

Реактивность ЭЭГ-характеристик у подростков с разной степенью успешности выполнения БОС-тренингов параметрами сердечного ритма

Дёмин Д.Б.

Reactivity of the EEG characteristics in teenagers with varying degrees of HRV biofeedback training success

Dyomin D.B.

Институт физиологии природных адаптаций УрО РАН, г. Архангельск

© Дёмин Д.Б.

Рассматриваются изменения биоэлектрической активности мозга в динамике сеансов биоуправления параметрами вариабельности сердечного ритма у подростков. Выявлено усиление доминирования альфа-активности в структуре электроэнцефалограммы и повышение устойчивости подкорковых структур мозга. Наибольшие перестройки характерны для правого полушария, часто с вовлечением лобных отделов мозга. Данные изменения более выражены у подростков с успешным выполнением тренинга.

Ключевые слова: электроэнцефалография, вариабельность сердечного ритма, биоуправление, подростки.

We consider the nature of the brain bioelectric activity changes in the dynamics of heart rate variability parameters biofeedback sessions in teenagers. There was revealed increase in predominance of the brain functional activity and increase in the stability of the subcortical brain structures. The biggest bioelectric reorganizations are revealed in the right brain hemisphere, often involving the frontal brain lobes. These changes were more pronounced in adolescents with successful completion of training.

Key words: electroencephalography, heart rate variability, biofeedback, teenagers.

УДК 616.12-008.3-073.96:616.831-073.97]-053.6

Введение

Методы функционального биоуправления на основе биологической обратной связи (БОС) в настоящее время активно используются как в медицине, так и в различных психокоррекционных и личностно-развивающих практиках. К таким методикам относится биоуправление отдельными параметрами электроэнцефалограммы (ЭЭГ), электромиограммы, частоты сердечных сокращений [2, 9]. При выполнении исследований, посвященных определению эффективности метода адаптивного биоуправления, используется обычно следующая последовательность действий: определение значения первичного параметра, выполнение процедуры БОС-тренинга, направленной на его стабилизацию и (или) улучшение, определение значения того же параметра после проведения курса процедур. Подобные методы контроля являются внепроцедурными, т.е. оценивают некоторые параметры до и после проведения процедуры

или курса процедур. Перспективным направлением контроля качества БОС-тренинга является возможность оценки динамики неуправляемых параметров во время самой процедуры (внутрипроцедурный метод контроля). В данной работе использован способ биоуправления статистическими и спектральными параметрами вариабельности сердечного ритма, позволяющими дать интегративную оценку вегетативной регуляции организма на уровне баланса периферических и центральных структур нервной регуляции сердечной деятельности [7].

С целью контроля эффективности выбранного способа адаптивного биоуправления у подростков с различной степенью успешности выполнения тренинга были изучены неуправляемые в течение процедуры параметры биоэлектрической активности головного мозга.

Материал и методы

В исследовании принимали участие 160 подростков обоего пола 15—17 лет. Испытуемые выбирались на

добровольной основе, с отсутствием в анамнезе травм головного мозга и неврологических нарушений. От всех обследованных лиц и их родителей было получено информированное согласие на участие в исследовании, одобренном биоэтическим комитетом Института физиологии природных адаптаций (ИФПА) УрО РАН (г. Архангельск). Исследования проводились в комфортной, привычной для испытуемых обстановке в период с 9 до 14 ч. Перед исследованием проводился опрос испытуемых с целью исключения состояний напряжения, дискомфорта или утомления, а также давалась установка на поддержание состояния спокойствия и расслабленности с целью возможной унификации психологического состояния.

Сеансы биологической обратной связи проводили по авторской методике Л.В. Поскотиновой, Ю.Н. Семёнова (патент на изобретение № 2317771) [7]. Для реализации принципа БОС обследуемый получал на экране монитора информацию о состоянии суммарной мощности спектра variability сердечного ритма [1] в виде окна с заданными пределами ее колебаний. Перед началом исследования испытуемому давалась инструкция о том, что изменение графика на экране монитора зависит от его внутреннего состояния. Формирование состояния, отражающего изменение выбранного параметра, производилось посредством стратегии «свободного поиска» — сочетания спокойного глубокого дыхания с эффективным плавным выдохом, мышечной расслабленностью и созданием положительно окрашенных мысленных образов. После оценки степени успешности выполнения процедуры биоуправления все испытуемые были условно разделены на две группы: лица с успешным сеансом (130 человек) и лица, которым не удалось достигнуть желаемого результата с первого раза (30 пациентов).

В данном исследовании с каждым подростком был проведен один сеанс БОС-тренинга по вышеописанной методике [7]. С целью контроля эффективности адаптивного биоуправления во время сеансов проводили оценку биоэлектрической активности головного мозга. ЭЭГ регистрировали в состоянии спокойного бодрствования с закрытыми глазами на ЭЭГА-21/26 «Энцефалан-131-03» (НПКФ «Медиком МТД», г. Таганрог) монополярно от 16 стандартных отведений с ушными референтными электродами, установленными по международной системе 10—20 в полосе 1—35 Гц. Схема сеанса включала четыре этапа:

1) 5-минутная запись ЭЭГ с закрытыми глазами (регистрация фона, реакция активации) с одновременной регистрацией параметров variability сердечного ритма на аппаратно-программном комплексе «Варикард» («Рамена», г. Рязань);

2) 5-минутная процедура БОС, проводимая с открытыми глазами по вышеописанной методике [7] без регистрации ЭЭГ;

3) регистрация реакции последствия (воспроизведение комфортного состояния без сигналов обратной связи) — 5-минутная запись ЭЭГ с закрытыми глазами (повторение первого этапа);

4) 2-минутная запись ЭЭГ с закрытыми глазами (заключительный фон).

При оценке ЭЭГ каждого испытуемого выделяли безартефактные отрезки записи, спектр анализировали по дельта- (1,5—3,5 Гц), тета- (4—7 Гц), альфа- (7,5—12,5 Гц), бета₁- (13—21 Гц) диапазонам. Для количественной оценки спектра ЭЭГ в каждом частотном диапазоне проводили усредненную для каждого испытуемого оценку максимальной амплитуды (мкВ), индекса (%), абсолютных значений мощностей (мкВ²), доминирующих частот, реакции усвоения ритмов фотостимуляции в диапазоне частот 4—22 Гц с вариантами гармоник первого и второго порядка.

Статистическую обработку полученных результатов проводили непараметрическими методами с помощью компьютерного пакета прикладных программ Statistica 6.0 (StatSoft, США). Учитывали средние значения M и стандартные отклонения SD . Для проверки статистической гипотезы разности средних значений использовали критерий Вилкоксона и сравнения средних рангов для всех групп. Критический уровень значимости p при проверке статистических гипотез принимали равным 0,05.

Сбор и дальнейшее использование первичного материала в рамках данной работы проводили совместно с сотрудниками лаборатории биоритмологии ИФПА Л.В. Поскотиновой и Е.В. Кривоноговой.

Результаты и обсуждение

Группы испытуемых были условно сформированы после оценки степени успешности выполнения процедуры биоуправления по динамике показателей variability сердечного ритма (ВСР): суммарной мощности спектра (total power — TP, мс²) и индекса напряжения регуляторных систем (ИН, усл. ед.). Предыдущие исследования [4] показали, что направленное произ-

вольное управление вегетативной регуляцией с целью мобилизации функциональных резервов парасимпатической активности у подростков становится обычно возможным после трех-четырёх сеансов обучения, когда у испытуемых минимизируется рефлекс на обстановку исследования и устанавливается ассоциативная связь между изменениями графика движения параметров ВСП и внутренним состоянием. Но даже при однократном сеансе в рамках текущего исследования более 80% лиц смогли успешно выполнить процедуру БОС. Критерием эффективности служило снижение индекса напряжения и увеличение суммарной мощности спектра ВСП, при этом испытуемые достигали состояния общей расслабленности, покоя, психического комфорта и эмоционального равновесия.

Так, в группе подростков с успешно выполненной процедурой суммарная мощность спектра значимо повышалась в процессе БОС-тренинга в сравнении с фоновыми значениями (ТР от 2 517 до 4 683 мс², $p < 0,001$), при этом индекс напряжения значимо снижался (ИН от 142,8 до 78,3 усл. ед., $p < 0,001$). Увеличение суммарной мощности спектра ВСП в процессе БОС-тренинга свидетельствует об увеличении синхронизации процессов дыхания и сердечной деятельности и усилении влияния парасимпатического отдела нервной системы на ритм сердца [1].

В группе лиц с неуспешным БОС-тренингом в динамике процедур, напротив, происходило значимое снижение суммарной мощности спектра и повышение индекса напряжения (ТР от 4 881 до 4 161 мс², $p < 0,001$; ИН от 90,6 до 149,2 усл. ед., $p < 0,001$). Фоновые значения показателей ВСП в группе лиц с неуспешным тренингом могут быть свидетельством относительно большего вагусного влияния на ритм сердца. Можно пред-

положить, что в процессе БОС-тренинга с целью повышения парасимпатических влияний на ритм сердца у этих лиц срабатывает механизм стабилизации вегетативного тонуса для возвращения вегетативного гомеостаза к сбалансированному состоянию [2].

В проведенных исследованиях было обнаружено, что перестройки параметров ЭЭГ при произвольной регуляции характеристиками ВСП могут достигаться как за счет изменения амплитуды отдельных составляющих спектра ЭЭГ, так и изменения их удельного веса (индекса) в биоэлектрической активности (таблица).

При сравнении показателей начального фона (1-й этап) и реакции последействия БОС (3-й этап) было отмечено повышение амплитуд и индексов альфа-диапазона у 70—80% обследованных лиц. Изменение их средних значений ($M \pm SD$) выражалось в значимом повышении ($p < 0,01—0,001$) от фона к этапу последействия БОС и вновь снижении ($p < 0,001$) к заключительному фону, что может свидетельствовать о высокой реактивности мозговых структур в ответ на процедуру БОС-тренинга. Во время регистрации заключительного фона (4-й этап) средние значения амплитудно-частотных характеристик альфа-активности снизились практически к уровням начальных фоновых значений (1-й этап) у обеих групп лиц независимо от успешности выполнения процедуры. После завершения процедуры биоуправления и уменьшения парасимпатических влияний на этапе заключительного фона показатели ВСП стремятся к фоновым значениям, показатели альфа- и бета₁-активности также компенсаторно возвращаются к исходным значениям.

Изменение средних значений амплитуды и индекса основных частотных диапазонов ЭЭГ в динамике сеанса биоуправления у подростков (15—17 лет) в зависимости от степени успешности выполнения процедуры ($M \pm SD$)

Диапазон	Этап	Успешный сеанс (130 человек)		Неуспешный сеанс (30 человек)	
		Амплитуда, мкВ	Индекс, %	Амплитуда, мкВ	Индекс, %
Тета	1-й	39,5 ± 15,9	17,6 ± 9,6	41,5 ± 15,0	20,6 ± 10,3
		39,3 ± 15,7	17,3 ± 9,6	41,3 ± 15,4	19,7 ± 10,6
	4-й	38,6 ±	16,5	39,3	19,0

		16,5* *	± 9,3 *	± 15, 4*	± 9,8
Альфа	1-й	77,0 ± 23,0	64,6 ± 15,8	73,6 ± 24,6	61,0 ± 17,1
		80,3 ± 25,0* **	65,0 ± 16,9	81,3 ± 25,1**	61,8 ± 18,2
	4-й	77,1 ± 24,9* **	62,6 ± 16,4***	74,9 ± 25,6***	59,0 ± 16,8**
		30,3 ± 10,1	33,9 ± 9,1	31,0 ± 10,4	34,9 ± 9,7
Бета-1	3-й	30,8 ± 10,0* **	34,1 ± 8,4	31,9 ± 11,4	35,0 ± 8,6

4-й	29,4 ±	33,8	30,4	33,7
	9,9** *	± 8,9	± 10, 7**	± 10, 0

Примечание. 1-й этап — фон; 3-й этап — реакция последствия БОС; 4-й этап — заключительный фон. Статистически значимое отличие в сравнении с предыдущим этапом: * — $p < 0,05$; ** — $p < 0,01$; *** — $p < 0,001$.

Этот факт подчеркивает наличие определенных изменений функциональной активности головного мозга, происходящих на предыдущих этапах, обусловленных именно эффектами биоуправления.

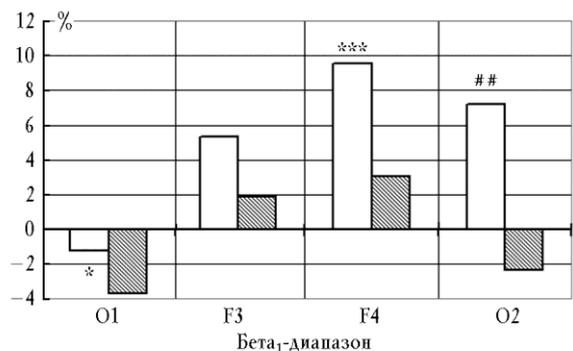
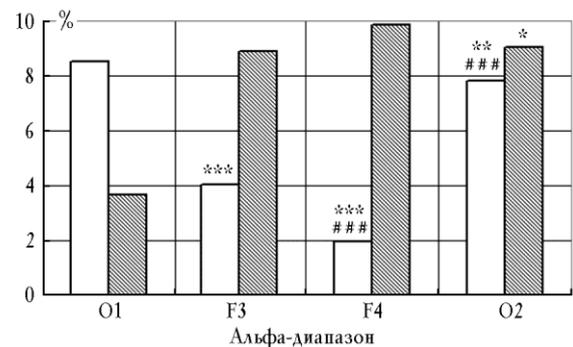
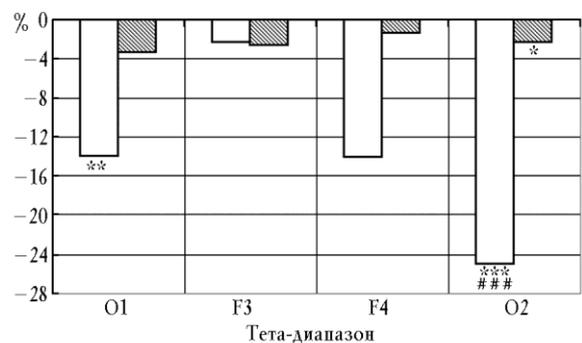
Динамика средних значений бета₁-активности в целом была сходна с изменениями в альфа-диапазоне, более значимые изменения происходили в группе подростков с успешно выполненным сеансом. Повышение бета₁-активности у подростков на этапе последствия (3-й этап) может являться признаком усиления концентрации внимания в процессе формирования биологической обратной связи. Результаты некоторых исследований показали, что мотивация к успешности выполнения вербальных заданий с элементами новизны и тестов на зрительно-пространственные отношения положительно связана с высокой активностью бета-диапазона ЭЭГ. Также предполагается, что эта активность связана с отражением деятельности механизмов сканирования структуры внешнего стимула, осуществляемой нейронными сетями, продуцирующими высокочастотную активность ЭЭГ [8].

Средние показатели тета-активности к этапу последствия БОС снижались на уровне тенденции, значимое же их снижение ($p < 0,05—0,01$) в пределах нормативных значений происходило лишь к заключительному фону для обеих групп подростков. Как известно, основную роль в генезе тета-ритма играют промежуточный мозг и лимбическая система, т.е. структуры, непосредственно участвующие в детекции и регуляции эмоций [3, 8]. Наблюдаемая депрессия тета-активности может быть обусловлена стабилизацией психоэмоционального состояния испытуемого при выполнении процедуры БОС-тренинга и активацией восходящих влияний глубинных структур на кору мозга.

Картина процентного изменения абсолютных значений мощности основных частотных диапазонов ЭЭГ в динамике сеанса биоуправления в целом повторяет колебание средних значений амплитуд (рисунок). В большинстве случаев обращает на себя внимание наличие значимой (статистически подтвержденной) правосторонней асимметрии в динамических изменениях рас-

Экспериментальные и клинические исследования

сматриваемых частотных диапазонов. Мощность тета-ритма снижается в среднем у всех подростков, более отчетливо в затылочных отделах у группы лиц, успешно выполнивших процедуру. Прирост мощности альфа-ритма распространяется до префронтальных областей у всех подростков, где он более значимо выражен наряду с правой затылочной областью. Приросты мощности бета₁-активности у обследованных лиц происходят преимущественно за счет лобных отделов на фоне некоторого снижения в затылочных, прирост активности в правой затылочной области отмечен лишь у лиц, успешно выполнивших процедуру.



□ Успешный БОС-тренинг ■ Неуспешный БОС-тренинг

Прирост (снижение) абсолютных значений мощности основных частотных диапазонов ЭЭГ в динамике сеанса биоуправления у подростков (15—17 лет). Статистически значимое отличие между показателями фонового состояния и этапа последствия БОС-

тренинга: * — $p < 0,05$; ** — $p < 0,01$; *** — $p < 0,001$; # — между показателями в симметричных отведениях слева и справа

В обеих группах подростков после выполнения процедуры БОС-тренинга по предложенной методике происходит сдвиг биоэлектрической активности в сторону более высоких частот, преимущественно в альфа-диапазоне, что может свидетельствовать о повышении синхронизирующей роли таламуса, при которой альфа-активность возрастает по всей конвекситальной поверхности мозга. При функциональных перестройках в заданных условиях процедуры происходит формирование нового алгоритма работы ритмозадающих систем за счет снижения активности глубоких подкорковых структур (тета-активность) на фоне оживления структур, ответственных за сосредоточение и поисковую активность в новых условиях (бета-активность). Известно, что формирование оптимального соотношения бета-, тета-активности головного мозга в подростковый период важно с точки зрения профилактики и коррекции синдрома гиперактивности [3, 6].

Правосторонняя асимметрия функциональной топографии мозга в ответ на процедуру биоуправления, видимо, вызвана преобладающей скоростью формирования внутренних моделей в правом полушарии на ранних стадиях обучения когнитивному навыку [3], при этом эмоционально окрашенная деятельность независимо от ее знака вызывает более генерализованные сдвиги ЭЭГ также в правом полушарии [5].

Изменения при БОС-тренинге, усиливающим парасимпатические влияния на ритм сердца, происходят посредством стимуляции парасимпатических центров передних отделов гипоталамуса, как следствие, активируются и лобные отделы коры [3]. Роль лобных долей в работе с когнитивной новизной была подтверждена в экспериментах по функциональной нейровизуализации [10, 12], когда при обучении новым навыкам было отмечено повышение активности относительно исходных значений в префронтальной области коры правого полушария (средняя лобная извилина). Кроме того, в некоторых работах [11] показано, что активация префронтальной коры происходит более значительно в случаях неуспешности выполнения предъявляемых когнитивных заданий.

При оценке реакции усвоения ритмов фотостимуляции с вариантами гармоник первого и второго порядка на этапе начального фона отмечены различия в количестве усвоений. Так, у подростков успешной

группы усвоение в тета-диапазоне (при сохранении собственной доминирующей частоты в альфа-диапазоне) происходило в 16% случаев, в альфа-диапазоне — 78%, в бета₁-диапазоне — 32%. Среди подростков неуспешной группы количество усвоений ритмов было выше: в тета-диапазоне — 24%, в альфа-диапазоне — 96%, в бета₁-диапазоне — 33%, что может быть следствием некоторого повышения триггерной реактивности таламуса у этих лиц.

По окончании БОС-тренинга в сравнении с фоном наблюдалась тенденция снижения числа усвоений практически у всех подростков во всех диапазонах частот фотостимуляции. Успешная группа: тета-диапазон — 14% случаев, альфа-диапазон — 74%, бета₁-диапазон — 24%. Неуспешная группа: тета-диапазон — 22% случаев, альфа-диапазон — 76%, бета₁-диапазон — 28%. Иначе говоря, можно предположить, что БОС-тренинг на повышение парасимпатической активности вегетативной регуляции ритма сердца в конечном итоге способствует повышению устойчивости ритмозадающих структур мозга независимо от успешности проведенного сеанса.

Заключение

Таким образом, способность испытуемого изменять активность параметров ритма сердца также определяет степень его воздействия и на функции центральных структур вегетативной регуляции. Меняя фундаментальные ритмические механизмы за счет изменения нейромодуляторных влияний подкорковых структур регуляции, кардиотренинг нормализует механизмы активации, улучшая при этом кортикальную стабильность. В зависимости от успешности выполнения процедуры адаптивное биоуправление параметрами ритма сердца с целью повышения резервов его парасимпатической регуляции формирует сходные по характеру, но различные по силе варианты изменений биоэлектрической активности мозга подростка. Процессы синхронизации мозговой активности в процессе биоуправления наиболее отчетливо проявляются в правом полушарии, при этом часто с вовлечением префронтальных областей. Наибольшая выраженность изменений отмечена для группы успешных лиц, где наряду с усилением активности парасимпатического отдела вегетативной регуляции происходит более интенсивная оптимизация нейродинамических процессов (увеличение альфа- и снижение тета-ритмов). Достижение положительного эффекта биоуправления в

группе неуспешных подростков, видимо, возможно при более длительном курсе процедур, но целесообразность проведения такого курса необходимо уточнять индивидуально с учетом исходного вегетативного тонуса и психоэмоционального состояния испытуемого.

Литература

1. *Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Рябыкина Г.В.* Современное состояние исследований по variability сердечного ритма в России // *Вестн. аритмологии.* 1999. № 14. С. 71—75.
2. *Вегетативные расстройства: клиника, диагностика, лечение* / под ред. А.М. Вейна. М.: Мед. информ. агентство, 2003. 752 с.
3. *Голдберг Э.* Управляющий мозг: лобные доли, лидерство и цивилизация / пер. с англ. Д. Бугакова. М.: Смысл, 2003. 335 с.
4. *Дёмин Д.Б., Поскотнинова Л.В., Кривоногова Е.В.* Контроль ЭЭГ-реакций в течение сеансов адаптивного биоуправления вегетативными параметрами у школьников // *Педиатрия. Журн. им. Г.Н. Сперанского.* 2011. Т. 90, № 2. С. 135—138.
5. *Жирмунская Е.А., Лосев В.С., Евакова Т.П.* Электроэнцефалографические корреляты функциональной асим-

Экспериментальные и клинические исследования

- метрии больших полушарий мозга человека // *Успехи физиол. наук.* 1982. Т. 13, № 1. С. 42—51.
6. *Клинико-психофизиологические основы лечения синдрома нарушения внимания с гиперактивностью у детей и подростков* / под ред. Т.А. Лазебник, Л.С. Чутко, Ю.Д. Кропотова. СПб., 2001. 36 с.
 7. *Патент 2317771 РФ.* Способ коррекции вегетативных дисбалансов с помощью комплекса для обработки кардиоинтервалограмм и анализа variability сердечного ритма «Варикард 2.51», работающего под управлением компьютерной программы ISCIM 6.1 (BUILD 2.8), с использованием биологической обратной связи / Л.В. Поскотнинова, Ю.Н. Семёнов; Ин-т физиологии природных адаптаций УрО РАН. Опубл. 27.02.2008. Бюл. № 6.
 8. *Равич-Щербо И.В., Марютина Т.М., Григоренко Е.Л.* Психогенетика. М.: Аспект Пресс, 2000. 447 с.
 9. *Сороко С.И., Трубаев В.В.* Нейрофизиологические и психофизиологические основы адаптивного биоуправления. СПб.: ИЭФБ РАН, 2010. 607 с.
 10. *Gold J.M.* PET validation of a novel prefrontal task: Delayed response alteration // *Neuropsychology.* 1996. V. 10. P. 3—10.
 11. *Raichle M.E.* Practice-related changes in human brain functional anatomy during nonmotor learning // *Cereb. Cortex.* 1994. V. 4, № 1. P. 8—26.
 12. *Shadmehr R., Holcomb H.H.* Neural correlates of motor memory consolidation // *Science.* 1997. V. 277, № 5327. P. 821—825.

Поступила в редакцию 11.10.2011 г.

Утверждена к печати 05.03.2012 г.

Сведения об авторах

Д.Б. Дёмин — канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник лаборатории биоритмологии ИФПА УрО РАН (г. Архангельск).

Для корреспонденции

Дёмин Денис Борисович, тел./факс (8182) 65-29-92; e-mail: denisdemin@mail.ru