
 Fig. 8. Trends of Parameter 5 in comparison groups.

что этот критерий является предиктором успешности эффективности курса биоуправления в целом. Пациенты, которые могли удерживать температуру выше 93F на третьем сеансе, достигали лучших результатов по всем критериям в курсе, чем остальная группа (см. рис.7).

Динамика обучения в процессе биоуправления в выделенной группе отличалась значительно от трендов центров хорошего класса, полученного с помощью кластерного анализа сеансов (рис.8 - добавить!!!!). Мы считаем, что это различие объясняется индивидуальными особенностями (в первую очередь - психическими) процесса обучения: высокие результаты, достигнутые на одном сеансе, не дают гарантии успешности следующего. Рисунок 9, демонстрирующий изменения вероятностей принадлежности к хорошему классу для четырех пациентов из анализируемых групп, подтверждает это заключение. Динамика центров классов показывает общую, идеальную картину обучения в курсе биоуправления.

Поведение на первых двух сеансах курса биоуправления можно назвать ориентировочно-исследовательским, или «осознанным незнанием». Незначительные изменения температуры (центры кластеров) соответствуют разным по величине изменениям миограммы, что затрудняет определение хорошей или плохой группы.

После второго сеанса наблюдаемые изменения физиологических параметров можно назвать «поисковым» поведением, или стадией обучения «осознанному знанию». Часть людей уже могут достаточно хорошо увеличивать температуру рук, но необходимый результат достигается не в каждом сеансе. Происходит перебор различных известных типов, стратегий.

Целью обучения методом биоуправления является последняя стадия («неосознанное знание»), ее наступление можно зафиксировать после окончания курса у тех пациентов, которые самостоятельно без помощи компьютера могут изменять свое физиологическое состояние.

Аналогичный анализ был проведен по массивам данных, полученным в результате электроэнцефалографического альфа-тета тренинга, стимулирующего альфа-активность, и тренинга, организованного на базе оценки длительности кардиотеталов. Поскольку биоуправле-

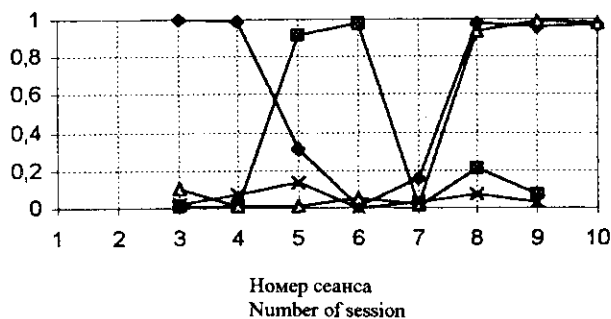


Рис. 9. Вероятности принадлежности к «хорошему» классу для 4 пациентов.
 Fig. 9. Probabilities of belonging to «good» class for 4 patients (fuzzy sets algorithm).

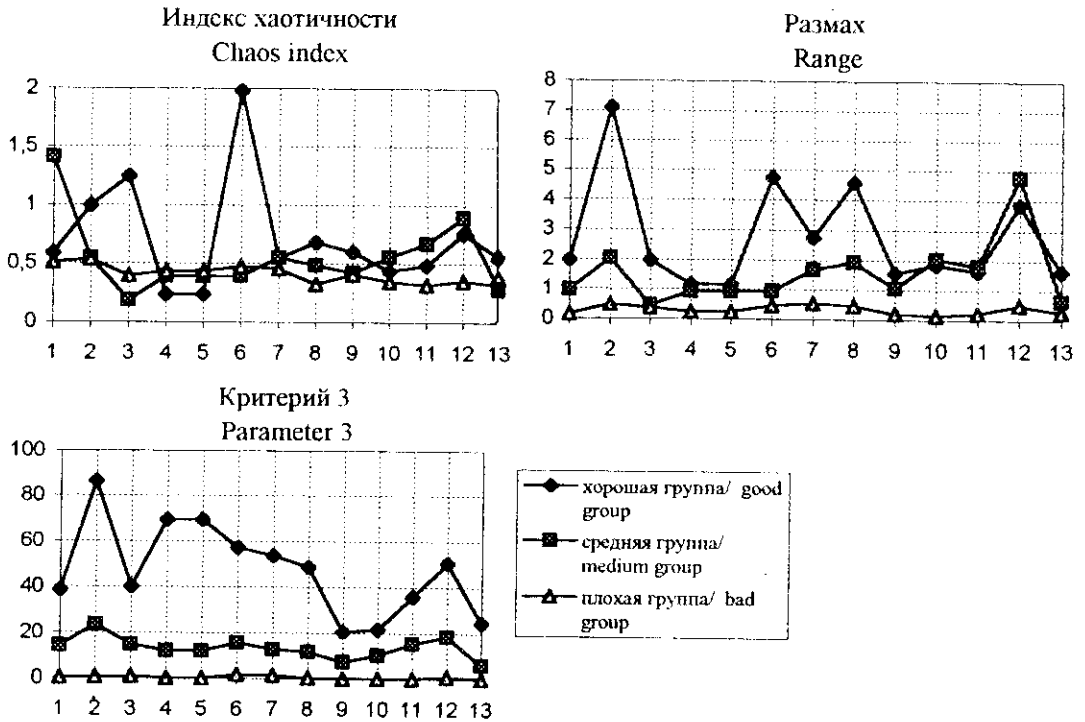


Рис. 10. Тренды проекций центров классов (электроэнцефалографический альфа-тета тренинг).
 Fig. 10. Trends of projections of classes centers (alpha-theta neurofeedback)

ние в обоих случаях было организовано по одному физиологическому показателю (при электроэнцефалографическом тренинге требовалось повысить уровень альфа-активности, во втором варианте ставилась задача увеличить длительность кардиоинтервалов), то для кластерного анализа было выбрано по три критерия.

Критерии для электроэнцефалографического альфа-тета тренинга:

1. Размах, разность между фоновым значением альфа-активности, регистрируемым в начале сеанса, и максимально достигнутым.
2. Время (в процентах), когда значение альфа-активности превышало исходное на 20% и более.
3. Индекс хаотичности альфа-активности.

Критерии для тренинга, организованного на базе оценки длительности кардиоинтервалов:

1. Размах, разность между фоновым значением длительности кардиоинтервала, регистрируемым в начале сеанса, и максимально достигнутым.
2. Время (в процентах), когда значение длительности кардиоинтервала превышало исходное на 5% и более.
3. Индекс хаотичности длительности кардиоинтервалов.

Кластерный анализ проводился методом размытых множеств по всем сеансам тренинга с делением на три группы, которые ранжировались в зависимости от успешности обучения, эффективности биоуправления.

На рисунках 10, 11 приведены графики трендов проекций центров классов, демонстрирующие динамику обучения, аналогичную полученной для температурно-миографического тренинга. Для энцефалографического тренинга характерно увеличение длительности второй стадии обучения (ориентировочно-исследовательского поведения), что связано с более сложными для осознания задачами при обучении этому типу саморегуляции.

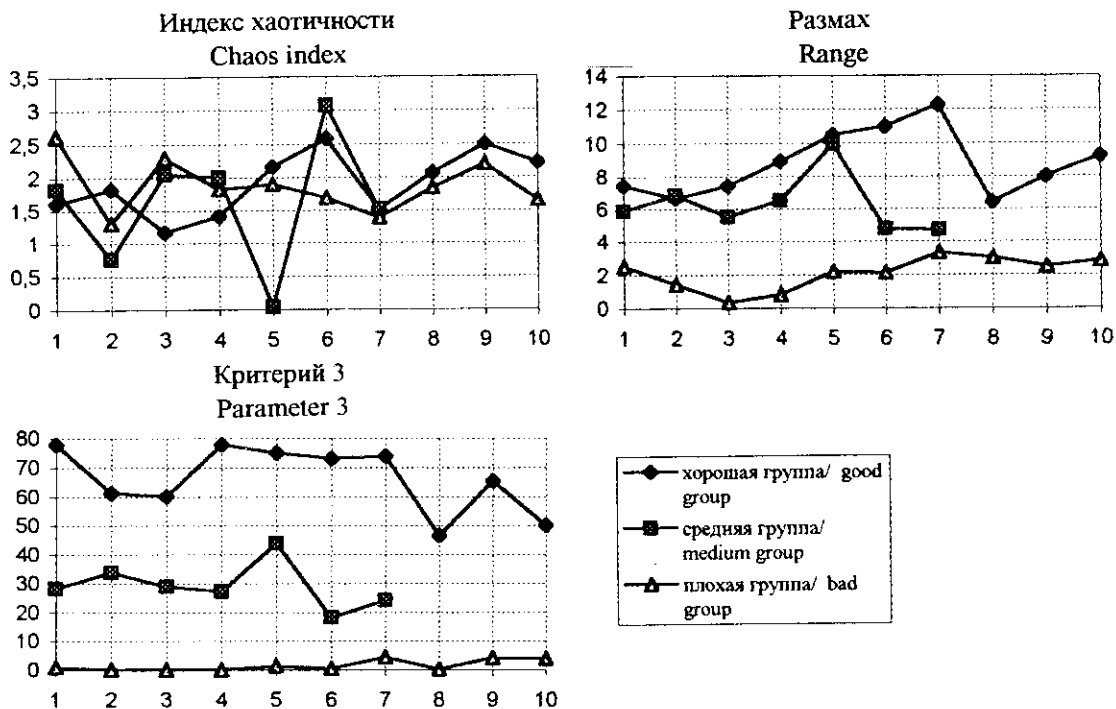


Рис. 11. Тренды проекций центров классов (тренинг по длительности кардиоинтервалов).
 Fig. 11. Trends of projections of classes centers (RR-interval training).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволил выделить стадии обучения в процессе биоуправления, определить группы, различающиеся по эффективности, а также подтвердить наличие общих закономерностей для различных видов БОС-тренинга.

Показано, что все три вида тренинга, включенные в исследование, имеют общий характер течения курса, хотя длительность процесса обучения различается. Наиболее сложным для освоения является электроэнцефалографический тренинг.

Подчеркнем, что метод биоуправления является уникальной техникой саморегуляции, сочетающей в себе элементы релаксации с напряженной психической деятельностью. Процесс обучения в курсе биоуправления не следует сводить к чисто физиологическому научению навыкам регуляции вегетативных функций организма, нужно учитывать его личностный, социальный аспект.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Saito M. Information-Theoretical Approach to Biofeedback//Biobehavioral Self-Regulation. Springer-Verlag, Tokyo. 1995.
- 2 Gallego J., Laurenti-Lions L. A systemic model of biofeedback learning//Kybernetes. 1983. 12. P.263-266.
- 3 Джафарова О.А., Новожилова Л.А., Своровская Н.Г. Прогноз эффективности курса БОС-тренинга// "Биоуправление-2. Теория и практика" Новосибирск 1993. С.43-47.
- 4 О'Коннор Дж., Сеймор Дж. Введение в нейролингвистическое программирование. Челябинск, 1997г.
- 5 Заде Л.А. Размытые множества и их применение в распознавании образов и кластерном анализе//Классификация и кластер. М. 1980. С.17-35.
- 6 Швыркова Н.А. Активность нейронов коры гиппокампа в обучении//Нейроны в поведении: системные аспекты. М. 1986. С.117-122.
- 7 Шубина О.С. Биоуправление в лечении и диагностике дистимических расстройств (предикторы эффективности)//Биоуправление-3: Теория и практика. Новосибирск. ИМБК СО РАМН. 1998. С.110-121