

© Чернова Г.В., Сидоров П.В., Ергольская Н.В., Алленова Е.А., Эндебера О.П., 2020

УДК 613.16:57.044+539.1:582.263

Экспериментальная оценка влияния электромагнитного излучения крайне высокой частоты на развивающийся организм

Г.В. Чернова, П.В. Сидоров, Н.В. Ергольская, Е.А. Алленова, О.П. Эндебера

Научно-образовательный центр биофизических исследований ФГБОУ ВО

«Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского»,

ул. Степана Разина, 26, г. Калуга, 248023, Российская Федерация

Резюме: Введение. Статья посвящена результатам экспериментального изучения изменчивости показателей признаков разного уровня значимости (популяционного, организменного, молекулярно-генетического) с целью оценки влияния электромагнитного излучения крайне высокой частоты (ЭМИ КВЧ) как одного из физических факторов среды обитания, воздействующего на организм человека. *Материалы и методы.* Исследования осуществлялись на лабораторной популяции *Drosophila melanogaster* линии дикого фенотипа (D-32). Содержание дрозофил проводилось на стандартной питательной среде в специальных сосудах при температуре $24,0 \pm 0,1$ °C в термостате ТС-80М при соблюдении необходимых условий. *Результаты.* На модельном генетическом объекте выявлены эффекты проявления данного фактора, которые определяли закономерности изменчивости численности особей в популяции, их массы тела и содержания РНК в организме в зависимости от дозы ЭМИ КВЧ при разных формах регуляции: на уровне функциональной асимметрии и в генотип-средовом контексте. *Выводы.* Показано, что излучение крайне высокой частоты как фактор природного и техногенного происхождения, оказывая влияние на жизненно важные признаки развивающегося организма, требует внимания при комплексной гигиенической оценке влияния факторов среды обитания. Такой подход необходим с учетом модифицирующего действия ЭМИ КВЧ по отношению к жизнеспособности особей, которая отражает морфофизиологическое и молекулярно-генетическое состояние родительского поколения и его потомства.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, популяция, организм, численность, масса тела, РНК, функциональная асимметрия, генотип-средовые эффекты.

Для цитирования: Чернова Г.В., Сидоров П.В., Ергольская Н.В., Алленова Е.А., Эндебера О.П. Экспериментальная оценка влияния электромагнитного излучения крайне высокой частоты на развивающийся организм // Здоровье населения и среда обитания. 2020. № 7 (328). С. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2020-328-7-59-66>

Experimental Evaluation of Effects of Electromagnetic Radiation of Extremely High Frequency on the Developing Organism

G.V. Chernova, P.V. Sidorov, N.V. Ergolskaya, E.A. Allenova, O.P. Endebera

Scientific and Educational Center of Biophysical Research, Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovsky, 26 Stepan Razin Street, Kaluga, 248023, Russian Federation

Abstract. *Introduction:* The article is devoted to the results of an experimental study of the variability of indicators of the signs of different levels of importance (population, organismal, and molecular genetic) in order to assess the impact of electromagnetic radiation of extremely high frequency (EHF EMR) as one of the physical environmental factors affecting the human body. *Materials and methods:* The studies were carried out on the laboratory population of *Drosophila melanogaster* of the wild phenotype line (D-32). The fruit flies were grown in a standard nutrient medium in special vessels at the temperature of 24.0 ± 0.1 °C in a TC-80M thermostat subject to the necessary conditions. *Results:* The model genetic object revealed the effects of the factor that determined the patterns of variability of the number of individuals in the population, their body weight and the RNA content in the body depending on the dose of EHF EMR under different forms of its regulation: at the level of functional asymmetry and in the genotype-medium context. *Conclusions:* It was demonstrated that radiation of extremely high frequency as a factor of natural and anthropogenic origin influencing vital signs of a developing organism requires attention in a comprehensive hygienic assessment of health effects of environmental factors. This approach is necessary in view of the modifying effect of EHF EMR with respect to the viability of individuals reflecting the morphophysiological and molecular genetic state of the parent generation and its offspring.

Key words: electromagnetic radiation, population, organism, abundance, body weight, RNA, functional asymmetry, genotype-environmental effects.

For citation: Chernova GV, Sidorov PV, Ergolskaya NV, Allenova EA, Endebera OP. Experimental evaluation of effects of electromagnetic radiation of extremely high frequency on the developing organism. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2020; (7(328)):59–66. (In Russian) DOI: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2020-328-7-59-66>

Author information: Chernova G.V., <https://orcid.org/0000-0001-6961-2417>; Sidorov P.V., <https://orcid.org/0000-0002-7643-3596>; Ergolskaya N.V., <https://orcid.org/0000-0003-2969-5750>; Allenova E.A., <https://orcid.org/0000-0002-1651-3121>; Endebera O.P., <https://orcid.org/0000-0002-9542-6084>.

Введение. Происходящие изменения в условиях среды обитания могут оказывать влияние на различные системы организма, при этом эффекты такого влияния могут быть запрограммированы определенным образом, чтобы в критические моменты своего развития системы на них реагировали. В литературных источниках приведено большое количество данных, свидетельствующих о воздействии факторов природного и техногенного происхождения на организм человека и животных [1–7]. Из них следует, что все виды подобного импринтирования, наблюдаемые при регуляции проявления разных признаков, взаимообусловлены. Одним из связующих звеньев такого явления могут быть электромагнитные поля [8].

Из факторов среды обитания, имеющих электромагнитную природу и оказывающих действие на процессы жизнедеятельности организма, особый интерес представляют излучения с длиной волны от 1 до 10 мм. Их называют крайне высокочастотными (КВЧ) или миллиметровыми (мм) волнами. Электромагнитное излучение КВЧ (ЭМИ КВЧ) является одним из поддиапазонов сверхвысокочастотных колебаний (частота свыше 300 МГц). Основным естественным источником электромагнитных волн на Земле является Солнце. Излучение в мм-диапазоне зависит от интенсивности солнечной активности. При этом влияние ЭМИ КВЧ как физического фактора определяется частотой следования его импульса, длиной

волны, плотностью потока мощности, интенсивностью облучения, его направленностью. Доза, получаемая биообъектом при проявляемой интенсивности КВЧ излучения, будет зависеть от времени облучения и площади экспонируемой поверхности. Эффекты такого типа воздействия выявляются на разных уровнях организации биологических систем, проявляясь наиболее оптимально при сочетании излучения КВЧ и красного света [9, 10]. С учетом реакции биообъектов на данное излучение разработаны источники ЭМИ КВЧ искусственного происхождения. Они применяются для диагностических, лечебных, биотехнологических целей и при осуществлении производственных процессов разного назначения.

Данный тип неионизирующего излучения (НИ), как и другие физические воздействия, являясь первичным экологическим фактором, не всегда вызывает адекватную реакцию адаптационных систем. При этом их состояние способно влиять на приспособленность организма к условиям обитания, а КВЧ излучение может обусловить изменение его жизнеспособности, модифицируя продолжительность жизни [11]. Указанные особенности этого типа НИ определили цель данной работы. Она направлена на экспериментальное изучение изменчивости показателей признаков разного уровня значимости (популяционного, организменного, молекулярно-генетического) для оценки влияния ЭМИ КВЧ как одного из факторов среды обитания природного и техногенного происхождения, действующего на организм человека.

Материалы и методы исследования. В качестве источника ЭМИ КВЧ нами использовался аппарат «АМФИТ-0.2/10-01» мощностью 2.019 мкВт/см, который часто применяется для диагностических и лечебных целей.

Исследования осуществлялись на лабораторной популяции *Drosophila melanogaster* линии дикого типа (Д-32). Дикий фенотип — совокупность признаков, свойственных особям, обитающим в природных популяциях. Содержание дрозофил проводилось на стандартной питательной среде в специальных сосудах при температуре $24,0 \pm 0,1$ °C в термостате ТС-80М при соблюдении необходимых условий¹. Особи опытной группы экспонировались: 1) на 10 стадии эмбрионального развития; 2) на 3 стадии личиночного развития; 3) во взрослом состоянии (стадия имаго). В указанный период эмбрионального развития происходят многочисленные митозы в нейробластах и сегментация мезодермы. В этом случае эффект воздействия ЭМИ КВЧ выразится у имаго в изменении нервно-мышечной активности. У личинок 3-го возраста сформированы все имагинальные диски. На уровне данного периода постнатального развития личиночные клетки постепенно дегенерируют, а имагинальные диски получают сигналы к дифференцировке в органы взрослых особей, у которых эффекты облучения могут вызывать изменения в их морфофизиологических системах. В репродуктивном возрасте эти особи использовались в качестве родительских форм для получения следующего поколения.

Параметры воздействия ЭМИ КВЧ в разных экспериментальных исследованиях определялись временем экспонирования. Оно составляло от 0,5 до 100 минут, следовательно, дозы облучения — от 0,03029 до 6,05700 Дж/см². Для выявления эффектов ЭМИ КВЧ определялась численность особей в популяции, их масса тела, содержание в нем рибонуклеиновой кислоты (РНК). Поскольку численность популяции зависит от условий ее существования, от отношения ее с ведущими факторами среды исследовалось количество особей репродуктивного возраста, полученных при облучении их на эмбриональной и 3-й личиночной стадии развития, и их потомков.

Для оценки важным являлось то, что рост организма, составляя один из процессов его развития, детерминирован в основном генетически, но существует компонента, которая является следствием влияния средовых факторов [12]. Проявление их влияния зависит от реализации генетической программы, определяющей развитие организма, и притока информации извне, то есть от взаимодействия с информационным полем среды обитания. Такие взаимодействия представляют собой один из детерминантов формирования массы тела в растущем организме. Для выявления доли влияния на этот процесс ЭМИ КВЧ у экспериментальных особей в возрасте одних суток проводили определение массы тела (в граммах).

Масса тела организма — один из важнейших морфологических признаков, который включает всю его активную клеточную массу [13]. Из всех макромолекул, определяющих биологическую структуру клеток и их функциональное состояние, наибольшую значимость имеют белки, на отдельных этапах синтеза которых участвуют разные типы РНК. Учитывая их роль, исследовали у особей опытных и контрольных групп общее содержание РНК, выражая концентрацию РНК в мг/г сырой массы объекта. При выборе метода основывались на его оптимальности [14, 15] в зависимости от решаемой задачи. Это был классический метод выделения нуклеиновых кислот из тканей, включающий в себя мягкий щелочной гидролиз РНК, к которому ДНК более устойчива и остается в осадке. Через ряд последовательных этапов получения гидролизата РНК проводилось измерение оптической плотности раствора с использованием двухволновой спектрофотометрии. Общее содержание РНК определялось на основе расчета ее значения, которое отражало концентрацию РНК в исследованной пробе.

Биометрический анализ полученных данных проводили с учетом требований к объему выборочной совокупности, который определяли по формуле:

$$n = (t \times \delta^2) / \Delta^2, \text{ где}$$

t — нормированное отклонение, с которым связан тот или иной уровень значимости, δ^2 — выборочная дисперсия,

Δ = t_m — величина, определяющая границы доверительного интервала (m — ошибка репрезентативности выборочной средней).

При этом при облучении эмбрионов по каждому признаку обследовано на уровне роди-

¹ Козак М.Ф. Дрозофила — модельный объект генетики: учебно-методическое пособие. Астрахань: Издательский дом «Астраханский государственный университет», 2007. 87 с.

тельского поколения (РР) 3026 особей, первого поколения (F1) — 3607, при экспонировании особей на личиночной стадии развития количество РР = 4959, F1 = 4909. Содержание РНК определено у 1720 особей.

Первичные данные получены при проведении серии экспериментов, иногда разделенных во времени по условиям планирования опытов, соответственно, при объективно происходящих изменениях окружающей среды. В связи с этим методологически было бы неправильным сравнивать результаты на уровне абсолютных значений. В таком случае они приводятся в виде отношения опытных значений к контрольным, выраженного в %. Статистическая оценка результатов исследования была направлена на получение показателей согласно теории репрезентативности: средних величин, раскрывающих тенденцию развития признаков; разнообразия, отражающего проявление их генетически обусловленной изменчивости; распределения объектов в зависимости от величины изучаемых признаков; t-распределения с учетом значений нормированного отклонения, которое было на уровне нормального типа; репрезентативности с оценкой достоверности при расчете критериев Стьюдента, χ^2 -квадрат, Фишера. Кроме использования классических методов в их компьютерных вариантах, в том числе регрессионного (на уровне различий двух рядов регрессии) и корреляционного анализов, основывались на современных исследовательских технологиях [16].

Результаты и их обсуждение. Как уже указывалось, при облучении особей на 10 стадии эмбрионального развития отдаленные последствия его воздействия могут выразиться в изменении нервно-мышечной активности и, соответственно, отразиться на поведенческих признаках взрослых особей. Морфологически данные изменения могут выражаться в особенностях наложения крыльев (правое крыло сверху — «правокрылые» (ПК), левое крыло сверху — «левокрылые» (ЛК)).

Изменчивость показателей численности ПК и ЛК особей, обусловленная влиянием КВЧ-излучения, была проявлением ее регуляции

на уровне функциональной асимметрии (ФА). Отношение (индексы) ЛК и ПК (ЛК/ПК) в лабораторной популяции (без разделения по половому признаку), содержащихся в темноте (обычные лабораторные условия развития дрозофилы), составило 2,80, при этом у особей женского пола (♀) — 3,00, мужского (♂) — 2,64. У особей, содержащихся при свете, наблюдалось снижение индексов до 1,86 (♀) и 1,66 (♂), то есть понижалась жизнеспособность ЛК. Численность ЛК ♀ уменьшалась в 1,61 раза, ♂ — 1,59, что отражало негативное влияние постоянного света на адаптацию особей в популяции к этому физическому фактору. Показатели, представленные на рис. 1–7, характеризуют особей, развивающихся в темноте, то есть лимитирующим фактором в этом случае было только экспериментальное воздействие — ЭМИ КВЧ. Анализ данных рис. 1 позволил установить, что при указанных условиях ПК и ЛК взрослые особи, выросшие из облученных эмбрионов на 10 стадии, проявили близкое соотношение численности. Выявлена положительная регрессионная зависимость между количеством ПК и ЛК в связи с повышением дозы энергии ЭМИ КВЧ. Она выразилась у ♂ величиной коэффициента корреляции: $r = 0,892$ при $p < 0,001$ (его показатель у ♀ соответствовал 0,992, $p < 0,001$).

Необходимо указать, что облучение эмбрионов всех опытных групп в зависимости от дозы КВЧ-излучения проводилось в разное время. Следовательно, изучение экспонированных особей в каждой серии опытов сопровождалось одновременным контрольным исследованием. В связи с этим следует добавить, что наименьшее (по сравнению с показателями других групп) отношение числа взрослых особей, развившихся из облученных эмбрионов, к контрольным их сверстникам (О/К) наблюдалось при дозе КВЧ-излучения $0,06057 \times 10^{-3}$ Дж/см². Оно составляло $55,36 \pm 0,60$ % (ПК ♀), $55,87 \pm 0,62$ % (ПК ♂), $72,47 \pm 0,66$ % (ЛК ♀) и $52,47 \pm 0,33$ % (ЛК ♂). Наибольшая величина О/К определилась у ПК и ЛК ♀ при дозе энергии $1,8171 \times 10^{-3}$ Дж/см² — $135,77 \pm 1,06$ % и $140,47 \pm 1,00$ %, у ПК и ЛК ♂ — при дозах $0,6057 \times 10^{-3}$ и $6,057 \times 10^{-3}$ Дж/см².

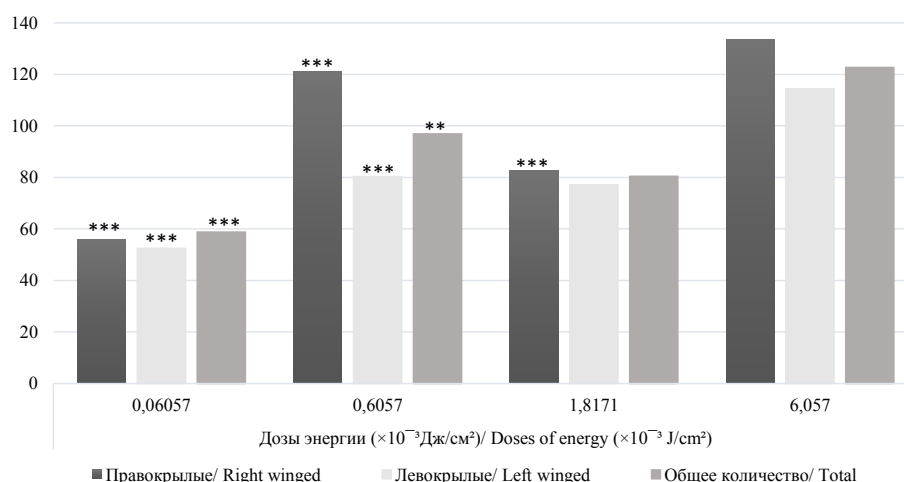


Рис. 1. Численность ♂, выросших из облученных эмбрионов, выражена в % по отношению к контролю. Здесь и на последующих рисунках достоверность различий показана при $p < 0,05$ — *, $p < 0,01$ — **, $p < 0,001$ — ***

Fig. 1. The number of ♂ grown from irradiated embryos is expressed as % of control. Here and in the following figures, the significance of the differences is shown for $p < 0.05$ — *, $p < 0.01$ — **, $p < 0.001$ — ***.

При увеличении величины О/К при дозе $6,057 \times 10^{-3}$ Дж/см² отмечена наименьшая величина отношения массы тела к его контрольному значению у ПК и ЛК ♀ до $88,97 \pm 0,66$ % и ♂ – $107,97 \pm 0,65$ %, что является проявлением известной популяционной закономерности: увеличение или уменьшение численности популяции влияет на массу тела (вес) ее особей, соответственно в сторону снижения или повышения.

Масса тела ПК и ЛК имаго (рис. 2) с возрастанием дозы ЭМИ КВЧ изменялась в основном в одном направлении. Показана высокая степень взаимосвязи между проявлением признака у ПК и ЛК особей при значении $r = 0,951$ ($p < 0,001$) у ♂; для сравнения укажем, что значение « r » у ♀ было равно $0,795$ при $p < 0,001$. Учитывая высоко сопряженные эффекты влияния ЭМИ КВЧ на проявление двух признаков, проанализируем их изменчивость в зависимости от дозы воздействующего фактора на уровне общих популяционных значений.

При снижении численности особей (рис. 1) возрастала их масса тела (рис. 2) при дозах $0,06057 \times 10^{-3}$ Дж/см², $0,6057 \times 10^{-3}$ Дж/см² (с особенностями соотношений ЛК и ПК у каждого пола). Повышение дозы в 27 и 92 раза по сравнению с $0,06057 \times 10^{-3}$ Дж/см² вызывало также характерные гендерные изменения двух

признаков. Для обнаружения закономерностей проявления признаков разной популяционной значимости с помощью анализа дисперсий (фенотипической, генотипической и средовой) были выявлены те факторы, которые их определяли в данном исследовании.

Изменение численности особей в популяции в 90,53 % случаев было обусловлено дозой КВЧ-излучения, то есть средовым фактором. Проявление генетической компоненты составило 6,44 %, ФА – 3,03 %. По отношению к массе тела влияние генетического фактора проявилось в 67,12 % случаев, средового (КВЧ излучение) – в 19,66 %, ФА – в 13,22 %. Изменчивость проявления ФА в зависимости от дозы ЭМИ КВЧ была особенно велика по отношению к содержанию РНК в исследуемом биообъекте (рис. 3, 4). Изменчивость концентрации РНК в зависимости от поглощенной эмбрионами дозы ЭМИ КВЧ была обусловлена проявлением ФА (40,33 %) и энергией излучения (55,73 %) при небольших (3,94 %) половых различиях.

Из анализа экспериментальных данных следует, что изменение численности особей в популяции, выросших из облученных разными дозами ЭМИ КВЧ эмбрионов, в основном происходило под влиянием средового фактора (КВЧ-излучения). Их масса тела (как морфофизиологический признак) формировалась при

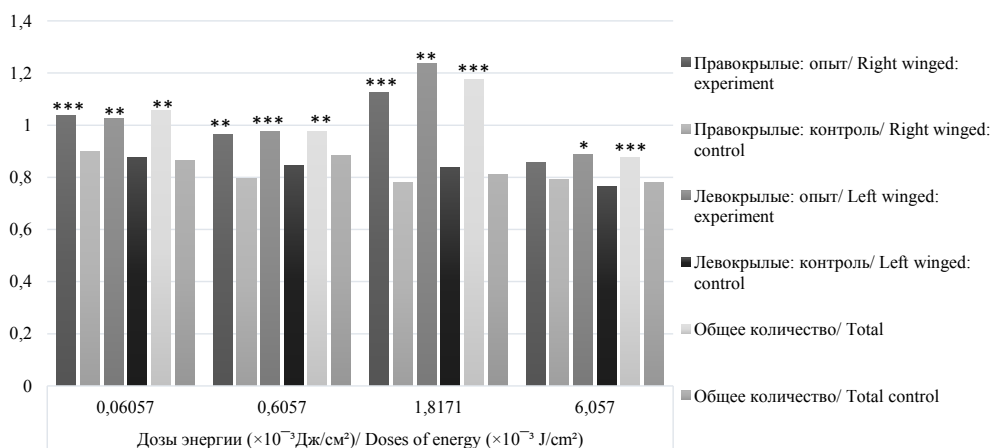


Рис. 2. Масса тела (г) ♂, выросших из облученных эмбрионов (приведены показатели экспериментальных и контрольных значений ПК, ЛК и общего количества особей без разделения по проявлению ФА); обозначение достоверности аналогичны рис. 1

Fig. 2. Body weight (g) of ♂ grown from irradiated embryos (the experimental and control values of RW, LW and the total number of individuals without separation by FA manifestation are presented); see Fig. 1 for designation of significance

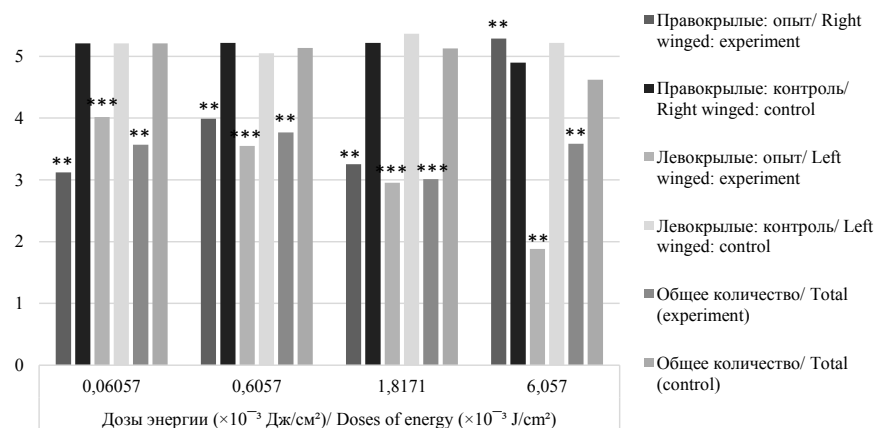


Рис. 3. Содержание РНК (мг/г массы объекта) у ♀ экспериментальных и контрольных групп

Fig. 3. RNA content (mg/g mass of the object) in ♀ of experimental and control groups

реализации генетической программы развития в условиях умеренного воздействия на этот процесс экспериментального средового фактора и небольшого влияния ФА.

В этом аспекте объяснима сопряженность между изменчивостью признаков у ПК и ЛК особей в зависимости от дозы облучения. Эффекты высокой значимости ФА и ЭМИ КВЧ (как средового фактора) проявились на уровне снижения содержания РНК в организме эмбрионов (рис. 3, 4). Это происходило при высокой отрицательной корреляционной связи ($r = -0,827$, $p < 0,001$) между концентрацией РНК у ПК и ЛК, изменчивостью численности взрослых особей и содержанием РНК у облученных эмбрионов ($r = -0,752$, $p < 0,001$). Функционально важным явилось то, что при этом масса тела имаго была сопряжена с концентрацией РНК ($r = 0,498$, $p < 0,001$).

Основные результаты, характеризующие эффекты экспонирования особей на 3 личиночной стадии развития, показаны на рис. 5 (на рис. 5 и 6 дозы энергии = $\times 10^{-3}$). Из данных рис. 5 следует, что численность выросших из них ♀ и ♂ снижалась. Сопряженность между изменчивостью количества их особей была близка к

среднему значению ($r = 0,425$, $p < 0,001$), а зависимость между массой их тела – высокой ($r = 0,786$, $p < 0,001$). При этом снижение численности популяции в 71,41 % случаев было вызвано воздействием ЭМИ КВЧ. Влияние ФА проявлялось в 19,44 %, гендерных различий в небольшом % случаев (9,15 %). Такие различия не были статистически значимыми на уровне основного генетически определяемого показателя разнообразия – среднего квадратического отклонения $-\delta$ (сигмы). В качестве примера приведем его значения по отношению к изменчивости показателя численности ПК особей при разных дозах КВЧ-излучения: $0,06057 \text{ Дж/см}^2 \times 10^{-3} - 3,20 \pm 0,53 \% (\text{♀}), 2,77 \pm 0,45 \% (\text{♂}); 0,30285 - 4,34 \pm 0,79 \% (\text{♀}), 3,31 \pm 0,58 \% (\text{♂}); 0,6057 - 3,82 \pm 0,66 \% (\text{♀}), 3,53 \pm 0,69 \% (\text{♂}); 1,2114 - 4,02 \pm 0,71 \% (\text{♀}), 4,96 \pm 0,88 \% (\text{♂}); 1,50425 - 3,06 \pm 0,57 \% (\text{♀}), 2,52 \pm 0,50 \% (\text{♂}); 1,8171 - 3,24 \pm 0,60 \% (\text{♀}), 2,32 \pm 0,41 \% (\text{♂});$ в контроле: $2,55 \pm 0,41 \% (\text{♀})$, у ♂ – $3,24 \pm 0,52$. Ошибки репрезентативности δ отражают варьирование показателя при исследовании разных групп одной и той же лабораторной популяции.

Изменчивость массы тела взрослых особей (рис. 6) определялась эффектами их облучения

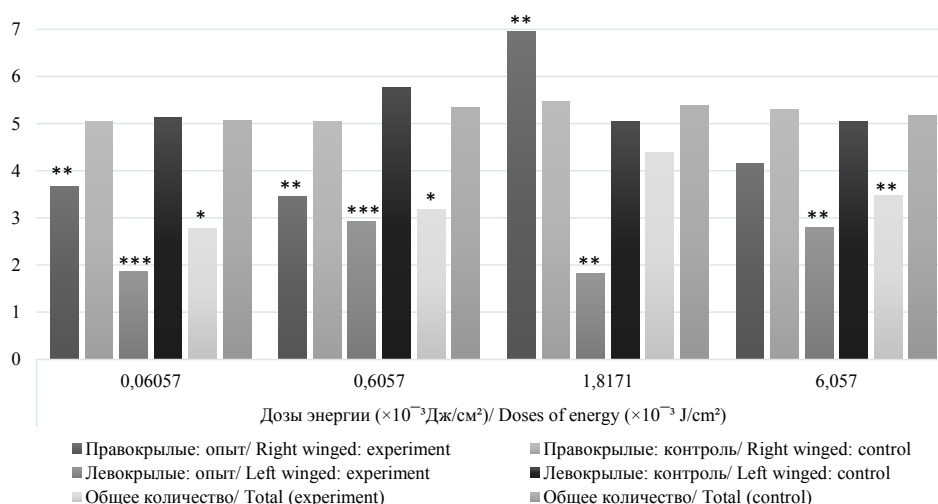


Рис. 4. Содержание РНК (мг/г массы биообъекта) у ♂ (обозначения аналогичны рис. 3)
Fig. 4. RNA content (mg/g of bioobject mass) in ♂ (designations as in Fig. 3)

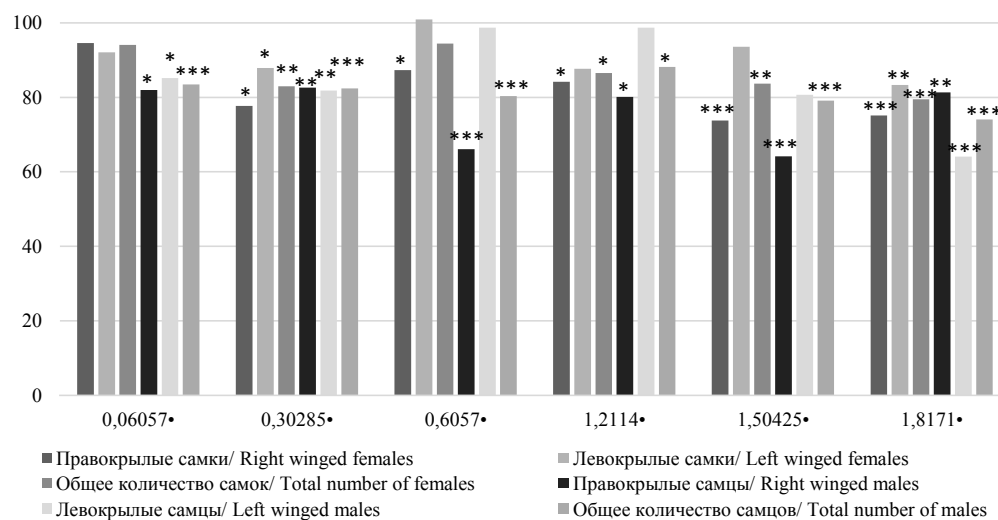


Рис. 5. Численность ♀ и ♂ (% к контролю), выросших из особей, облученных на 3 стадии личиночного развития
Fig. 5. The number ♀ and ♂ (% of control) grown from individuals irradiated at the third stage of larval development

на 3 стадии личиночного развития и происходила под статистически значимым ($p < 0,001$) влиянием генетических (G) факторов (65,37 %), средовых (E - КВЧ-излучение) — 31,45 % и ФА — 3,07 %. При указанном соотношении G, E и ФА происходило примерно одинаковое варьирование опытных значений признака относительно контрольных его величин у ПК и ЛК особей. По данному морфологическому признаку наблюдалось эволюционно и генетически определяемое проявление полового диморфизма. Оно выявлялось при сравнении различий в значениях признака у особей мужского и женского пола. На уровне показателя его разнообразия δ гендерные различия отмечены в направлении повышения и понижения показателя в зависимости от половой принадлежности при разной энергии облучения. При дозе КВЧ-излучения $0,06057 \times 10^{-3}$ Дж/см² он составлял (приводим на примере ПК) — $0,26 \pm 0,04$ г (♀), $0,13 \pm 0,02$ г (♂), $p < 0,01$; $0,30285 \times 10^{-3}$ Дж/см² —

$0,21 \pm 0,04$ г (♀), $0,13 \pm 0,02$ г (♂); $0,6057 \times 10^{-3}$ Дж/см² — $0,040 \pm 0,007$ г (♀), $0,14 \pm 0,03$ г (♂), $p < 0,01$; $1,2114 \times 10^{-3}$ Дж/см² — $0,12 \pm 0,02$ г (♀), $0,08 \pm 0,01$ г (♂); $1,50425 \times 10^{-3}$ Дж/см² — $0,15 \pm 0,03$ г (♀), $0,29 \pm 0,06$ г (♂), $p = 0,05$; $1,8171 \times 10^{-3}$ Дж/см² — $0,38 \pm 0,07$ г (♀), $0,12 \pm 0,02$ г (♂), $p = 0,001$. Все значения « δ » достоверны.

При особенностях изменчивости признаков у особей репродуктивного возраста, облученных на ранних стадиях эмбрионального и постэмбрионального развития, и у их потомства (♀ и ♂) происходило снижение всех анализируемых показателей по сравнению с контрольными значениями (рис. 7).

Особенно низкую концентрацию РНК имели ♂, что и определило уменьшение их массы тела. Среди механизмов такого эффекта ЭМИ КВЧ отмечается его воздействие на один из имажинальных дисков личиночной стадии, на которой облучались особи.

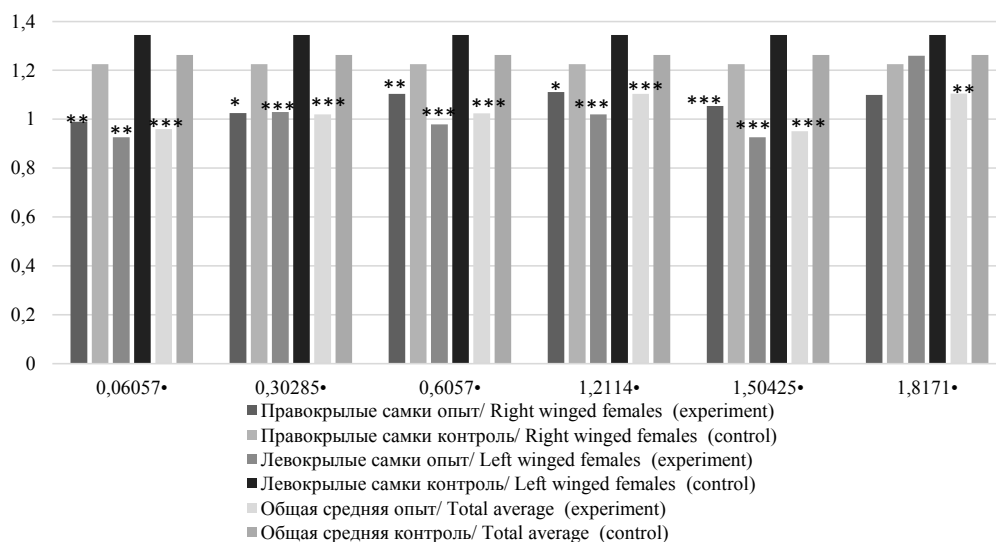


Рис. 6. Изменчивость массы тела (г) особей, облученных на 3 стадии личиночного развития
Fig. 6. Variability of body weight (g) of individuals irradiated at the third stage of larval development

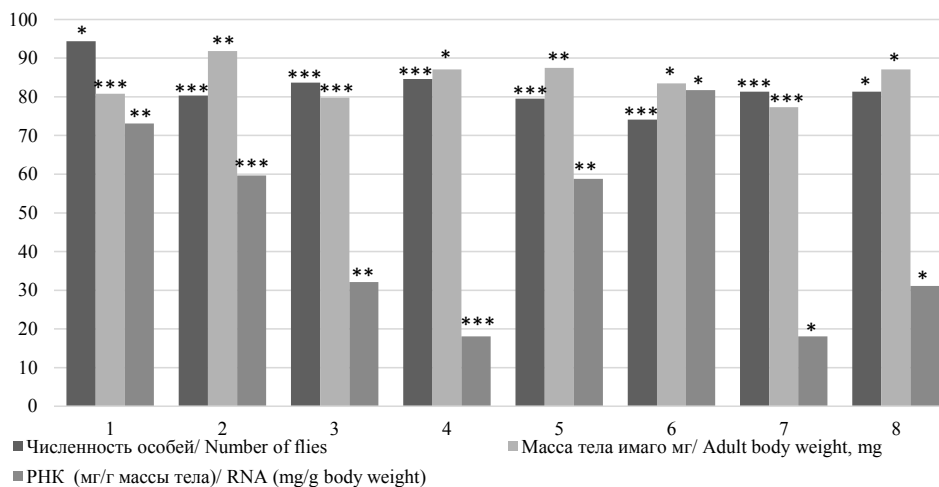


Рис. 7. Изменчивость признаков, вызванная разными дозами КВЧ-излучения: $0,06057^*$ (1–4) и $1,8171 \times 10^{-3}$ Дж/см² (5–8) и выраженная в % по отношению к контролю. Цифрами 1 и 5 показаны данные ♀, облученных на 3 стадии личиночного развития, 3 и 7 — ♀-потомков облученных особей, 2 и 6, 4 и 8 отражают данные ♂
Fig. 7. Variability of signs caused by different doses of EHF EMR: $0,06057^*$ (1–4) and $1,8171 \times 10^{-3}$ J/cm² (5–8) and expressed in % of control. Numbers 1 and 5 show data on ♀ irradiated at the third stage of larval development, 3 and 7 on ♀-offspring of irradiated individuals; 2 and 6, 4 and 8 reflect the data on ♂

Из облученного диска образовался генитальный диск с запрограммированными изменениями, которые передались сформированным репродуктивным структурам взрослого организма.

Такой возможный механизм преемственности в ряду поколений обусловил уменьшение содержания РНК у потомства — взрослых особей мужского пола. Поэтому в 94,31 % случаев оно было детерминировано генетически. При этом масса их тела формировалась (в 96,77 % случаев) под влиянием генетических факторов. У ♀ содержание РНК также было ниже по сравнению с контролем и отражалось на показателях их массы тела (рис. 7). В ряду поколений проявление признаков было обусловлено генетически: в 84,26 % случаев (при доле влияния средовых факторов = 15,74 % (у ♂ оно составлял 5,69 %).

С учетом положений научной платформы «профилактическая среда» [17], направленной на решение актуальных вопросов современной гигиены, приведенные в данной работе результаты экспериментально доказывают необходимость гигиенической регламентации флюктуирующих физических факторов среды обитания человека.

Выводы

1. Распределение фенотипов в популяции определялось под влиянием генетических и средовых факторов при эффектах проявления регуляции на уровне функциональной асимметрии (ФА).

2. Численность особей в такой популяции изменялась в зависимости от дозы излучения крайне высокой частоты (КВЧ) как средового фактора, воздействие которого происходило на особей ранних эмбриональной и постэмбриональных стадиях развития (3-я личиночная стадия) организма. Средовое значение (Е) этого фактора по отношению к данному признаку было высоким (Е = 90,5 % при генотипическом значении G = 6,5 % на уровне небольшого проявления ФА — в 3,0 % случаях). Снижение численности популяции наблюдалось на уровне следующего поколения. При этом у ♀ эффекты Е проявились в 71,4 % случаев при G = 28,6 %, ♂ — Е = 41,9 %, G = 58,1 %.

3. Изменчивость массы тела как одного из важнейших признаков организменного уровня при всех дозах КВЧ-излучения контролировалась в основном генетическими факторами. Значение G варьировало в экспериментах от 65,4 до 67,1 %, Е — от 19,7 до 31,5 %; проявление ФА — 3,1–13,2 %. Снижение этого признака в ряду поколений определялось в 84,3 % G, 15,7 % — Е (КВЧ-излучение) и зависело от концентрации синтезируемой РНК.

4. Сравнительный анализ содержания РНК выявил дозовую зависимость изменения (в основном снижения) ее концентрации. Она определялась на уровне значений G (в том числе включая регуляцию ФА) и Е. Так, эффект дозы 0,6057 Дж/см² проявлялся при значениях G = 78,2 % и Е = 21,8 %. В случае КВЧ-излучения при дозе 1,8171 Дж/см² генотипическое значение G = 92,9 %, а средовое Е = 7,1 %.

5. Излучение крайне высокой частоты как фактор природного и техногенного происхождения, оказывая влияние на развивающийся организм, требует особого внимания с учетом его эффективности на уровне модифицирующего действия по отношению к жизнеспособности особей, которая определяет их численность, морфофизиологическое и молекулярно-генетическое состояние родительского поколения и его потомства. При этом изучение уровней реализации механизмов формирования ответных реакций и проявление их закономерностей определяет одну из составляющих комплексных гигиенических оценок двух основных компонентов: функционального состояния организма и изменения существенных переменных окружающей его среды обитания.

Информация о вкладе авторов:

Алленова Е.А. — методическое обеспечение исследований по теме статьи, наблюдение за состоянием лабораторной популяции, проведение необходимых типов скрещиваний для осуществления экспериментальной работы, экспериментальные исследования влияния условий содержания на развитие особей;

Ергольская Н.В. — генетико-популяционные исследования влияния экспериментальных факторов;

Сидоров П.В. — методология и методика получения результатов экспериментальных исследований, их анализа в биометрическом контексте;

Чернова Г.В. — научное обоснование, научное обеспечение всех этапов исследований с использованием современных технологий и научно-методического анализа их результатов;

Эндебера О.П. — материально-техническое обеспечение исследований на уровне возможностей заведующего кафедрой.

Финансирование. Работа не имела спонсорской поддержки.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы (пп. 4–7, 15. 16 см. References)

1. Волчек О.Д., Павлов К.И. Сопряженность показателей сенсомоторики с природными условиями месяцев зачатия и рождения // Ученые записки СПбГМУ им. акад. И.П. Павлова, 2011. Т. 18. № 3. С. 63–64.
2. Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А. Сотовая связь и здоровье. Электромагнитная обстановка. Радиобиологические и гигиенические проблемы. Прогноз опасности. М.: Экономика, 2016. 573 с.
3. Коротаев А.В., Билюга С.Э., Малков С.Ю., Осипов Д.А. О солнечной активности как возможном факторе социально-политической дестабилизации // История и современность. 2016. № 2. С. 180–209.
4. Хорсева Н.И., Григорьев Ю.Г., Григорьев П.Е. Влияние низкоинтенсивных электромагнитных полей на антенатальный период развития организма. Часть 2. Отдаленные последствия в постнатальный период (Обзор) // Журнал медико-биологических исследований. 2018. Т. 6. № 1. С. 41–55.
5. Бабкина В.В., Чернова Г.В., Алленова Е.А. и др. Особенности проявления эколого-биологических признаков *D. melanogaster* в зависимости от дозы разных типов электромагнитного излучения // Радиационная биология. Радиоэкология. 2013. Т. 53. № 2. С. 191–198.
6. Ефремов Ю.И., Кревский М.А. Воздействие радиоволн крайне высоких частот на биологические объекты и перспективы его применения

- // Вестник научно технического развития. 2007. № 4. С. 1–9.
11. Чернова Г.В., Алленова Е.А., Эндебера О.П. Оценка функциональной асимметрии у модельного биологического объекта в условиях воздействия крайне высокочастотного излучения // Экология урбанизированных территорий. 2013. № 3. С. 98–102.
 12. Чернова Г.В., Кондратьев Ю.А., Романова А.Н., и др. Особенности динамики гематологических показателей эритроидного ряда у здоровых детей первого года жизни // Педиатрия. 2011. Т. 90. № 6. С. 34–40.
 13. Чернова Г.В., Дыкова Е.В., Сидоров В.В. и др. Сравнительный анализ показателей физического развития человека в раннем периоде постнатального онтогенеза начала XXI века // Валеология. 2017. № 4. С. 12–19.
 14. Антонова О.С., Корнева Н.А., Белов Ю.В. и др. Эффективные методы выделения нуклеиновых кислот для проведения анализов в молекулярной биологии (обзор) // Научное приборостроение. 2010. Т. 20. № 1. С. 3–9.
 17. Ракитский В.Н. Проблемы современной гигиены // Гигиена и санитария. 2015. № 94(4). С. 4–7.
 8. Khorseva NI, Grigor'ev YuG, Grigor'ev PE. Influence of low-intensity electromagnetic fields on the organism's antenatal development. Part 2. Late effects during the postnatal period (review). *Zhurnal Mediko-Biologicheskikh Issledovaniy*. 2018; 6(1):41–55. (In Russian).
 9. Babkina VV, Chernova GV, Allenova EA, et al. Features of manifestation of environmental and biological signs of *Drosophila melanogaster* depending on the dose of different types of electromagnetic radiation. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya*. 2013; 53(2):191–198. (In Russian).
 10. Efremov YuI, Krevsky MA. Impact of radio waves of extremely high frequencies on biological objects and perspectives of its application. *Vestnik Nauchno-Tekhnicheskogo Razvitiya*. 2007; (4):1–9. (In Russian).
 11. Chernova GV, Allenova EA, Endebera OP. Assessment of functional asymmetry at a model biological object in the conditions of influence of extremely high-frequency radiation. *Ehkologiya Urbanizirovannykh Territorii*. 2013; (3):98–102. (In Russian).
 12. Chernova GV, Kondratyev YuA, Romanova AN, et al. Features of dynamics of hematologic indicators of an erythroid row in healthy children of the first year of life. *Pediatriya*. 2011; 90(6):34–40. (In Russian).
 13. Chernova GV, Dykova EV, Sidorov VV, et al. The comparative analysis indexes of physical development of the person in the early period of the post-natal ontogenesis of the beginning of the 21st century. *Valeologiya*. 2017; (4):12–19. (In Russian).
 14. Antonova OS, Korneva NA, Belov YuV, et al. Methods of nucleic acids purification and separation in molecular biology (review). *Nauchnoe Priborostroyeniye*. 2010; 20(1):3–9. (In Russian).
 15. Basic DNA and RNA protocols, methods in molecular biology. Harwood AJ, editor. Vol. 58. New Jersey: Human Press, Totowa; 1994. 511 p.
 16. Vrijheid M, Martinez D, Manzanares S, et al. Ambient air pollution and risk of congenital anomalies: A systematic review and meta-analysis. *Environ Health Perspect*. 2011; 119(5):598–606.
 17. Rakitskii VN. Problems of contemporary hygiene. *Gigiena i Sanitariya*. 2015; 94(4):4–7. (In Russian).

References

1. Volchek OD, Paulou KI. Correlations between sensorimotor indices and environment conditions in the months of conception and birth. *Uchenye Zapiski SPBGMU im. Akad. I.P. Pavlova*. 2011; 18(3):63–64. (In Russian).
2. Grigoryev YuG, Grigoryev OA. Cellular communication and health. Electromagnetic environment. Radiobiological and hygiene problems. Hazard forecast. Moscow: Economics Publ.; 2016. 573 p.
3. Korotayev AV, Bilyuga CE, Malkov SYu, et al. About solar activity as a possible factor of socio-political destabilization. *Istoriya i Sovremennost'*. 2016; (2(24)):180–209. (In Russian).
4. Ingole IV, Ghosh SK. Effect of exposure to radio frequency radiation emitted by cell phone on the developing dorsal root ganglion of chick embryo: A light microscopic study. *Nepal Med Coll J*. 2012; 14(4):337–341.
5. Odaci E, Ünal D, Mercantepe T, et al. Pathological effects of prenatal exposure to a 900 MHz electromagnetic field on the 21-day-old male rat kidney. *Biotech Histochem*. 2015; 90(2):93–101.
6. Vrijheid M, Martinez D, Forns J, et al. Prenatal exposure to cell phone use and neurodevelopment at 14 months. *Epidemiology*. 2010; 21(2):259–262.
7. Zarei S, Mortazavi SMJ, Mehdizadeh AR, et al. A challenging issue in the etiology of speech problems: The effect of maternal exposure to electromagnetic fields on speech problems in the offspring. *J Biomed Phys Eng*. 2015; 5(3):151–154.

Контактная информация:

Чернова Галина Васильевна, директор научно-образовательного центра биофизических исследований ФГБОУ ВО «Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского»
e-mail: chernova.klg@mail.ru

Corresponding author:

Galina V. Chernova, Director, Scientific and Educational Center of Biophysical Research, Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovsky
e-mail: chernova.klg@mail.ru

