

## НЕЙРОЭФФЕКТЫ ЭМП СВЧ ДИАПАЗОНА НЕТЕПЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ И КОРОТКОЙ ЭКСПОЗИЦИИ

© 2024 г. С.Н. Лукьянова<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва, Россия

\*E-mail: lukyanovashn@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.06.2023 г.

После доработки 25.01.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Представлено обобщение и анализ результатов многолетних исследований автором нейроэффектов слабых электромагнитных воздействий с целью ответа на вопросы: существуют ли они, каковы их феноменология, нейрофизиологический механизм, пути модификации? Используя электрофизиологические и поведенческие методы исследования, показана линия эффектов слабых ЭМП от нейрона к отделу мозга, ЦНС (как системе) и организму. В экспериментах на животных и исследованиях с участием испытуемых-добровольцев статистически обоснована их феноменология, зависимость от параметров, режима модуляции, организации ЭМП. Сделан вывод, что слабые ЭМП – это полноценный раздражитель ЦНС, который в своем влиянии на организм подчиняется законам физиологии и биологической значимости ответной реакции, путях ее модификации и адаптационных механизмах, что целесообразно учитывать и использовать в условиях практического применения источников ЭМП.

**Ключевые слова:** микроволны, слабое воздействие, кролики, испытуемые, реакция, нейрон, отдел мозга, ЦНС, организм, полипараметрическая зависимость

**DOI:** 10.31857/S0869803124030026, **EDN:** MBQOJM

До настоящего времени в литературе нет однозначного мнения о нейроэффектах слабых электромагнитных воздействий (ЭМВ). Сохраняются вопросы о самом факте их существования, механизмах возникновения, феноменологии, зависимости от комплекса показателей. Соответствующие дискуссии ведутся давно и находят отражение в литературе. Их обобщение, анализ и пути развития (именно нейроэффектов) неоднократно описаны и в трудах Ю.А. Холодова – основоположника данного направления исследований. В своих монографиях он доказывал существование подобных ответов ЦНС, привлекая данные физиков, нейрофизиологов, морфологов, физиотерапевтов [1, 2]. Его представления о слабых ПМП и ЭМП как раздражителях ЦНС, о превалировании непосредственного действия на биологическую ткань, зависимости эффектов от параметров поля и состояния организма, действительно, являются основополагающими. Неоднозначность их отражения в последующих исследованиях других авторов связана с разнообразием условий и методов изучения данного направления. В большинстве случаев

это определялось отсутствием необходимого аппаратного и материального обеспечения экспериментальных исследований или их детального описания в опубликованных работах. Эта “разношерстность” материала не давала возможности представить единую базовую характеристику соответствующих нейроэффектов как научно обоснованной отправной точки.

Развитие техники дало возможность создать необходимые условия для корректного проведения таких работ, повысить разнообразие методик исследования с учетом статистической оценки. Одни из экспериментальных камер с соответствующим научно-техническим обеспечением были созданы в Институте биофизики МЗ СССР под руководством акад. Л.А. Ильина и проф. Ю.Г. Григорьева в 1976 г. В таких условиях появилась возможность продолжить и развить соответствующие исследования. В результате в единых корректных условиях *in vivo* с возможным анализом реакций ЦНС на различных уровнях ее функционирования выполнен большой объем экспериментов на животных и исследований с участием испытуемых-добровольцев.

Показана линия реакций от нейрона к отделу мозга, ЦНС (как системе) и организму, что имеет отношение к актуальному вопросу — формирование единого подхода к анализу данных эффектов с целью их оценки, систематизации, а также прогнозирования возможных вариантов новых воздействий. В основе — доказательство правомерности отношения к слабому ЭМП как раздражителю ЦНС, что позволило, используя неспецифические законы физиологии, представить пути модификации соответствующих эффектов. Совокупность таких исследований в работах других авторов (отечественных и зарубежных) не представлена. Полностью этот большой объем материала исследований изложен в статьях и двух монографиях автора [3, 4]. Настоящая работа отражает основные положения, которые обосновывают сам факт существования и представляют фундаментальную характеристику нейроэффектов слабых электромагнитных воздействий.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В статье приведены результаты многолетних работ, выполненных в условиях *in vivo* в экспериментах на животных (главным образом кроликах) и исследованиях с участием испытуемых-добровольцев. Количественная характеристика дана при описании результатов, так как она включает большое разнообразие серий с различными параметрами, экспозициями и условиями ЭМВ, показателями функционального состояния систем и организма.

Основное внимание уделяли реакциям ЦНС, используя поведенческие, условно-рефлекторные и электрофизиологические методы оценки. В условиях облучения, преимущественно головы, металлические детали (электроды, провода, микроманипулятор) были заменены на так называемые “безартефактные”. В самостоятельной серии исследований нашло свое подтверждение существующее мнение, что в месте контакта металл—биологическая ткань может возникать ток микрополяризации, существенно искажающий эффект слабого ЭМВ [3, 4]. На этом основании ЭЭГ электродами служили хлорвиниловые трубки, пипетки, воронки, заполненные физиологическим раствором на основе агар-агара. Они имели сопротивление около 1 МОм и удовлетворяли требованиям оценки результатов, полученных в условиях ЭМП СВЧ диапазона. Для записи нейронов использовали традиционные

стеклянные капилляры, а микроманипулятор был изготовлен из органического стекла по аналогии с (обычно применяемым) металлическим. Эти особенности позволяли регистрировать более корректную информацию, не только до и после, но и в период экспозиции ЭМП.

Для формирования отправной точки базовой характеристики нейроэффектов слабых ЭМВ использовали самый простой вариант (ЭМП нетепловой интенсивности, непрерывный режим, короткая однократная экспозиция, здоровые особи). Пути модификации изучаемой реакции включали изменение: параметров, режимов, экспозиций ЭМВ, состояния биообъектов и сочетанное действие с факторами других модальностей.

Все работы проводили в сопоставимых условиях камеры, удовлетворяющей проведению электрофизиологических исследований с учетом особенностей воздействующего фактора. Камера была изолирована от посторонних внешних влияний (свет, звук, и т.д.) и внутри выложена радиопоглощающим материалом “Дон” с коэффициентом отражения 30 дБ. Источниками линейно-поляризованного ЭМП служили высокочастотные промышленные генераторы сигналов (ГЗ-21, Г4-121, Г4-111, Россия) с соответствующими усилителями мощности и рупорными антеннами. Во время эксперимента биообъект находился в дальней зоне поля антенны, т.е. в области сформированной плоской электромагнитной волны. Основным воздействующим фактором было ЭМП СВЧ диапазона (1 ГГц–10 ГГц), которое не вызывало регистрируемого нагрева ткани (ППЭ эквивалентной плоской волны  $\leq 300$  мкВт/см<sup>2</sup> в НР или импульсе).

Использовали комплекс методов, позволяющий параллельно анализировать функциональное состояние не только ЦНС, но и изменения в дыхании, ССС, крови и мышечной ткани<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Проведение исследований всегда 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. В.В. Закусова”. Исследования с участием испытуемых были полной копией предварительно проведенных экспериментов на кроликах. Испытуемые-добровольцы проходили медицинское обследование в клиническом отделе ФМБЦ им. А.И. Бурназяна и принимали участие в исследованиях в присутствии дежурного врача (сотрудника той же больницы).

**Таблица 1.** Сравнительная характеристика реакции нейронов зрительной области коры головного мозга кролика на слабые воздействия факторами различной модальности: ЭМП, ПМП, свет, звук

**Table 1.** Comparative characteristics of the reaction of neurons in the visual cortex of the rabbit cerebral cortex to weak effects by factors of various modalities: EMF, CMF, light, sound

| Фактор (параметры)  | Число нейронов | Число 1-минутных воздействий | Процент реакций – статистически значимых изменений фоновой частоты |                |
|---|----------------|------------------------------|--|----------------|
|   |                |                              | учащение   | урежение       |
| ЭМП СВЧ (6 ГГц, меандр 50 Гц, ППЭмп. 200 мкВт/см <sup>2</sup> ) | 60             | 87                           | 6.6  | <b>58** ■</b>  |
| ПМП (100 мТл)   | 41             | 63                           | 23.40*   | <b>36.36**</b> |
| Звук, шелчки (50 Гц, на 15 дБ выше порога слышимости человека)  | 41             | 108                          | 16.41  | 29.82*         |
| Световые вспышки (50 Гц, τ – 1 мс, 0.62 Дж)                     | 41             | 207                          | <b>60.97** ■</b>   | 25.47*         |
| Контроль (ложные воздействия)                                   | 54             | 71                           | 10.88  | 3.8            |

Примечание. По группе воздействий – \*, \*\*  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$  соответственно, по  $\chi^2$  относительно контроля; ■ –  $p < 0.05$  по  $\chi^2$  относительно реакций противоположного характера. Здесь и далее в таблицах шрифтом и цветом выделены наиболее важные изменения.

Нейроэффекты ЭМП постоянно сопоставляли с соответствующими реакциями на ПМП, свет, звук, что позволяло оценить биологическую значимость, неспецифичность и особенность изучаемого ЭМВ как раздражителя ЦНС. Абсолютно все серии с ЭМП сопровождали соответствующими контролями с ложным предъявлением фактора, полностью сохраняя остальные условия проведения исследований. Необходимым был и статистический анализ сравнения результатов различных серий с истинными и ложными (контроль) воздействиями, используя компьютерную программу “Statistika”, параметрическую и непараметрическую оценки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

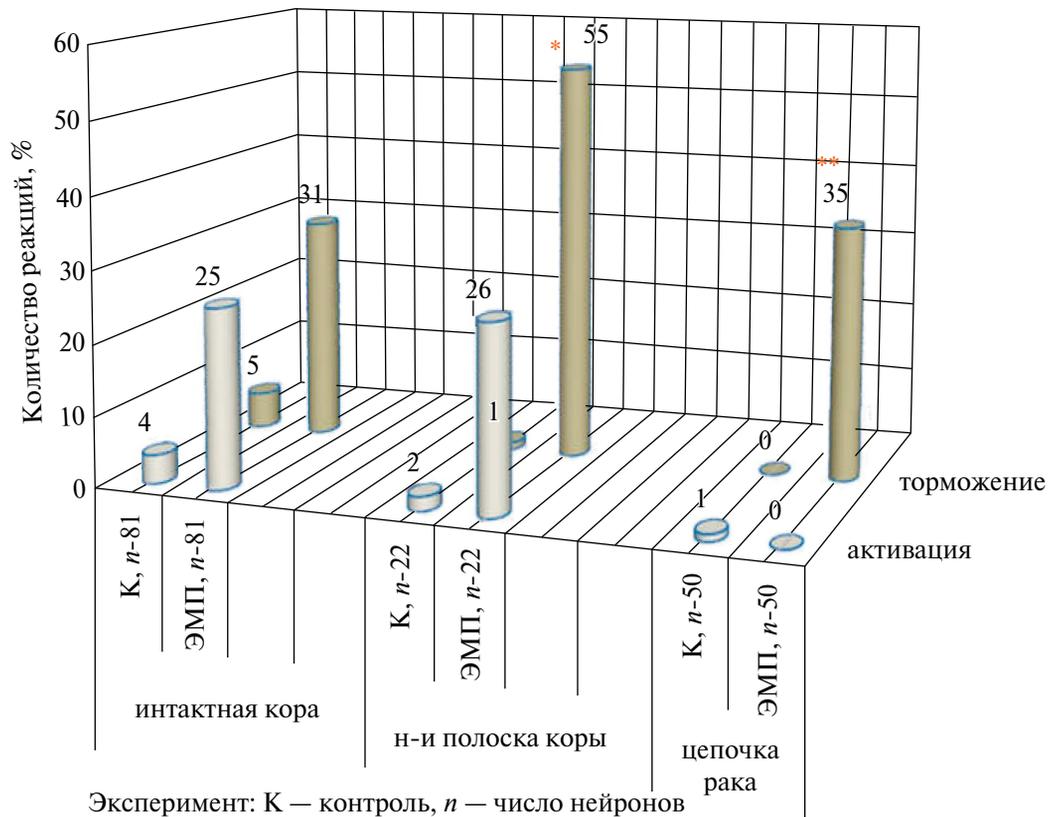
Статистически обоснованное наличие реакций нейронов и возможность выработать условный рефлекс на слабое ЭМП (ППЭ  $\leq 300$  мкВт/см<sup>2</sup>, короткая экспозиция) в корректных условиях проведения экспериментов – прямое доказательство того, что мы имеем дело с обычным раздражителем ЦНС.

Реакции нейронов реализовались с очень большими латентными периодами (секунды, а не мс) и сводились главным образом к уменьшению количества импульсов, т.е. усилению

процесса торможения по сравнению с ответами на известные адекватные раздражители пороговой величины. В специально проведенной серии на 70 нейронах зрительной области, предъявляя каждому из них свет, звук или СВЧ ЭМП, мы не встретили ни одного, который реагировал только на ЭМП. Это были главным образом клетки, отвечающие на все три стимула – 34%, тогда как на свет и СВЧ – 20%; на свет и звук – 13%, только на адекватный раздражитель свет – 23 и 10% вообще не реагировали. Приведенная в табл. 1 совокупность показателей статистически значимо отличает СВЧ ЭМП от адекватных стимулов пороговых значений и характеризует его как неспецифический и неадекватный раздражитель для нейрона.

Изучение нейрофизиологического механизма формирования этой реакции показало преобладающее значение непосредственного действия поля на ткань мозга в условиях облучения головы [3]. Исследования на препаратах головного мозга позволили сделать вывод: чем больше изоляция области нервной ткани от окружающих влияний, тем четче проявлялся основной ответ на слабое ЭМВ в виде торможения [рис. 1].

Полностью изолированная нервная ткань (нервная брюшная цепочка речного рака – препарат



**Рис. 1.** Сравнительная характеристика реакций нейронов: коры интактного мозга, нейронально-изолированной полоски коры, нервной цепочки речного рака – на СВЧ ЭМП.

Примечание. ЭМП: 1 ГГц, непрерывный режим, ППЭ – 200–300 мкВт/см<sup>2</sup>. \*, \*\* –  $p < 0.05$  по  $\chi^2$  относительно К, К и реакции противоположного характера соответственно.

Fig. 1. Comparative characteristics of the reactions of neurons: the cortex of the intact brain, the neuronally isolated strip of the cortex, the neural chain of river cancer – on microwave EMF.

физиологической практики) отвечала на слабое ЭМП только торможением биоэлектрической активности, в отличие от нейронально-изолированной полоски коры и целостного мозга.

Особенности реакций нейронов на ЭМП были причиной более медленной выработки и меньшей прочности условных двигательных ответов на ЭМП при формировании электрооборонительных отставленных рефлексов избегания (табл. 2). Выработка условных рефлексов на ЭМП и ПМП требовала большего количества сочетаний для появления и укрепления двигательных условных реакций, а их прочность была ниже относительно соответствующих значений на свет и звук. Отличался и средний период запаздывания условного ответа. В случаях ЭМП и ПМП он был статистически значимо более длительным, по сравнению с теми же показателями на адекватные стимулы.

Важно отметить, что выработанная условная двигательная реакция сопровождалась

усилением  $\tau$ -диапазона ЭЭГ, что наблюдали в одноименной ситуации и для звука [4]. По работам М.Н. Ливанова и его сотрудников, именно такая форма ЭЭГ-активности сопровождала соответствующие рефлекторные ответы на хорошо изученные адекватные стимулы [6]. Усиление  $\tau$ -диапазона ЭЭГ отражает повышение биологической значимости воздействия (в частности, от раздражителя слабого до средней силы). Такое явление вполне вероятно и для слабых ЭМВ в условиях повторения коротких экспозиций (требование процедуры выработки рефлекса), что приводит к суммации эффектов. Эти данные еще раз подчеркивают, что мы имеем дело с обычным раздражителем ЦНС.

Огромный материал по изучению экстраклеточной активности нейронов различных областей коры головного мозга показал сходство феноменологии и прочности реакций нейронов в различных отделах коры (рис. 2). Эти данные и непосредственное действие поля на ткань

**Таблица 2.** Сравнительная характеристика выработки у кроликов условных электрооборонительных отставленных рефлексов избегания на ЭМП, ПМП, свет и звук

**Table 2.** Comparative characteristics of the development in rabbits of conditioned electrodefensive reflexes of avoidance to EMF, CMF, light and sound

| Условный сигнал  | Появление (№ сочетания) | Укрепление (№ сочетания) | Максимальная прочность за 50 сочетаний, % | Средний период запаздывания ответа после укрепления (с) |
|--|-------------------------|--------------------------|---|---|
| Вспышки света (50 Гц, 0.62 Дж)                         | 8 ± 2.4                 | 120.8 ± 7.9              | 78.8 ± 2.8                                | 4.9 ± 1.1   |
| Щелчки 50 Гц, на 15 дБ выше порога слышимости человека | 19.4 ± 2.1 •            | 108 ± 6.1                | 70 ± 4.1                                  | 5.2 ± 0.2   |
| СВЧ ЭМП 6 ГГц меандр 50 Гц, ППЭимп. = 200 мкВт/см      | 40.2 ± 6.2 ••           | 154 ± 9.1 ••             | 54.7 ± 5.2 ••                             | 7.9 ± 0.4 ••  |
| ПМП 100 мТл  | 41.8 ± 2.7 ••           | 248 ± 4.8 ••             | 48.4 ± 3.4 ••                             | 8.5 ± 0.12 ••   |
| Контроль   | 82.2 ± 38.9             | —                        | 5.5 ± 1                                   | —   |

Примечание. В каждой серии по пять кроликов; отставление безусловного подкрепления от начала действия условного сигнала – 20 с. Безусловное подкрепление – электрический ток пороговой величины для проявления отклика на ЭМГ; совместное действие – 2.5 с; •• –  $p < 0,05$  по критерию Стьюдента по сравнению с выработкой рефлекса на вспышки света и щелчки.

мозга свидетельствуют о вероятности замыкания условной связи в пределах одного анализатора (в данном случае, представительство безусловного подкрепления). Как показано на рис. 2, эффекты ЭМВ зависели от режима облучения. Усложнение режима ЭМП повышало его биологическую значимость как раздражителя ЦНС, целиком поддерживая известное мнение – чем больше меняющихся параметров, тем эффективнее воздействие, подразумевая, что большее число элементов нервной ткани включается в реакцию. В итоге наблюдается возрастание числа ответов на ЭМП в виде активации, что соответствует усилению биологической значимости воздействия.

Погружая электрод в глубину мозга, можно наблюдать (отличную от коры) неоднозначную реактивность подкорковых структур головного мозга на одно и то же слабое ЭМВ. Вне зависимости от несущей частоты (1 ГГц или 10 ГГц, т.е. 30 см или 3 см), ЭМП в НР вызывало больший процент реакций в виде торможения в гипоталамусе, а наименьший – в ретикулярной формации (РФ) среднего мозга (табл. 3). Аналогичный результат был получен и в экспериментах с ПМП (46 мТл или 100 мТл). Казалось удивительным, что различные по частотным и энергетическим характеристикам поля вызывали однозначные “картины” распределения структур мозга по реактивности. При этом в каждом (отдельно взятом) образовании доминировала зависимость

ответа на слабое ЭМП от конкретных исходных фоновых характеристик [3]. Можно было предположить, что определяющую роль в пространственной организации реактивности структур мозга играло их исходное функциональное состояние. Это нашло подтверждение в сериях с предварительным введением кофеина или адреналина (рис. 3). В результате наибольший процент реакций отмечали в основных точках приложения данных фармакологических препаратов, соответственно, в коре (на фоне кофеина) и РФ среднего мозга (при введении адреналина). Эти эксперименты явно показывают, что перестройка пространственной организации биопотенциалов в мозге на слабое ЭМВ связана с исходной функциональной активностью его отделов. Это заключение не является специфическим для ЭМП, так как характерно и для других слабых раздражителей ЦНС (более изученной модальности), представляя один из возможных путей управления реакцией на слабое воздействие. На обычном спонтанном фоне наибольшую реактивность гипоталамуса можно объяснить его повышенной физиологической значимостью. Гипоталамус объединяет и связывает в единое целое механизмы гуморальной, гормональной, вегетативной и нервной регуляции.

Параллельная запись импульсной и суммарной биоэлектрической активности показала отражение реакции нейронов в отклике отделов головного мозга. Основной реакции нейронов

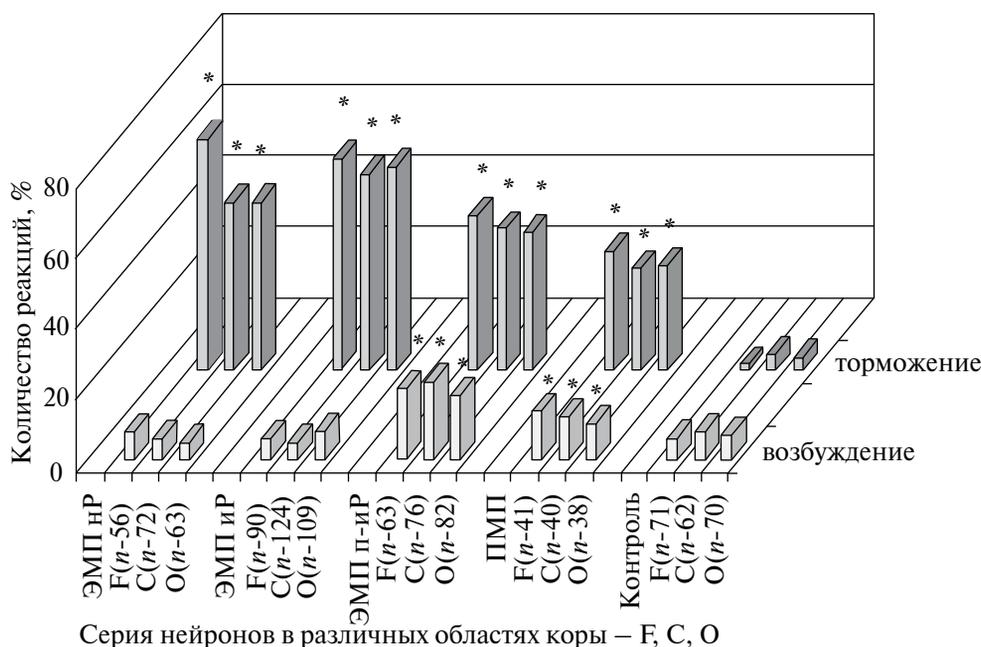


Рис. 2. Характеристика реакций нейронов на ЭМП в различных областях коры головного мозга.

Примечание. \* –  $p < 0.05$  по  $\chi^2$  относительно контроля и противоположной реакции соответственно, F, C, O – фронтальные, центральные, окципитальные области коры. 1.2 ГГц ЭМП, ППЭ в нР или в импульсе – 300 мкВт/см<sup>2</sup>; иР – импульсный режим: Гимп – 0.12 Гц,  $\tau$  – 0.4 мс, п-иР – пачечно-импульсный режим: Гимп – 1000 Гц, Гпачек – 0.12 Гц,  $\tau$  – 0.4 мс.

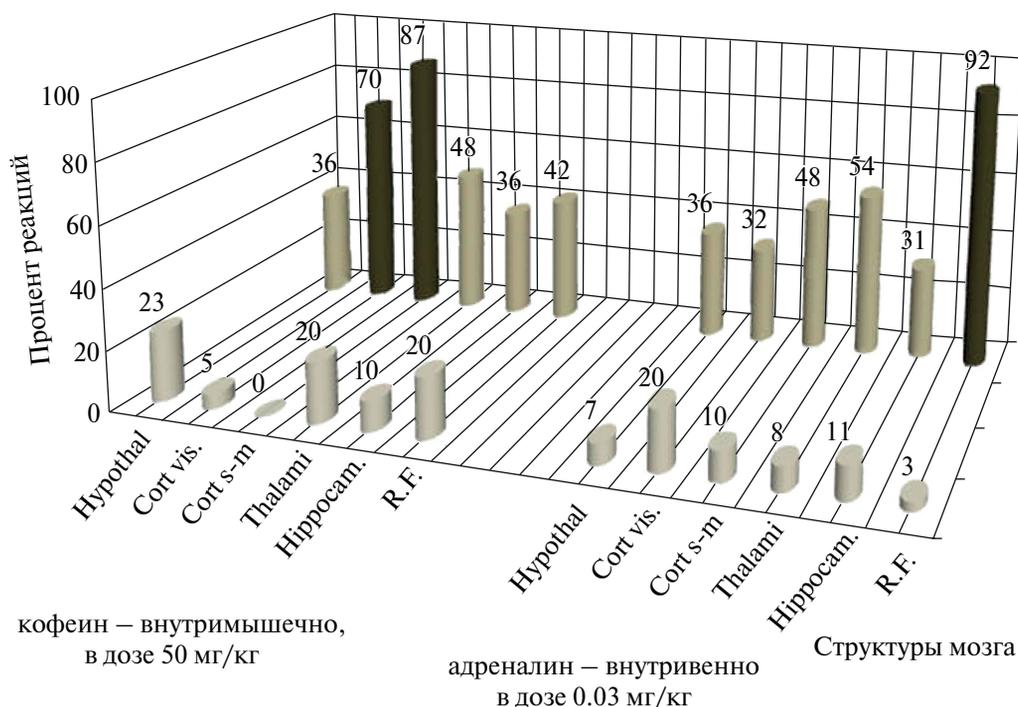
Fig. 2. Characterization of neuronal responses to EMF in various areas of the cerebral cortex.

Таблица 3. Сравнительная характеристика процента реакций нейронов на воздействие ПМП и ЭМП в разных отделах головного мозга кролика

Table 3. Comparative characteristics of the percentage of neuronal responses to the effects of CMF and EMF in different parts of the rabbit brain

| Отделы мозга       | Процент нейронов, статистически значимо урежающих частоту импульсации (относительно исходного фона) на воздействие: |                             |                             |                             | Ложное воздействие (контроль) |
|--------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
|                    | ПМП, мТл  |                             | ЭМП, ГГц                    |                             |                               |
|                    | 46  | 100                         | 1                           | 10                          |                               |
| Cort s-m           | 25.8*<br>(n = 31)   | 37.8*<br>(n = 45)           | 42.3**<br>(n = 52)          | 39.5*<br>(n = 38)           | 8.2<br>(n = 62)               |
| Cort vis.          | 28.8*<br>(n = 45)   | 33.9*<br>(n = 53)           | 48.5*<br>(n = 33)           | 48.6*<br>(n = 35)           | 9.8<br>(n = 71)               |
| Hippocampus        | 20.0<br>(n = 40)  | 18.9<br>(n = 37)            | 23.6<br>(n = 38)            | 27.2<br>(n = 33)            | 10.1<br>(n = 41)              |
| Thalami            | 33.3*<br>(n = 36)   | 29.6*<br>(n = 27)           | 40.5*<br>(n = 42)           | 27.7*<br>(n = 54)           | 10.0<br>(n = 60)              |
| <b>Hypothalami</b> | <b>56.1***<br/>(n = 41)</b>   | <b>54.0***<br/>(n = 37)</b> | <b>70.2***<br/>(n = 37)</b> | <b>62.8***<br/>(n = 43)</b> | 10.1<br>(n = 59)              |
| R.F.               | 20.5<br>(n = 39)  | 22.5<br>(n = 40)            | 18.6<br>(n = 43)            | 22.6<br>(n = 31)            | 11.7<br>(n = 61)              |

Примечание. n – число записанных нейронов, \*, \*\*, \*\*\* – по группе статистически значимые изменения относительно контроля по критерию  $\chi^2$  при  $p < 0.05$ ;  $p < 0.005$  и  $p < 0.001$  соответственно; выделено наиболее реактивное образование. ЭМП: непрерывный режим, ППЭ 200 мкВт/см<sup>2</sup>.



**Рис. 3.** Реактивность отделов мозга на ПМП 46 мТл на фоне кофеина или адреналина по анализу импульсной активности нейронов.

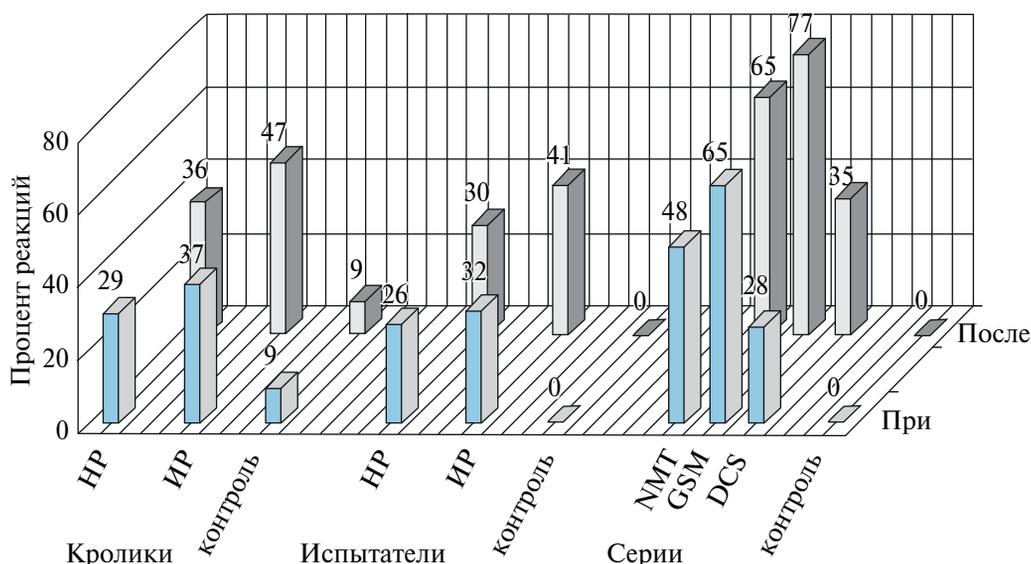
Примечание. Первый ряд – изолированное действие кофеина, адреналина; второй ряд – на фоне ПМП; в каждой серии число записанных нейронов = 25–30; выделены наиболее реактивные структуры на фоне действия ПМП.

Fig. 3. Reactivity of brain regions on CMF 46 mT against the background of caffeine or adrenaline according to the analysis of the impulse activity of neurons.

в виде усиления процессов торможения в ЦНС соответствовало увеличение числа веретенообразных колебаний в  $\alpha$ -диапазоне ЭЭГ [4]. Такие изменения в суммарной биоэлектрической активности мозга описаны в литературе как адапционные ответы на слабые раздражители [6] и как реакции на неосознаваемые стимулы [7, 8]. Детальные исследования подобных реакций на экспозицию и сразу после выключения ЭМП показали их больший процент проявления в последнем случае, что отмечали в экспериментах на кроликах и исследованиях с участием испытуемых-добровольцев (рис. 4). В 11 сериях с участием 39 испытуемых-добровольцев (практически здоровые мужчины в возрасте 25–40 лет) изучали биоэффекты ЭМП с различными режимами, параметрами и экспозициями [3, 4]. Это разнообразие СВЧ ЭМП создавали, используя промышленный генератор Г4–121 или абонентские терминалы трех стандартов сотовой связи (GSM-900, DCS-1800, NMT с ППЭ на уровне головы – 5.17, 61.25, 78.93 мкВт/см<sup>2</sup> соответственно). Ответы после

выключения представляли собой самостоятельную реакцию, которая не являлась последствием или откликом на выключение. Это – суммация изменений, возникающих на появление и исчезновение слабого стимула, что проявлялось с латентным периодом, соответствующим данной величине ответа при экспозиции (рис. 5). Сходство реакций на одни и те же ЭМВ у кроликов и испытуемых еще раз подчеркивает определяющую роль биологической значимости воздействия, которая в обоих случаях соответствовала слабому раздражителю для ЦНС. Анализ ЭЭГ с большей вероятностью определяет значимость применяемого ЭМВ как слабого раздражителя ЦНС.

Более сложная суммарная биоэлектрическая активность (в отличие от нейрона) определяла и более сложную зависимость от исходных (фоновых) значений. Важную роль играл не только конкретный ЭЭГ-спектр той или иной структуры, но и пространственная организация биопотенциалов. О ней можно было судить по корреляционным отношениям (КК) между ЭЭГ



**Рис. 4.** Преобладание реакций в первую минуту после выключения поля по сравнению с периодом экспозиции по ЭЭГ показателю у кроликов и испыателей.

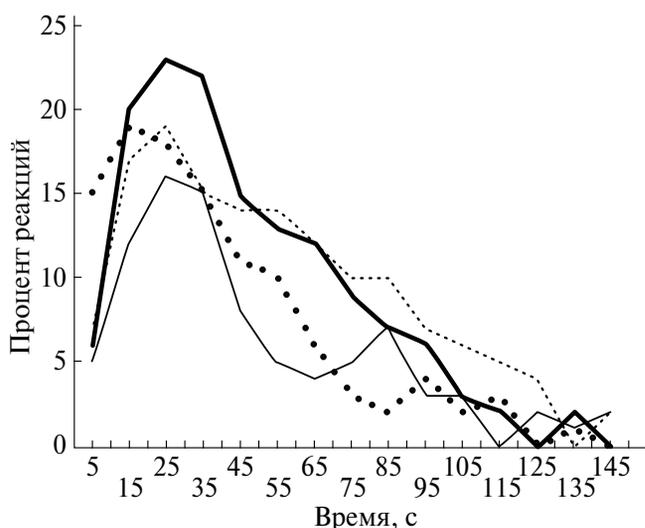
Примечание. НР, ИР – непрерывный режим, импульсный режим ЭМП, характеристики приведены в примечании к рис. 2; NMT, GSM, DCS –стандарты сотовой связи (описание в тексте).

Fig. 4. The predominance of reactions in the first minute after turning off the field compared to the exposure period according to the EEG index in rabbits and testers.

дистанционных областей мозга. Специально проведенный управляемый эксперимент на кроликах с включением ЭМП (по сигналу от ЭВМ) на фоне только эффективных значений КК показало существенное усиление реакции [3, 4].

Представляла интерес и детальная фоновая характеристика  $\alpha$ -диапазона, как основной феноменологии реакции на изучаемое воздействие. Детальная характеристика  $\alpha$ -диапазона позволила разделить испыателей по их реактивности на ЭМП, излучаемые телефонами различных стандартов сотовой связи [3, 4]. У групп испыателей с различными особенностями этого диапазона (от max. до min. выраженности при открытых и закрытых глазах) наблюдали различные эффекты. У лиц одной группы особенностей  $\alpha$ -диапазона ЭЭГ при сопоставимых условиях воздействия неоднократно воспроизводились одинаковые результаты.

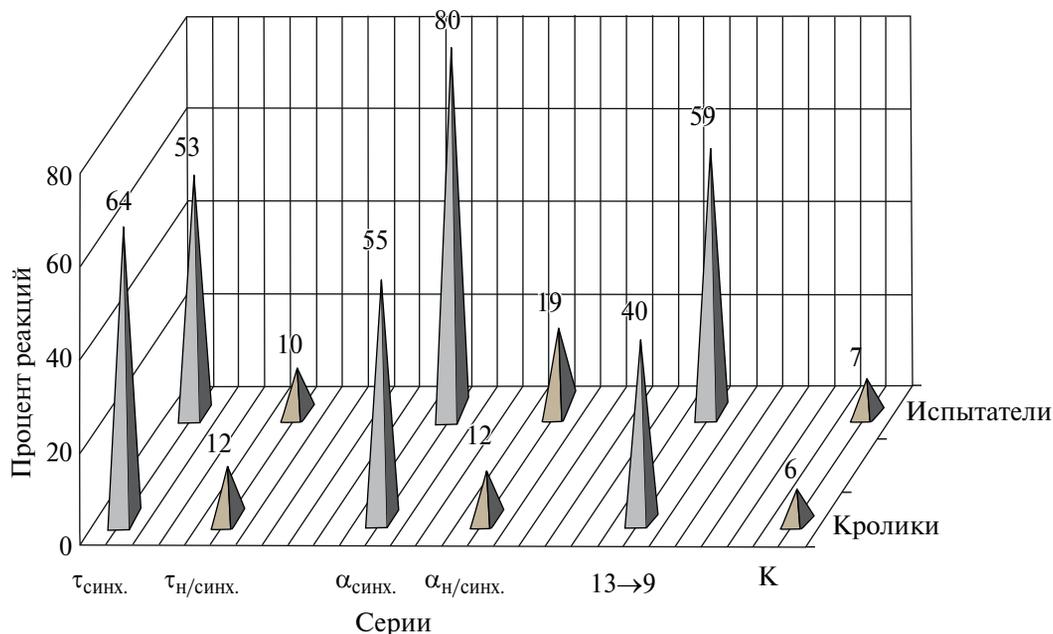
Изучение реакций мозга по показателю ЭЭГ позволило получить дополнительную информацию и о зависимости от параметров воздействия. В частности, показано, что частоту, соответствующую повторению СВЧ-импульсов, можно усилить в ЭЭГ (навязать), аналогично вспышкам света или щелчкам звука, используя



**Рис. 5.** Сходство латентных периодов реакций, при экспозиции и сразу после выключения ЭМП в исследованиях на кроликах и с участием испыателей.

Примечание. Сплошные линии – при экспозиции; пунктир – после выключения; жирные линии – испыатели, тонкие линии – кролики.

Fig. 5. Similarity of latent reaction periods during exposure and immediately after EMF shutdown in studies on rabbits and with the participation of testers.



**Рис. 6.** 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  $\chi^2$ ) от контроля и несинхронных (н/синх) воздействий в сериях с режимом обратной связи от волн тэта ( $\tau$ ) и альфа ( $\alpha$ , 13→9) диапазонов ЭЭГ.

Fig. 6. Comparative characteristics of the percentage of reactions corresponding to the frequency of modulation of EMF in studies on rabbits and with the participation of volunteer testers.

режим обратной связи [4]. В данных экспериментах источником СВЧ ЭМП 1 ГГц служил отечественный генератор Г4-121, ППЭ на уровне головы не превышала  $200 \text{ мкВт/см}^2$  в импульсе (табл. 4). Изменения можно было наблюдать и при модуляции в виде плавного изменения частот СВЧ импульсов в пределах избранного диапазона частот ЭЭГ. Эти данные были получены в экспериментах на кроликах и исследованиях с участием испытуемых-добровольцев (рис. 6).

Повторение соответствующих процедур приводило к усилению реакции, которая переходила от отдела мозга, на уровень ЦНС и организма (табл. 4).

В условиях соответствующей модуляции использование одновременно двух, трех несущих частот СВЧ-диапазона могло еще в большей степени усилить реакцию (рис. 7), что находило отражение в откликах других систем организма [4]. Важно отметить, что это усложнение реакций не сопровождалось повышением ППЭ, она сохранялась  $\leq 300 \text{ мкВт/см}^2$  в суммарном импульсе. Анализируя возможный нейрофизиологический механизм формирования наблюдаемых

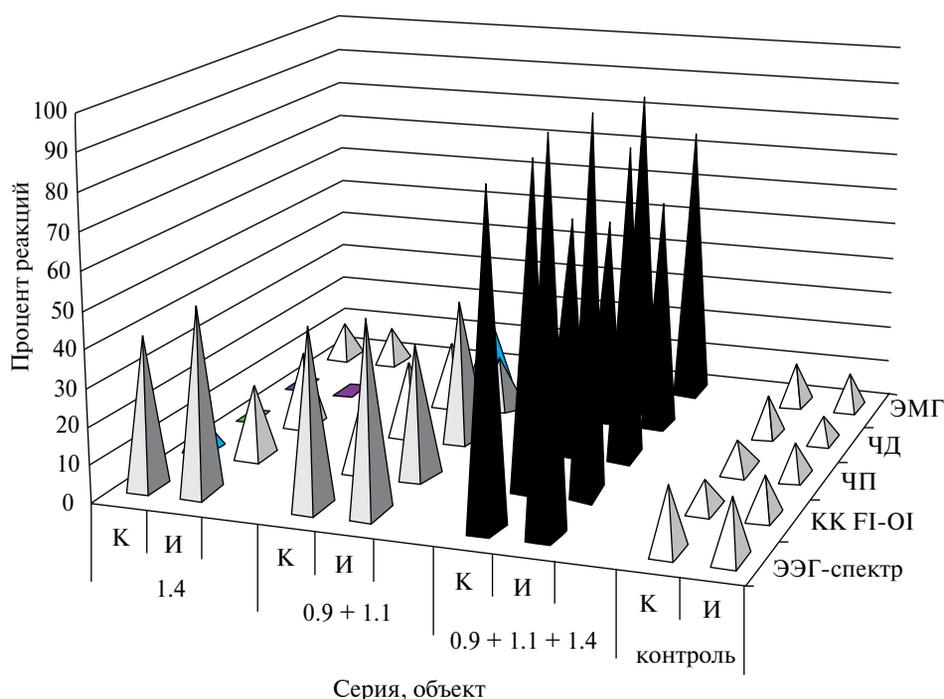
изменений, можно увидеть важную роль усиления синхронизации биоэлектрических процессов при формировании ответов нейронов, отделов мозга и ЦНС как системы, что показал специально проведенный анализ собственных данных и соответствующей литературы [9]. О специфике (в данном случае) может “говорить” только первичное физико-химическое взаимодействие факторов магнитной природы и нервной ткани. В литературе неоднократно описана возможность взаимодействия ЭМП нетепловой интенсивности с биологической тканью. Важная роль отводится главным образом заряженным частицам, которые в большом количестве находятся в примембранной области (гликокалекс). Изменение их конформации, движения, может повлиять на проницаемость мембраны и течение местных химических реакций. Н. Frehlich [10] полагает, что физической основой взаимодействия ЭМП с биологической тканью являются системы, несущие на себе дипольные заряды или последовательности зарядов, которые под влиянием поля приобретают способность к упорядоченному (кооперативному) взаимодействию. К таким системам носителей заряда относятся

**Таблица 4.** Сравнительная характеристика показателей различных систем организма в экспериментах на кроликах с ЭМП воздействием в режиме синхронной обратной связи от волн ЭЭГ

**Table 4.** Comparative characteristics of indicators of various body systems in experiments on rabbits with EMF exposure in the mode of synchronous feedback from EEG waves

| 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 |
| δ синх.                    | 63.63  | 45.45         | 45.45         | 54.54 ↓                                  | 63.63 ↓ | 54.54 ↓ | 63.63 ↓ |
| τ синх.                    | 72.72  | 36.36         | 36.36         | 72.72 ↑                                  | 63.63 ↑ | 63.63 ↑ | 54.54 ↑ |
| δ 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. Полужирным выделены статистически значимые изменения относительно контроля; ↓, ↑ – снижение, повышение показателя соответственно. Приведено условное обозначение серий с синхронной (синх.) и несинхронной (н/синх.) обратной связью от волн частотных диапазонов ЭЭГ – дельта (δ), тэта (τ).



**Рис. 7.** Повышение эффективности ЭМВ в условиях увеличения количества действующих одновременно несущих частот.

Примечание. К – кролики, И – испытуемые; приведены: ЭМП-частоты, ГГц; показатели реакции: ЭЭГ, ККFI-OI – коэффициент кросс-корреляции между ЭЭГ лобной и затылочной областей, ЧП – частота пульса, ЧД – частота дыхания, ЭМГ – электромиограмма.

Fig. 7. Improving the efficiency of EMV in the face of an increase in the number of simultaneously operating carrier frequencies.

**Таблица 5.** Влияние ЭМП на функциональное состояние испытателя в условиях операторской деятельности  
**Table 5.** Effect of EMF on the functional state of the tester under conditions of operator activity

| Серия         | Число испы-<br>тателей | % испытателей с достоверными изменениями показателей |                 |                   |               |               |                       |
|---------------|------------------------|--|-----------------|-------------------|---------------|---------------|-----------------------|
|               |                        | ЭЭГ  | ККЭЭГ Fr-<br>Or | Частота<br>пульса | РЭГ           | АД            | t° кожных<br>покровов |
| “К”           | 19                     | 26.3↑α   | 15.7            | 21.1              | 15.7          | 5.3           | 15.7                  |
| “MP”          | 19                     | 36.8↑α   | 36.8*           | 15.7              | 21.1          | 15.7          | 26.3                  |
| “MP +<br>ЭМП” | <b>19</b>              | <b>68.4 ↑α**</b>                                     | <b>68.4**</b>   | <b>52.9**</b>     | <b>52.9**</b> | <b>47.4**</b> | <b>68.4**</b>         |
| “AP”          | 10                     | 70↑θ*  | 50              | 40                | 30            | 10            | 30                    |
| “AP +<br>ЭМП” | 10                     | 60   | 30              | 40                | 30            | 0             | 30                    |

Примечание. “К” – 1,5-часовое пребывание в экспериментальной обстановке без выполнения работы; “MP” – монотонная работа; “MP + ЭМП” – монотонная работа на фоне облучения ЭМП РЧ в режиме модуляции меандром (“ИР1”); “AP” – активная работа; “AP + ЭМП” – “AP” на фоне облучения ЭМП РЧ в режиме модуляции меандром (“ИР1”); КК – коэффициент кросскорреляции; \*, \*\* –  $p < 0.05$  по  $\chi^2$  относительно серий “К” и “MP” соответственно. Полу жирным выделен наиболее значимый вариант изменений по комплексу показателей.

молекулы воды, макромолекулы РНК и ДНК, мембранные комплексы и т.д. Леднев В.И. подчеркивает, что мишенями для ЭМП могут быть магнитные моменты [11]. Совокупность этих данных несомненно свидетельствует о вероятности существования механизмов, способных вызвать раздражение биологической ткани путем воздействия ЭМП. При этом определенная роль отводится ионам  $Ca^{+2}$  и эфаптическому взаимодействию нервных элементов, которые обеспечивают кооперативный синхронный ответ [12], подчеркивая неспецифическое синхронизирующее влияние слабого ЭМВ.

Самостоятельный огромный раздел исследований показывает, что к ЭМП как слабому раздражителю ЦНС применимы неспецифические законы физиологии о повышении биологической значимости. Известные неспецифические пути: повторение коротких экспозиций; их применение на фоне неполноценного функционирования организма; усложнение режима облучения, комбинирование с воздействиями других модальностей – способны повысить биологическую значимость и слабых ЭМВ [3]. Используя данные законы физиологии и при короткой экспозиции ЭМП, сохраняя нетепловую энергию в импульсе, можно наблюдать изменения в жизнедеятельности организма, что важно учитывать при разностороннем практическом использовании слабых ЭМВ. Например, при 1.5 ч монотонной работе на фоне слабого ЭМВ может

иметь место реакция организма, соответствующая развитию монотонии (табл. 5). При этом увеличивается и количество ошибок в работе. Используя режим плавного перебора частот модуляции ЭМП в диапазоне альфа-ритмов ЭЭГ можно усилить их содержание в спектре, снизив тем самым энергию стресс-ритмов т-диапазона. В наших исследованиях такой физиотерапевтический прием в течение одной-двух недель вызывал нормализацию функций организма кролика, находящегося в состоянии экспериментального невроза [3, 13]. В практике использования слабых ЭМВ в областях гигиены и физиотерапии важно учитывать описанные особенности их действия, на что обращают внимание и авторы соответствующего направления работ [6, 14–19].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные материалы не оставляют сомнения, что слабые ПМП и ЭМП можно рассматривать как обычные раздражители ЦНС, которые могут иметь различную биологическую значимость, что зависит от комплекса показателей: ЭМП, функционального состояния биологического объекта, сопутствующих воздействий. Разносторонние исследования показали, что к этим факторам полноправно применимы законы физиологии о биологической значимости ответной реакции, путях ее модификации и адаптационных механизмах. Это заключение является очень важным, так как снимает с изучаемых

факторов некоторую “таинственность” и ставит в один ряд с хорошо изученными раздражителями ЦНС. Такой подход дает возможность объяснить наблюдаемые реакции и прогнозировать новые варианты воздействий, используя фундаментальную область знаний о феноменологии и механизмах формирования эффектов слабых раздражителей. Несомненным является и вывод, что в любых вариантах практического использования слабых ЭМВ необходима комплексная оценка показателей состояния организма, параметров воздействующего фактора и возможных побочных влияний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холодов Ю.А. Реакции нервной системы на ЭМП. М.: Наука, 1975. 284 с. [Kholodov Y.A. Reactions of the nervous system to EMF. M.: Science, 1975. 284 p. (In Russ.)]
2. Холодов Ю.А., Шишло М.А. Электромагнитные поля в нейрофизиологии. М.: Наука, 1979. 166 с. [Kholodov Yu.A., Shishlo M.A. Electromagnetic fields in neurophysiology. M.: Science, 1979. 166 p. (In Russ.)]
3. Лукьянова С.Н. ЭМП СВЧ диапазона нетепловой интенсивности как раздражитель для ЦНС М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, 2015. 200 с. [Lukyanova S.N. EMF of the microwave range of non-thermal intensity as an irritant for the central nervous system. Moscow: FSBI SSC FMBC named after A.I. Burnazyan, 2015. 200 p. (In Russ.)]
4. Лукьянова С.Н. Фундаментальная характеристика нейроэффектов слабых электромагнитных воздействий (от нейрона к отделу мозга, ЦНС, организму). М.: Изд-во ГНЦ им. А.И. Бурназяна. 2023, 138 с. [Lukyanova S.N. Fundamental characteristics of neuroeffects of weak electromagnetic influences (from neuron to brain, central nervous system, body). M.: FSBI SSC FMBC named after A.I. Burnazyan, 223. 138 p. (In Russ.)]
5. Ливанов М.Н. Избранные труды. М.: Наука, 1989. 400 с. [Livanov M.N. Selected works. M.: Science, 1989. 400 p. (In Russ.)]
6. Гаркави Л.Х. Квакина Е.В., Уколова М.А. Адаптационные реакции и резистентность организма. Ростов: изд-во Ростовск. Ун-та, 1979. 223 с. [Harkavy L.Kh., Kvakina E.V., Ukolova M.A. Adaptive reactions and resistance of the organism. Rostov: Rostovsk Publ. House. Un-ta, 1979. 223 p. (in Russ.)]
7. Кастандов Э.А. Нейрофизиологические механизмы неосознаваемых явлений. *Успехи физиол. наук.* 1981;12(4):3–27. [Kastandov E.A. Neurophysiological mechanisms of unconscious phenomena. *Successes of Physiol Sciences.* 1981;12(4):3–27. (In Russ.)]
8. Кастандов Э.А., Курова Н.С., Черемушкин Е.А., Лакovenко И.А. Роль неосознаваемых стимулов в сознательной познавательной деятельности. *Высш. нервн. деят.* 1998;48(3):438–448. [Kastandov E.A., Kurova N.S., Cheryomushkin E.A., Lakovenko I.A. The role of unconscious stimuli in conscious cognitive activity. *Nervous. Ac.* 1998;48(3):438–448. (In Russ.)]
9. Лукьянова С.Н. Феноменология и генез изменений в суммарной биоэлектрической активности головного мозга на неионизирующее излучение. *Радиаци. биология. Радиоэкология.* 2002;42(3):308–314. [Lukyanova S.N. Phenomenology and genesis of changes in the total bioelectric activity of the brain on non-ionizing radiation. *Radiation Biology. Radioecology.* 2002;42(3):308–314. (In Russ.)]
10. Frochlich H. What are non-thermal electric biological effects? *J. Bioelectromagnetics.* 1982;3(1):45–47.
11. Леднев В.И. Магнитные моменты – мишени для ЭМП. *Биофизика.* 2010;55(4):23–48. [Lednev V.I. Magnetic moments – targets for EMF. *Biophysics.* 2010;55(4):23–48. (In Russ.)]
12. Петше Г. К вопросу о природе элементарных генераторов синхронизированной активности при эпилептическом припадке. Сб.: Функциональное значение электрических процессов головного мозга. М.: Наука, 1977. С. 347–357 [Petsche G. On the question of the nature of elementary generators of synchronized activity in an epileptic seizure. Collection: Functional significance of electrical processes of the brain. M.: Science, 1977 P. 347–357 (In Russ.)]
13. Лукьянова С.Н., Уйба В.В. Терапия экспериментального невроза у кроликов с помощью ЭМП в сравнении с факторами электрической и химической природы. *Мед. радиология и радиаци. безопасность.* 2017;62(3): 5–12; 96. [Lukyanova S.N., Uyba V.V. Therapy of experimental neurosis in rabbits using EMF in comparison with factors of electrical and chemical nature. *Medical Radiology and Radiation Safety.* 2017;62(3): 5–12; 96. (In Russ.)]
14. Франциянц Е.М, Шейко Е.А. Противоопухолевое действие ЭМП и их влияние на боль в экспериментальной и клинической онкологии. *Исследования и практика в медицине.* 2019;6(2):86–99. [Franzants E.M., Sheiko E.A. Antitumor effect of EMF and their influence on pain in experimental and clinical oncology. *Research and Practice in Medicine.* 2019; 6(2):86–99 (In Russ.)]
15. 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 pulsed MP for obtaining a given biological effect. Dokl. 1st International. Conf. “Man and EMF”. Sarov, 2003. P. 8–19 (In Russ.)]

16. Походзей Л.В., Пальцев Ю.П., Руднева Е.А. Гигиеническая оценка электромагнитной обстановки на компьютеризированных рабочих местах: история и современное состояние. *Гигиена и санитария*. 2019;98(11):1196–1200 [Pokhodzey L.V., Paltsev Yu.P., Rudneva E.A. Hygienic assessment of the electromagnetic environment at computerized workplaces: history and current state. *Hygiene and Sanitation*. 2019;98(11):1196–1200 (In Russ.)]
17. Пальцев Ю.П., Походзей Л.В., Рубцова Н.Б., Перов С.Ю., Белая О.В. Современные принципы и средства защиты работников от неблагоприятного воздействия электромагнитных полей радиочастот. *Гигиена и санитария*. 2017;5:451–516. [Paltsev Yu.P., Pokhodzey L.V., Rubtsova N.B., Perov S.Yu., Belaya O.V. Modern principles and means of protecting workers from the adverse effects of electromagnetic fields of radio frequencies. *Hygiene and Sanitation*. 2017;5:451–516. (In Russ.)]
18. Никитина В.Н., Калинина Н.И., Ляшко Г., Дубровская Е.Н., Плеханов В.П. Особенности архитектуры сетей 5G. Вероятностное прогнозирование воздействия ЭМП радиочастот на население. *Гигиена и санитария*. 2021; 100(8):792–796. [Nikitina V.N., Kalinina N.I., Lyashko G., Dubrovskaya E.N., Plekhanov V.P. Features of the architecture of 5G networks. Probabilistic prediction of the impact of EMF radio frequencies on the population. *Hygiene and Sanitation*. 2021;100(8):792–796. (In Russ.)]
19. Рудой А.С. и др. Современные подходы к диагностике, терапии, профилактике поражений электромагнитными излучениями СВЧ диапазона. Минск: БГМУ, 2018. 38 с. [Rudoy A.S. et al. Modern approaches to diagnosis, therapy, prevention of lesions by electromagnetic radiation of the microwave range. Minsk: BSMU, 2018. 38 s. (In Russ.)]

## Neuroeffects of Microwave EMF Range of Non-Thermal Intensity and Short Exposure

© 2024 S. N. Lukyanova<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical and Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

\*E-mail: lukyanovasn@yandex.ru

The article presents a generalization and analysis of the results of many years of research by the author of the neuroeffects of weak electromagnetic effects in order to answer the questions: do they exist, what are their phenomenology, neurophysiological mechanism, ways of modification? Using electrophysiological and behavioral research methods, the line of effects of weak EMF from the neuron to the brain, the central nervous system (as a system) and the body is shown. In animal experiments and studies with the participation of volunteer testers, their phenomenology, dependence on parameters, modulation mode, and EMF organization are statistically substantiated. As a result, it is concluded that this is a common stimulus of the central nervous system, which in its influence on the body obeys the laws of physiology about the biological significance of the response, ways of its modification and adaptation mechanisms, which is advisable to take into account.

**Keywords:** microwaves, low impact, rabbits, testers, reaction, neuron, part of the brain, CNS, organism, polyparametric dependence