

## Перспективы развития методов биоуправления параметрами ритма сердца

Д. Б. Демин

### Введение

С помощью методов адаптивного биоуправления на основе биологической обратной связи (БОС) человек может научиться регулировать своё функциональное состояние. Одним из перспективных методов немедикаментозной коррекции сосудистой дистонии является метод биоуправления параметрами variability сердечного ритма (ВСР), при котором происходит усиление вагусных влияний на ритм сердца и снижение явлений симпатикотонии [Поскотинова 2010, Lehrer 2004].

Сердечный ритм, наряду с другими физиологическими показателями, характеризуется сложной конфигурацией variability, представленной различными частотными составляющими [Баевский 2001, Lehrer 2003]. Предположительно, данные ритмы относятся к числу систем, поддерживающих кардиоваскулярную активность и физиологическую адаптацию в целом [Vaschillo 2002]. Ряд работ посвящён одному из колебательных механизмов в сердечном ритме, которым является респираторная синусовая аритмия – вариация ритма, сопровождающая дыхательный цикл (частота сердечных сокращений возрастает на вдохе и снижается на выдохе) [Bernardi 1994, Lehrer 2003]. Частота респираторно обусловленных колебаний в сердечном ритме представлена “высокочастотными” (0,15-0,4 Гц) и “низкочастотными” (0,05-0,15 Гц) компонентами.

Распространённым методическим подходом является использование показателя ритма сердца, в том числе и респираторной синусовой аритмии, как информативного признака баланса между парасимпатическим и симпатическим тонусом. Считается, что сдвиги variability сердечного ритма могут служить не только ранними признаками риска развития кардиоваскулярных расстройств, но и критериями нервно-психиче-

ского напряжения [Вейн 2003]. Таким образом, модификация ритма может быть ключом к управлению функциональным состоянием организма.

Проведенные рядом авторов исследования показали, что с помощью техники биоуправления можно добиваться увеличения респираторной синусовой аритмии, что позволяет перейти к таким типам дыхания, при которых возникает резонанс между ритмами, связанными с барорефлекторной деятельностью (“низкочастотные” колебания) и сердечными ритмами, связанными с дыханием (“высокочастотные” колебания или собственно респираторная синусовая аритмия), что приводит к увеличению интенсивности барорефлексов; одновременно увеличивается их эффективность и, следовательно, модуляция автономной активности [Bernardi 1994, Zucker 2009]. Есть мнение, что человек способен достигать наибольших амплитуд лишь на определённых заданных частотах в указанных пределах, с центром примерно 0,1 Гц (6 колебаний в минуту), при ритме дыхания около 6 раз в минуту. Такая частота дыхания может запускать достаточно высокие амплитуды респираторной синусовой аритмии, что может достаточно легко достигаться путём БОС-тренинга.

Дыхание – функция в значительной степени кортикализованная [Сафонов 2006]. Это проявляется в способности человека произвольно управлять дыхательными движениями, что создаёт уникальный вход во внутреннюю среду организма. Однако в том случае, когда произвольные изменения легочной вентиляции или её задержка оказываются несовместимыми с требованиями метаболизма, произвольные сокращения респираторных мышц и соответствующая сигнализация из их проприорецепторов создают императивный стимул, выводящий дыхание из-под поведенческого контроля. Оказалось, что этот защитный механизм включает активацию ряда структур ЦНС, в том числе определённых зон коры и лимбической системы. Паттерн дыхания тесно связан с функциональным состоянием ЦНС. Управляя дыханием, удаётся воспроизводить релаксацию, либо готовность организма к активной деятельности. Управление в основных контурах дыхательной системы производится по отклонению регулируемых переменных от заданных значений. Сознательное регулирование акта дыхания

осуществляется посредством высшего отдела нервной системы – коры больших полушарий головного мозга. Влияние коры больших полушарий мозга на дыхательные движения выражается в возможности произвольно прерывать (в известных пределах напряжения  $CO_2$  в артериальной крови) дыхательные движения и изменять их характер [цит. по Поскотинова 2010, Сафонов 2006].

Учитывая то, что дыхание сопряжено с деятельностью сердечно-сосудистой системы [Lehrer 2004], предложены различные виды биоуправления по дыхательной аритмии сердца. Так, для коррекции вегетативных дисфункций применён знакопеременный БОС-тренинг по кардиоинтервалограмме [Суворов 2005].

Наилучший эффект и индивидуальная зависимость выявляются при использовании методики альтернативного биоуправления, ориентированного не просто на однонаправленное изменение текущей частоты сердечных сокращений (ЧСС), а на усиление или ослабление выраженности волн разного периода в кардиоинтервалограмме. В этом случае идёт направленная модификация отдельных контуров центральных механизмов регуляции ЧСС. Так как система регуляции ЧСС определяется совместно двумя отделами вегетативной нервной системы, то БОС-регуляция по кардиоинтервалам содержит информацию о смешанном эффекте симпатических и парасимпатических влияний. В обусловленные хронотропные изменения ЧСС обычно вовлекаются синергические действия симпатической и парасимпатической сердечной иннервации [цит. по Сороко 2010]. Показано, что передние отделы правого полушария мозга доминируют в сердечно-сосудистой афферентации при произвольной регуляции частоты сердечных сокращений [Глазкова 1996].

В работах же, посвящённых ЭЭГ-биоуправлению, были показаны обратные влияния на показатели автономной регуляции когнитивных функций. Так, у пациентов с генерализованной тревожностью после 8-12 сессий тренинга увеличения мощности альфа-волн с помощью нейробиоуправления кардиоинтервалы удлинились, реактивность пульса на стресс снижалась, этот эффект сопровождался снижением тревожности [Rice 1993]. Биоуправление же, направленное на сниже-

ние альфа-мощности, не изменяло реактивности ритма сердца на стрессорные стимулы [Rice 1993]. После проведения курса тренингов произвольного увеличения альфа-мощности ЭЭГ другими авторами [Базанова 2013] было выявлено, что у здоровых испытуемых с исходно низкой частотой альфа-ритма ЭЭГ увеличивается уровень альфа-активности в состоянии покоя, улучшается выполнение когнитивных задач, снижается психоэмоциональное напряжение и увеличивается вариабельность сердечного ритма. У лиц с исходно высокой частотой альфа-ритма его мощность в покое и характеристики когнитивной эффективности не изменяются после курса биоуправления, а показатели ВСР снижаются.

Установлено, что БОС-тренинг по частоте сердечных сокращений наиболее эффективен в отношении лиц с высокой личностной и ситуативной тревожностью [Kotani 2007]. Весьма распространён метод кардиотренинга с целью урежения частоты сердечных сокращений [Редько 2010]. При этом изменения показателей ВСР свидетельствуют о разнонаправленных вариантах соотношения симпатических и парасимпатических звеньев вегетативной регуляции ритма сердца. Акцент в таких работах делается в большей степени на социальный эффект биоуправления (успешность обучения, социальная адаптация), а не на результат направленного усиления вагусных либо симпатических влияний на ритм сердца. Показана значимость успешности биоуправления по ЧСС и по показателю суммарной мощности спектра ВСР от свойств темперамента (эмоциональность, тревожность, темп, пластичность) [Редько 2010].

Широко используется обратная связь по параметрам кардиоритма у лиц с артериальной гипертензией, где в качестве управляемого параметра применяется показатель соотношения частоты сердечных сокращений и дыхания. Установлено, что после данной немедикаментозной коррекции гипертензивных состояний оптимизируется соотношение ЧСС и дыхания, снижается артериальное давление и улучшается психоэмоциональный фон [Полякова 2011].

Биоуправление по статистическим параметрам ВСР позволяет более целенаправленно отслеживать состояние вегетативного тонуса во время и после БОС-тренинга [Sigafus 2011]. Так, использовалась оценка эффективности кардиотренинга по

среднеквадратичному отклонению кардиоинтервала, степени энтропии разности между исходным и регулируемым параметром. В результате такого тренинга наблюдалось уменьшение проявлений синдрома вегетативной дистонии, логоневроза, нарушений памяти и внимания [Бразовская 2002]. При таком виде тренинга, несмотря на повышение общей мощности спектра ВСР, соотношение спектральных показателей свидетельствует о сохранении достаточно высокой симпатической активности [Бразовская 2002]. По-видимому, оценка спектральных показателей ВСР при нестационарном процессе даёт неоднозначные результаты в оценке соотношения симпатических и парасимпатических механизмов [Баевский 2001].

Однократное проведение сеанса релаксации с биологической обратной связью по индексу напряжения регуляторных систем показало отчётливую тенденцию к повышению устойчивости обследуемых к эмоциональному стрессу. Разработанные личностные и психофизиологические критерии стрессустойчивости, положенные в основу выделения групп “гиперреакция” и “типореакция”, позволяют определять индивидуальные показания к практическому использованию адаптивного биоуправления параметрами variability сердечного ритма и прогнозировать его эффективность [Ефимова 2007]. В целом, однократный сеанс биоуправления расценивается как тест для определения адаптивных возможностей человека [Nada 2009].

Одни из основоположников метода биоуправления параметрами ритма сердца Paul Lehrer и Evgeny Vaschillo продемонстрировали эффективность управления параметрами variability ритма сердца (HRV biofeedback) с целью усиления суммарной мощности сердца, что отражало активизацию вагусных влияний на ритм сердца. При этом важно было с целью активизации барорефлексов добиться усиления низкочастотной (LF – low frequency) составляющей спектра ВСР, которая с физиологических позиций является отражением как вагусных, так и симпатических влияний на ритм сердца. Наиболее успешно такой эффект достигался при более медленном дыхании, в результате сеансов биоуправления наблюдалось улучшение параметров внешнего дыхания у здоровых добровольцев [Lehrer 2003].

Использование метода биологической обратной связи на определённых частотах ВСР возможно для изучения выраженности барорефлекторных механизмов. При тренинге на урежение и учащение частоты сердечных сокращений самые высокие амплитуды колебаний были произведены в диапазоне 0,05-0,11 Гц для ЧСС и 0,02-0,05 Гц для артериального давления. Они были расценены как резонансные частоты колебательных процессов сердечно-сосудистой системы. Метод биологической обратной связи также позволил авторам определить количественные характеристики чувствительности барорефлекторной системы, в том числе при лечении лиц с бронхиальной астмой [Lehrer 2004, Vaschillo 2005].

Вариабельность сердечного ритма может служить вегетативным индикатором саморегуляции когнитивных и психоэмоциональных процессов [Reynard 2011], так отмечается снижение показателей ВСР при депрессивных состояниях [Kemp 2010] и повышение при когнитивных нагрузках [Yu 2009]. Увеличение общей variability сердечного ритма с помощью биологической обратной связи благотворно действует на людей с депрессиями [Siermann 2008], с мышечными болями различной локализации [Hallman 2011], головной болью [Andrasic 2010], психоэмоциональными расстройствами [Henriques 2011, Nada 2009]. Несмотря на наличие большой доказательной базы, подтверждающей эффективность биологической обратной связи по параметрам ритма сердца, остаются открытыми вопросы долговременности эффекта биоуправления, так как успешность биоуправления по параметрам ритма сердца и клиническое улучшение состояния пациента не всегда совпадают по времени [Wheat 2010].

Показатель суммарной мощности спектра ВСР как управляемый параметр представляется перспективным для использования с целью усиления вагусных влияний на ритм сердца. Известно, что при коротких записях (5 минут) данный показатель имеет аналогичный стандартному отклонению кардиоинтервала физиологический смысл – усиление вагусной активности [Баевский 2001]. Показатель суммарной мощности спектра ВСР отражает в основном сумму колебаний высоко-, низко- и сверхнизкочастотных волн классических диапазонов и минимальную долю непериодических волн. В отличие от дан-

ного показателя временные параметры общей вариабельности ритма сердца содержат большую долю неперiodических волн, обусловленных нестационарностью процесса биоуправления. Поэтому суммарная мощность спектра ВСР при коротких записях представляется нам более чётким показателем в плане оценки вагусных влияний на ритм сердца, особенно если при этом происходит снижение индекса напряжения регуляторных систем [Баевский 2001, Поскотинова 2008].

При выполнении исследований, посвящённых 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). Предложенный нами метод биоуправления статистическими и спектральными параметрами вариабельности сердечного ритма [Поскотинова 2008] позволяет рассматривать не только клиническую эффективность БОС-тренинга, но и служить в качестве диагностического маркера для выявления патогенетических механизмов изменения управляемых и неуправляемых физиологических параметров в ходе процедуры биоуправления. В связи с этим, была предложена схема диагностики, основанная на анализе данных, получаемых в результате контроля эффективности процедуры биоуправления, что позволяет дать интегративную оценку вегетативной регуляции организма на уровне баланса периферических и центральных структур нервной регуляции сердечной деятельности.

Таким образом, анализ литературы показал, что методы кардиотренинга, основанные на внешней обратной связи, дают возможность получать устойчивые изменения в деятельности различных систем организма, что в свою очередь открывает широкие перспективы использования БОС для профилактики

ки функциональных нарушений, а также ряда психосоматических заболеваний, путём раскрытия и использования резервов организма.

В экспериментальной части нашего исследования, 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 экспериментальном исследовании принимали участие 160 подростков обоего пола 15-16 лет. Испытуемых выбирали на добровольной основе с отсутствием в анамнезе травм головного мозга и неврологических нарушений. От всех подростков и их родителей было получено информированное согласие на участие в исследовании, одобренном биоэтическим комитетом Института физиологии природных адаптаций Уральского отделения Российской академии наук (ИФПА УрО РАН).

Исследования проводили в комфортной, привычной для испытуемых обстановке в период с 9 до 14 часов. Перед исследованием проводили опрос для исключения лиц с возможными нарушениями режима труда и отдыха, наличием социально обусловленных стрессовых состояний (напряжения, дискомфорта или утомления). В виде рекомендации испытуемым давали установку на поддержание состояния спокойствия и расслабленности с целью возможной унификации их психологического состояния. Сеансы биологической обратной связи проводили по авторской методике Поскотиновой Л.В. – патент на изобретение № 2317771 [Поскотинова 2008]. Для реализации принципа БОС, в процессе регистрации электрокардиограммы во II стандартном отведении на аппаратно-программном комплексе “Варикард” (“Рамена”, г. Рязань), обследуемый получал на экране монитора информацию о состоянии общей мощности спектра вариабельности сердечного ритма (дисперсии кардиоинтервалов) [Баевский 2001] в виде линейного графика и цифровых показателей. В динамике сеанса обновление указанных показателей происходило каждые 4 секунды по принципу скользящего окна, общая продолжительность БОС-тренинга составляла 5 минут. Перед началом исследования подростка

инструктировали о том, что изменение графика на экране монитора зависит от его внутреннего состояния, цель тренинга – увеличение общей мощности спектра (повышение графика). Состояние, отражающее изменение выбранного параметра, формировалось посредством стратегии “свободного поиска” – создания положительно окрашенных мысленных образов в сочетании со спокойным глубоким дыханием с эффективным плавным выдохом и мышечной расслабленностью. После оценки степени успешности выполнения процедуры биоуправления все испытуемые были условно разделены на 2 группы: лица с успешным сеансом ( $n = 130$ ) и лица которым не удалось достигнуть желаемого результата с первого раза ( $n = 30$ ).

В данном исследовании с каждым подростком был проведен один сеанс БОС-тренинга по вышеописанной методике [Поскотинова 2008], для контроля направленности церебральных изменений во время сеансов оценивали биоэлектрическую активность головного мозга. Электроэнцефалограмму (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 и ритмическая фотостимуляция) с одновременной регистрацией параметров ВСР;

2) 5-минутная процедура БОС проводимая с открытыми глазами по вышеописанной методике [Поскотинова 2008] 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 длительностью 60 секунд на каждом этапе исследования, спектр анализировали по дельта- (1,6-4 Гц), тета- (4-7 Гц), альфа- (7-13 Гц), бета<sub>1</sub>- (13-24 Гц) диапазонам.

Для количественной оценки спектра ЭЭГ в каждом частотном диапазоне проводили усреднённую для каждого испытуемого оценку максимальной амплитуды (мкВ), индекса (%), абсолютных значений мощностей (мкВ<sup>2</sup>), доминирующих частот, реакции усвоения ритмов фотостимуляции в диапазоне частот 4-22 Гц с вариантами гармоник первого и второго порядка. Исходя из того, что ЭЭГ является полиритмическим процессом – в один и тот же отрезок времени записи может отмечаться наложение волн более высокой частоты на волны более низкой. Для расчёта временного индекса выраженности использовали выделение полуволн каждого частотного диапазона из полиморфного сигнала ЭЭГ, включающего в себя суперпозицию волн различных ритмов, и вычисляли процент времени присутствия волн заданного диапазона ЭЭГ за период времени эпохи анализа.

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 значений использовали критерии Wilcoxon для двух связанных выборок, Mann-Whitney для двух независимых групп. Критический уровень значимости ( $p$ ) при проверке статистических гипотез принимали за 0,05.

Сбор и дальнейшее использование первичного материала в рамках данной работы проводили совместно с сотрудниками лаборатории биоритмологии ИФПА УрО РАН доктором биологических наук, доцентом Поскотиновой Л.В. и кандидатом биологических наук Кривоноговой Е.В.

### Результаты и обсуждение

Группы испытуемых были условно сформированы после оценки степени успешности выполнения процедуры биоуправления по динамике показателей variability сердечного ритма: суммарная мощность спектра (Total Power – TP, мс<sup>2</sup>) и индекс напряжения регуляторных систем (ИН, усл. ед.). Наши предыдущие исследования [Демин 2012] показали, что направленное произвольное управление вегетативной регуляцией с целью мобилизации функциональных резервов парасимпатической активности у подростков становится обычно возможным после 3-4 сеансов обучения, когда у испытуемых

минимизируется рефлекс на обстановку исследования и устанавливается ассоциативная связь между изменениями графика движения параметров ВСР 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 ВСР, 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 2517 до 4683 мс<sup>2</sup>,  $p < 0,001$ ), при этом индекс напряжения значимо снижался (ИН от 142,8 до 78,3 усл.ед.,  $p < 0,001$ ). Увеличение суммарной мощности спектра ВСР в процессе БОС-тренинга свидетельствует об увеличении синхронизации процессов дыхания и сердечной деятельности, и усилении влияния парасимпатического отдела нервной системы на ритм сердца [Баевский 2001].

В группе лиц с неуспешным БОС-тренингом, в динамике процедуры напротив происходило значимое снижение суммарной мощности спектра и повышение индекса напряжения (ТР от 4881 до 4161 мс<sup>2</sup>,  $p < 0,001$ ; ИН от 90,6 до 149,2 усл.ед.,  $p < 0,001$ ). Фоновые значения показателей ВСР в группе лиц с неуспешным тренингом, могут быть свидетельством относительно большего вагусного влияния на ритм сердца. Можно предположить, 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 [Вейн 2003].

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

При сравнении показателей начального фона (1 этап) и реакции последствия БОС (3 этап) – было отмечено повышение амплитуд и индексов альфа-диапазона у 70-80% обследованных лиц. Изменение их средних значений ( $M \pm SD$ ) выразалось в значимом повышении ( $p < 0,01-0,001$ ) от фона к этапу последствия 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 этап) средние значения амплитудно-частотных характеристик альфа-активности снизились практически к уровням начальных фоновых значений (1 этап) у обеих групп лиц независимо от успешности выполнения процедуры. После завершения процедуры биоуправления и уменьшения парасимпатических влияний на этапе заключительного фона – показатели ВСР стремятся к фоновым значениям, показатели альфа- и  $\beta_1$ -активности также компенсаторно возвращаются к исходным значениям. Этот факт подчёркивает наличие определённых изменений функциональной активности головного мозга, происходящих на предыдущих этапах, обусловленных именно эффектами биоуправления.

Динамика средних значений  $\beta_1$ -активности в целом была сходна изменениям в альфа-диапазоне, более значимые изменения происходили в группе подростков с успешно выполненным сеансом. Повышение  $\beta_1$ -активности у подростков на этапе последствия (3 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 высоко-частотную активность ЭЭГ [Глазкова 1996].

Таблица. Изменение средних значений ( $M \pm SD$ ) амплитуды ( $\mu V$ ) и индекса (%) основных частотных диапазонов ЭЭГ в динамике сеанса биоуправления у подростков (15-16 лет) в зависимости от степени успешности выполнения процедуры

Диапазон	Этап	Успешный сеанс ( $n = 130$ )		Неуспешный сеанс ( $n = 30$ )	
		Амплитуда	Индекс	Амплитуда	Индекс
Тета	1	39,5±15,9	17,6±9,6	41,5±15,0	20,6±10,3
	3	39,3±15,7	17,3±9,6	41,3±15,4	19,7±10,6
	4	38,6±16,5**	16,5±9,3*	39,3±15,4*	19,0±9,8
Альфа	1	77,0±23,0	64,6±15,8	73,6±24,6	61,0±17,1
	3	80,3±25,0***	65,0±16,9	81,3±25,1**	61,8±18,2
	4	77,1±24,9***	62,6±16,4***	74,9±25,6***	59,0±16,8**
Бета-1	1	30,3±10,1	33,9±9,1	31,0±10,4	34,9±9,7
	3	30,8±10,0*	34,1±8,4	31,9±11,4	35,0±8,6
	4	29,4±9,9***	33,8±8,9	30,4±10,7**	33,7±10,0

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

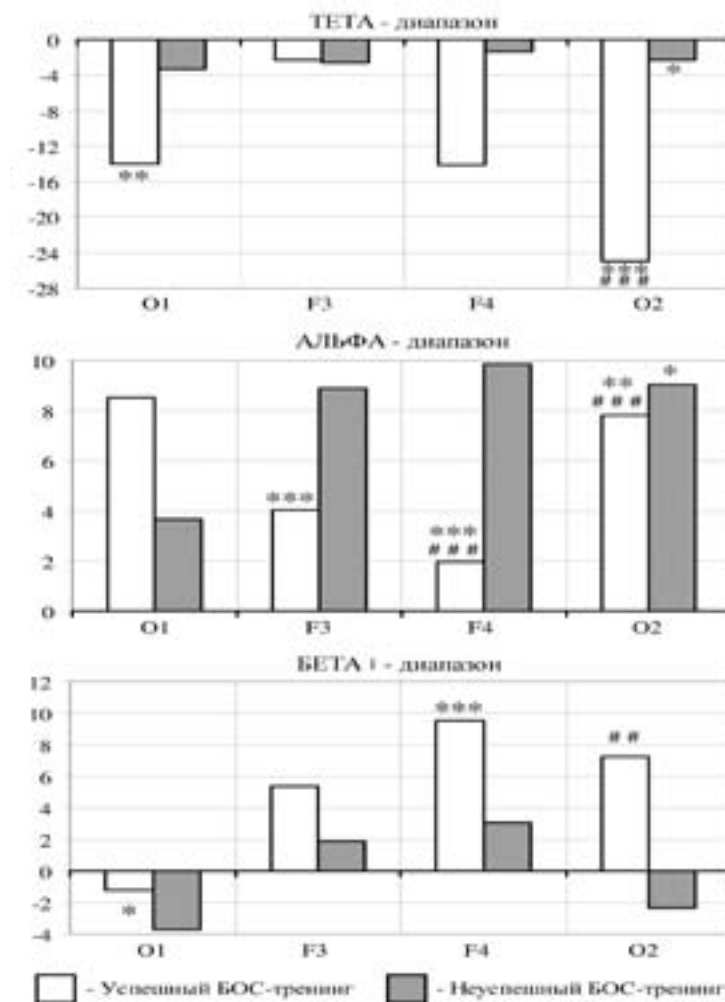


Рис. Прирост/снижение (в процентах) абсолютных значений мощности основных частотных диапазонов ЭЭГ в динамике сеанса биоуправления у подростков (15-16 лет)

Примечание. 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.

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 [Голдберг 2003, Глазкова 1996]. 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 (см. рис.). В большинстве случаев обращает внимание наличие значимой (статистически подтвержденной) правосторонней асимметрии в динамических изменениях рассматриваемых 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 бета<sub>1</sub>-активности у обследованных лиц происходят преимущественно за счёт лобных отделов, на фоне некоторого снижения в затылочных, прирост активности в правой затылочной области отмечен лишь у лиц, успешно выполнивших процедуру.

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 конвексимальной поверхности мозга. При функциональных перестройках в заданных условиях процедуры, происходит формирование нового алгоритма работы ритмозадающих систем за счёт снижения активности глубинных подкорковых структур (те-

та-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. [Кропотов 2010].

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 [Голдберг 2003], при этом эмоционально окрашенная деятельность независимо от её знака вызывает более генерализованные сдвиги ЭЭГ также в правом полушарии [Henriques 2011].

Изменения при БОС-тренинге, усиливающим парасимпатические влияния на ритм сердца, происходят посредством стимуляции парасимпатических центров передних отделов гипоталамуса, а как следствие активируются и лобные отделы коры [Голдберг 2003]. Роль лобных долей в работе с когнитивной новизной была подтверждена в экспериментах по функциональной нейровизуализации [Gold 1996], 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 [Wheat 2010] 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 бета<sub>1</sub>-диапазоне – 32%. Среди подростков неуспешной группы количество усвоений ритмов было выше: в тета-диапазоне – 24%, в альфа-диапазоне – 96%, в бета<sub>1</sub>-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%, в бета<sub>1</sub>-диапазон – 24%. Неуспешная группа: тета-диапазон – 22% случаев, альфа-диапазон – 76%, в бета<sub>1</sub>-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 счёт 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 отчётливо 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 учётом исходного вегетативного тонуса и психоэмоционального состояния испытуемого.

Перспективными видятся и дальнейшие исследования с использованием современных методов функциональной ней-

ровизуализации (ЭЭГ высокого разрешения, магнитоэнцефалография, позитронно-эмиссионная томография) с целью определения активационных зон в структурах головного мозга при различных уровнях успешности биоуправления параметрами ритма сердца.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В. и др. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации) // Вестник аритмологии. 2001. № 24. С. 65–87.
2. Базанова О.М., Балиоз Н.В., Муравлева К.Б., Скорая М.В. Влияние тренинга произвольного увеличения альфа-мощности ЭЭГ на variability сердечного ритма // Физиология человека. 2013. Т. 39, № 1. С. 103–116.
3. Бразовская Н.Г. Адаптивное биоуправление на основе биологической обратной связи по динамике параметров сердечного ритма человека: автореф. дис. ... канд. мед. наук. Томск, 2002. – 23 с.
4. Вегетативные расстройства: клиника, диагностика, лечение / под ред. А.М. Вейна. М.: Медицинское информационное агентство, 2003. – 752 с.
5. Глазкова В.А., Свицерская Н.Е., Королькова Т.А. Пространственная организация корковой электрической активности при произвольной регуляции частоты сердечных сокращений // Физиология человека. 1996. Т. 22, № 5. С. 104–108.
6. Голдберг Э. Управляющий мозг: Лобные доли, лидерство и цивилизация / Пер. с англ. Д. Бугакова. М.: Смысл, 2003. 335 с.
7. Демин Д.Б., Поскотинова Л.В., Кривоногова Е.В. Варианты ЭЭГ-реакций при выполнении курса БОС-тренингов у подростков в зависимости от исходного вегетативного тонуса // Экология человека. 2012. № 3. С. 16–22.
8. Ефимова Е.А. Применение БОС-тренинга в лечении детей с синдромом вегетативной дисфункции: автореф. дис. ... канд. мед. наук. Пятигорск, 2007. – 25 с.
9. Кропотов Ю.Д. Перспективы развития биообратной связи при коррекции психических расстройств (на примере синдрома нарушения внимания с гиперактивностью) // Биоуправление: теория и практика. Новосибирск, 2010. С. 44–55.
10. Полякова А.Г., Матвеева В.В. Использование аппаратного биоуправления в комплексном восстановительном лечении пациентов с психовегетативными расстройствами для профилактики развития артериальной гипертонии // Медицинский альманах. 2011. № 3 (16). С. 64–66.

11. Поскотинова Л.В., Семенов Ю.Н. 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 / Патент 2317771 РФ; Институт физиологии природных адаптаций УрО РАН; опублик. 27.02.2008. Бюл. № 6.
12. Поскотинова Л.В. Вегетативная регуляция ритма сердца и эндокринный статус молодежи в условиях Европейского Севера России. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – 235 с.
13. Редько Н.Г. Зависимость динамики психовегетативных показателей от темперамента пациентов и особенности организации сеансов биоуправления // Бюллетень сибирской медицины. 2010. № 2. С. 125–128.
14. Сафонов В.А., Тарасова Н.Н. Нервная регуляция дыхания // Физиология человека. 2006. Т. 32, № 4. С. 64–76.
15. Сороко С.И., Трубочев В.В. Нейрофизиологические и психофизиологические основы адаптивного биоуправления. СПб.: ИЭФБ РАН, 2010. – 607 с.
16. Суворов Н.Б. Функциональное биоуправление ритмом сердца человека: адаптивный модуль // Медицинская техника. 2005. № 2. С. 24–27.
17. Andrasic F. Biofeedback in headache: An overview of approaches and evidence // Cleveland Clinic Journal of Medicine. 2010. Vol. 77, Suppl. 3. S. 72–76.
18. Bernardi L., Leuzzi S., Radaelli A. et al. Low frequency spontaneous fluctuations of R-R interval and blood pressure in conscious humans: A baroreceptor of central phenomenon? // Clinical Science. 1994. Vol. 87. P. 647–654.
19. Gold J.M. PET validation of a novel prefrontal task: Delayed response alteration // Neuropsychology. 1996. Vol. 10. P. 3–10.
20. Hallman D.M., Olsson E.M., Von Scheele B. et al. Effects of heart rate variability biofeedback in subjects with stress – related chronic neck pain: a pilot study // Appl. Psychophysiol. Biofeedback. 2011. Vol. 36, N. 2. P. 71–80.
21. Henriques G., Keffer S., Abrahamson C., Horst S. Exploring the effectiveness of a computer – based heart rate variability biofeedback program in reducing anxiety in college students // Appl. Psychophysiol. Biofeedback. 2011. Vol. 36, N. 2. P. 101–112.
22. Kemp A.H., Quintana D.S., Gray M.A. et al. Impact of depression and antidepressant treatment on heart rate variability: a review and meta-analysis // Biol. Psychiatry. 2010. Vol. 67, N. 11. P. 1067.

23. Kotani K., Takamasu K., Tachibana M. Respiratory – phase domain analysis of heart rate variability can accurately estimate cardiac vagal activity during a mental arithmetic task // Methods. Inf. Med. 2007. Vol. 46, N. 3. P. 376–385.
24. Lehrer P.M., Vaschillo E., Vaschillo B. et al. Heart Rate Variability Biofeedback Increases Baroreflex Gain and Peak Expiratory Flow // Psychosomatic Medicine. 2003. Vol. 65. P. 796–805.
25. Lehrer P.M., Vaschillo E., Vaschillo B. et al. Biofeedback Treatment for Asthma // Chest. 2004. Vol. 126. P. 352–361.
26. Nada P.J. Heart rate variability in the assessment and biofeedback training of common mental health problems in children // Med. Arh. 2009. Vol. 63, N. 5. P. 244–248.
27. Reynard A., Gevirtz R., Berlow R. et al. Heart rate variability as a marker of self-regulation // Appl. Psychophysiol. Biofeedback. 2011. Vol. 36, N. 3. P. 209.
28. Rice K.M., Blanchard E.B., Purcell M. Biofeedback treatments of Generalized Anxiety Disorder: Preliminary results // Biofeedback and Self-Regulation. 1993. Vol. 18, N. 2. P. 93.
29. Siepmann M., Aykac V., Unterdorfer J. et al. A pilot study on the effects of heart rate variability biofeedback in patients with depression and in healthy subjects // Appl. Psychophysiol. Biofeedback. 2008. Vol. 33, N. 4. P. 195–201.
30. Sigafus P. Heart Rate Variability Biofeedback and Mindfulness: A Functional Neuroimaging Study // Cleveland Clinic Journal of Medicine. 2011. Vol. 78, Suppl. 1. S. 102.
31. Vaschillo E., Lehrer P., Rishé N., Konstantinov M. Heart Rate Variability Biofeedback as a Method for Assessing Baroreflex Function: A Preliminary Study of Resonance in the Cardiovascular System // Appl. Psychophysiol. Biofeedback. 2002. Vol. 27, N. 1. P. 1–27.
32. Wheat A.L., Larkin K.T. Biofeedback of heart rate variability and related physiology: a critical review // Appl. Psychophysiol. Biofeedback. 2010. Vol. 35, N. 3. P. 229–242.
33. Yu X., Zhang J., Xie D. et al. Relationship between scalp potential and autonomic nervous activity during a mental arithmetic task // Auton. Neurosci. 2009. Vol. 146, N. 1. P. 81.
34. Zucker T., Samuelson K., Muench F. et al. The effects of respiratory sinus arrhythmia biofeedback on heart rate variability and posttraumatic stress disorder symptoms: A pilot study // Appl. Psychophysiol. Biofeedback. 2009. Vol. 34. P. 135–143.