

УДК 537.87

РАСЧЕТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБЛУЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

А. Н. Думин, Ю. Г. Шкорбатов, А. И. Чернов, В. А. Катрич

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4,
E-mail: Alexander.N.Dumin@univer.kharkov.ua
Поступила в редакцию 21 марта 2014 г.

Рассматриваются явления при облучении биологических растворов импульсным электромагнитным полем. Посредством прямого численного расчета во временной области проводится оптимизация конструкции облучателя и его размеров. Исследуется равномерность нагрева растворов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сверхширокополосное поле, импульсное поле, удельный коэффициент поглощения, облучение клеток

Розглядаються явища при опроміненні біологічних розчинів імпульсним електромагнітним полем. За допомогою прямого чисельного розрахунку у часовому просторі проводиться оптимізація конструкції опромінювача і його розмірів. Досліджується рівномірність нагріву розчинів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: надширокосмугове поле, імпульсне поле, питомий коефіцієнт поглинання, опромінення клітин

The phenomena of homogeneous irradiation of biological solutions by impulse electromagnetic field is investigated. The optimization of construction and sizes of the apparatus for the irradiation is carried out by direct numerical calculation in time domain. Uniformity of heat distribution in solution is studied.

KEYWORDS: ultrawideband field, impulse field, specific absorption rate, cell irradiation

ВВЕДЕНИЕ

Микроволновое излучение является неотъемлемой и постоянно увеличивающейся частью общего электромагнитного фона, окружающего современного человека. Мобильная связь, беспроводные системы связи WiFi и WiMAX и другие промышленные и бытовые источники микроволнового излучения оказывают на человека определенное влияние, механизмы действия которого до конца не изучены.

Существующие стандарты безопасности микроволнового электромагнитного излучения основаны на ограничении уровня напряженности поля либо уровня поглощенной мощности при определенных временах экспозиции. Оба эти подхода к безопасности, по сути, отражают две гипотезы об основных причинах вредоносного действия электромагнитного поля: первый подход основан на гипотезе о том, что, независимо от механизмов влияния на живые организмы, с ростом напряженности поля каким-либо нелинейным образом растет его вредное воздействие; второй подход однозначно связывает опасность поля с нагревом тканей. Другими словами, второй подход отрицает существование пагубного нетеплового действия поля.

В настоящее время в литературе описаны десятки гипотез, описывающих возможные механизмы влияния электромагнитного поля разных диапазонов на живые организмы [1]-[3]. Однако, в силу различных причин, доказать или однозначно опровергнуть эти теории чрезвычайно сложно, особенно в микроволновом диапазоне электромагнитных волн, в силу множества причин, главными из которых можно назвать невероятную сложность функционирования живых организмов и проявления их индивидуальности, приводящие порой к невозможности прослеживания четких причинно-следственных связей в результатах экспериментов. Относительная однозначность этих результатов наступает только при больших уровнях напряженности поля, и, действительно, может быть объяснена тепловым действием поля. Также следует отметить, что если в обычных экспериментах отклонения от средних значений описываются определенными статистическими законами, то в опытах по облучению причина отклонений может лежать в проявлении подчас весьма ярких индивидуальных свойств биологических объектов. При этом статистические данные экспериментов и их интерпретация могут принципиально отклоняться в сторону существенного уменьшения их точности и надежности по сравнению с экспериментальными исследованиями большого числа неживых объектов. Особенно важно это учитывать, принимая во внимание наличие серьезного морально-этического аспекта ошибочного анализа

экспериментов с участием человека. Ведь если в обычных исследованиях неправильные или неточные выводы приводят к легко оцениваемому непосредственному материальному ущербу, то оценить экономические потери от возможного урона здоровью и жизни людей крайне сложно, так как каждая человеческая жизнь бесценна.

Сторонники теплового действия электромагнитного поля на живые объекты объясняют действие слабых (нетепловых) уровней облучения наличием «горячих точек», мест в живых организмах, где имеется сильная концентрация электромагнитной энергии [1]. В свою очередь, опять-таки тепловое действие на избранные клетки влияет на весь организм, объясняя сверхчувствительность к слабым электромагнитным полям. Хотя «горячие точки» действительно имеют место, концентрация энергии в них не настолько велика, чтобы объяснить все эффекты тепловым воздействием. Также следует отметить, что в силу диэлектрических потерь в биологических веществах и частотной зависимости их параметров, результаты решений задач моделирования нагрева не подлежат масштабированию [2].

Актуальность изучения влияния электромагнитного излучения на состояние клетки и клеточного ядра обусловлена тем, что именно на этом уровне происходит регуляция наиболее важных процессов жизнедеятельности, итогом которых на уровне всего организма может стать временное нарушение функционального состояния или заболевание. Для проведения экспериментальных исследований влияния поля на живые клетки предполагается использовать авторский подход, состоящий в контроле состояния ДНК, выражающийся в проверке уровня гетерохроматизации клеточного ядра [4]. Данный, весьма чувствительный метод позволяет изучить результирующее биологическое действие полей на клетку, не привязываясь к конкретным его механизмам, так как именно состояние ДНК характеризует степень стресса, в котором находится клетка после пагубного внешнего воздействия самой различной природы. При таких исследованиях проводится облучение электромагнитным полем специально приготовленного раствора, содержащего живые клетки. Такой подход позволяет регистрировать воздействие окружающих нас достаточно слабых полей, влияние которых в последнее время стало все больше беспокоить как мировую, так европейскую общественность [5].

Ранее различными авторами проводились исследования возможного мутагенного воздействия радиочастотного излучения низкой интенсивности. В ряде исследований было обнаружено, что радиочастотное излучение может вызывать мутации. Например, было показано, что под действием микроволнового излучения (частота 7.7 ГГц, мощность 0.5, 10 и 30 мВт / см²) со временем экспозиции 10, 30 и 60 мин имело место увеличение хромосомных aberrаций и микроядер в лимфоцитах человека. При более длительных временах облучения радиочастотные сигналы с SAR (Specific Absorbition Rate, удельная величина поглощения излучения), равным 5 Вт / кг вызвали повреждения хромосом в лимфоцитах человека. Действие излучений на четырех различных частотах (в диапазоне 837-1909.8 МГц) в течение 24 часов со значением SAR от 5 до 10 Вт / кг приводило к существенному и высокоповторяемому увеличению количества лимфоцитов с микроядрами [6].

Однако, в ряде других исследований мутагенного воздействия микроволнового излучения обнаружено не было. Например, излучение с частотой 2,45 ГГц в течение двух часов в непрерывном (SAR = 100 Вт / кг) и импульсном (максимум SAR = 900 Вт / кг) режимах не вызвало хромосомных aberrаций в клетках мышей [7]. Используемые в мобильных телефонах излучения с частотами 847.74-813.56 МГц и значением SAR 2.4-26 мВт / кг не приводило к изменению уровня повреждения ДНК и не влияло на индукцию апоптоза в Molt-4 T-лимфобластоидных клетках [8].

Облучение крыс электромагнитным излучением частотой 915 МГц с плотностью мощности 0,24, 2,4 и 24 мВт/см² вызывает повреждения нейронов: поврежденные клетки окрашиваются кризидовым фиолетовым и теряют внутреннюю структуру [9]. Облучение культуры клеток эпителия хрусталика кролика микроволновым излучением с частотой 2,45 ГГц с плотностью мощности от 0,5 до 2 мВт/см² вызывает снижение жизнеспособности клеток, подавление синтеза ДНК и уровня пролиферации клеток [10].

На культуре клеток китайского хомячка отмечен рост количества хромосомных aberrаций после облучения микроволновым излучением, причем количество aberrаций повышалась с экспозицией (15, 30, 60 мин), а также наблюдался рост количества микроядер в облученных клетках [11, 12]. В работах [13, 14] было показано увеличение количества хромосомных aberrаций под действием микроволнового излучения на лимфоциты человека. Другие авторы также наблюдали увеличение количества микроядер в лимфоцитах [15]. В работе [10] было показано повышение процента клеток с микроядрами, кариолизисом и клеток с двумя ядрами у людей, использующих мобильные телефоны.

В наших предыдущих исследованиях было показано, что поляризованное микроволновое излучение с частотой 35 ГГц и плотностью мощности 30 мкВт/см² вызывает увеличение количества гранул гетерохроматина в ядрах клеток человека в зависимости от поляризации [16]. Описаны также другие свидетельства негативного воздействия низкоэнергетического микроволнового облучения на здоровье человека [17-20]. По нашему мнению, основой воздействия электромагнитных факторов на организм

является влияние этих факторов на клетку и клеточное ядро, поскольку факторы электромагнитного излучения способны непосредственно проникать внутрь клетки и взаимодействовать со структурами клетки. Известно, что микроволновое облучение вызывает ряд морфологических изменений, в частности, увеличение объема ядер и клеток [21]. В наших исследованиях было показано влияние низкоэнергетического микроволнового излучения на структуру хроматина [22], а также импульсных широкополосных излучений на состояние хроматина в клетках человека [23]. Аналогичное действие оказывают и излучение гелий-неонового лазера [9], теплового шока и ультрафиолетового излучения [24]. С другой стороны, ранее нами было показано изменение показателя степени конденсации хроматина при воздействии растворенных в воде токсичных химических веществ [25]. Предлагается использовать в качестве общего индикатора воздействия неблагоприятных факторов среды состояние хроматина в клетках буккального эпителия человека.

Обеспечение заданного уровня облучения с контролем значений напряженности поля внутри раствора с целью расчета удельной поглощенной энергии, как требуют существующие международные стандарты, равномерности поля внутри раствора сопряжены с существенными трудностями. Так как облучаемые растворы обладают значительной относительной диэлектрической проницаемостью и потерями на исследуемых рабочих частотах, они существенно искажают распределение поля в электродинамических объемах, порождая порой недопустимую неравномерность в уровне облучения растворенных клеток. Новым перспективным направлением исследований в последнее время стало влияние на биологические объекты не только монохроматического, но и импульсного электромагнитного поля, спектр которого является сверхшироким. Поэтому целью данной статьи является расчет установки для облучения сверхширокополосными электромагнитными полями растворов, содержащих живые клетки, обладающей хорошим постоянством характеристик в широком диапазоне частот, высокой равномерностью поля внутри пробирки с раствором и малым коэффициентом отражения импульса, поступающего от генератора.

Проводится электродинамическое моделирование теплового действия импульсного поля на биологические объекты. Для учета сложной геометрии экспериментального оборудования, которое используется для облучения, и частотной зависимости диэлектрических характеристик и потерь проводится численный расчет полей в диэлектрике с целью нахождения величины роста температуры во время облучения. Для дальнейшего исследования вопроса о существовании нетеплового биологического действия электромагнитного поля на живые клетки рассчитывается удельный коэффициент поглощения (SAR).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предполагается использовать установку для облучения биологических растворов с существующим генератором сверхкоротких импульсов с формой, близкой к гауссовой, и длительностью 1 нс. Запитка установки будет проводиться через стандартный коаксиальный разъем. Установка должна позволять облучать растворы в стандартных полиэтиленовых пробирках диаметром 6 мм. Ввиду сложной геометрии электродинамической задачи, необходимости учета потерь в материалах и, прежде всего, в биологическом растворе, целесообразно расчет произвести численным методом. За исходную форму установки была выбрана структура с максимально равномерным распределением поля в определенной области – линия передачи в виде двух плоских параллельных пластин. Предполагается провести оптимизацию формы и размеров пластин для получения наилучших характеристик.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Электродинамическая задача решается путем прямого численного моделирования методом конечных разностей во временной области. Оптимизация формы пластин, величины сопротивления поглощающей нагрузки, место ее размещения и место размещения запитывающего кабеля на пластинах проводится путем минимизации амплитуд волн, отраженных от мест подключения запитывающего кабеля и поглощающей нагрузки. Также исследуется равномерность распределения тепловых потерь в объеме облучаемого биологического раствора и его удельного коэффициента поглощения на разных частотах. Расчет удельного коэффициента поглощения (SAR) проводится по формуле:

$$SAR = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon'' \omega}{\rho} |E|^2$$

где ε_0 – электрическая постоянная свободного пространства, ε'' – мнимая часть диэлектрической проницаемости, ω – угловая (круговая) частота, ρ – удельная плотность облученного раствора, E – среднеквадратичное значение напряженности электрического поля.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Первоначальный вид установки для облучения представлен на рис. 1. Поглощающая нагрузка и источник имеют точечные размеры.

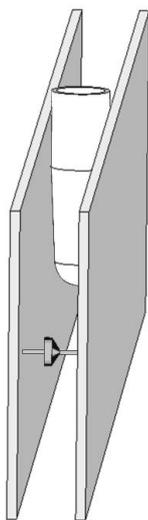


Рис. 1. Исходный вид установки.

После проведенных многопараметрических исследований влияния формы пластин, включая такие формы как эллипс, экспоненциальное расширение, закругление краев, изменения места запитывания и подключения поглощающей нагрузки, наилучший вариант был найден после просчета 10 тысяч вариантов. Оптимальная форма пластин установки – прямоугольник с закруглениями со всех сторон. Временные формы падающего гауссова и отраженного импульсов для данного наилучшего случая представлены на рис. 2.

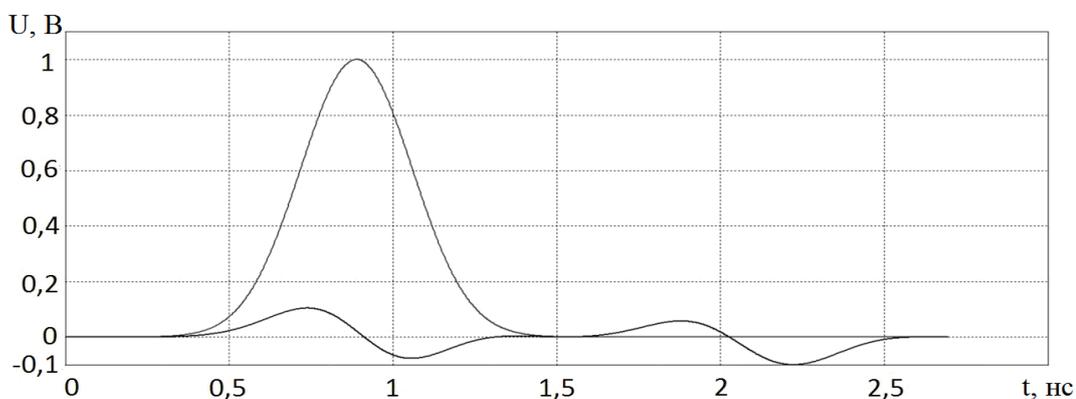


Рис. 2. Временные зависимости падающего гауссового и отраженного импульса для установки с $d = 6$ мм и $h = 34$ мм.

Оказалось, что от всей установки отражается менее 1,5% энергии падающего импульса.

Для проверки равномерности нагрева капли биологического раствора стандартного объема для проводимых экспериментов – 10 мкЛ, на рис. 3 изображено распределение величины потерь в различных частях капли на центральной частоте спектра падающего поля 1 ГГц. Несмотря на то, что внешнее поле равномерное, видно, что вследствие большой диэлектрической проницаемости раствора и потерь, неравномерность нагрева разных частей капли может достигать одного порядка, и улучшить этот показатель не представилось возможным. Но эта неравномерность может считаться допустимой, принимая во внимание эффекты теплопередачи внутри жидкости.

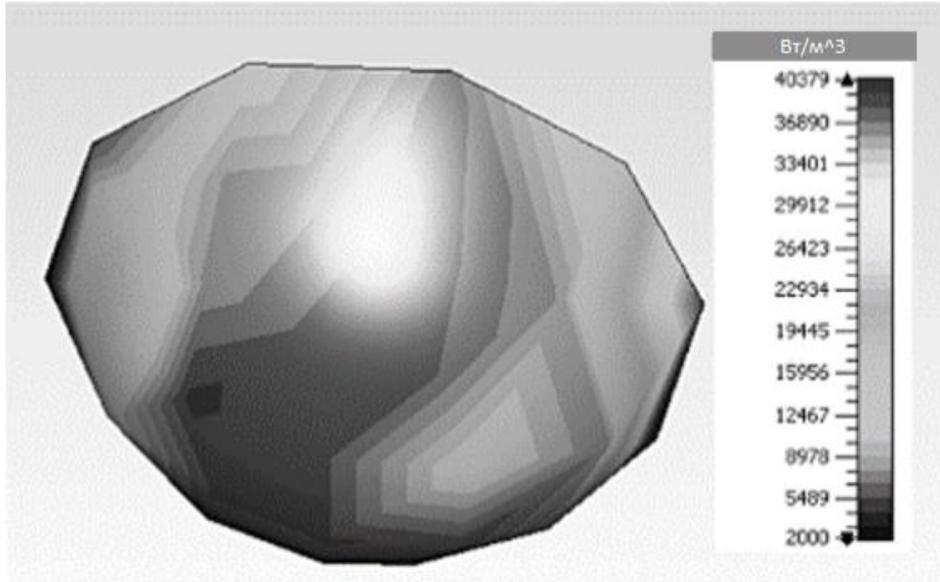


Рис. 3. Потери энергии в капле.

Так как падающее импульсное поле содержит в себе самые различные частоты, представляет интерес удельный коэффициент поглощения для всей капли как функция частоты. Результаты расчета приведены на рис. 4. Видно, что удельный коэффициент поглощения слабо зависит от частоты, что свидетельствует о том, что данная экспериментальная установка будет достаточно точно моделировать облучение биологических объектов импульсной плоской электромагнитной волной.

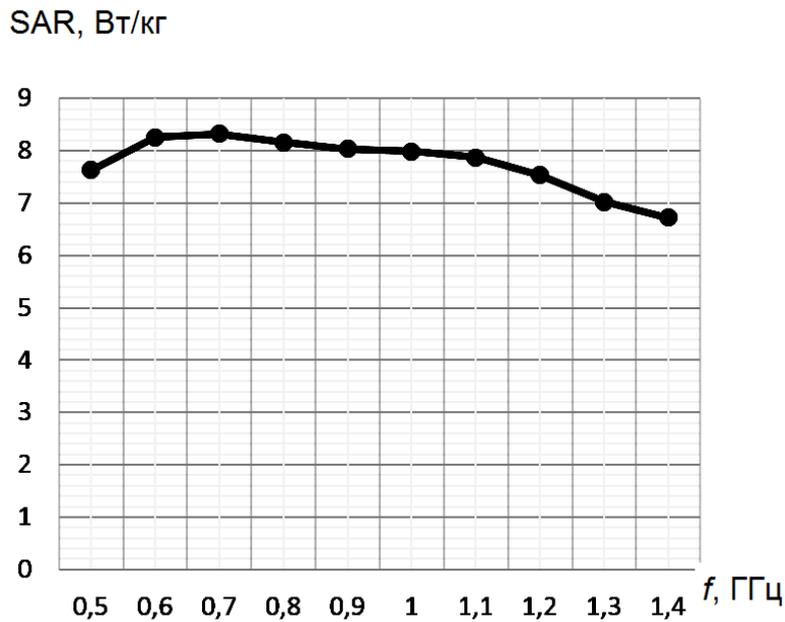


Рис. 4. Удельный коэффициент поглощения для всей капли как функция частоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен расчет и оптимизация установки для облучения биологических растворов импульсными электромагнитными полями. Электродинамическое моделирование процесса облучения показало, что даже в равномерном поле в малой капле распределение потерь по объему имеет заметную неравномерность. Рассчитанная установка может быть успешно применена для проведения экспериментов по облучению биологических растворов электромагнитными полями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Biological effects and exposure criteria for radio frequency electromagnetic fields / National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) report #86. Ed. A.W. Guy. – Bethesda: NCRP 1995. – 385 p.
2. Vorst A. vonder, Rosen A., Kotsuka Y. RF / Microwave Interaction with Biological Tissues. – Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006.– 330 p.
3. Preece A.W. Safety Aspects of Radio Frequency Effects in Humans from Communication Devices / In Handbook of Antennas in Wireless Communications. Ed. Lal Chand Godara. – New York: CRC Press, 2002. – 888 p.
4. Shckorbatov Y.G., Shakhbazov V.G., Grigoryeva N.N., Grabina V.A. Microwave irradiation influences on the state of human cell nuclei // Bioelectromagnetics. – 1998, 19(7). – P. 414-419.
5. Huss J. The potential dangers of electromagnetic fields and their effect on the environment // Report of Committee on the Environment, Agriculture and Local and Regional Affairs. Parliamentary Assembly of Council of Europe, 6 May 2011. P. 1 – 12.
6. Tice R.R., Hook G.G., Donner M., McRee D.I., Guy A.W. Genotoxicity of radiofrequency signals. I. Investigation of DNA damage and micronuclei induction in cultured human blood cells // Bioelectromagnetics. – 2002. –V.23. – N2. – P.113-126.
7. Salford L. G., Brun A. K, Eberhardt J. L. et al. Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones //Environ. Health Perspect. 2003. Vol. 111, P. 881-883.
8. Kheifets L., Repacholi M, Saunders R. The Sensitivity of Children to Electromagnetic fields //Pediatrics. 2005. Vol. 116. P. 303-313.
9. Shckorbatov Y, G. He-Ne laser light induced changes in the state of chromatin in human cells // Naturwissenschaften. 1999. Vol. 86. N 9. P. 452-453.
10. Yao K., Wang K. J., Sun Z. H. et al. Low power microwave radiation inhibits the proliferation of rabbit lens epithelial cells by upregulating P27Kipl expression // Mol. Vis. 2004. Vol. 10. P. 138-143.
11. Hook G. J., Zhang P., Lagroyel. Measurement of DNA damage and apoptosis in Molt- 4 cells after in vitro exposure to radiofrequency radiation //Rad. Res. 2004. Vol. 161. P. 193-200.
12. Kheifets L., Repacholi M, Saunders R. The Sensitivity of Children to Electromagnetic fields //Pediatrics. 2005. Vol. 116. P. 303-313.
13. Garaj-Vrhovac V., FucicA., Horvat D. The correlation between the frequency of micronuclei and specific chromosome aberrations in human lymphocytes exposed to micro waves //Mutat. Res. 1992. Vol. 281. P. 181-186.
14. Garaj-Vrhovac V., Horvat D., Karen Z. Effect of microwave radiation on the cell genome // Mutat. Res., Mutat. Res. Lett. 1990. Vol. 243. N 2. P. 87-93.
15. Vijayalaxmi, Bisht K. S., Pickard W. F. et al. Chromosome damage and micronucleus formation in human blood lymphocytes exposed in vitro to radiofrequency radiation at a cellular telephone frequency (847.74 MHz, CDMA) //Rad. Res. 2001. Vol. 156. P. 430-432.
16. Shckorbatov Y. G., Pasiuga V. N, Kolchigin N. N. et al. The influence of differently polarized microwave radiation on chromatin in human cells // Int. J. Rad. Biol. 2009.Vol. 85. N4. P. 322-329.
17. Сердюк А. М. Взаимодействие организма с электромагнитными полями как факторами окружающей среды /А. М. Сердюк - К.: Наукова думка, 1977. - 228 с.
18. Lacy-Hulbert A., Metcalfe J. C., Hesketh R. Biological responses to electromagnetic fields / A. Lacy-Hulbert J. C. Metcalfe, R. Hesketh // The FASEB Journal. - 1998. -No 12. - P.395-420.
19. Repacholi M. H. Radiofrequency field exposure and cancer: What do the laboratory studies suggest? / M. H. Repacholi // Env. Health Res. Persp. - 1997. - V.105, Suppl. 6.-P.1565-1568.
20. Szmigielski S. Cancer morbidity in subjects occupationally exposed to high frequency (radio-frequency and microwave) electromagnetic radiation / S. Szmigielski // Sci. Total Environ. - 1996. - V. 180. - P. 9-17.
21. Залюбовская Н. П. Влияние электромагнитных волн миллиметрового диапазона на клетки культуры ткани / Н. П. Залюбовская, Р. И. Киселев. Е. Ф. Тесленко-Пономаренко // Экспериментальная и клиническая радиология. - 1973. - № 9. - С. 177-179.
22. Shckorbalov Y. G. Changes in the human nuclear ciromatin induced by ultra wideband pulse irradiation /Y. G. Shckorbatov, V. N. Pasiuga, N. N. Kolchigin and others// Central European Journal of Biology. - 2009. - V.4,№1.-P. 97-106.
23. Shckorbatov Y. G. The influence of differently polarized microwave radiation on chromatin in human cells /Y. G. Shckorbalov. V. N. Pasiuga, N. N. Kolchigin and others // International Journal of Radiation Biology. - 2009. - V.85, No 4. - P. 322-329.
24. Шкорбатов Ю. Г. О роли изменений состояния хроматина и биоэлектрических свойств ядер в реакции клеток на внешние воздействия / Ю. Г. Шкорбатов, В. Г. Шахбазов, А. О. Руденко, М. Болхассани // Труды по фундаментальной и прикладной генетике. - Х.:Штрих, 2001. - С.128-139
25. Шкорбатов Ю. Г. Состояние хроматина как индикатор экологической безопасности /Ю. Г. Шкорбатов, А. Л. Савенкова // Актуальные вопросы теоретической и прикладной биофизики, физики и химии -2009: материалы V Международной научно-технической конференции - Севастополь, 2009. -С.222-224.