

УДК 537.8:612.822.3

К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭМП, МОДУЛИРОВАННЫХ ЧАСТОТАМИ В ДИАПАЗОНЕ РИТМОВ ЭЭГ

© 2021 г. С. Н. Лукьянова^{1,*}, Ю. Г. Григорьев¹, В. С. Степанов¹

¹ Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва, Россия

*E-mail: lukyanovash@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.06.2020 г.

После доработки 28.10.2020 г.

Принята к публикации 11.11.2020 г.

Работа представляет сравнительную оценку эффективности ЭМП 1 ГГц (ППЭ в импульсе 200 мкВт/см^2), модулированных различными способами в диапазоне ритмов ЭЭГ. В экспериментах на кроликах и исследованиях с участием испытуемых-добровольцев изучали эффективность режимов модуляции: меандр, обратная связь от волн ЭЭГ непосредственно облучаемого (синхронно) или другого (используя запись ЭЭГ, не синхронно) объектов, плавное изменение частот (сви́пирование) в пределах избранного диапазона. Обосновано, что в основе усиления мощности ЭЭГ диапазона, соответствующего частоте модуляции ЭМП, лежит механизм навязывания ритмов, как и в случае известных стимулов (свет, звук и др.). В отличие от указанных раздражителей ЭМП может быстрее и более интенсивно привести к желаемому результату. Наиболее эффективными были способы модуляции в виде синхронной обратной связи от волн ЭЭГ и режим сви́пирования частот в пределах избранного диапазона. Эксперименты на кроликах и исследования с участием испытуемых-добровольцев показали однозначные результаты.

Ключевые слова: ЭМП 1 ГГц, ППЭ_{имп.} 200 мкВт/см^2 , различные способы модуляции в диапазоне ритмов ЭЭГ, эксперименты на кроликах, исследования с участием испытуемых-добровольцев, сравнительная оценка

DOI: 10.31857/S0869803121010082

Хорошо известно, что различные стимулы, представляемые с частотой ритмов ЭЭГ, могут усилить содержание соответствующего диапазона в спектре и, тем самым, изменить функциональное состояние мозга. На этом основании разработан ряд физиотерапевтических процедур, корректирующих функциональную активность центральной нервной системы (ЦНС) и других систем организма [1–3]. Начало этим работам было положено известными академиками М.Н. Ливановым [4, 5] и Н.П. Бехтеревой [6, 7], которые доказали эффективность использования широко применяемых стимулов (свет, звук, электрический ток) в режиме обратной связи от волн частотных диапазонов ЭЭГ.

Позднее в современную физиотерапевтическую практику вошли магнитные и электромагнитные поля [8–10]. Описаны и процедуры биоуправляемой магнитотерапии, которые позволяют автоматически изменять параметры воздействующих магнитных полей в зависимости от электрических характеристик тканей пациента [11, 12].

В литературе приведены фундаментальные физические и физиологические данные о большей эффективности слабых воздействий ЭМП,

используемых в модулированном режиме, чем непрерывном [13–17]. Многочисленные исследования со слабыми электромагнитными полями показали, что это — полноправные раздражители для ЦНС, которые подчиняются законам физиологии о биологической значимости и путях ее модификации [17]. Сравнение со светом, звуком (в сопоставимых условиях) свидетельствует о возможности большей эффективности электромагнитного поля (ЭМП).

Приведенные данные поддерживают целесообразность применения слабых электромагнитных импульсов в процедуре коррекции функционального состояния ЦНС. Однако вопрос о наиболее эффективном способе модуляции ЭМП, приводящей к провокации соответствующих ритмов ЭЭГ, требует накопления экспериментальных данных для понимания и совершенствования их практического использования. Настоящее исследование имеет непосредственное отношение к этому вопросу, представляя результаты сравнительной оценки эффективности слабых ЭМП с различными способами амплитудной модуляции в диапазоне ритмов электроэнцефалографии (ЭЭГ).

Таблица 1. Количественная характеристика исследований биоэффектов ЭМП с различными формами амплитудной модуляции в диапазоне ритмов ЭЭГ**Table 1.** Quantitative characterization of studies of bio-effects of electromagnetic fields with various forms of amplitude modulation in the range of EEG rhythms

Серия		Параметры СВЧЭМП 1 ГГц					Число		
№ п/п	условное обозначение	характеристика импульса				средняя ППЭ, мкВт/см ²	кроликов (5-минутное воздействие)	испытателей (2-минутное воздействие)	
		длительность, мс	скважность	частота, Гц	ППЭ, мкВт/см ²				
1	1 Гц меандр	500	1	1	200	100	12 (122)		
2	$\delta_{\text{синх.}}$	20	0.02–0.06	1–3	200	4–12	13 (130)		
3	$\delta_{\text{н/синх.}}$	- «-« -	- «- -	- «- « -	- «-« -«-	- «- «- « -	14 (141)		
4	3 → 1	- «- - «-	- «- «-	- «- « -	- «- -« -	- «- «- -«	12 (124)		
5	$\tau_{\text{синх.}}$	20	0.08–0.16	4–8	200	16–32	10 (108)	12 (105)	
6	$\tau_{\text{н/синх.}}$	«- «- «	«- -«- -	«- -«- «-	-«- -«- -«-	-«- «- -«	10 (100)	12 (121)	
7	$\alpha_{\text{синх.}}$	20	0.18–0.26	9–13	200	36–52	10 (115)	12 (123)	
8	$\alpha_{\text{н/синх.}}$	«- - -«-	-«- -«-	- «- - «-	«- -«- -«-	-«- -«- -«-	10 (104)	12 (105)	
9	13 → 9	«- - -«-	-«- -«-	«- -«- -	-«- -«- -	«- - -«- -	8 (91)	12 (126)	
10	K1	ложное облучение кроликов						15 (121)	
11	K2	ложное облучение испытуемых						12 (129)	

Примечание. Условное обозначение серий: $\delta_{\text{синх.}}$, $\tau_{\text{синх.}}$, $\alpha_{\text{синх.}}$ и $\delta_{\text{н/синх.}}$, $\alpha_{\text{н/синх.}}$, $\tau_{\text{н/синх.}}$ — обратная связь от волн ЭЭГ диапазонов (δ , τ , α) синхронно и не синхронно соответственно; 3 → 1 и 13 → 9 — плавное изменение частот (сви́пирование) в δ и α -диапазонах ЭЭГ; K1, K2 — контроли с ложным включением поля с полным сохранением всей остальной процедуры исследования; «- - -«- — те же показатели, что и в ряду выше.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Проведены эксперименты на 15 кроликах (здоровые особи породы Шиншилла, весом 2 кг) и исследования с участием 12 испытуемых-добровольцев (практически здоровые мужчины в возрасте 30–40 лет). Общая количественная характеристика работы представлена в табл. 1.

Выполнено девять серий с СВЧ-облучением в условиях различных форм амплитудной модуляции в диапазоне ритмов ЭЭГ и две серии с ложным включением поля (№ 10, 11). Все девять серий с облучением были проведены в экспериментах на кроликах, а последние пять (№ 5–9) — и в исследованиях с участием испытуемых-добровольцев. Одни и те же кролики и испытуемые принимали участие в различных сериях с интервалом 1–2 нед. За одно исследование каждому объекту

предъявляли по 10–12 2- или 5-минутных воздействий ЭМП с различными интервалами.

Условные обозначения серий в табл. 1 отражают различные способы амплитудной модуляции ЭМП СВЧ диапазона (1 ГГц). Все они характеризуются единой плотностью потока энергии (ППЭ) в импульсе (200 мкВт/см²), но различной частотой следования импульсов, способом их предъявления и различной ППЭ в среднем. Используемые частоты находятся в пределах диапазонов ЭЭГ, и ожидаемая реакция сводится к провокации (усилению) соответствующих ритмов в суммарной биоэлектрической активности головного мозга. Сравнивали эффективность способов модуляции, формируемых в результате режимов: меандр (1 Гц меандр); обратная связь от волн различных диапазонов ЭЭГ (δ , τ , α) непосредственно облучаемого или другого (используя запись

ЭЭГ) объектов; плавное изменение частот (свипирование) за 0.5 мин в пределах τ или α -диапазонов.

Источником СВЧ ЭМП с несущей частотой 1 ГГц служил отечественный генератор Г4-121 (Россия). Облучение осуществляли в специально оборудованной камере, неоднократно нами описанной [17]. Облучению подвергали, главным образом, голову объекта, которая находилась в дальней зоне поля антенны, т.е. в области сформированной плоской электромагнитной волны. В каждой серии интенсивность ЭМП контролировали перед началом экспозиции в отсутствие биообъекта с помощью миллитесламетра ТП2-2У (Россия) и широкополосного измерителя NagdaEMR-300 (ФРГ). На уровне головы ППЭ никогда не превышала 200 мкВт/см² ни в среднем, ни в импульсе (табл. 1).

Обратную связь от волн различных диапазонов ЭЭГ осуществляли в полном соответствии с подобными методами, описанными в работах М.Н. Ливанова [4, 5] и Н.П. Бехтеревой [6, 7]. Исключением был только сигнал – импульс СВЧ. Он подавался в падающий фронт волны избранного диапазона частот и по длительности составлял 20 мс (табл. 1), что позволяло ему не выходить за пределы волны в каждом из анализируемых частотных диапазонов ЭЭГ. Имеющаяся программа анализа спектров ЭЭГ позволяла выделить из суммарного ЭЭГ-сигнала любой частотный диапазон, а синхронизатор – обеспечить попадание СВЧ-импульса в падающий фронт волны избранного диапазона.

Проведение исследований осуществляли с соблюдением необходимых этических норм и правил, описанных в ряде соответствующих документов: Правила лабораторной практики Хельсинкской декларации (2000); Правила Европейской Конвенции ETS 123; Нормы обращения с животными на основе стандартных операционных процедур, принятых в ФГБНУ “НИИ фармакологии им. Закусова” [18]. Исследования с участием добровольцев были полной копией предварительно проведенных экспериментов на кроликах. Добровольцы проходили медицинское обследование в 6-й клинической больнице ФМБА России и принимали участие в исследованиях в присутствии дежурного врача (сотрудника той же больницы).

Обработка материала сводилась, главным образом, к оценке спектров ЭЭГ областей мозга, от которых велась обратная связь, и соответствующей области противоположного полушария. Это были затылочные области правого и левого полушарий – Ог и Ол соответственно. Запись ЭЭГ производили монополярным способом с ушным индифферентным электродом, используя так называемые безартефактные электроды и провода,

неоднократно описанные в наших работах [17]. Параллельно записывали ЭЭГ и от передних областей мозга (F1 и Fr), а также другие показатели: электромиограмму (ЭМГ), частоту пульса (ЧП) и дыхания (ЧД), используя традиционные методы. Статистическую оценку результатов производили при помощи компьютерной программы Statistika с привлечением параметрического (критерий Стьюдента) и непараметрического (χ^2) критериев.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Комплекс проведенных исследований позволил сравнить биоэффекты ЭМП 1 ГГц с различными способами амплитудной модуляции в пределах ритмов ЭЭГ за период коротких (2–5 мин) и более длительных (10 воздействий по 2–5 мин с различными интервалами) экспозиций. Способ модуляции ЭМП-сигнала в режиме синхронной обратной связи от волн ЭЭГ (облучаемого объекта) был наиболее эффективным. В данном случае даже на одно короткое действие ЭМП можно наблюдать провокацию (усиление) избранного диапазона частот как визуально, так и при спектральной оценке (рис. 1, рис. 2).

Рисунок 1 демонстрирует визуально наблюдаемую картину ЭЭГ кролика в период 5-минутного СВЧ-облучения в режиме синхронной обратной связи от волн δ -диапазона. Показано: запись от различных областей коры, выделенный δ -диапазон из ЭЭГ затылочной области справа (Ог), работа синхронизатора и заметное усиление данных частот в Ог в период 5-минутной экспозиции ЭМП. При этом в других ЭЭГ отведениях подобной картины не наблюдалось. Многочисленные эксперименты на кроликах с обратной связью от волн различных частотных диапазонов ЭЭГ (δ , τ , α) непосредственно облучаемого объекта (соответственно, серии – $\delta_{\text{синх.}}$, $\tau_{\text{синх.}}$, $\alpha_{\text{синх.}}$) статистически обосновали этот результат.

На рис. 2 приведена сравнительная оценка спектров ЭЭГ затылочных областей правого и левого полушарий (Ог, Ол соответственно) непосредственно до и в период 5-минутной экспозиции. Однократная короткая экспозиция вызывала статистически значимое усиление только того диапазона частот, от которого велась обратная связь. Показано, что кратковременное ЭМП воздействие в режиме синхронной обратной связи от Ог в случае диапазонов δ и δ вызывает статистически значимые усиления соответствующих диапазонов только в избранной области, тогда как провокация τ -частот находит отражение, не только в Ог, но и в Ол. Это различие можно объяснить различием в связях между структурами, которые обеспечивают формирование соответствующего корково-подкоркового взаимодействия [19–21]. Величина усиления диапазона, соответствующе-

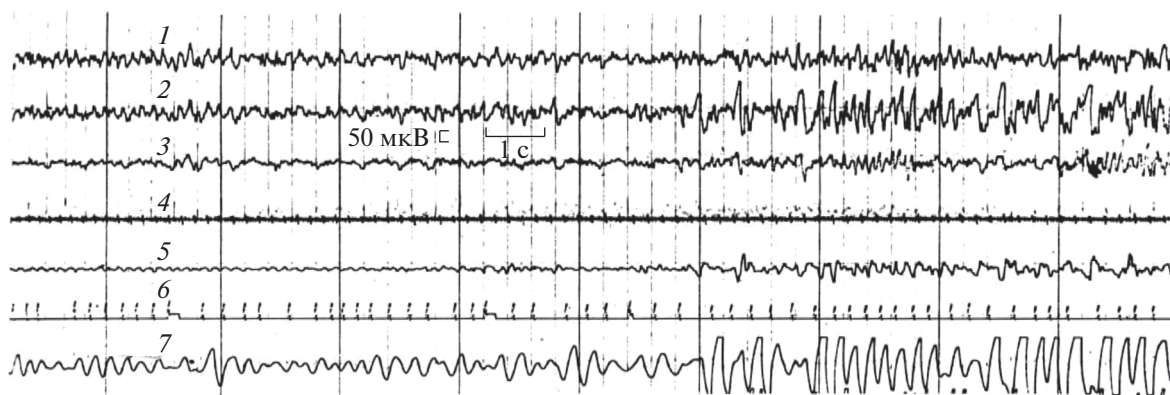


Рис. 1. Пример оригинальной записи в период 5-минутной экспозиции ЭМП с усилением δ -активности в ЭЭГ зрительной области правого полушария, синхронно с которой предъявляли СВЧ импульсы в серии " $\delta_{\text{синх.}}$ ".
Примечание. 1, 2 – ЭЭГ зрительной области левого (ОЛ), правого (ОР) полушарий соответственно; 3 – ЭЭГ сенсомоторной области левого полушария; 4 – импульс; 5 – биполярная запись ОР-ОЛ; 6 – отметка работы синхронизатора; 7 – волны дельта диапазона, выделенного из ЭЭГ ОР.

Fig. 1. Example of an original recording during the 5 min exposure period of EMF with amplification of delta activity in the EEG of the visual region of the right hemisphere, simultaneously with which microwave pulses were presented in the " $\delta_{\text{synch.}}$ ".
Note. 1, 2 – EEG of the visual region of the left (OL), right (OR) hemispheres, respectively; 3 – EEG of the sensorimotor region of the left hemisphere; 4 – pulse; 5 – bipolar recording of OR-OL; 6 – mark operation of the synchronizer; 7 – wave delta range isolated from EEG OR.

го модуляции, составляла 15–30%, что статистически значимо относительно фона, но не выходит за пределы нормальных характеристик ЭЭГ. При оценке по группе исследований (n – в табл. 1) такой эффект наблюдали в 60–80% случаев ($p < 0.05$ по χ^2).

Повторение данных воздействий с меняющимися интервалами 5–15 мин способствовало кумуляции эффектов, что усиливало выраженность и процент соответствующих ЭЭГ изменений. Сравнение подобных результатов серии " $\tau_{\text{синх.}}$ " с ответами на вспышки света пороговой величины (для ЭЭГ отражения), предъявляемые с фиксированной частотой 4 Гц (из того же диапазона), показало явное преимущество действия ЭМП (рис. 3). При повторении коротких экспозиций света наличие слабого отклика имело место только в момент действия вспышек, тогда как на ЭМП вызванная реакция наблюдалась и после его выключения, приобретая (в условиях кумуляции эффектов) лавинообразный характер. Индивидуальные особенности животных находят отражение в скорости и интенсивности данных проявлений (на рис. 3, б, в, г – реакции различных кроликов).

Важно отметить, что вышеописанные яркие изменения на модулированные электромагнитные воздействия наблюдали только в случаях синхронной обратной связи, т.е. непосредственно от волн облучаемого объекта (рис. 4). Подобные изменения не вызывали такие способы соответствующей модуляции, как меандр или обратная связь от волн ЭЭГ другого объекта, используя ЭЭГ запись. Соответствующая сравнительная ха-

рактеристика представлена на диаграмме рис. 4, в виде сопоставления процента реакций на ЭМП в период кратковременных облучений и сохранения данных изменений спустя 15 мин после их сеанса (10 воздействий по 5 мин). По группе исследований наибольший процент реакций наблюдали в серии с синхронной обратной связью, что сохранялось и спустя 15 мин после воздействий. В меньшем проценте случаев сходные реакции наблюдали и в серии с плавным изменением частот (свипирование 3 Гц \rightarrow 1 Гц за 0.5 мин). Статистически значимое различие режимов $\delta_{\text{синх.}}$ и 3 \rightarrow 1 наблюдалось только через 15 мин после сеанса воздействий. Оба эти режима ЭМП были более эффективны ($p < 0.05$ по χ^2) относительно меандра и несинхронной обратной связи. Последние, хотя и были статистически менее значимы, но также показали свою эффективность по сравнению с соответствующим контролем с ложным включением поля.

Результат действия наиболее эффективных режимов ЭМП можно было наблюдать и по другим показателям, характеризующим функциональное состояние организма (табл. 2). Анализ коэффициентов кросскорреляций между ЭЭГ различных областей коры мозга свидетельствует о соотношении данных процессов (степени их сходства или различия), отражая выход изменений за пределы одной области. Как следует из табл. 2, провокации ритмов δ и τ в ЭЭГ ОР по-разному изменяли сходство процессов в различных областях мозга. В серии " $\delta_{\text{синх.}}$ " оно снижалось, а в случае " $\tau_{\text{синх.}}$ " – увеличивалось. Процент этих изменений был вы-

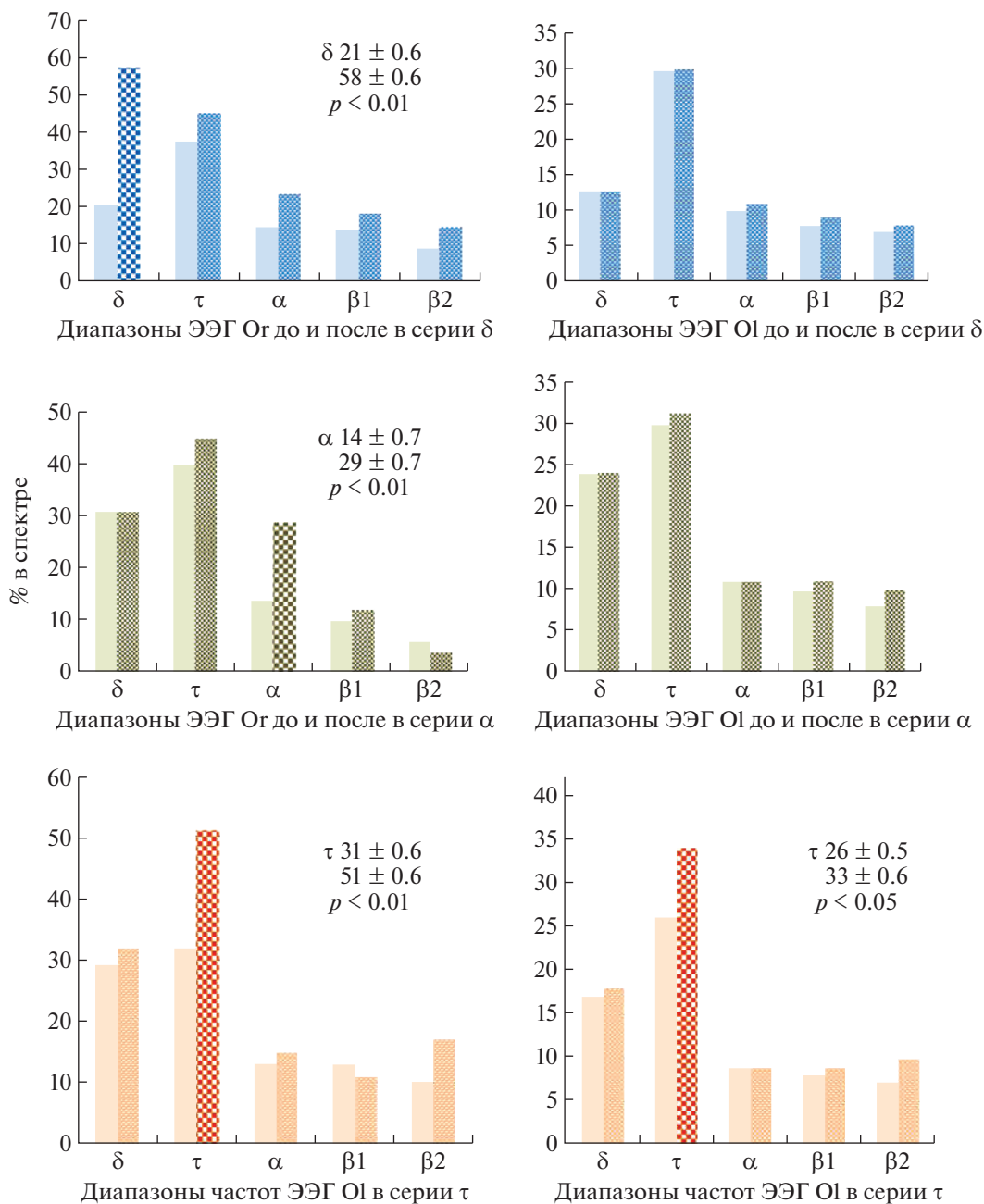


Рис. 2. Сравнительная характеристика спектров ЭЭГ затылочных областей правого и левого полушарий мозга кроликах в экспериментах с 5 мин воздействием ЭМП в режиме синхронной обратной связи от волн различных диапазонов ЭЭГ Ог.

Примечание. Количественная характеристика воздействий приведена в табл. 1; отмеченные штриховкой столбики – статистически значимое отличие от периода до.

Fig. 2. Comparative characteristic of the EEG spectra of the occipital regions of the right and left cerebral hemispheres in rabbits in experiments with 5 min exposure to EMF in the mode of synchronous feedback from waves of different EEG ranges of Or. Note. A quantitative characteristic of the impacts is given in table 1; bars marked with hatching are a statistically significant difference from the period before.

ше ($p < 0.05$ по χ^2), относительно серий “ $\delta_{н/синх.}$ ” и “К 1”. В отличие от последних, статистически значимо больше изменений отмечено и по показателям: ЭМГ, ЧП, ЧД – в сериях с синхронной обратной связью. Однако (как следует из табл. 2), различие в направлении изменений, наблюдае-

мое в сериях “ $\delta_{синх.}$ ” и “ $\tau_{синх.}$ ”, в данном случае не нашло отражения. В каждой из этих серий наблюдали только усиление ЭМГ и замедление ЧП и ЧД.

Результаты экспериментов на кроликах никогда не выходили за пределы нормального функционирования ЦНС и организма. Исследования

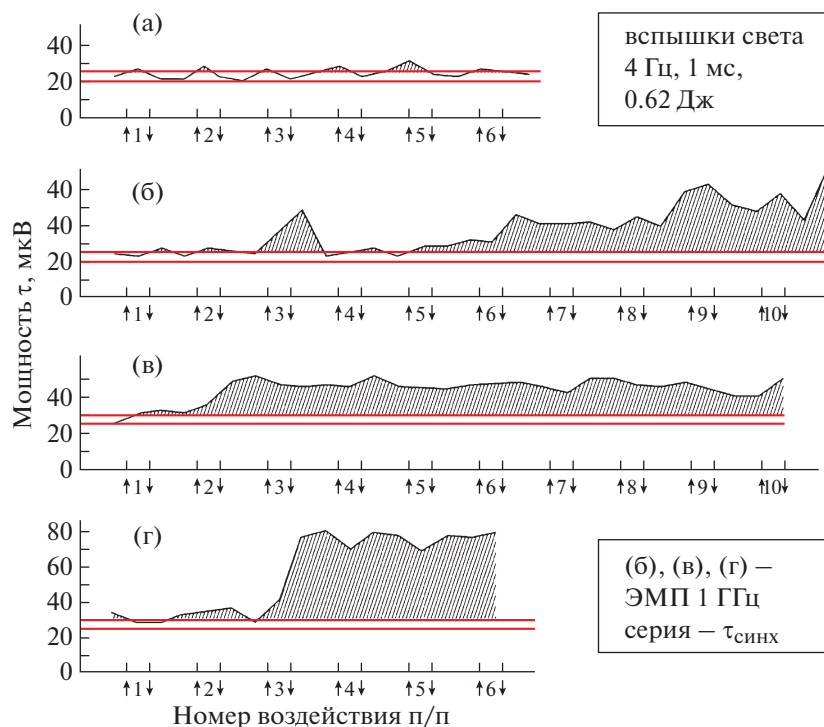


Рис. 3. Сравнительная характеристика динамики содержания тэта диапазона в спектре ЭЭГ Ор при воздействии вспышками света (4 Гц) или СВЧ ЭМП в режиме “ $\tau_{\text{синх}}$ ” у кроликов: а, б — один и тот же кролик; б, в, г — различные кролики.

Fig. 3. A comparative characteristic of the dynamics of the content of the theta range in the EEG spectrum of Or when exposed to flashes of light (4 Hz) or microwave EMF in the “ τ_{sync} ” in rabbits. а, б — the same rabbit; б, с, д — various rabbits.

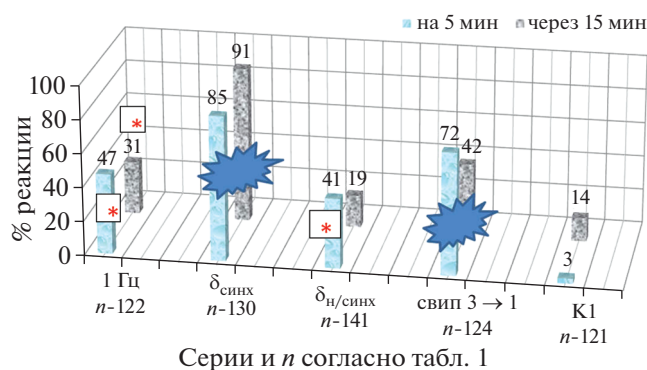


Рис. 4. Сравнительная характеристика эффективности различных способов амплитудной модуляции ЭМП ритмами δ -диапазона ЭЭГ.

Примечание. Реакция — статистически значимое усиление диапазона, соответствующее частоте модуляции, при воздействии относительно фона при $p < 0.05$ по критерию Стьюдента; отмеченные данные достоверно отличаются от контроля (красный цвет) и всех остальных вариантов (синий цвет) при $p < 0.05$ по χ^2 .

Fig. 4. Comparative characteristics of the effectiveness of various methods of amplitude modulation of EMF rhythms of the EEG δ range.

Note. Reaction is a statistically significant range gain corresponding to the modulation frequency when exposed to the background at $p < 0.05$ according to Student's criterion; the noted data significantly differ from other options at $p < 0.05$ in χ^2 .

с участием испытуемых-добровольцев были их точной копией и показали сходные результаты. Данное сопоставление эффектов ЭМП в режимах синхронной и несинхронной обратной связи от волн α и τ -диапазонов ЭЭГ приведено на рис. 5. Как и в случае экспериментов на кроликах, процент реакций (статистически значимых изменений относительно фона) в исследованиях с участием испытуемых в сериях с синхронной обратной связью и режимом свипирования был значительно выше ($p < 0.05$ по χ^2) относительно серий с несинхронной обратной связью и контролем с ложным включением поля. Важно отметить, что феноменология реакций в обоих случаях была однозначной и сводилась к усилению избранных диапазонов ЭЭГ. Тем не менее у кроликов в большем проценте случаев отмечали усиление τ -диапазона, а у испытуемых — α -диапазона, что может быть связано с видовыми особенностями биообъектов [22].

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показывают влияние способа амплитудной модуляции ЭМП на биоэффект. Этот вывод не является новым, однако еще раз подчеркивает необходимость его учета

Таблица 2. Характеристика изменений в различных показателях функционального состояния кролика, после десяти 5-минутных воздействий ЭМП в экспериментах с обратной связью

Table 2. Characterization of changes in various indicators of the functional state of the rabbit after ten 5 min of exposure to EMF in feedback experiments

Серия условное обозначение	% случаев статистически значимых изменений относительно фона						
	ЭМГ усиление	ЧП замедление	ЧД замедление	коэффициент кросс-корреляции между ЭЭГ:			
				Or – Ol	Or – Fr	Or – Fl	Ol – Fl
$\delta_{\text{синх.}}$	63.63	45.45	45.45	54.54 ↓	63.63 ↓	54.54 ↓	63.63 ↓
$t_{\text{синх.}}$	72.72	36.36	36.36	72.72 ↑	63.63 ↑	63.63 ↑	54.54 ↑
$\delta_{\text{н/синх.}}$	9.09	18.18	9.09	0	9.09 ↑	18.18 ↓	9.09 ↑
К 1	9.09	0	0	9.09 ↑	9.09 ↓	9.09 ↓	9.09 ↓

Примечание. Приведены результаты по группе кроликов (11), каждому из которых было дано по десять 5-минутных воздействий; условное обозначение серии приведено в соответствии с табл. 1; стрелки – направление изменения показателя; курсив – статистически значимые изменения по группе кроликов при $p < 0.05$ по χ^2 , относительно серий $\delta_{\text{н/синх.}}$ и К 1.

при разработке режимов слабых электромагнитных воздействий, направленных на модификацию функционального состояния ЦНС. Одним из таких путей является провокация (навязывание) ритмов, соответствующих частоте модуляции. Эксперименты с обратной связью непосредственно от волн диапазонов ЭЭГ облучаемого объекта показывают статистическую значимость такого способа модуляции ЭМП. Значительно менее эффективным является режим меандра с фиксированной частотой (из того или иного диапазона ЭЭГ) модуляции. Его действие сравнимо с влиянием ЭМП в режиме несинхронной обратной связи. В данном случае меньшая эффективность может быть связана с индивидуальными особенностями частотных диапазонов ЭЭГ отдельно каждого животного или человека. В наших ранее описанных исследованиях показана типологическая особенность α -диапазона ЭЭГ у испытуемых-добровольцев [17, 23]. Обосновано, что наличие и последовательность смены частот в конкретном диапазоне ЭЭГ не являются постоянной величиной, свойственной каждому человеку. По этому признаку испытуемые были разделены на четыре группы, каждая из которых реагировала по-разному на то или иное определенное воздействие [23]. Хорошо известно, что на вспышки света или щелчки звука, предъявляемые с конкретной частотой, не все животные или люди реагируют, а если и отвечают, то неоднозначно. На этом основании является очевидной слабая эффективность режимов “1 Гц меандр”, несинхронной обратной связи и большая эффективность режима плавного перебора частот (сви́пирование) в избранном диапазоне ЭЭГ. Эта со-

вокупность исследований обосновывает вывод о том, что набор и строгую последовательность частот в том или ином диапазоне ЭЭГ, свойственную одному объекту, другому “не навязешь”. В этом случае режим модуляции в виде плавного перебора частот (сви́пирования) в избранном диапазоне ЭЭГ является эффективным и наиболее

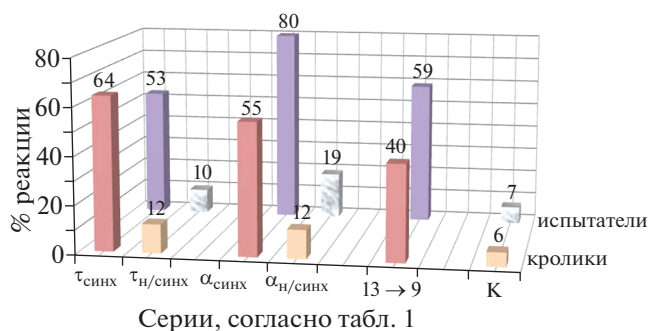


Рис. 5. Сравнительная характеристика процента реакций, соответствующих частоте модуляции ЭМП в исследованиях на кроликах и с участием испытуемых-добровольцев.

Примечание. Более интенсивным цветом выделены статистически значимые отличия по группе исследований ($p < 0.05$ по χ^2) от контроля и несинхронных воздействий; количественная характеристика серий приведена в табл. 1.

Fig. 5. Comparative characteristics of the percentage of reactions, corresponding to the frequency of EMF modulation in studies on rabbits and with the participation of volunteer testers.

Note. Statistically significant differences in the study group ($p < 0.05$ in χ^2) from the control and non-synchronous effects were highlighted in a more intense color; quantitative characteristics of the series are given in Table 1.

лее привлекательным с точки зрения практического использования, как было показано в наших исследованиях [17, 23, 24].

Таким образом, представленные материалы дополняют данные литературы об эффективности слабых модулированных электромагнитных воздействий. Дана (ранее не описанная) сравнительная характеристика различных способов модуляции ЭМП частотами ЭЭГ. Статистически обоснована вероятность провокации в ЭЭГ ритмов, соответствующих частоте модуляции ЭМП с отражением данной реакции в других показателях состояния организма (ЧД, ЧП, ЭМГ). Показана и большая эффективность данных воздействий относительно вспышек света пороговой интенсивности. Важно отметить, что свет и звук, обычно применяемые на практике как функциональная нагрузка, превышают пороговые значения, а представленные в работе слабые ЭМП соответствуют подпороговым раздражителям ЦНС [1, 17]. Практически идентичные результаты получены в экспериментах на кроликах и в исследованиях с участием испытуемых-добровольцев. С практической точки зрения наибольшего внимания заслуживает режим модуляции ЭМП в виде свипирования (плавного изменения) частот в избранном диапазоне ЭЭГ. Полученные данные могут быть учтены при формировании новых режимов модуляции слабых электромагнитных воздействий, используемых в физиотерапевтических процедурах коррекции функционального состояния ЦНС и организма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гафиятуллина Г.Ш., Омельченко В.П., Евтушенко Б.Е., Черникова И.В. Физиотерапия. Учебное пособие. М.: Изд. группа ГЭОТАР Медиа, 2010. 272 с. [Gafiyatullina G.Sh., Omelchenko V.P., Evtushenko B.E., Chernikova I.V. Physiotherapy. Tutorial. Moscow: GEOTAR Media Publ. Group, 2010. 272 p. (In Russian)]
2. Малютина И.В. Комплексы лечебных программ для приборов серии “биомедис” и “биомедис м”. Методическое пособие. М.: “БИОМЕДИС”, 2011. [Malyutina I.V. Complexes of treatment programs for devices of the Biomedis and Biomedis m series. Methodological manual. Moscow: BIOMEDIS, 2011. (In Russian)]
3. Улащик В.С. Физиотерапия. Новейшие методы и технологии (справочное пособие). Минск: Книжный дом “Белоруска навука”, 2013. 448 с. [Ulashchik V.S. Physiotherapy. The latest methods and technologies (reference manual). Minsk: Book House “Belorusska Navuka”, 2013. 448 p. (In Russian)]
4. Ливанов М.Н. Пространственная организация процессов головного мозга. М.: Наука, 1972. 181 с. [Livanov M.N. Spatial organization of brain processes. M.: Science, 1972. 181 p. (In Russian)]
5. Ливанов М.Н. Пространственно-временная организация процессов и системная деятельность головного мозга / Под ред. П.В. Симонова. М.: Наука, 1989. 400 с. [Livanov M.N. Spatial-temporal organization of processes and systemic activity of the brain / Ed. P.V. Simonova. M.: Science, 1989. 400 p. (In Russian)]
6. Бехтерева Н.П., Камборова Д.К., Поздеев В.К. Устойчивое патологическое состояние при болезнях мозга. Л.: Медицина, 1978. 238 с. [Bechtereva N.P., Kamborova D.K., Pozdeev V.K. Steady pathological condition in diseases of the brain. L.: Medicine, 1978. 238 p. (In Russian)]
7. Бехтерева Н.П. Здоровый и больной мозг человека / Под ред. С.М. Медведева. СПб.: Изд-во АСТ “Медицина”, 2010. 400 с. [Bechtereva N.P. Healthy and diseased human brain / Ed. S.M. Medvedev. SPb.: Publ. House of AST “Medicine”, 2010. 400 p. (In Russian)]
8. Самосюк И.З., Чухраев Н.В., Шимков Г.Е., Бицон А.В. Терапия электромагнитными волнами миллиметрового диапазона (КВЧ-терапия, МРТ, ИВТ). Киев: Всеукр. ассоциация физиотерапевтов и курортологов, 1999. Вып. 1.2. 199 с. [Samosyuk I.Z., Chukhraev N.V., Shimkov G.E., Bitson A.V. Therapy with millimeter-wave electromagnetic waves (EHF-therapy, MRI, IWT). Kiev: All-Ukrainian Association of physiotherapists and balneologists. 1999. Issue 1.2. 199 p. (In Russian)]
9. Улащик В.С., Плетнев А.С., Войченко Н.В., Плетнев С.В. Магнитотерапия. Теоретические основы и практическое применение. Минск: Изд. дом “Белоруска навука”, 2015. 377 с. [Ulashchik V.S., Pletnev A.S., Voichenko N.V., Pletnev S.V. Magnetotherapy. Theoretical foundations and practical application. Minsk: Publ. house “Belarusian Navuka”, 2015. 377 p. (In Russian)]
10. Штарк М.Б., Скок А.Б. Применение электроэнцефалографического биоуправления в клинической практике // Биоуправление-3: Теория и практика. Разд. 4. М.: 2004. С. 131–139. [Stark M.B., Skok A.B. The use of electroencephalographic biocontrol in clinical practice. M., 2004. P. 131–139. (In Russian)]
11. Коновалов В.Ф., Буренко Б.Н., Кожжакару А.Ф. Биорезонансная электроимпульсная терапия с помощью ЭМП // Мат. конф. “Проблемы электромагнитной безопасности человека”. Фундаментальные и прикладные исследования. М., 1996. С. 128–129. [Konovalov V.F., Burenko B.N., Kozhakar A.F. EMR bioresonance electropulse therapy // Materials of the conference “Problems of human electromagnetic safety”. Fundamental and applied research. M., 1996. P. 128–129. (In Russian)]
12. Лобкаева Е.П., Девяткова Н.С., Комиссаров В.И. Обоснование подбора параметров импульсного МП для получения заданного биологического эффекта // Сб. докл. 1-й междунар. конф. “Человек и

- ЭМП". Саров, 2003. С. 8–19. [Lobkaeva E.P., Devyatkova N.S., Komissarov V.I. Justification of the selection of parameters of a pulsed magnetic field to obtain a given biological effect // Sat. reports of the 1st international conference "Man and EMF". Sarov, 2003. P. 8–19. (In Russian)]
13. Григорьев Ю.Г. Роль модуляции в биологическом действии ЭМП // Радиационная биология. Радиоэкология. 1996. Т. 36. № 5. С. 659–670. [Grigoryev Yu.G. The role of modulation in the biological effect of EMF // Radiat. Biology. Radioecology. 1996. V. 36. № 5. P. 659–670. (In Russian)]
 14. Штемберг А.С., Узбеков М.Г., Шихов С.Н. и др. Видовые, возрастные особенности и некоторые нейрохимические корреляты спонтанного поведения животных после воздействия электромагнитных полей сверхнизкой интенсивности // Журн. высш. нервн. деят.-ти. 2000. Т. 50. № 4. С. 703–714. [Shtemberg A.S., Uzbekov M.G., Shikhov S.N. et al. Species, age-related features and some neurochemical correlates of spontaneous behavior of animals after exposure to electromagnetic fields of ultra-low intensity // ZhVND. 2000. T. 50. № 4. P. 703–714. (In Russian)]
 15. Воронцов И.В., Жилыев Е.Г., Карпов В.Н., Ушаков И.Б. Малые радиационные воздействия и здоровье человека (очерки системного анализа). М., 2002. 256 с. [Vorontsov I.V., Zhilyaev E.G., Karpov V.N., Ushakov I.B. Small radiation exposure and human health (essays on system analysis). Moscow, 2002. 256 p. (In Russian)]
 16. Жаворонков Л.П., Дубовик Б.В., Павлова Л.Н., Посадская В.М. Экспериментальная оценка реакций ЦНС на воздействие импульсных ЭМИ низкой интенсивности // Ежегодник РНКЗНИ. М., 2011. С. 35–51. [Zavoronkov L.P., Dubovik B.V., Pavlova L.N., Posadskaya V.M. Experimental evaluation of central nervous system reactions to low-intensity pulsed electromagnetic radiation // Yearbook RNZNI. M., 2011. P. 35–51. (In Russian)]
 17. Лукьянова С.Н. Электромагнитное поле СВЧ диапазона нетепловой интенсивности как раздражитель для центральной нервной системы. М.: ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2015. 200 с. [Lukyanova S.N. The electromagnetic field of the microwave range of non-thermal intensity as an irritant for the central nervous system. M.: FMBC them. A.I. Burnazyan FMBA of Russia, 2015. 200 p. (In Russian)]
 18. Руководство по проведению доклинических исследований лекарственных средств. М.: Изд. ФГБУ "НЦЭСМП" Минздравсоцразвития России, 2012. [Guidelines for preclinical studies of drugs. M.: FSBI "NTsESMP" of the Ministry of Health and Social Development of Russia, 2012. (In Russian)]
 19. Виноградова О.С. Гиппокамп и память. М.: Наука, 1975. 333 с. [Vinogradova O.S. Hippocampus and memory. M.: "Science", 1975. 333 p. (In Russian)]
 20. Klimesch W., Sauseng P., Hanslmayr S. EEG alpha oscillations: The inhibition-timing hypothesis // Brain Res. Rev. 2007. V. 53. P. 63–88.
 21. Барк Е.Д. Исследование альфа-ритма как распространяющегося волнового процесса: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2006. 142 с. [Bark E.D. Investigation of alpha rhythm as a propagating wave process: Cand. dis. M., 2006. 142 p. (In Russian)]
 22. Батуев А.С. Физиология высшей нервной деятельности и сенсорных систем: Учебник. 3-е изд., испр. и доп. СПб.: Питер, 2009. 317 с. [Batuev A.S. Physiology of higher nervous activity and sensory systems: textbook. 3rd ed., Rev. and add. SPb.: Peter, 2009. 317 p. (In Russian)]
 23. Лукьянова С.Н., Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А., Меркулов А.В. Зависимость биоэффектов ЭМП РЧ нетепловой интенсивности от типологических особенностей ЭЭГ человека // Радиационная биология. Радиоэкология. 2010. Т. 50. № 6. С. 712–722. [Lukyanova S.N., Grigoryev Yu.G., Grigoryev O.A., Merkulov A.V. Dependence of bioeffects of EMF RF of non-thermal intensity on typological features of human EEG // Radiat. biology. Radioecology. 2010. V. 50. № 6. P. 712–722. (In Russian)]
 24. Лукьянова С.Н., Уйба В.В. Терапия экспериментального невроза у кроликов с помощью электромагнитного поля в сравнении с факторами электрической и химической природы // Мед. радиология и радиац. безопасность. 2017. № 3. С. 5–12. [Lukyanova S.N., Uyba V.V. Therapy of experimental neurosis in rabbits using an electromagnetic field in comparison with factors of an electric and chemical nature // Med. Radiology and Radiat. Safety. 2017. № 3. P. 5–12. (In Russian)]

To the Question of Efficiency of EMF Modulated by Frequencies in the Range of EEG Rhythms

S. N. Lukyanova^{a, #}, Yu. G. Grigoryev^a, and V. S. Stepanov^a

^a Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

[#]E-mail: lukyanovasn@yandex.ru

The work presents a comparative assessment of the efficiency of 1 GHz EMF (pulse energy flux density 200 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$), modulated in various ways in the range of EEG rhythms. In experiments on rabbits and studies

involving volunteer testers, the effectiveness of modulation modes was studied: meander; feedback from EEG waves of directly irradiated (synchronously) or other (using EEG recording, not synchronously) objects; smooth frequency change (sweep) within the selected range. It is substantiated that the basis for amplifying the power of the EEG range corresponding to the frequency of EMF modulation is the mechanism of imposing rhythms, as in the case of known stimuli (light, sound, etc.). Unlike these stimuli, EMF can faster and more intensively lead to the desired result. The most effective were modulation methods in the form of synchronous feedback from EEG waves and a frequency sweep mode within the selected range. Experiments on rabbits and studies involving volunteer testers have shown unequivocal results.

Keywords: 1 GHz EMF, pulse energy flux density $200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, modulation methods in the range of EEG rhythms, rabbit experiments, studies with volunteer testers, comparative evaluation of effectiveness