

УДК: 621.391

## ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

**В. И. КРЮКОВ**

*(300026, Тула, пр. Ленина, 104, ГУП НИИ НМТ МЗ РФ;  
тел. /факс: (0872) 33-22-09; E-mail: root@cczo.mednet.com)*

Жизнь на Земле существует благодаря энергии Солнца. Оно излучает энергию в форме электромагнитного излучения, полный спектр которого составляют  $\gamma$ -лучи, рентгеновские лучи, ультрафиолетовый и видимый свет, инфракрасное излучение и радиоволны. Часть диапазона радиоволн составляют волны крайневисоких частот. Сопоставление суточных, месячных, годовых показателей солнечных магнитных нарушений с ритмом рождаемости и зачатий показал существование обратно пропорциональной зависимости [71].

Влияние электромагнитного излучения Солнца на биоту Земли требует дальнейшего изучения. Ещё более пристального внимания заслуживают биологические эффекты антропогенного повышения электромагнитного фона биосферы [28]. Создание современных средств связи и новых промышленных технологий, связанных с использованием мощных электромагнитных полей (ЭМП), использование различных электрических приборов и установок в медицинской практике, быту и производстве, обусловило значительное усиление воздействий ЭМП низкочастотного (НЧ), высокочастотного (ВЧ), сверхвысокочастотного (СВЧ) и крайневисокочастотного (КВЧ) диапазонов на живые организмы. Превышение параметров используемых ЭМП по сравнению с фоновыми параметрами, к которым живые организмы адаптировались в процессе длительного эволюционного развития, может отражаться на функционировании внутриклеточных структур.

Установлены две группы генетических эффектов ЭМП на биосистемы: индукция различных генетических нарушений при одних режимах воздействия и модифицирование генной экспрессии при других [7]. Механизмы и закономерности этих процессов пока еще не познаны. Малоизученными остаются генетические эффекты воздействия ВЧ, СВЧ, и КВЧ ЭМП на соматические и генеративные клетки. Не следует исключать возможности отдалённых генетических последствий воздействия ЭМП на генетический аппарат генеративных клеток. Высказаны предположения о том, что регистрируемый в последние годы рост числа онкологических заболеваний может зависеть (помимо прочих причин) и от антропогенного повышения электромагнитного фона биосферы [38, 67]. Проведение дальнейших фундаментальных исследований биологических эффектов электромагнитных полей чрезвычайно актуально, т.к. имеет большое значение для понимания их роли в эволюционном развитии организмов, индукции патологических процессов, регуляции функциональных систем и генной экспрессии в процессе онтогенеза [28, 47].

Влияние электромагнитных излучений малой интенсивности КВЧ-диапазона на организмы было установлено в середине 60-х годов. Длина волн этого диапазона находится в интервале 1-10 мм, что соответствует частотам 300-30 ГГц.

В настоящее время биологические эффекты волн КВЧ-диапазона интенсивно исследуются и в биологии, и в медицине. Интерес к КВЧ-диапазону обусловлен теоретическими обобщениями, основанными на экспериментально доказанных фактах: клетки живых организмов излучают электромагнитные волны КВЧ-диапазона и посредством этих волн обмениваются информацией. Существует предположение, что движение белковых молекул в клетках находится под управлением КВЧ-волн. Доказана эффективность КВЧ-терапии при многих видах заболеваний, в том числе и онкологических [28]. Современные взгляды на биологические механизмы действия КВЧ-излучения изложены в ряде работ [6, 12, 17, 28, 29, 46, 47]. С точки зрения генетики, интерес представляют следующие из них:

- а) живые организмы могут генерировать КВЧ-волны;
- б) собственное электромагнитное поле используется организмом для управления;
- в) внешнее поле КВЧ-генераторов может оказывать воздействие на собственное поле организма;
- г) основные эффекты происходят в бислойных белково-липидных мембранах клеток; при этом следует подчеркнуть установленный факт: характер биологического ответа клеток на КВЧ-воздействия изменяется с частотой этих воздействий, образуя последовательность резонансов [9].

Рассмотрение биологических эффектов электромагнитных излучений, отличных от генетических, не входит задачи этого обзора. Разносторонний анализ этих сведений можно найти в других работах [17, 47, 49, 51]. Однако в связи с потенциальной опасностью для здоровья человека загрязнения окружающей среды физическими факторами, обладающими выраженным специфическим воздействием на организм, необходимо изучить проблему возможной патогенности генетической активности ЭМП.

Самой ранней публикацией, указывающей на возможность мутагенного воздействия некоторых частот электромагнитных полей радиодиапазона является, по-видимому, работа [58]. Чуть позднее появились работы отечественных исследователей [25, 30, 36]. В настоящее время генетические эффекты ЭМИ различных частот обнаружены на имеющихся генетических тест-системах – от вирусов до млекопитающих.

Показано, что 90-минутное воздействие ЭМП СВЧ длиной волны 8 мм и 12,6 см интенсифицирует образование свободных радикалов в вирусных суспензиях. Действие ЭМП длиной волны 12,6 см более выражено по сравнению с полем миллиметрового диапазона [37]. Результаты этого исследования позволяют предположить, что под действием электромагнитных СВЧ-полей интенсивность мутагенеза вирусов может увеличиваться за счет увеличения концентрации свободных радикалов в среде. Кроме того, возможно усиление мутагенеза в клетках, в которых паразитируют вирусы, – также за счет увеличения концентрации свободных радикалов во внутриклеточной среде.

Облучение взвеси в физиологическом растворе резистентных к антибиотикам клеток золотистого стафилококка электромагнитным полем 2375 МГц и мощностью 1,516 кВт в течение нескольких секунд приводит к образованию большого числа сегрегантов [20]. При действии пестицидов в электромагнитных полях происходило увеличение мутагенности веществ в 1,2-1,6 раза. В электромагнитном поле сверхвысоких частот миллиметрового диапазона пестициды индуцировали прямые ауксотрофные мутанты в большем количестве, по сравнению с их действием в полях частот сантиметрового диапазона [16].

В конце 80-х годов в научной печати был поднят вопрос о биологической активности излучений видеотерминалов. Специально проведенное исследование показало, что облучение от видеотерминала в течение 6 часов при комнатной температуре (14-18 °С) и влажности воздуха 16-20% с расстояния 62 мм при силе электростатического поля 250 кВ/м не индуцировало генных мутаций у сальмонелл штамма TA100 [44].

Результаты исследования генетических эффектов электромагнитных полей на растениях противоречивы. Опубликованы работы, в которых показано отсутствие каких-либо генетических откликов растений на воздействие электромагнитного излучения, но одновременно с ними опубликованы результаты исследований, доказывающих наличие ярко выраженного генетического отклика организмов на такое воздействие.

Облучение грибов рода *Aspergillus* в течение 3 часов микроволнами с плотностью потока мощности 0,1 мВт/см<sup>2</sup> в диапазоне 6-7 мм приводило к возникновению мутантных форм, у которых была в 2-2,5 раза усилена способность к образованию протеаз фибринолитического действия. Характер биологического эффекта в значительной степени зависел от длины волны и кратности облучения. Чувствительность грибов к микроволнам носила ярко выраженный кумулятивный характер. Стимуляция ферментообразования коррелировала с возрастанием продуцирующей способности клеток, а также с ускоренным и обильным спорообразованием [19].

К.С. Рэй с сотр. [72] исследовали влияние высоковольтных электрических полей с интенсивностями от 0,07 до 30 кВ/м и частотой 60 Гц на митотическую активность, частоту возникновения клеток с абберациями хромосом и гетеропикнотическими ядрами на 4-11 сутки от начала проращивания лука *Allium cepa* и бобов *Vicia faba*. Ими установлено, что электрические поля указанной интенсивности не вызывали каких-либо изменений в растительных организмах по изученным показателям. Обработка проросших корней лука *Allium cepa* электрическим полем, создаваемым двумя параллельными металлическими пластинами, на которые в течение 2 часов от источника переменного тока подавалось напряжение, практически не влияла на митотический индекс и незначительно увеличивала частоту аббераций хромосом [74]. Дж. Баум и Ч. Наумэн [42] подвергали соцветия традесканции клонов 4430 и 02 воздействию магнитного поля с интенсивностями 0,16 и 0,75-0,78 Тл в течение 6-11 дней. После экспозиции определяли повреждения хромосом ранней профазы материнских клеток пыльцы по частоте микроядер в ранних тетрадах. В клетках волосков тычинок традесканции клона 4430 мутацию "pink" обнаруживали в течение 15 дней после 6-дневного воздействия поля с высокой интенсивностью, а в клоне 02 - в течение

6 дней после одиннадцатидневного облучения полем 0, 16 Тл Статистически значимых различий по частотам микроядер в опытных и контрольных группах растений клона 4430 не обнаружили.

Под влиянием ЭМП линии высокого напряжения у растений *Vicia cracca* увеличивается число стерильных и полустерильных бутонов и цветков, что приводит к изменению генетического статуса популяции. Электромагнитный импульс разрядного тока является активным фактором для семян и вегетирующих растений, причём воздействие электромагнитного импульса на семена может приводить как к интенсификации развития растений, так и к их угнетению. Установлено, что существует такое физиологическое состояние семян, при котором они максимально чувствительны к воздействию электромагнитного импульса [4].

Обработка семян хлопчатника определенными дозами ЭМП определенных частот приводила к статистически достоверному увеличению, по сравнению с контролем, частоты нуль-аллелей [15].

Ряд опубликованных работ свидетельствует об отсутствии генетических эффектов воздействия электромагнитных полей на насекомых. При облучении самцов дрозофил на стадии 1-2-часовых эмбрионов микроволновым излучением частотой 2450 МГц (100 Вт/кг) не обнаружили его влияния на выживаемость имаго и частоту появления у них соматических мутаций [57]. К.С. Рэй с сотр. [72] в полевых и лабораторных условиях исследовали влияние высоковольтных электрических полей с интенсивностями от 0,07 до 30 кВ/м и частотой 60 Гц на хромосомы доминантные летали, численность, плодовитость, скорость развития комаров *Aedes aegypti*. Ими установлено, что электрические поля указанной интенсивности вызывают в некоторых случаях изменение частоты инверсий и частоты аномальных хромосом. Однако указанные нарушения носили случайный, не воспроизводимый в повторных опытах характер Предварительный вывод, сделанный исследователями, сводился к тому, что электрические поля сверхвысоковольтных линий электропередач не вызывают генетических изменений у комаров

Эффект неоднократного микроволнового облучения изучен на *Drosophila melanogaster* линии Oregon-R [65]. Микроволны генерировали с помощью магнетрона TESLA 50SA51 (выходная мощность – 2 кВт, частота – 2375 МГц). В течение 5 дней самцов дрозофилы подвергали действию сублетальных доз микроволн (15 Вт/см<sup>2</sup> – в течение 60 минут, 20 Вт/см<sup>2</sup> – в течение 10 минут и 25 Вт/см<sup>2</sup> – в течение 5 минут). Для определения сцепленных с полом леталей, облучённых самцов скрещивали с самками линии Мёллер-5. Дополнительно оценивали количество особей и соотношение полов у потомков первого поколения. В обработанных группах обнаружены 4 мутации (различия были недостоверны). Авторы не выявили влияния повторных обработок микроволнами на жизнеспособность самцов (т.е. кумулятивный эффект отсутствовал). Микроволны не оказывали влияния на соотношение полов у потомков первого поколения. Значительное уменьшение числа потомков у мух, облучённых в дозе 15 Вт/см<sup>2</sup>, авторы объяснили тепловым воздействием микроволн на сперматогенез.

При изучении на *D. melanogaster* генетических эффектов магнитного поля интенсивностью от 13000 до 37000 Гс не получено доказательств увеличения

частоты сцепленных с полом рецессивных леталей. Были исследованы возможные взаимодействия биологических эффектов  $\gamma$ -облучения и магнитного поля. При этом анализировали процесс возникновения мутаций в спермиях, сперматидеях и сперматоцитах. Доказательств взаимодействия между результатами этих двух воздействий не обнаружено [59]. При анализе частот рецессивных и доминантных летальных мутаций у дрозофил не обнаружили мутагенного эффекта низкочастотного электрического поля [18]; авторы этого исследования считают, что по энергетическим причинам низкочастотные неионизирующие излучения не представляют генетической опасности. Воздействие на эмбрионы и 1-2-дневных личинок дрозофил в течение 30 мин электромагнитного излучения частотой 35-37, 5 ГГц (с "шагом" 0, 5 ГГц) не вызывало увеличения частоты соматического кроссинговера [5].

Однако наряду с указанными выше публикациями, свидетельствующими об отсутствии генетических эффектов электромагнитных излучений, известен ряд работ, в которых авторы получили прямые доказательства существования генетической активности электромагнитных излучений для насекомых. Так, показан летальный эффект электромагнитного поля для дрозофил [63]. В этом эксперименте яйца дрозофил, отложенные молодыми самками на поверхность окрашенной среды, подсчитывали и подвергали действию электромагнитного поля в течение 1 часа. Обработанные и контрольные культуры инкубировали в течение 14 суток. Число куколок подсчитывали на 7-й, а число взрослых особей – на 14-й день.

Продольные поляризационные Е-волны, импульсно ( $t_n = 4 \cdot 10^{-6}$  с) генерируемые в физическом вакууме на частоте 15 МГц (ВЧ-диапазон), способны вызывать статистически достоверное увеличение частоты соматической рекомбинации в клетках дрозофил [8]. Установлен мутагенный эффект некоторых режимов облучения Е-волнами у *Arabidopsis thaliana* [24].

Результаты исследования генетических эффектов воздействия ЭМИ на млекопитающих столь же противоречивы, как и на другие организмы. Облучение мышей рассеянным или фокусированным электромагнитным полем СВЧ-диапазона не вызывало у животных каких-либо цитогенетических нарушений [31]. Не обнаружено влияния 10-30-суточного ежедневного 3-часового воздействия малоинтенсивного СВЧ-поля с плотностью потока энергии (ППЭ) 10, 15, 30 и 50 мкВт/см<sup>2</sup> на частоту aberrаций хромосом у лабораторных крыс [21]. Не обнаружено влияния фракционированного воздействия радиоволн СВЧ-диапазона на частоту доминантных летальных мутаций у мышей [32, 33].

Микроволновое облучение (2, 45 ГГц в течение 30 минут) задних частей тела взрослых самцов мышей (доза 43 Вт/кг на половину тела) приводила к значительному нарушению чувствительных к нагреванию стадий развития спермиев. В последующие 8-10 недель самцов спаривали с самками. Значительного снижения постимплантационной выживаемости не происходило. Это указывало на отсутствие мутагенного действия микроволнового облучения на половые клетки самцов. Однако число беременностей значительно снижалось в 3-ю, 4-ю, 5-ю, и 6-ю недели, достигая минимума ( $\approx 10$  % от контрольного значения) в 4-ю и 5-ю недели, что хорошо коррелировало с ожидаемым снижением числа спермиев на основе картины повреждения сперматогенного эпителия)

семенников [73]. Авторы работы пришли к выводу, что уменьшение числа беременностей связано со снижением фертильности самцов. Существенных различий в постимплантационной выживаемости между контролем и опытом не обнаружено. На этом основании было сделано заключение, что нет доказательств возникновения доминантных летальных мутаций у самцов мышей после острого микроволнового облучения с мощностью дозы 43 Вт/кг.

Микроволновое излучение не повреждало ДНК в сперматогониях мышей [41]. В указанной работе мышей подвергали воздействию микроволнового излучения (2450 МГц, 39-40°C, 20 мин) в области семенников и через 1,5-2 месяца анализировали частоту сестринских хроматидных обменов (СХО) в сперматогониях. Авторы работы не обнаружили статистически достоверных различий в частотах опытной и контрольной групп животных ( $1,192 \pm 0,284$  и  $1,317 \pm 0,408$ ;  $p > 0,05$ ) и предположили, что микроволновое излучение не вызывает повреждений ДНК в половых клетках. В другом эксперименте самцов мышей в течение 2 недель подвергали непрерывному воздействию вертикального электрического поля с частотой 50 Гц при 20 кВ/м. Плотность токов, индуцированных в семенниках, была  $\approx 100$  мкА/м<sup>2</sup>. После экспозиции самцов скрещивали с 2 различными самками каждую неделю в течение 8 недель. Таким образом, самки были оплодотворены спермой, экспонированной в электрическом поле на разных стадиях сперматогенеза. В качестве положительного контроля использовали группы самцов мышей, облучённых рентгеновским излучением. Авторы не выявили изменений в количестве и выживаемости эмбрионов и сделали вывод об отсутствии мутагенного действия электрического поля [60].

Наряду с работами, в которых не обнаружено генетических эффектов ЭМИ, опубликован ряд работ, результаты которых доказывают существование генетического отклика млекопитающих на воздействие ЭМИ.

Микроволновое неионизирующее излучение в дозах от 5 до 5000 мВт/см<sup>2</sup> вызывало у лабораторных грызунов появление aberrаций хромосом, изменение плотности и степени их спирализации, возрастание анеуплоидии [62]. Микроволновое облучение самцов мышей частотой 2450 МГц, длительностью воздействия 70 с, мощностью дозы 170 мВт/см<sup>2</sup> значительно снижало индекс фертильности этих самцов, увеличивало частоту аномальных сперматозоидов, а также до- и постимплантационные потери потомков [55].

Авторы работы [64] подвергали мышей ежедневно (6 дней в неделю) по 30 минут воздействию микроволн с частотой 2,45 ГГц. Суммарные дозы, полученные мышами в течение 2 недель, составляли 0,05; 0,5; 10 и 20 мкВт/г веса тела. Aberrации хромосом учитывали в диакинезе – метафазе I. В разных вариантах опыта было обнаружено 4-12 % клеток с транслокациями и унивалентами. Процент клеток с транслокациями нелинейно возрастал по мере увеличения дозы. Увеличение доли клеток с унивалентами наблюдалось лишь у животных, подвергнутых воздействию 10 и 20 мкВт/г веса. По мнению авторов, мутагенное действие микроволн связано не с нагреванием тканей, а с резонансной абсорбцией микроволн ДНК.

Проанализирована кластогенность широко применяемого в радиолокационной технике микроволнового (сантиметровый диапазон) излучения для самцов мышей. Было использовано излучение с частотой 2,45 ГГц (с модуляцией

по амплитуде 100 Гц) в течение 30 мин/день в течение 6 дней при 3 вариантах плотности мощности - 1, 100 и 400 Вт/м<sup>2</sup>. Достоверное увеличение температуры ( $\approx 3^{\circ}\text{C}$ ) обнаружено лишь в варианте 400 Вт/м<sup>2</sup>, в остальных вариантах изменение температуры находилось в пределах вариабельности температуры контрольных мышей. Увеличение частоты аберраций хромосом также было достоверным лишь при 400 Вт/м<sup>2</sup> – 1,5 % (в контроле частота этих нарушений составила 0,3 %). Частота аномальных спермиев в контроле, при плотности облучения 1, 100 и 400 Вт/м<sup>2</sup> составила 1,1; 1,4; 1,9 и 2,0 % соответственно. Вес семенников не зависел от дозы облучения. Авторы подчеркнули, что обнаруженные ими незначительные последствия микроволнового облучения противоречат опубликованным ранее данным [43].

Высказано предположение, согласно которому ЭМП ПЧ являются не повреждающим, а дезадаптирующим генетический аппарат фактором. Так как ядрышко играет важную роль в декодировании генома, в качестве теста на адаптацию генетического аппарата при воздействии неблагоприятных факторов внешней среды может служить нуклеолярный тест, исследующий структурно-функциональную активность ядрышка [10].

На основании установленного цитогенетического действия микроволн предложено два возможных подхода к экстраполяции экспериментальных данных с животных на человека [39]. Первый подход целесообразно применять при изучении действия микроволн низких плотностей потока энергии, близких к нормальным. Второй подход – при изучении более высоких уровней плотностей потока энергии, близких к тепловым. В обоих случаях в качестве объекта исследования используются хромосомы гепатоцитов крыс, подвергнутых подострому облучению микроволнами. При 1-м подходе, связанном с оценкой антимутагенного эффекта микроволн, в качестве функциональной нагрузки применяется ионизирующая радиация, что позволяет достаточно точно определить пограничный между нормой и патологией уровень воздействия микроволн с последующим выходом на норматив с учётом установленного различия в радиочувствительности крыс и человека, а также коэффициента запаса. При 2-м подходе, связанном с оценкой мутагенного эффекта микроволн, цитогенетический эффект ионизирующей радиации используется в качестве положительного контроля, что позволяет сопоставлять мутагенное воздействие микроволн с эквивалентной дозой ионизирующей радиации и выйти на норматив с учетом регламентов, установленных для ионизирующей радиации.

Длительное (более 30 дней) общее облучение крыс микроволнами как непрерывной, так и импульсной (2750 МГц) генерации, в зависимости от интенсивности, вызывает либо снижение (при плотности потока энергии 10 или 50 мкВт/см<sup>2</sup>), либо повышение (500 мкВт/см<sup>2</sup>) уровня гепатоцитов с аберрациями хромосом [2]. Показано, что цитогенетический эффект микроволн носит опосредованный характер и может быть связан с изменением репарации ДНК под влиянием гормональных воздействий, в частности с изменением функции щитовидной железы. Показано влияние ЭМП низкоэнергетической природы на увеличение частоты АХ в клетках животных [3].

Обработка мышей однородными полями переменного тока частотой 50 Гц и интенсивностью 100, 170, 220 и 290 кВ/м в течение 24 часов приводила к

зависимому от дозы увеличению частот микроядер в клетках костного мозга [52].

На гепатоцитах белых рандомбредных крыс было показано, что плотность потока энергии (ППЭ)  $100 \text{ мкВт/см}^2$  близка к уровню, при котором начинают формироваться мутагенные эффекты микроволн (3000 МГц, частота посылки импульсов – 400 Гц, 60 суток по 12 часов ежедневно). Выраженность мутагенных эффектов излучения с ППЭ 100, 500 и  $2500 \text{ мкВт/см}^2$  зависит от типа генерации микроволн, обуславливающего различную энергетическую нагрузку. Увеличение суммарной энергии излучения приводит к выращиванию мутагенных эффектов микроволн всех трёх интенсивностей [1].

Усиление мутагенного эффекта микроволн (2450 или 2750 МГц,  $500 \text{ мкВт/см}^2$ , 30 суток по 7 часов) происходит как при понижении, так и при повышении тиреоидных гормонов у крыс. Это свидетельствует о том, что нормальное функционирование щитовидной железы является важным условием стабилизации целостности хромосом при воздействии неионизирующего излучения микроволнового диапазона [22],

При исследовании генетических эффектов радиации микроволнового диапазона на культивируемых клетках млекопитающих установлено, что действие микроволн не вызывает образования мутаций и не усиливает мутагенности митомицина С ни при изменении времени воздействия, ни при изменении концентрации или температурного режима [66].

Экспериментально доказано действие электромагнитных полей в диапазоне  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  Тл на динамику синтеза ДНК в культивируемых клетках млекопитающих [76]. Существуют доказательства, что электромагнитная модуляция потока ионов через клеточную мембрану приводит к изменению в синтезе ДНК и транскрипции РНК [27].

Обнаружено увеличение частоты АХ в лимфоцитах периферической крови быка, индуцируемых электрическим полем частотой 50 Гц и плотностью  $2,4 \text{ мкА/см}^2$  [40]. Частота АХ в обработанных культурах была в 3 раза выше, чем в контроле (28,3 и 9,7%, соответственно), что свидетельствует о кластогенном действии указанного режима обработки. Спектр aberrаций хромосом состоял из хроматидных разрывов (45,4 %), фрагментов хромосом (19,1%), полиплоидных клеток (17,3%), аномальных хромосом (9,1%), хромосомных разрывов (4,5%), анеуплоидных клеток (2,7%) и гэпов (1,8%).

Электрическое поле частотой 50 Гц и плотностью  $2,4 \text{ мкА/см}^2$  не индуцировало СХО в лимфоцитах периферической крови крупного рогатого скота [40]. Не обнаружено влияния воздействия переменного магнитного поля (ПеМП) с частотой 50 Гц и величиной индукции от 0,1 до 7,5 мТл в течение 48 и 72 часов на индукцию СХО и АХ, а также на интенсивность пролиферации клеток в лимфоцитах периферической крови человека *in vitro* [56]. Полученные результаты подтвердили выводы других авторов, изучавших воздействие ПеМП частотой 50 и 60 Гц и доказавших отсутствие кластогенного эффекта ПеМП указанных параметров

Воздействие постоянного магнитного поля (0,3 Тл) в течение 30, 60, 120, 180, 240, 300 и 360 минут на мышей и культуру клеток крови человека не вызвало статистически достоверного изменения частоты АХ ни в одном экспери-



ментов по сравнению с контролем, что может свидетельствовать об отсутствии мутагенной активности постоянного магнитного поля (мышей забивали через 20 часов, культуры лимфоцитов готовили на 48 час культивирования) [66].

Результаты исследований биологической активности электромагнитных полей низких и сверхнизких частот к началу 90-х годов были в высшей мере противоречивы. Ряд работ отмечает отсутствие вреда от электрических и магнитных полей промышленных частот [48], хотя накопленных к началу 90-х годов данных было достаточно для демонстрации достоверной связи между воздействием электромагнитных полей сверхнизких частот и развитием рака у человека [50, 53, 70, 75]. В обзорах [45, 69] показано, что для людей, профессионально связанных с электрооборудованием, риск смерти от острого лейкоза возрастает в 2, 6 раза, опасность заболевания раком увеличивается в 4 раза у людей, подверженных воздействию неионизирующего облучения; от 10 до 15 % заболеваний раком в детском возрасте связано с электрическими полями в жилище. Использование зимой одеял с электроподогревом вызывает увеличение выкидышей у женщин по сравнению с летними месяцами. Нарушения состава крови отмечаются у людей на расстоянии до 300 м от высоковольтных ЛЭП. Случаи лейкоза отмечены при нахождении людей в 40 м от таких линий.

Цитогенетический анализ показал, что в клетках 50 человек, профессионально контактирующих с микроволновым излучением (операторов приборов с излучением в пределах 300 МГц-300 ГГц), частота аббераций хромосом колеблется от 0,5 до 13%. В спектре АХ обнаружены хромосомные разрывы и ацентрические фрагменты, транслокации в виде дицентриков, изменения ploидности клеток [54].

Исследования английского биофизика Р. Кофилла свидетельствуют о сильном влиянии на ткани головного мозга электромагнитных излучений от сотовых телефонов. Низкоэнергетические радио- и микроволновые излучения способны изменять внутриклеточные биохимические процессы. Это может вызывать изменение тканей и функций мозга, что является в некоторых случаях предваряющими этапами канцерогенеза и ослабления общего иммунитета организма [13]. Европейские организации рекомендуют для сотовых телефонов предельную норму плотности потока - 2 мВт/г.

Электромагнитные поля действуют на регуляторные механизмы на всех уровнях организма, включая молекулярный, внутриклеточные и межклеточные. Одним из таких механизмов может быть электролитный обмен [34]. Воздействие ЭМП на биологические структуры наступает внезапно (особенно в техногенных условиях), а интенсивность ответной реакции организма в значительной степени зависит от его индивидуальных особенностей. Если здоровый организм может сохранять равновесие, то в больном могут происходить интенсивные изменения, способные довести его до патологического состояния. Данные [77] подтвердили отсутствие кластогенного действия низкочастотных электромагнитных полей на спермии здорового человека. Аналогичные результаты получены на грызунах: эякулят золотистого хомячка подвергали воздействию низкочастотного (50 Гц) электромагнитного поля. После этого пробы криоконсервировали, а анализ методом оплодотворения освобожденных от вителлинового слоя яйцеклеток золотистого хомячка проводили после оттаивания. Кариотипи-

рованы 264 облученных спермия и 206 контрольных клеток. В облучённых и контрольных клетках частота АХ составила 20,8% и 17%, статистически достоверных различий между 2 группами не было. Не было различий и по качественному составу аберраций в каждой из выборок

На возможность генетической опасности для человека СВЧ-излучения одним из первых, по-видимому, указал Б.А. Минин [26].

В группе теледикторов (10 женщин и 2 мужчин) установлена значительно более высокая частота АХ ( $7,5 \pm 3,5$  %) по сравнению с 3-мя контрольными группами (здоровые женщины, не работающие на телевидении, технические работники телевидения и актёры телевидения), в которых средний уровень АХ составил  $2,96 \pm 1,1$  %. Аберрации хромосом были представлены в основном хроматидными (73 %) и изохроматидными разрывами (23 %), а также хромосомными обменами (4 %). Частота СХО у теледикторов не отличалась от таковой в контрольных группах [63]. Более позднее исследование [68] не выявило влияния излучения видеодисплеев на частоту спонтанных абортотворений женщин. Общая выборка составила 214108 женщин в возрасте от 15 до 44 лет, число беременностей – 24362, из них спонтанными абортотворениями закончились 2248, или 9,2 %. Кошечкина Т.А. с сотр. использовали цитогенетический анализ популяций клеток периферической крови с разной длительностью жизненного цикла – эритроцитов и лимфоцитов. Были исследованы клетки крови лиц, профессионально связанных с воздействиями СВЧ-излучений. У лиц, работавших в этих условиях в течение 1 года, уровень АХ был незначительно выше, чем в контроле. У лиц, работавших в условиях воздействия СВЧ-излучения 3 года, уровень АХ в лимфоцитах периферической крови вдвое превысил контрольный. Однако ни у тех, ни у других лиц количество эритроцитов, несущих микроядра, не было выше, чем в контроле. Полученные результаты могут свидетельствовать о том, что аберрантные клетки возникают не в процессе гемопоэза, а в кровеносном русле, а также о том, что изменение лимфоцитов периферической крови носит паратипический характер, обеспечивая адаптацию организма к неблагоприятному воздействию [23].

Существует предположение, согласно которому микроволновое излучение может изменять у облучённых организмов модель генной экспрессии на срок больший, чем одна генерация. Фиксация результатов низкоинтенсивного микроволнового воздействия при этом осуществляется на уровне конформационного состояния генома [7].

Установлено, что воздействие низкочастотного (50 Гц) электрического поля достаточно высоких напряжённостей (сотни кВ/м) приблизительно в 2 раза повышает у головастиков лягушек частоту ненаследуемых эпигенетических изменений – морфозов. Это доказывает влияние поля физиологически значимых уровней на экспрессию генетического аппарата [18].

Приведённый выше обзор исследований генетических эффектов электромагнитных полей показывает, что механизмы действия этих излучений исследованы недостаточно. Необходимы дальнейшие фундаментальные исследования биологических эффектов электромагнитных полей. Это подчёркивают многие специалисты [3, 11, 14, 35], работающие над рассмотренными выше проблемами.

### Литература

1. Антипенко Е.Н. К вопросу о количественных закономерностях цитогенетического действия микроволн // Радиобиология, 1991. Т 31, №1. –С. 149-151.
2. Антипенко Е.Н., Ковешникова И.В. Цитогенетические эффекты микроволн нетепловой интенсивности у млекопитающих // Докл. АН СССР, 1987. Т 296, №3, -С. 724-726.
3. Антипенко Е.Н. Тимченко О.И. Обоснование необходимости и возможности изучения опасности физических факторов низкоэнергетической природы // Гигиена и санитария. 1989, № 10. С. 59-63.
4. Артамонов А.Л., Артамонова Л. Н. Фенотипические последствия воздействия комплексного импульса на семена / Волгоградский политехн. ин-т. Волгоград 1989 -32 с. – Деп. в ВИНТИ, 22.03.89, №1825-В89.
5. Афромеев В.И. Богданов В.П., Колондар Е.А. и др. Исследование воздействия на соматический кроссинговер *Drosophila melanogaster* как "биологический индикатор" высокочастотных полей различной физической природы // Вестн. нов. мед. технологий. 1997. Т. 4, №4, -С.18-23.
6. Афромеев В.И., Загуральский Н.Ф., Кругликов И.Т. Биофизические предпосылки и радиотехнические решения повышения эффективности КВЧ-терапии // Вестн. новых мед. технологий. 1997. Т 4, №4, -С 103-105.
7. Беляев И.Л., Атагов Е.Д., Щеглов В.С. Влияние миллиметрового излучения на радиационно-индуцируемую репарацию конформационного состояния генома // Труды рабочего совещания по исследованию механизма радиационно-индуцированного мутагенеза и репарации ДНК. –Дубна, 1990. –С. 242-261.
8. Богданов В.П., Воронов В.В., Сидоров Р.А., Яшин А.А., Исследование методом соматической рекомбинации дрозофил, подвергшихся воздействию продольных электромагнитных волн // Вестн. новых мед. технологий. 1995. Т. 2, № 3-4. –С. 6-9.
9. Божанова Т.П., Брюхова А.К., Голант М.Б., Кичаев В.А. Одно из возможных средств создания КВЧ-диагностической аппаратуры // Электронная промышленность. 1987. 3 –С. 35-36.
10. Бондарева Л.А., Крылова М.И., Матросова В.Ю. Использование нуклеолярного теста как возможного индикатора воздействия ЭМП ПЧ на генетический аппарат лабораторных животных // Электропередачи сверхвысоких напряжений и экология. –М., 1986. С. 109-115.
11. Бородин И.Ф., Будагавский А.В., Будаговская О.Н. Адаптация растений к когерентному электромагнитному излучению // Докл. РАСХН. 1998. № 1. -С. 46-48.
12. Гарибов Р.Э., Островский А.В. Изменяет ли микроволновое излучение динамическое поведение биологических макромолекул? // Усп. совр. биологии. 1990. Т. 110, №2(5). –С. 306-320.
13. Гордиенко И. Сотовые телефоны: молчанье – золото // Компьютера, 1998. №3. –С. 18-20.
14. Грефнер Н.М., Яковлева Т.Л., Борейша И.К. Влияние электромагнитного излучения на развитие головастиков лягушки (*Rana temporaria*)

//Экология. 1998. №2. -С. 154-155.

15. Гулин В.В., Кальченко В.А., Цупина А.П. Влияние ВЧ-поля на хлопчатник // 1 Всес. корд. совещ. "Генетические последствия загрязнения окр. среды мутагенными факторами". 8-10 октября 1990 г /Тез. докл. Самарканд, 1990. –С. 69-70.
16. Даниленко И.И., Щербинская А.М. Значение липидов при действии пестицидов на микроорганизмы // Всес. совещ. "Эколого-генетический мониторинг состояния окружающей среды". -Караганда, 1990. -С 39.
17. Девятков И.Д., Голант М.Б., Бецкий О.Б. Особенности медико-биологического применения миллиметровых волн. М.: Изд-во ИРЭ РАН, 1994. –164 с.
18. Дромашко С.Е., Квитко О.Б., Писарчик Г.А. Эффекты электрического поля на *Drosophila melanogaster*. II. Экология. 1997. №4. –С. 311-313.
19. Егоров Н.С., Ландау Н.С., Охохонина Г.М. Использование электромагнитных волн миллиметрового диапазона для получения мутантных форм некоторых микроорганизмов // XIV Международный генетический конгресс / Тез. докл. Часть II. Секции 21-32. –М.: Наука, 1978. –С. 230-231.
20. Игнатов В.В. Шендеров Б.А. Панасенко В.И. Элиминирование генетических детерминант устойчивости у *Staphylococcus aureus* при действии на клетки мощного электромагнитного поля // Генетика –1973. Т. 9. № 4. –С. 57-68.
21. Капустин А. А., Антомонов М.Ю. Построение математической модели динамики мутационного процесса при экспериментальном изучении цитогенетического действия микроволновой радиации // XIV Международный генетический конгресс / Тез. докл. Часть II. Секции 21-32. –М.: Наука, 1978. –С. 235.
22. Ковешникова И.В., Антипенко Е.Н. Об участии тиреоидных гормонов в модификации мутагенного эффекта микроволн // Радиобиология. 1991. Т. 31, № 1. –С. 147-149.
23. Кошечева Т.А., Шиманская Е.И., Медведев Л.Г. Возможности оценки адаптивной роли соматического мутагенеза // Цитология. 1991. Т 33, №5 –С. 108-109.
24. Крюков В.И., Богданов В.П. Анализ влияния ВЧ-излучения на процесс прорастания семян сельскохозяйственных растений и мутагенез у *Arabidopsis thaliana* //Вестник новых медицинских технологий. 1998. Т 5, №3-4. –С. 30-31.
25. Кулин Е.Т. Регуляция функции генов и возможное влияние на неё радиочастотных полей (излучений) // Вопросы генетики и селекции. –Минск: Наука и техника, 1970. –С. 56-63.
26. Минин Б.А. СВЧ и безопасность человека. –М.: Сов. радио,1974. -348 с.
27. Морят МГ "Публичное разоблачение" осложняет понимание серьёзных проблем здравоохранения // В мире науки- 1990-№6-С 88-92
28. Неганов В.А. Особенности воздействия электромагнитных волн КВЧ диапазона на биологические объекты: основные направления научных исследований и тенденции в разработках КВЧ аппаратуры //Вестник новых медицинских технологий. 1994, Т. 1, №2 –С 13-18.

29. Нефедов Е.И., Протопопов А.А., Семенцов А.Н., Яшин А.А. Взаимодействие физических полей с живым веществом. –Тула: Изд-во ТулГУ, 1995. –179 с.
30. Панасенко В.И., Игнатов В.В., Богородицкая С.В. Некоторые данные по вопросу влияния электромагнитных полей на живые клетки // Труды НИИ курортологии и физиотерапии. 1971. № 17. –С. 114-117.
31. Петров С.С., Кравец И.А., Глувштейн Ф.Я. Цитогенетическое действие СВЧ на клетки костного мозга и роговицу глаза мышей // Тез. докл. 2-го Всес. съезда мед. генет, Алма-Ата, 4-6 декабря. 1990 г. –М.,1990. –С. 343-344.
32. Рамайя Л.К., Померанцева М.Д., Вилкина Г.А. Сравнительный анализ мутагенности некоторых факторов, загрязняющих окружающую среду, и эффекта химических мутагенов у мышей // XIV Международный генетический конгресс / Тез. докл. Часть II. Секции 21-32. –М.: Наука, 1978. –С. 271.
33. Рамайя Л.К., Померанцева М.Д., Вилкина Г.А. Сравнительная эффективность использования разных тестов для определения мутагенности некоторых факторов у млекопитающих. Сообщение I // Генетика. 1980. Т. 16, № 6. –С. 1036-1043.
34. Соболев В.А., Гулиева Г.И. Геомагнитные возмущения и электролитный обмен у здоровых лиц //Актуальные вопросы магнито-биологии и магнитотерапии. /Сб. работ респ. научн.-практ. конф. –Ижевск: Изд-во "Удмуртия", 1981. –С. 66-67.
35. Суворов Н.Б., Василевский Н.Н., Никитина В.Н. Системный анализ состояния человека при длительном радиоволновом облучении //Гигиена и санитария. 1990. №4. –С. 18-21.
36. Счастливая П.И., Налбат А.С. Изменчивость вирулентности стафилококка под влиянием электромагнитных волн СВЧ //Сб. науч. тр. Харьковского мед. ин-та –Харьков: 1969, № 79. –С. 143-148.
37. Фролов А.Ф., Слепнева Т.И., Даниленко И.И. Воздействие электромагнитных полей на суспензии вирусов гриппа // Эколого-генетический мониторинг состояния окружающей среды. Матер. секции генетических аспектов проблемы "Человек и биосфера" –Караганда: 1990. –С. 123.
38. Хадарцев А.А. Электромагнитные поля: возможности применения в медицине. // Вестник новых медицинских технологий. -1994 –Т. 1. №1. –С 1-8.
39. Шандала М.Г. Физические факторы окружающей среды как гигиеническая проблема // Матер. 5-го сов.-амер. раб. совещ. по проблеме: Изучение биол. действия физ. факторов окруж. среды, Ялта, 22-26 апреля, 1985. - Киев, 1987. -С 3-16.
40. D'Ambrosio G., Scaglione A., Di Berardino D. Chromosomal aberrations induced by ELF electric fields // J. Bioelec. 1985. Vol. 4, №1. -P 279-284.
41. Bao T., Wu L., Liao D. Влияние микроволнового излучения на частоту сестринских хроматидных обменов в сперматогониях мышей // "Сичуань исюэ юань сюэбао", Acta acad. med. Sichan C. 1985. Vol. 16. № 3. –P. 204-207. (Пер с кит., цит по Реф. журн. "Биология", 04Я. Общая генетика. 1986. № 4. реф. 4Я184).
42. Bawn J.W., Nawnan C.H. Influence of strong magnetic fields on genetic end-

- ports in *Tradescantia* tetrads and stamen hairs // *Environ. Mutagenes.* 1984. Vol. 6. № 1. –P. 49-58.
43. Beechey C.V., Brooker D., Kawalczuk C.I. Cytogenetic effects of microwave irradiation on male germ cells of the mouse // *Int. J. Radiat. Biol.* 1986. Vol. 50. № 5. –P. 909-918.
44. Berg M., Lindelof B., Langlet I. Absence of mutagenic response from a video display terminal // *Scand. J. Work, Environ. and Health.* 1988. Vol. 14. № 1. – P. 49-51.
45. Best S. Killing fields. The epidemiological evidence fields // *Electron World+Wireless World.* 1990. –Vol. 96, №1648. –P. 98-110.
46. Betskii O.V. Electromagnetic millimeter waves and living organisms // *Biological Aspects of low intensity millimeter waves* /Eds. N.D. Devyatkov, O.V. Betskii. –Moscow: Seven Plus, 1994. –P. 8-38.
47. Biological aspects of low intensity millimeter waves /Eds. N.D. Devyatkov, O.V. Betskii. –Moscow: «Seven plus». 1994. –336 p.
48. Biological effects of power frequency electric and magnetic fields // *IEEE Eng. Med. and Biol. Mag.* 1989. –Vol. 8, №3. –P. 46-47.
49. Chou C.K. Biological effects of electromagnetic waves // *Plus. and Technol Hyperthermia: Proc. NATO Adv. Study. Inst., Urbino, July 26-Aug. 9, 1986.* Dordrecht etc., 1987. –P. 319-353.
50. Coleman M.P., Bell J. Extremely low frequency (ELF) electromagnetic fields and leukaemia in children // *Brit. J. Cancer.* 1990. Vol. 62, №2. –P. 331-332.
51. Elder J.A., Czerasla P.A. Stuchly M.A. Radiofrequency radiation // *Reg. Publ. Eur.-Ser. WHO.* 1989. - №25. –P. 117-173.
52. El Nahas S.M. Oraby H.A. Micronuclei formation in somatic cells of mice exposed to 50-Hz electric fields // *Environ. and Mol. Mutagenes.* 1989. -№2. –P. 107-111.
53. Extremely lowfrequency electric and magnetic fields and risk of human cancer /Group Ad Hoc Working // *Bioelectromagnetics.* 1990. –Vol. 11. №1. –P. 91-99.
54. Garaj-Vrhovac V., Horvat D., Brumen-Machovic V. Somatic mutations in persons occupationally exposed to microwave radiation // *Mutat. Res.* 1987. Vol. 181. №2. –P. 321.
55. Goud S.N., Usha Rini M.V., Reddy P.P. Genetic effects of microwave radiation in mice // *Mutat. Res.* 1982. Vol. 103. № 1. –P. 39-42.
56. Gunter O., Rosenthal M., Zur Wirkung von elektromagnetischen 50 Hertz-Feldern auf die Chromosomen vonmenschlichen peripheren Lymphocyten *in vitro.* II Nichtionisierende Strahlung. 21 Tahrestag., Gurzenich zu Koln, 7-9 Nov., 1988. Koln, 1988 –S. 87-88.
57. Hammerrus Y., Olofsson H., Rasmuson A. A negative test for mutagenic action of microwave radiation in *Drosophila melanogaster* // *Mutat. Res.* 1979. Vol. 68, №3. –P. 217-223.
58. Heller J., Teixeira-Pinto A. A new physical method of creating chromosomal aberration // *Nature.* 1959. –Vol. 183. – P. 905.
59. Kale P.G., Baum J.W. Genetic effects of strong magnetic fields in *Drosophila melanogaster.* II. Lack of interaction between homogeneous fields and fission

- neutron-plus-gamma radiation // Environ. Mutagenes. 1980. –Vol. 2, №2, -P. 179-186.
60. Kawalczuk C.I. Saunders R.D. Dominant lethal studies in male mice after exposure to a 50-Hz electric field // Bioelectromagnetics. 1990. Vol. 11. №2 –P. 129-137.
  61. Kucerova M., Polivkova Z., Gregor V. The possible mutagenic effect of the occupation of TV announcer // Mutat. Res., Mutat. Res. Lett. 1987. Vol. 192, № 1. – P. 59-63.
  62. Leach W.M., Genetic, growth and reproductive effects of microwave radiation //Bull. N.-Y.Acad. Med. 1980. Vol. 56, №2. –P. 249-257.
  63. Ma T.H., Chu K.C., Chen T.D. Lethal effect of electromagnetic field on *Drosophila* eggs // Environ. and Mol. Mutagenes. 1991. Vol. 17. –с. 44-45.
  64. Manikowska-Czerska E., Czerska P., Leach W.M. Effects of 2,45 GHz microwaves on meiotic chromosomes of male CBA/CAY mice // J. Hered. 1985. Vol 76. № 1. –P. 71-73.
  - 65 Marek F., Ondracek J., Brunnhoffer V. The effect of repeated microwave irradiation on the frequency of sex-linked recessive lethal mutations in *Drosophila melanogaster* // Mutat. Res. 1985. № 2-3. –P. 163-167.
  - 66 Mileva M., Bulanova M., Ivanov B. Permanent magnetic field exposure *in vivo* and *in vitro* to the genetic structures of somatic cells // Mutat. Res. 1985. Vol. 147. № 5. –P. 308-309.
  67. Newi G. Biologische Wirkung elektromagnetischer 50 Hz-Felder auf Menschen // Nichtionisierende Strahlung 21 Jahrestag., Gurzenich zu Koln, 7-9 Nov, 1988. Koln, 1988. –S. 89-94.
  68. Nielsen C.V., Brandt L.P. Spontaneous abortion among women using video display terminals // Scand. J. Work, Environ. and Health. 1990. Vol. 16, №5. –P. 323-328.
  69. Philips A. Killing fields // Electron. World + Wireless World.1990. Vol. 96., №1648. –P. 96-97.
  70. Pool R. Is there an EMF-cancer connection? // Science. 1990. –Vol. 249. № 4973 –P. 1096-1098.
  71. Randall W. The solar wind and human birth rate. A possible relationship due to magnetic disturbances// Int. J. Biometeorol. 1990. Vol. 34. №1. –P. 42-48.
  72. Rai K.S. Greenlee J.K., Rao P.N. Genetic effects of ultra high voltage transmission line electric fields // Trends Elec. Util. Res. New York et al. 1984. –P. 397-409.
  73. Sounders R.D., Kowalczuk C.I., Darby S.C. Dominant lethal mutations in male mice as a result of acute microwave radiation // Res. and Dev. Rept. 1979-1981. Nat. Radiol. Prot. Borad. Didcot. 1982. –P. 155-157.
  74. Saxena M., Gupta S.N. Effect of electric field on mitosis in root tips of *Allium cepa* L. // Cytologia. 1987. – Vol. 52. № 4. –P. 787-791.
  75. Shulman S. All aboard the bandwagon //Nature. –1990. Vol. 346. № 6285. –P. 489-490.
  - 76 Takanashi R. Effect of pulsing electromagnetic field on DNA synthesis in mammalian cells in culture // Experientia. 1986. Vol. 42. №2. –P. 185-186.
  77. Tateno H., Iyima S., Nakanishi R. Cytogenetic study of human spermatozoa ex-

posed to extremely low frequency electromagnetic fields // Mutat. Res. Environ. Mutatgen. and Relat. Subj. 1996. Vol 359., № 3. –P. 218-219.

## GENETIC EFFECTS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS

V. I. KRYUKOV

### Summary

In the article the author discusses two groups of genetic effects of EMFs. On biosystems, and namely an induction of different genetic disorders under one modes of an exposure and a modification of a genie expression under others.

There is the review of results of researches of the genetic effects of electromagnetic fields. The perspective directions of the further researches are determined.