

НОВЫЙ КРИТЕРИЙ ЭКСПРЕСС ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НА ОРГАНИЗМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НЕТЕПЛОВОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

К. Ю. Краюхина, В. В. Баркин, О. В. Глухова, Е. П. Лобкаева

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров

Наряду с всесторонним анализом медико-биологических последствий воздействия импульсных электромагнитных полей нетепловой интенсивности в диапазоне промышленных частот актуальной является выработка критериев экспресс-оценки нарушения функционирования регуляторных систем организма.

В настоящее время внимание ряда исследователей-биологов привлечено к свойствам пропорции «золотого сечения» как своеобразного методологического принципа, лежащего в основе структурной гармонии самоорганизующихся природных систем. Доказано присутствие принципа «золотой пропорции» в строении конечностей и гармонической соразмерности частей тела животных и человека, организации структуры биомолекул, ряда биохимических и физиологических параметров организмов, ритмологической деятельности мозга и структуры сердечных циклов человека и млекопитающих, а также психофизических параметров деятельности человека [1–5].

Суть данной симметрии состоит в том, что целое относится к большей его части так же, как большая часть относится к меньшей. Данное отношение составляет 1,618 (1):

$$1 : 0,618 = 0,618 : 0,382 = 1,618 \quad (1)$$

При выборе направления исследования мы руководствовались трудами, в которых было обнаружено присутствие «золотой пропорции» в соотношении физиологических параметров, характеризующих работу

сердца и головного мозга (В.Д. Цветков, Соколовы и др.) [4, 6].

Нашими **задачами** было:

1) Найти проявление «золотой пропорции» в соотношении других параметров, отражающих работу сердечно-сосудистой системы и центральной нервной системы.

2) Проверить «устойчивость» выявленных «золотых соотношений» к действию физических факторов, биологическая эффективность которых была ранее установлена.

Было решено проанализировать в данном аспекте результаты, полученные с помощью кардиоритмологических и этологических методик исследования, оценивающих, соответственно, вариабельность сердечного ритма (ВСР) и структуру спонтанного поведения, широко используемых в экспериментальной практике РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили на белых беспородных крысах-самцах массой тела 180 – 250 граммов. В качестве воздействующего фактора использовали:

1) Линейнополяризованное низкоинтенсивное ЭМИ частотой 1 ГГц:

а) амплитудно-модулированное последовательностью прямоугольных импульсов длительностью 0,2 в трех режимах, различающихся значениями параметра n огибающей спектров (1,79, 1,14 и 0,65) [7–8], обусловленными импульсно-частотным варьированием;

б) модулированное периодической последовательностью монополярных импульсов переменной частоты;

в) немодулированное ЭМИ.

2) Низкочастотное магнитное поле (НЧМП) с амплитудно-фазовой модуляцией с $n = 1,79, 1,14, 0,65$.

3) Акустический сигнал.

Оценку активности вегетативной нервной системы проводили с помощью анализа ВСР по стандартным методикам: вариационной пульсометрии Р. М. Баевского [9], статистического временного анализа [10] и спектрального анализа с применением быстрого преобразования Фурье [11-12]. Расчёт показателей ВСР проводили на основе математической обработки кардиосигнала, регистрацию которого осуществляли в течение 60 секунд до и после воздействия ЭМИ.

Исследование структуры спонтанного поведения крыс проводили с использованием теста «открытое поле» [13-15]. В течение 5 минут регистрировали стандартный комплекс параметров, отражающих структуру исследовательского и эмоционального поведения.

Оценку значимости различий средних значений проводили по t-критерию Стьюдента, критерию Манна-Уитни и двухвыборочного критерия Уилкоксона [16]. Различия между сравниваемыми величинами считали статистически значимыми при уровне $p \leq 0,05$.

Результаты и их обсуждение

В настоящее время при анализе результатов исследований реакции вегетативной нервной системы особое внимание уделяется оценке периодических компонентов сердечного ритма, так называемой волновой структуре. Спектральные методы анализа ВСР позволяют выявлять в структуре колебаний сердечного ритма проявления активности отдельных регуляторных механизмов, обладающих известной периодичностью

[12]. Вовлеченность в управление сердечным ритмом того или иного уровня нервной регуляции, а также относительный вклад симпатических и парасимпатических влияний на ритм сердца, на наш взгляд, наиболее адекватно отображается в соотношении нормированных мощностей спектра: высокочастотной (% HF), низкочастотной (% LF) и сверхнизкочастотной (% VLF) составляющих, рассчитываемых по формулам:

$$\% VLF = \frac{VLF}{TP} \times 100 \%, \quad (1)$$

где VLF – абсолютная мощность спектра в диапазоне очень низких частот (mc^2),
 TP – общая мощность спектра (mc^2).

$$\% LF = \frac{LF}{TP} \times 100 \%, \quad (2)$$

где LF – абсолютная мощность спектра в диапазоне низких частот (mc^2).

$$\% HF = \frac{HF}{TP} \times 100 \%, \quad (3)$$

где HF – абсолютная мощность спектра в диапазоне высоких частот (mc^2).

Для определения значений рассматриваемых составляющих спектра был проанализирован массив экспериментальных данных, полученных при оценке состояния вегетативной нервной системы животных контрольных групп в экспериментах за 2011–2015 гг. Выборка, составившая 92 особи, включала только животных-нормотоников (с балансом вагусных и симпатических механизмов регуляции сердечного ритма).

Соотношение мощностей спектра ВСР животных в области высоких частот (% HF) и мощностей спектра в области низких и сверхнизких частот (% LF + % VLF) у животных, использовавшихся в экспериментах 2011, 2013, 2014 и 2015 годов, было практически одинаковым. Это позволило объединить все данные в единые массивы, соответствующие рассматриваемым составляю-

щим спектра ВСР: % HF = 61,73±1,90 % и (% LF + % VLF) = 38,27±1,90 %. Было выявлено, что данные значения максимально приближены к «золотым» и их соотношение подчиняется закону «золотой пропорции» (4):

$$\% \text{ HF: } (\% \text{ LF} + \% \text{ VLF}) = 100: 61,73 = \quad (4) \\ = 61,73 : 38,27 \approx 1,618.$$

Таким образом, показано, что нормальному функциональному состоянию животных соответствует такое состояние вегетативной нервной системы, при котором соотношение составляющих спектра ВСР % HF и (% LF + % VLF) соответствует «золотой пропорции».

Результаты, полученные в РФЯЦ-ВНИИЭФ в ходе этологических исследований, были проанализированы с точки зрения концепции, согласно которой приспособительное поведение представляет собой дискретное явление. Используемая для его описания статистико-вероятностная модель рассматривает поведенческие активность и пассивность как функции времени. Психомоторная реактивность, с одной стороны, и неподвижность, с другой, являются основными проявлениями стратегии приспособительного поведения в новой среде [17, 18].

Равновесие совокупностей активных и пассивных паттернов, демонстрируемых крысами в «открытом поле», на наш взгляд, наиболее адекватно отображается в соотношении индексов исследовательской активности и пассивности – ИПА и ИПП [19].

Индекс поведенческой активности (ИПА) – характеризует отношение времени активного поведения к общему времени наблюдения (5). *Индекс поведенческой пассивности* (ИПП) – характеризует отношение времени пассивного поведения к общему времени наблюдения (6).

$$\text{ИПА} = \frac{BT - (ДПП + ВПЗ + ЛПА)}{BT} \times 100(\%), \quad (5)$$

где ДПП – длительность пассивного поведения (отсутствие горизонтальных перемещений, вертикальных стоек, реакции груминга и замирания) (с),

ВПЗ – время полного замирания (отсутствие каких-либо проявлений двигательной активности) (с),

ЛПА – латентный период адаптации (период времени между моментом помещения животного в условия теста «открытого поля» до начала им исследовательской двигательной активности) (с),

BT – время тестирования (300 с).

$$\text{ИПП} = \frac{ДПП + ВПЗ + ЛПА}{BT} \times 100(\%), \quad (6)$$

Для определения значений рассматриваемых индексов у животных в нормальном состоянии был проанализирован массив экспериментальных данных, полученных при оценке поведения контрольных групп в экспериментах за 2010 – 2015 гг. Объем выборки составил 324 особи. Среднее значение индекса активности по выборке составило 61,85±1,45 %, а индекса пассивности – 38,15±1,45 %. Индексы поведенческой активности и пассивности, по сути своей, отражают соотношение временных параметров реализации активных и пассивных паттернов в рамках 5-минутного (в нашем случае) периода наблюдения, составляющего 100 % времени. Полученные значения индексов максимально приближены к «золотым»:

$$\text{ИПА: ИПП} = 100 : 61,85 = \quad (2) \\ = 61,85 : 38,15 \approx 1,618.$$

Таким образом, показано, что нормальному функциональному состоянию животных соответствует такая модель поведения в «открытом поле», при которой соотношение временных характеристик активных и пассивных паттернов соответствует «золотой пропорции».

Далее рассмотрим примеры, демонстрирующие, на сколько соотношения (4) и (7)

«устойчивы» к действию физических факторов.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ установлены критерии и определён механизм реализации воздействия импульсно-модулированного электромагнитного поля на организм различных видов лабораторных животных и человека. Воздействие импульсно-модулированного электромагнитного поля, спектральная плотность сигнала которого зависит от частоты по закону $U(f) = mf^{-n}$ с параметрами, определяющими значение показателя степени $0,8 < n < 1,5$ (для крыс), не приводит к значительным изменениям в состоянии организма. При $n < 0,8$ и $n > 1,5$ организм переходит в неустойчивое состояние, характеризующееся функциональными нарушениями на организменном, системном, клеточном и молекулярном [7-8]. Кроме того, рядом исследований показана высокая биологическая эффективность ЭМИ с импульсно-частотной модуляцией в диапазоне естественной ритмической активности головного мозга.

Стандартными методами анализа ВСР (вариационная пульсометрия Р. М. Баевского, статистический временной анализ и спектральный анализ) нами было установлено, что воздействие ЭМИ с $n = 1,79$ и $n = 0,65$, что соответствует состоянию «дискомфорта», вызывает значительные изменения со стороны вегетативной нервной системы.

Так, воздействие ЭМИ, спектральные характеристики которого соответствовали значению $n = 1,79$, приводило к значительному отклонению значений составляющих спектра от «золотых чисел»: $\% HF = 47,68 \pm 3,33 \%$ и $(\% LF + \% VLF) = 52,32 \pm 3,33 \%$ ($p \leq 0,001$), нарушая, тем самым, закон «золотой пропорции»:

$$\% HF: (\% LF + \% VLF) = 47,68: 52,32 = 0,91.$$

При воздействии ЭМИ с $n = 0,65$ наблюдали аналогичное отклонение значений составляющих спектра от «золотых чи-

сел», но в меньшей степени по сравнению с воздействием ЭМИ с $n = 1,79$, причем, в противоположную сторону ($\% HF = 68,44 \pm 3,71 \%$, $(\% LF + \% VLF) = 31,56 \pm 3,71 \%$):

$$\% HF: (\% LF + \% VLF) = 68,44: 31,56 = 2,17.$$

Ранее нами было установлено, что воздействие ЭМИ с $n = 1,14$, что соответствует состоянию «комфорта», не вызывает заметных изменений в работе вегетативной нервной системы. После данного воздействия отмечали незначительное отклонение составляющих спектра ВСР от «золотых чисел» ($\% HF = 62,96 \pm 4,92 \%$, $(\% LF + \% VLF) = 37,04 \pm 4,92 \%$) (1) и, соответственно, незначительное смещение «золотой пропорции»:

$$\% HF: (\% LF + \% VLF) = 62,96: 37,04 = 1,70.$$

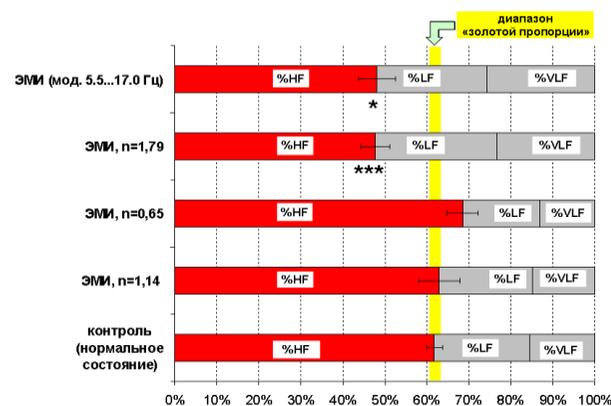


Рис. 1. Проявление «Золотой пропорции» после воздействия физических факторов

Воздействие ЭМИ, импульсно-частотные характеристики которого периодически изменялись в диапазоне естественных ритмов головного мозга, приводило к формированию состояния напряжения симпатического и парасимпатического отделов вегетативной нервной системы, а также к увеличению роли гуморальных влияний.

После данного воздействия отмечали значительное отклонение составляющих спектра ВСР от «золотых чисел» ($\% HF = 48,10 \pm 4,46 \%$, $(\% LF + \% VLF) = 51,90 \pm 4,46 \%$) ($p \leq 0,05$)

(1) и, соответственно, заметное смещение «золотой пропорции», аналогичное тому, которое наблюдалось после воздействия ЭМИ с $n = 1,79$:

$$\% HF: (\% LF + \% VLF) = 48,10: 51,90 = 0,93.$$

Аналогичные результаты были получены в этологических исследованиях. Воздействия НЧ МП с параметрами модуляции, соответствующими $n = 1,79$ и $n = 0,65$, привело к формированию у животных пассивно-оборонительной модели поведения, характеризующемуся угнетением исследовательской активности, снижением двигательной активности и эмоциональному напряжению. После воздействия НЧ МП со спектральными характеристиками, соответствующими $n = 1,14$, отклонений в структуре поведения не происходило.

Реорганизация структуры поведения животных, подвергавшихся воздействию НЧ МП с $n = 1,79$, проявилась в заметном отклонении от «золотого соотношения» (2). Значения интегральных индексов активности и пассивности существенно отличались от контрольных ($p \leq 0,05$) и составили $49,67 \pm 6,35 \%$ и $50,33 \pm 6,35 \%$ соответственно. При этом соотношение индексов приняло вид:

$$\text{ИПА: ИПП} = 49,67: 50,33 = 0,99.$$

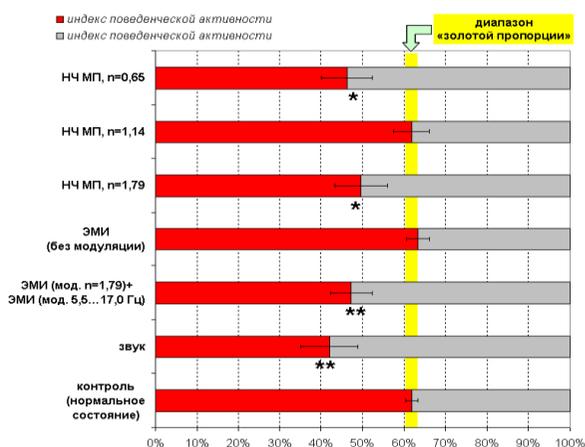


Рис. 2. Нарушение «золотой пропорции» в структуре поведения после воздействия физических факторов

После воздействия НЧ МП с $n = 0,65$ значения индексов ИПА и ИПП составили $46,25 \pm 6,17 \%$ и $53,75 \pm 6,17 \%$ соответственно (отклонения от контроля были статистически значимыми, $p \leq 0,05$). А отношение их стало выражаться как:

$$\text{ИПА: ИПП} = 46,25: 53,75 = 0,86.$$

После воздействия НЧ МП с $n = 1,14$ отношение интегральных индексов поведенческой активности ($61,83 \pm 4,33 \%$) и пассивности ($38,17 \pm 4,33 \%$) практически соответствовало «золотой пропорции»:

$$\text{ИПА: ИПП} = 61,83: 38,17 = 1,62.$$

У животных, подвергавшихся воздействию импульсно-модулированного ЭМИ, получили выраженное смещение баланса активных и пассивных паттернов, характеризующееся достоверными изменениями значений ($p \leq 0,01$) индексов поведенческой активности ($47,33 \pm 5,01 \%$) и пассивности ($52,67 \pm 5,01 \%$). Данное соотношение указывает на заметное нарушение «золотой пропорции»:

$$\text{ИПА: ИПП} = 47,33: 52,67 = 0,90.$$

При этом воздействие на крыс ЭМИ без модуляции привело к незначительным изменениям относительно «золотой пропорции»:

$$\text{ИПА: ИПП} = 63,40: 36,60 = 1,73.$$

Картину, аналогичную той, которая наблюдалась после воздействия импульсно-модулированного ЭМИ, получили после использования акустического воздействия с уровнем звукового давления 100 дБ. Зарегистрировали существенное нарушение баланса активных ($42,04 \pm 6,86 \%$) и пассивных ($57,96 \pm 6,86 \%$) паттернов ($p \leq 0,01$). Величина отклонения от «золотой пропорции» в последнем случае была соизмерима с таковой после воздействия модулированного ЭМИ ($p \leq 0,01$).

$$\text{ИПА: ИПП} = 42,04: 57,96 = 0,73.$$

Необходимо подчеркнуть, что описанные изменения в динамической структуре поведения и спектральных характеристик работы сердечно-сосудистой системы животных сочетались со снижением работоспособности, ухудшением равновесия,

ухудшением когнитивной деятельности, нарушением проницаемости гематоэнцефалического барьера, комплексными нарушениями на уровне системы крови [20-23].

Заключение

1. Осуществлен анализ результатов экспериментальных исследований влияния низкоинтенсивных импульсно-модулированных электромагнитных полей на кардиоритмологические и этологические параметры крыс, проведенных в РФЯЦ-ВНИИЭФ в период 2010 – 2015 годов.

2. Установлено, что нормальное функциональное состояние организма лабораторных животных характеризуется определенным соотношением спектральных показателей ВСР (% HF, % LF и % VLF) и интегральных показателей поведенческой активности и пассивности (ИПА и ИПП), подчиняющимся закону «золотой пропорции».

3. Показано, что воздействие электромагнитных полей с биологически эффективными параметрами модуляции, характеризующееся комплексными физиологическими нарушениями функционирования организма, приводит к значительным смещениям «золотой пропорции» в ту или иную сторону в соотношении указанных кардиоритмологических и этологических параметров. Поля, не вызывающие заметных физиологических откликов, практически не нарушают «золотой пропорции» в соотношении рассматриваемых параметров.

4. Предлагаемый подход к оценке результатов кардиоритмологических и поведенческих исследований может быть использован в качестве инструмента экспресс-анализа биологических эффектов электромагнитных полей нетепловой интенсивности.

Список литературы

1. Шапоренко П. Ф. Гармоническая соразмерность частей тела человека и прин-

цип обобщенного золотого сечения / Шапоренко П. Ф., Лужецкий В. А. // Морфология. – 1992. - Т. 103. - №11-12. - С. 122–130.

2. Коробко В. И. Основы структурной гармонии природных и искусственных систем / Коробко В. И., Коробко Г. Н. – Ставрополь, 1995. – 350 с.

3. Суббота А.Г. Золотое сечение («sectio aurea») в медицине / Суббота А. Г. – СПб., 1994.

4. Соколов А. А. Математические закономерности электрических колебаний мозга / Соколов А. А., Соколов А. Я. – М., Наука, 1976. – 97 с.

5. Цветков В. Д. Системная организация деятельности сердца млекопитающих / Цветков В. Д. – Пушино: ПНЦ РАН, 1993. – 134 с.

6. Цветков В. Д. Золотое сечение и гармония сердца / Цветков В. Д. // Полигнозис. – Т. 2. – № 6. – ИИнтелЛ, 1999.

7. Лобкаева Е. П., Девяткова Н. С., Комиссаров В. И. Обоснование подбора параметров импульсного магнитного поля для получения заданного биологического эффекта. Человек и электромагнитные поля. Сборник материалов I Международной конференции. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. – С. 8 – 19.

8. Лобкаева Е.П., Девяткова Н.С., Синельникова И.А. Определение критериев устойчивости организма при воздействии модулированного низкоинтенсивного электромагнитного излучения и механизмы его реализации. Человек и электромагнитные поля. Сборник материалов III Международной конференции. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010. – С. 29–39.

9. Баевский Р. М. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиологических систем / Баевский Р. М., Иванов Г. Г., Чирейкин Л. В., Гаврилушкин А. П., Довгалецкий П. Я. // Вестник аритмологии, 2001. – № 24. – С. 65–87.

10. Михайлов В. М. Variability сердечного ритма. Опыт практического метода / Михайлов В. М. – Иваново, 2000. – 200 с.

11. Рябыкина Г. В. Вариабельность ритма сердца / Рябыкина Г. В., Соболева А. В. М. / Оверлей, 2001–200 с.
12. Хаспекова Н. Б. Диагностическая информативность мониторинга вариабельности ритма сердца / Хаспекова Н. Б. // Вестник аритмологии. – 2003. – № 32. – С. 15–23.
13. Буреш Я. Методики и основные эксперименты по изучению мозга и поведения: Пер. с англ. Е.Н. Живописцевой / Буреш Я. и др. – М., 1991. – 399 с.
14. Судаков К. В. Индивидуальная устойчивость к эмоциональному стрессу / Судаков К. В. – М., 1998. – 268 с.
15. Калуев А. В. Проблемы и методы изучения груминга при анализе стрессорного поведения у грызунов / Калуев А. В. [электронный ресурс] <http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1159942&s=>
16. Лакин Г. Ф. Биометрия. – М.: Высшая школа, 1973. – 342 с.
17. Великжанин В. И. Генетика поведения сельскохозяйственных животных (этология, темперамент, продуктивность) / Великжанин В.И. // Спб: ВМИИИ, 2004. – 204 с.
18. Исмаилова Х. Ю. Индивидуальные особенности поведения (монаминэргические механизмы) / Исмаилова Х. Ю., Агаев Т. М., Семенова Т. П. – Баку, 2007. – 228 с.
19. Шаляпина В. Г. Изменение приспособительного поведения активных и пассивных крыс вistar в водно-имерсионной модели депрессии / Шаляпина В. Г., Вершинина Е. А, Ракицкая В. В, Рыжова Л. Ю, Семенова М. Г, Семенова О. Г. // Журн. высш. нервн. деят., 2006. – Т. 56, № 4. – С. 543 – 547.
20. Баркин В. В., Лабынцева О. М., Ананьева Ю. Е., Куканова О. В., Сметанина М. В., Синельникова И. А., Лобкаева Е. П. Исследование биологических эффектов низкоинтенсивного низкочастотного магнитного поля с различными спектральными характеристиками. Человек и электромагнитные поля. Сборник материалов IV Международной конференции. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010. – С. 38 – 47.
21. Лабынцева О. М., Калиновская О. В., Рохмистрова Е. Г., Ананьева Ю. Е., Поленова И. А. Клеточно-молекулярные аспекты действия сложномодулированного ЭМИ нетепловой интенсивности. Человек и электромагнитные поля. Сборник материалов IV Международной конференции. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010. – С. 48 – 57.
22. Мишагина М. Н., Глухова О. В., Баркин В. В. Оценка реакции вегетативной нервной системы биообъекта на воздействие низкоинтенсивным электромагнитным излучением с импульсно-частотной модуляцией. Человек и электромагнитные поля. Сборник материалов IV Международной конференции. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010. – С. 76 – 81.
23. Баркин В. В., Лабынцева О. М., Ананьева Ю. Е., Буянов Л. С., Данилова Е. В., Лопаткина Н. В., Рохмистрова Е. Г., Сметанина М. В., Лобкаева Е. П. Влияние модуляции на биологические эффекты низкоинтенсивного электромагнитного излучения различной частоты. Человек и электромагнитные поля. Сборник материалов IV Международной конференции. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010. – С. 128 – 139.