

INVESTIGATIONS OF GENOTOXICITY OF LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS. CURRENT STATE (second report)

Balenko N.V., Sovertkova L.S., Chernichenko I.O.,
Babyi V.F., Dumanskyi Yu.D., Lytvychenko O.M., Serdiuk Ye.A., Kondratenko O.Ye.

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНОТОКСИЧНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НИЗЬКОЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ. СУЧАСНИЙ СТАН (II повідомлення)

M

**БАЛЕНКО Н.В.,
СОВЕРТКОВА Л.С.,
ЧЕРНИЧЕНКО І.О.,
БАБІЙ В.Ф.,
ДУМАНСЬКИЙ Ю.Д.,
ЛИТВИЧЕНКО О.М.,
СЕРДЮК Є.А.,
КОНДРАТЕНКО О.Є.**
ДУ "Інститут громадського
здоров'я ім. О.М. Марзєєва
НАМН України", м. Київ

УДК 537.531 : 613.648.2 :
547.414 : 576.385.5

Ключові слова:
низькочастотні
електромагнітні поля,
експоновані люди,
генотоксичні ушкодження,
лимфоцити, буквальні клітини.

іжнародне агентство з вивчення раку (МАВР) класифікувало НЧ ЕМП як "можливий канцероген для людини" (група 2 В) на підставі епідеміологічного спостереження зв'язку лейкемії у дітей з впливом магнітного поля, яке створюють лінії електропередач [1].

З часу першого повідомлення [2] про можливий взаємозв'язок між магнітним полем від ліній електропередач високої напруги і раком у дітей проведено численні дослідження генотоксичного ефекту НЧ ЕМП. Ці дослідження включають експериментальне вивчення генотоксичності *in vivo* та *in vitro*, а також моніторингові обстеження людей, які зазнали впливу НЧ ЕМП за професійних та непрофесійних умов.

Мета роботи – аналіз стану досліджень з вивчення генотоксичних ушкоджень у людей, які зазнали впливу електромагнітних полів низь-

кочастотного діапазону.

Нині відомо, що висока частота хромосомних аберацій (ХА) у лімфоцитах крові людей збігається зі зростанням ризику раку [3-6]. Тому тест на ХА вважається прогностичним біомаркером щодо ризику раку, принаймні на рівні популяції, але не на індивідуальному рівні через багатфакторний вплив на цей показник (захворювання, вірусні інфекції, паління цигарок тощо).

Дослідженнями останніх років доведено також зв'язок між збільшенням частоти мікроядер (МЯ) у лімфоцитах крові і зростанням ризику раку, а також деяких пов'язаних з віком дегенеративних захворювань [7-9]. Тобто більш висока частота МЯ у клітинах крові певної популяції вказує на підвищений ризик раку. Як і ХА, МЯ є прогностичним показником ракового ризику на популяційному, а не

ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕНОТОКСИЧНОСТИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
НИЗКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА. СОВРЕМЕННОЕ
СОСТОЯНИЕ (II СООБЩЕНИЕ)

**Баленко Н.В., Соверткова Л.С., Черниченко И.А.,
Бабий В.Ф., Думанский Ю.Д., Литвиченко О.Н.,
Сердюк Е.А., Кондратенко Е.Е.**

ГУ "Институт общественного здоровья
им. А.Н. Марзеева НАМН Украины", г. Киев

Цель – анализ состояния вопроса по изучению генотоксичности низкочастотных электромагнитных полей (НЧ ЭМП).

Материалы и методы. Проанализированы данные литературы по изучению цитогенетических повреждений у людей, экспонированных НЧ ЭМП.

Результаты. Установлено, что проведенные авторами исследования генотоксических эффектов касаются преимущественно профессионально экспонированных людей, поскольку такие исследования на населении практически отсутствуют. Генотоксичность оценивали путем определения показателей повреждения ДНК (ДНК-комет), образования хромосомных абераций и микроядер в лимфоцитах крови и буккальных клетках. Полученные результаты были неодинаковы и порой противоречивы. Эти различия частично можно объяснить разными уровнями и продолжитель-

ностью воздействия НЧ ЭМП, а также рядом допущенных недостатков, могущих влиять на результаты. Тем не менее, в целом цитогенетические мониторинговые исследования на людях показали позитивные результаты, что позволяет предположить генотоксичность НЧ ЭМП. В единичных работах показана дозо-временная зависимость генотоксических эффектов у экспонированных НЧ ЭМП людей. Также выявлен рост показателей оксидативного стресса, анеугенные свойства и нарушение репарации ДНК, согласующиеся с данными *in vivo* и *in vitro* и позволяющие предположить их роль в генотоксическом эффекте НЧ ЭМП. Нерешенными остались вопросы, касающиеся минимально эффективных и максимально неэффективных уровней.

Выводы. Имеющиеся данные литературы подтверждают необходимость дальнейших исследований в этом направлении на профессионально экспонированных людях и населении для решения ряда вопросов, связанных с оценкой опасности разных уровней НЧ ЭМП для разработки эффективных мер защиты от их вредного влияния на здоровье человека в условиях профессионального воздействия и окружающей среды.

Ключевые слова: низкочастотные электромагнитные поля, экспонированные люди, генотоксические повреждения, лимфоциты, буккальные клетки.

© Баленко Н.В., Соверткова Л.С., Черниченко И.О., Бабий В.Ф., Думанський Ю.Д.,
Литвиченко О.М., Сердюк Є.А., Кондратенко О.Є. СТАТТЯ, 2018.

на індивідуальному рівні і біомаркером ефекту. Інші тести на генотоксичність (обмін сестринських хроматид (ОСХ), ДНК-комет) дозволяють визначити генотоксичні uszkodження, які вважаються біомаркерами експозиції, оскільки не обов'язково призводять до збільшення мутаційного ризику. Обидва тести широко відомі як генотоксичні, що пов'язані з канцерогенезом і залишаються важливими, хоча зв'язок їх з канцерогенезом у людей ще не встановлено [6].

Враховуючи викладені обставини, вивчення вказаних показників генотоксичності має важливе значення, що є причиною використання їх у моніторингових дослідженнях людей, професійно експонованих ЕМП низькочастотного діапазону.

В оглядовій публікації останніх років [6] наведено аналіз 22 робіт з вивчення генотоксичного ефекту НЧ ЕМП, переважна кількість яких виконана в останні 20 років і стосується професійного впливу. Дослідженням охоплено осіб різних "електричних" професій, більшість яких (17 робіт з 22) продемонструвала генотоксичність НЧ ЕМП. Генотоксичний ефект автори визначали, головним чином, у лімфоцитах периферичної крові експонованих осіб, іноді – у клітинах букального епітелію, користуючись при цьому одним або 2-3 генотоксичними тестами.

Низку робіт було присвячено вивченню генотоксичності в осіб різних професій, які працювали на електропідстанціях різної потужності. Так, генотоксичний ефект (збільшення ХА хроматичного та хромосомного типів) від дії НЧ ЕМП виявлено в інспекторів, ремонтників та експлуатацій-

ників електропідстанцій потужністю 110, 440 кВ, кабельщиків підстанцій 154 кВ [10-13]. Водночас різниця у частоті ОСХ та МЯ порівняно з контролем не була встановлена. Збільшення ХА і відсутність ефекту на частоту ОСХ за впливу протягом 3-19 років відзначено у працівників електричних підстанцій потужністю 132-230 кВ [14].

За іншими даними, у 142 робочих електропідстанцій потужністю 132 кВ, які професійно зазнавали експозиції ЕМП протягом 2-30 років, у середньому 9 років, виявлено тенденцію до збільшення частоти uszkodжень ДНК та зростання параметрів оксидативного стресу [17].

Подібні результати (збільшення частоти ХА та МЯ) були отримані іншими авторами [15, 16] при дослідженні лімфоцитів робітників трансформаторних та розподільчих станцій ліній електропередач потужністю 154-380 кВ з однаковими характеристиками ЕМП: 130-1500 В/м, 0,25-17 А/м. Середня тривалість експозиції ЕМП становила (19±7,4) років та (20±4,7) роки за прямої дії, (23±6) років – для тих, хто працює на відстані від джерел ЕМП. Частота ХА зростала зі збільшенням років експозиції [15], що стало підґрунтям для висновку про те, що хронічний професійний вплив ЕМП викликає генетичні uszkodження в "електропрацівників".

Обстеження Skyber і співавторами [18] працівників високовольтних лабораторій також показали генотоксичні зміни внаслідок професійного впливу ЕМП. Дослідження включали кабельщиків, які зазнавали впливу ЕМП від кабельних з'єднань (до 200 кВ), та інженерів, які перебували під дією постійного, перемінного та імпульсного ЕМП. Перемінне ЕМП 50 Гц діяло на рівні 5-10 мкТл, іноді раптово сягало найвищих рівнів – 500 мкТл з опроміненням всього тіла та 10000 мкТл на рівні рук. Встановлено збільшення частоти ХА. При цьому змін показників ОСХ та анеуплоїдії порівняно з контрольною групою не виявлено. Пізніше дослідження були проведені на клітинній культурі лімфоцитів, взятих у

паяльщиків генераторів та тестувальників трансформаторів (24 особи), які працювали у високовольтній лабораторії та перебували під впливом ЕМП різної сили – від 6 мкТл до 7 мТл протягом різного періоду [19]. При цьому автори враховували куріння, вживання алкоголю та кофе. Слід зазначити, що паяльщики генераторів, крім ЕМП, зазнавали також дії туману та пари мінеральних масел. Надмірних зрушень за показниками генотоксичності автори не виявили. Проте після додавання до культурального середовища оксисечовини та кофеїну, що пригнічують синтез і репарацію ДНК, у клітинах виявлено збільшення ХА. Автори дійшли висновку, що збільшення років експозиції ЕМП та фактор куріння підвищують ризик uszkodжень.

Вивчення анеуплоїдії за допомогою методу флуоресцентної *in situ* гібридизації у контролерів та інженерів транспорту, які зазнавали експозиції ЕМП, показало збільшення частоти моносомії 7-ї, 17-ї та γ -хромосом, що свідчить про наявність анеугенних властивостей у НЧ ЕМП [20].

Цитогенетичний моніторинг серед водіїв локомотивів залізничної дороги показав різні результати. Так, за даними [21], у водіїв (18 осіб), які зазнають впливу ЕМП 16,66 Гц на рівні густини магнітного потоку від декількох мкТл до 100 мкТл (стаж роботи 13±9 років), виявлено достовірне збільшення ХА порівняно з контролем (16 офісних працівників) та референтною групою (7 осіб, диспетчери поїздів, які професійно експоновані ЕМП на рівні 0,13-0,18 мкТл). Протилежні дані опубліковано індійськими авторами [22], які не виявили генотоксичного ефекту (ХА, ОСХ) при обстеженні 15 водіїв локомотивів, що, на їхню думку, підтверджує гіпотезу про відсутність генотоксичності в ЕМП низькочастотного діапазону.

Генотоксичний ефект – збільшення частоти ХА та МЯ у лімфоцитах крові та клітинах букального епітелію описано у суб'єктів, професійно експонованих ЕМП від моніторів відеодисплеїв, які працювали у середньому протягом

INVESTIGATIONS OF GENOTOXICITY OF
LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS.
CURRENT STATE (second report)

**Balenko N.V., Sovertkova L.S., Chernichenko I.O.,
Babyi V.F., Dumanskyi Yu.D., Lytychenko O.M.,
Serdiuk Ye.A., Kondratenko O.Ye.**

*State Institution "O.M. Marzeiev Institute for Public
Health, National Academy of Medical Sciences
of Ukraine", Kyiv, Ukraine*

Objective. We analyzed the current state of the issue of the investigations on the genotoxicity of low-frequency electromagnetic fields (LFEMF). **Material and methods.** We analyzed the literary findings on the study of cytogenetic damages in humans exposed to LF EMF.

Results. The investigations of genotoxic effects were established to be concerned with the occupationally exposed individuals as long as such investigations in the population were practically absent. Genotoxicity was assessed by means of the detection of DNA damages (Comet-test), chromosomal aberrations and micronuclei formation in lymphocytes and buccal cells. The results, obtained by the

authors, were unequal and sometimes contradictory. These differences may be partially explained by various levels and duration of LF EMF effect and a number of the admitted shortcomings affecting the results. Nevertheless, on the whole, the human cytogenetic biomonitoring investigations in humans showed positive results that allowed to suppose the genotoxicity of LF EMF. A dose-time dependence of genotoxic effects in humans exposed to LFEMF is shown in the isolated works. The problems, concerning minimum effective and maximum non-effective levels, are still unsolved.

Conclusions. Literary findings confirm the necessity of further investigations in this direction among occupationally exposed humans and population to solve the number of problems connected with the hazard evaluation of various LF EMF levels for the development of the effective protective measures from their harmful influence on human health in the occupational and environmental conditions.

Keywords: low-frequency electromagnetic fields, exposed humans, genotoxic damages, lymphocytes, buccal cells.

(14±7,4) років [23-24]. Причому у жінок генотоксичні ефекти були вищими, ніж у чоловіків. Дослідження тих, хто працює з дисплеями, проведені іншими авторами за показником ОСХ, показали негативні результати.

У роботі [25] встановлено генотоксичні зміни в осіб, що мали справу з фотокопіювальними машинами і були професійно експоновані ЕМП на тлі впливу токсичних компонентів – спектрографічних проявників, газу озону та інших летких органічних сполук. Генотоксичні ефекти проявилися збільшенням ХА у лімфоцитах крові та МЯ у клітинах букального епітелію. Тобто у даній ситуації генотоксичний ефект був наслідком поєданого впливу ЕМП з хімічними факторами.

Поєднання професійного впливу ЕМП та хімічних сполук (хрому, нікелю, інших токсичних випарів зварювання металів) мало місце також у дослідженнях генотоксичного ефекту у 21 зварника, які зазнавали дії ЕМП від зварювальних апаратів на рівні 0,03-345 мкТл, у середньому 7,8 мкТл, працюючи у різних компаніях [26]. Автори вказують на достовірне дозозалежне збільшення МЯ у лімфоцитах крові за одночасного зниження частоти обміну ОСХ порівняно з контролем (21 особа). Водночас, за даними інших авторів, виявлено зменшення

ушкоджень ДНК у тих саме зварників порівняно з контролем [27].

Крім робіт, в яких отримано генотоксично позитивний результат за професійного впливу ЕМП, у 5 дослідженнях з 22 проаналізованих генотоксичні ефекти були негативними. Так, у роботі [28] при обстеженні працівників розподільчих електростанцій потужністю 380 кВ за дії ЕМП 50 Гц генотоксичний ефект за показниками частоти ХА, ОСХ не виявлено.

Генотоксично негативні дані отримано при дослідженні 70 осіб різних професій, які зазнавали професійного впливу ЕМП на рівні приблизно 2 мкТл, причому, як вказують автори, за відсутності відомих мутагенів, канцерогенів [29]. Не виявлено генотоксичності за показниками ХА, ОСХ та МЯ також при обстеженні 109 осіб, експонованих ЕМП на рівні густини магнітного потоку від <0,1 мкТл, >0,2 мкТл до >1 мкТл, у середньому – 0,35 мкТл [30]. Ще два дослідження стосуються генотоксичного ефекту в осіб, що перебували під дією ЕМП у непрофесійних умовах. У роботі [31] обстежували добровольців, яких надавали дії ЕМП на рівні густини магнітного потоку 200 мкТл протягом 4 годин. Ефекти за показниками частоти ДНК ушкоджень (комет-тест) та МЯ у лімфоцитах крові не виявлено. Згідно з повідомленням

генотоксичний ефект за показником ХА не відзначено також у 10 осіб, які мешкали поблизу потужних ліній електропередач.

Якщо розглядати генотоксичні ефекти, отримані за різними показниками, можна бачити, що найбільш часто використані у роботах тести на ХА (у 16 дослідженнях) та МЯ (у 10 дослідженнях) показали переважно генотоксично позитивну реакцію (відповідно у 12 та 7 роботах). Тести на ушкодження ДНК, використані у 4 дослідженнях, позитивний ефект проявили у 3 випадках. Негативний ефект за частотою ушкодження ДНК, як і за показником частоти МЯ, встановлено в одній роботі при дослідженні добровольців, експонованих дією НЧ ЕМП на рівні 200 мкТл [31]. Такий ефект, ймовірно, пов'язаний з короткочасною дією (4 години).

Водночас тест на ОСХ, використаний у 9 роботах окремо або у сукупності з іншими тестами, показав генотоксично негативний результат в усіх випадках.

Аналогічну реакцію організму на тест ОСХ відзначено також іншими авторами при дослідженні генотоксичного ефекту ЕМП радіочастотного діапазону [32, 33]. Припускають, що це пов'язано з наявністю радіоміметичних властивостей. Адже давно відомо, що іонізуюче випромі-

нювання найчастіше індукує структурні ХА і рідко – ОСХ, що пояснюється включенням різних механізмів реалізації генотоксичного ефекту і, ймовірно, притаманне також ЕМП низькочастотного діапазону.

Отже, узагальнюючи аналіз моніторингових досліджень з генотоксичності НЧ ЕМП, можна зазначити, що отримані у різних роботах результати неоднорідні і навіть протирічливі. Очевидно, причинами такої розбіжності результатів є відмінність у професійних рівнях ЕМП і тривалості експозиції (стажу), а також застосування різних тестів у роботах.

На результати досліджень може впливати також низка допущених авторами таких недоліків, як неточність дозиметрії НЧ ЕМП, некоректна кількість досліджуваних клітин при тестуванні та недостатня кількість задіяних суб'єктів в експонованих та контрольних групах, а також ігнорування відмінностей між окремими професіями та присутності супровідних хімічних та фізичних факторів, зокрема ЕМП радіочастотного діапазону тощо [6].

Останнє має важливе значення, оскільки радіочастотні ЕМП також визнано МАВР канцерогеном групи 2 В.

Вважається, що для отримання статистично достовірних результатів при тестуванні генотоксичності необхідно аналізувати не менше 200 клітин при визначенні ХА, 50 – для ОСХ, 100 – для аналізу ДНК-ушкоджень та 2000 – для аналізу МЯ за кількості 20-50 суб'єктів в обох групах – експонованій та контрольній.

На жаль, не усі автори додержуються цих умов. Викладені обставини заважають дати чітку оцінку

досліджуваного фактора.

Проте, незважаючи на ці обставини, переважна кількість досліджень щодо професійно експонованих НЧ ЕМП осіб показали позитивні результати, що дозволяє оцінювати НЧ ЕМП загалом як генотоксично активні, отже, потенційно канцерогенні. У більшості досліджень професійні рівні НЧ ЕМП були нижчими за ефективні рівні в експериментах *in vivo* та *in vitro*, тим не менше вони викликали генотоксичні ефекти. Варто підкреслити, що деякі дослідження, хоча їх мало, ілюструють дозову та часову залежність проявів генотоксичності, наявність анеугенних властивостей, які збігаються з експериментальними даними *in vivo* та *in vitro* і можуть свідчити про те, що вони не є випадковими. Особливої уваги заслуговує виявлена здатність НЧ ЕМП індукувати анеугенні ефекти, які, згідно з сучасними поглядами, чітко пов'язані з канцерогенезом.

Дискусійним залишається питання щодо ефективних та неефективних рівнів НЧ ЕМП.

За даними ВООЗ [34], НЧ ЕМП не викликають генотоксичний ефект у клітинах на рівнях, нижчих за 50 мТл, хоча, за даними дослідів, виконаних за програмою REFLEX, мінімальний рівень густини магнітного потоку, що викликав ушкодження ДНК у лімфоцитах крові людини, становив 35 мкТл. На думку Наукового комітету Європи з безпеки ліків та продуктів харчування (SCENIHR) [35], генотоксичні ефекти можна очікувати за впливу НЧ ЕМП на рівні близько 100 мкТл. На думку [6], будь-яка реальна величина густини магнітного потоку НЧ ЕМП є вищою за експозиційні рівні, вказані у моніторингових дослідженнях, а спостережувані ефекти скоріше є наслідком дії ЕМП у комплексі з іншими хімічними та фізичними агентами.

Потребують подальшого вивчення також механізми генотоксичності НЧ ЕМП. Лише результати поодиноких робіт вказують на роль оксидативних ушкоджень ДНК [17], епігенетичних порушень, наслідком яких є анеугенні ефекти [20], а також пригнічення процесів репарації ДНК [36].

Останнє було доведено в епідеміологічних дослідженнях при вивченні поліморфізму генів ДНК-репарації у хворих на лейкемію дітей, що мешкали у зоні впливу потужних ліній електропередачі. При цьому встановлено достовірний взаємозв'язок "ген – навколишнє середовище" між інтенсивністю електромагнітного поля і зниженням активності генетичного варіанту XRCC1 критичного ензиму експцизивної репарації основ ДНК.

Отже, можна дійти висновку, що моніторингові цитогенетичні дослідження на професійно експонованих суб'єктах, з яких тільки у 5 роботах з 22 отримано генотоксично негативний результат, загалом дозволяють говорити про генотоксичність ЕМП низькочастотного діапазону. Проте протирічливість отриманих різними авторами результатів і допущені ними недоліки свідчать про необхідність подальших досліджень НЧ ЕМП у цьому напрямку на коректно сформованих експонованих та контрольних групах суб'єктів з використанням адекватних тестів і відповідної їм кількості досліджуваних клітин. Необхідні також епідеміологічні дослідження такого типу серед населення, які нині практично відсутні.

ЛІТЕРАТУРА

1. JARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans. Non-ionizing Radiation, Part 2:

Radiofrequency Electromagnetic Fields. Lyon : JARC, 2013. Vol. 102. 429 p.

2. Wertheimer N., Leeper F. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *American J. of Epidemiology*. 1979. Vol. 109. P. 273-284.

3. Bonassi S., Hagmar L., Stromberg U., Tinnerberg H. et al. Chromosomal aberrations in lymphocytes predicts human cancer in dependently of exposure to carcinogens. European Study Group on Cytogenetic Biomarkers and Health. *Cancer. Res*. 2000. Vol. 60. P. 1619-1625.

4. Bonassi S., Norppa H., Ceppi M., Stromberg U. et al. Chromosomal aberrations frequency in lymphocytes predict the risk of cancer: results from a pooled cohort study of 22358

subjects in 11 countries.

Carcinogenesis. 2008. Vol. 29. P. 1178-1183.

5. Hagmar L., Stromberg U., Bonassi S., Hansteen I.L. et al. Impact of types of lymphocyte chromosomal aberrations on human cancer risk: results from Nordic and Italian cohorts. *Cancer Res*. 2004. Vol. 64. P. 1619-1625.

6. Maes A., Verschaeve L. Genetic damage in humans exposed to extremely low-frequency electromagnetic fields. *Arch. Toxicol*. 2016. Vol. 90. P. 2337-2348.

7. Bonassi S., Ceppi M., Lando C., Chang W.P. et al. An increased micronucleus frequency in peripheral blood lymphocytes predicts the risk of cancer in humans. *Carcinogenesis*. 2007. Vol. 28. P. 625-631.

8. Bonassi S., El-Zein R., Bolognesi C., Fenech M. Micronuclei frequency in peripheral blood lymphocytes and cancer risk: evidence from human studies. *Mutagenesis*. 2011. Vol. 26. P. 93-100.

9. Murgia E., Ballardini M., Bonassi S., Rossi A.M. et al. Validation of micronuclei frequency in peripheral blood lymphocytes as early cancer risk biomarker in a nested case-control study. *Mutat. Res*. 2009. № 639. P. 27-34.

10. Valjus J., Norppa H., Jarventaus H., Sorsa M. et al. Analysis of chromosomal aberrations, sister chromatid exchanges and micronuclei among power linemen with long-term exposure to 50 Hz electromagnetic fields. *Radiat. Environ. Biophys*. 1993. Vol. 26. P. 325-336.

11. Nordenson I., Hansson Mild K., Sweins A., Birke E. Clastogenic effects in human lymphocytes of power frequency electric fields: in vivo and in vitro studies. *Radiat. Environ. Biophys*. 1984. Vol. 23. P. 191-201.

12. Nordenson I., Hansson Mild K., Ostman U., Ljunberg H. Chromosomal effects in lymphocytes of 400 kV-substation workers. *Radiat. Environ. Biophys*. 1988. Vol. 27. P. 39-47.

13. Erdal M.E., Erdal N., Oguskan S. Chromosomal aberrations in peripheral lymphocytes of a high-voltage

power lineman exposed to electromagnetic fields. *Turk J. Med. Sci*. 1999. Vol. 29. P. 335-336.

14. Khalil A.M., Qussem W., Amoura F. Cytogenetic changes in human lymphocytes from workers occupationally exposed to high-voltage electromagnetic fields. *Electro Magnetobiol*. 1993. Vol. 12. P. 17-26.

15. Celikler S., Aydemir N., Vatan O., Bilaloglu R. A biomonitoring study of genotoxic risk to workers of transformers and distribution line stations. *Int. J. Environ. Hyg. Health Res*. 2009. Vol. 19. P. 421-430.

16. Balamuralikrishnan B., Balachandar V., Kumar S.S., Varsha P. et al. Evaluation of chromosomal alterations in electric workers occupationally exposed to low frequency of electromagnetic fields (EMFs) in Coimbatore population. India. *Asian. Pac. J. Cancer Prev*. 2012. Vol. 13 (6). P. 2961-2966.

17. Tiwari R., Lakshmi N.K., Bhargava S.C., Ahuja Y.R. Epinephrine DNA integrity and oxidative stress in workers exposed to extremely low-frequency electromagnetic fields (ELF-EMFs) at 132 kV substations. *Electromagn. Biol. Med*. 2015. Vol. 34. P. 54-62.

18. Skyberg K., Hansteen I.L., Vistnes A.M. Chromosomal aberrations in lymphocytes of high-voltage cable splicer's exposed to electromagnetic fields. *Scand. J. Work. Environ. Health*. 1993. Vol. 19. P. 19-34.

19. Skyberg K., Hansteen I.L., Vistnes A.M. Chromosomal aberrations in lymphocytes of employees in transformer and generator production exposed to electromagnetic fields and mineral oil. *Bioelectromagnetics*. 2001. Vol. 22. P. 150-160.

20. Othman E.O., Aly M.S., Nahas S.M. Aneuploidy in workers occupationally exposed to electromagnetic fields detected by FISH. *Cytologia*. 2001. Vol. 66. P. 117-125.

21. Nordenson I., Hansson Mild K., Jarventaus H., Hirvonen A. et al. Chromosomal aberrations in peripheral lymphocytes of train engine drivers. *Bioelectromagnetics*. 2001. Vol. 22. P. 306-315.

22. Gadhia P., Chakraborty S., Pithawala M. Cytogenetic studies on railway engine drivers exposed to extremely low fre-

quency electromagnetic fields (ELF-EMF). *Int. J. Hum. Genet*. 2010. Vol. 10. P. 263-269.

23. Higinio Estecio M.R., Silva A.E. Chromosome abnormalities caused by computer video display monitors' radiation. *Rev. Saude Puhlica*. 2002. Vol. 36. P. 330-336.

24. Carbonari K., Goncalves L., Roth D., Moreira P. et al. Increased micronucleated cell frequency related to exposure to radiation emitted by computer cathode ray tube video display monitors. *Genet. Mol. Biol*. 2005. Vol. 28. P. 469-474.

25. Goud K.I., Hasan Q., Balakrishna N., Rao K.P., Ahuja Y.R. Genotoxicity evaluation of individual working with photocopying machines. *Mutat. Res*. 2004. № 563. P. 151-158.

26. Dominici L., Villarini M., Latigoni C., Monarca S., Moretti M. Genotoxic hazard evaluation in welders occupationally exposed to extremely low frequency magnetic fields (ELF-MF). *Int. J. Hyg. Environ. Health*. 2011. Vol. 215. P. 68-75.

27. Villarini M., Dominici L., Fatigoni C., Levorato S. et al. Primary DNA damage in welders occupationally exposed to extremely-low-frequency magnetic fields (ELF-MF). *Ann. Ig*. 2015. Vol. 27. P. 511-519.

28. Bauchinger M., Hauf R., Schmid E., Dresch J. Analysis of structural chromosome changes and SCE after occupational long-term exposure to electric and magnetic fields from 380 kV-systems. *Radiat. Environ. Biophys*. 1981. Vol. 19. P. 235-238.

29. Gobba F., Rocatto L., Sinigaglia B., Temperani P. Sister chromatid exchanges (SCE) and high frequency cells in workers occupationally exposed to extremely-low-frequency magnetic fields. *Med*.

Lav. 2003. Vol. 94. P. 450-458.

30. Scaringi M., Temperani P., Rossi P., Bravo G., Gobba F. Evaluation the genotoxicity of the extremely low frequency-magnetic fields (ELF-MF) in workers exposed for professional reasons. *Giorn. It. Med. Lavoro Ergon.* 2007. Vol. 29. P. 420-421.

31. Albert G.C., Vc Namee J.P., Marro L., Bellier P.V. et al. Assessment of genetic damage in peripheral blood of human volunteers exposed (whole-body) to a 200 μ T, 60 Hz magnetic field. *Int. J. Radiat. Biol.* 2009. Vol. 85. P. 144-152.

32. Verschaeve L., Juutilainen J., Lagroye I. et al. In vivo and in vitro genotoxicity of radiofrequency fields. *Mut. Res.* 2010. Vol. 70 S. P. 252-268.

33. Ruediger H.W. Genotoxic effects of radiofrequency electromagnetic fields. *Pathophysiology.* 2009. Vol. 16 (2-3). P. 89-102.

34. Environmental Health Criteria 238: Extremely Low Frequency Fields. Geneva : WHO, 2007. 100 p.

35. Opinion on Potential Health Effect of Exposure to Electromagnetic Fields (EMF) European Commission. DG Health and Food Safety SCENIHR. 2015. URL : <http://ec.europa.eu/health/scientificcommittees/emerging/docs/scenihr-u-041.pdf>.

36. Yang Y., Xingming Y., Chonghuai Y. et al. Case-only study of interactions between DNA repair genes (hMLH1, APEX1, MGMT, XRCC1 and XPD) and low-frequency electromagnetic fields in childhood acute leukemia. *Leuk. Lymphoma.* 2008. Vol. 49. P. 2344-2350.

REFERENCES

1. JARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans. Non-ionizing

Radiation, Part 2: Radiofrequency Electromagnetic Fields. Lyon : JARC ; 2013 ; 102 ; 429 p.

2. Wertheimer N. and Lee per F. *American J. of Epidemiology.* 1979 ; 109 : 273-284.

3. Bonassi S., Hagmar L., Stromberg U., Tinnerberg H. et al. *Cancer. Res.* 2000 ; 60 : 1619-1625.

4. Bonassi S., Norppa H., Ceppi M., Stromberg U. et al. *Carcinogenesis.* 2008 ; 29 : 1178-1183.

5. Hagmar L., Stromberg U., Bonassi S., Hansteen I.L. et al. *Cancer. Res.* 2004 ; 64 : 1619-1625.

6. Maes A., Verschaeve L. *Arch. Toxicol.* 2016 ; 90 : 2337-2348.

7. Bonassi S., Ceppi M., Lando C., Chang W.P. et al. *Carcinogenesis.* 2007 ; 28 : 625-631.

8. Bonassi S., El-Zein R., Bolognesi C. and Fenech M. *Mutagenesis.* 2011 ; 26 : 93-100.

9. Murgia E., Ballardini M., Bonassi S., Rossi A.M. et al. *Mutat. Res.* 2009 ; 639 : 27-34.

10. Valjus J., Norppa H., Jarventaus H., Sorsa M. et al. *Radiat. Environ. Biophys.* 1993 ; 26 : 325-336.

11. Nordenson I., Hansson Mild K., Sweins A. and Birke E. *Radiat. Environ. Biophys.* 1984 ; 23 : 191-201.

12. Nordenson I., Hansson Mild K., Ostman U. and Ljunberg H. *Radiat. Environ. Biophys.* 1988 ; 27 : 39-47.

13. Erdal M.E., Erdal N. and Oguskan S. *Turk J. Med. Sci.* 1999 ; 29 : 335-336.

14. Khalil A.M., Qussem W. and Amoura F. *Electro Magnetobiol.* 1993 ; 12 : 17-26.

15. Celikler S., Aydemir N., Vatan O. and Bilaloglu R. *Int. J. Environ. Hyg. Health Res.* 2009 ; 19 : 421-430.

16. Balamuralikrishnan B., Balachandar V., Kumar S.S., Varsha P. et al. *Asian. Pac. J. Cancer Prev.* 2012 ; 13 (6) : 2961-2966.

17. Tiwari R., Lakshmi N.K., Bhargava S.C. and Ahuja Y.R. *Electromagn. Biol. Med.* 2015 ; 34 : 54-62.

18. Skyberg K., Hansteen I.L. and Vistnes A.M. *Scand. J. Work. Environ. Health.* 1993 ; 19 : 19-34.

19. Skyberg K., Hansteen I.L. and Vistnes A.M.

Bioelectromagnetics. 2001 ; 22 : 150-160.

20. Othman E.O., Aly M.S. and Nahas S.M. *Cytologia.* 2001 ; 66 : 117-125.

21. Nordenson I., Hansson Mild K., Jarventaus H., Hirvonen A. et al. *Bioelectromagnetics.* 2001 ; 22 : 306-315.

22. Gadhia P., Chakraborty S. and Pithawala M. *Int. J. Hum. Genet.* 2010 ; 10 : 263-269.

23. Higino Estecio M.R. and Silva A.E. *Rev. Saude Publica.* 2002 ; 36 : 330-336.

24. Carbonari K., Goncalves L., Roth D., Moreira P. et al. *Genet. Mol. Biol.* 2005 ; 28 : 469-474.

25. Goud K.I., Hasan Q., Balakrishna N., Rao K.P. and Ahuja Y.R. *Mutat. Res.* 2004 ; 563 : 151-158.

26. Dominici L., Villarini M., Latigoni C., Monarca S. and Moretti M. *Int. J. Hyg. Environ. Health.* 2011 ; 215 : 68-75.

27. Villarini M., Dominici L., Fatigoni C., Levorato S. et al. *Ann. Ig.* 2015 ; 27 : 511-519.

28. Bauchinger M., Hauf R., Schmid E. and Dresch J. *Radiat. Environ. Biophys.* 1981 ; 19 : 235-238.

29. Gobba F., Rocatto L., Sinigaglia B. and Temperani P. *Med. Lav.* 2003 ; 94 : 450-458.

30. Scaringi M., Temperani P., Rossi P., Bravo G. and Gobba F. *Giorn. It. Med. Lavoro Ergon.* 2007 ; 29 : 420-421.

31. Albert G.C., Vc Namee J.P., Marro L., Bellier P.V. et al. *Int. J. Radiat. Biol.* 2009 ; 85 : 144-152.

32. Verschaeve L., Juutilainen J., Lagroye I. et al. *Mut. Res.* 2010 ; 70 S : 252-268.

33. Ruediger H.W. *Pathophysiology.* 2009 ; 16 (2-3) : 89-102.

34. Environmental Health Criteria 238: Extremely Low Frequency Fields. Geneva : WHO ; 2007 : 100 p.

35. Opinion on Potential Health Effect of Exposure to Electromagnetic Fields (EMF) European Commission. DG Health and Food Safety SCENIHR. 2015. URL : <http://ec.europa.eu/health/scientificcommittees/emerging/docs/scenihr-u-041.pdf>.

36. Yang Y., Xingming Y., Chonghuai Y. et al. *Leuk. Lymphoma.* 2008 ; 49 : 2344-2350.

Надійшло до редакції 14.02.2018