

Influența radiației electromagnetice asupra proceselor biomoleculare

Nellu CIOBANU¹, Natalia GUBCEAC^{1,2}, Ion GRABOVSKI¹, Vasile TRONCIU³

¹Universitatea de Stat de Medicină și Farmacie "Nicolae Testemițanu", Chișinău, Moldova

²Universitatea „Vasile Alecsandri”, Bacău, Romania

³Universitatea Tehnică a Moldovei, Chisinau, Moldova

cnellu@gmail.com

Abstract — În această lucrare este descris un model teoretic al interacțiunii radiației electromagnetice din diapazonul milimetric și terahertz cu un mediu biologic. În calitate de mediu a fost considerat un sistem de celule (moleculare). Scopul principal al prezentului articol este cercetarea mecanismului de formare a fononilor optici și interacțiunea acestora cu câmpul generat de sistemul de celule. Utilizându-se sistemul de ecuații ce descrie dinamica neliniară la interacțiunea undelor milimetrice și terahertz cu fononii generați de sistemul de molecule, se cercetează evoluția în timp a numărului mediu de fononi din condensat, portretele de fază precum și spectrul de emisie pentru diverse valori ale abaterii de la rezonanță, a frecvenței fononilor precum și a parametrilor feedback-ului optic. Sunt analizate posibilitățile de apariție ale oscilațiilor periodice, ale celor haotice, precum și bifurcațiile în planul diferitor parametri. Pentru anumite valori ale parametrului de bifurcație în sistemul de molecule pot apărea bifurcații Hopf cu dublare de perioadă.

Cuvintele cheie — unde milimetrice și terahertz, mediu biologic, haos, portret de fază.

I. INTRODUCERE

Influența câmpurilor electromagnetice asupra materiei vii reprezintă una dintre cele mai actuale probleme ale biomedicinii moderne. În ultimii ani s-a constatat că aplicarea practică a undelor electromagnetice din diapazonul MM și THZ reprezintă un interes deosebit [1-4]. După cum s-a demonstrat experimental în spectrul undelor MM există câteva frecvențe bine determinate (42.7 GHz, 53.5 GHz și 60.7 GHz), care la o valoare mică a intensității acestora intră în rezonanță cu câmpurile electromagnetice generate de diverse organisme vii. În urma acestor interacțiuni pot avea loc schimbări majore în starea funcțională a sistemelor de celule sau chiar la nivelul întregului organism. Radiațiile respective sunt considerate atermice [5], având intensitate joasă (fluxul de putere <10 mW/cm²). Cu toate că au fost realizat un număr enorm de experimente ce confirmă efectul terapeutic benefic al undelor MM asupra organismelor vii [6-9], explicația teoretică completă și mecanismul unic de interacțiune ale acestora lipsește. Există mai multe teorii care explică influența undelor electromagnetice de frecvență înaltă asupra biomacromolecularelor, prima fiind a lui Frohlich [10], conform căreia celulele vii sunt capabile să genereze unde MM. Alte studii au arătat că în general, producerea undelor coerente de către celulele vii, reprezintă un proces sistemic cu implicarea membranelor celulare, a canalelor proteice, precum și a pompelor celulare de transport activ. Radiația electromagnetică de intensitate joasă contribuie la accelerarea transportului activ al ionilor de sodiu, ceea ce conduce la modificarea permeabilității membranelor eritrocitare pentru ionii de potasiu [11]. De asemenea a fost observată o accelerare a mecanismului de oxidare a acizilor din componența lipozomilor, care participă la creșterea conductivității ionice în membrana celulară [12, 13]. O

teorie aparte o constituie mecanismul disipării energiei undelor MM în mediul biologic neomogen [14]. Această disipare conduce la apariția fononilor, care joacă un rol important în activitatea celulelor, iar iradierea cu unde MM sau THZ—la modificarea activității metabolice ale acestora. Efectele acțiunii undelor MM și THZ în procesul de absorbție și generare ale acestora de către biomoleculare au ca efect stimularea creșterii acestora, proces similar cu fotosinteza sau cu dirijarea procesului în urma fotoreacțiilor chimice. Drept urmare, un interes major îl prezintă cercetarea acestor procese ce au loc în sistemele biologice cu implicarea radiațiilor MM și THZ.

II. MODELUL TEORETIC

Sistemele biologice sunt caracterizate de un spectru energetic polarizat cu frecvența cuprinsă în diapazonul 10¹¹ ... 10¹² Hz (vezi Fig. 1). În procesele metabolice, celulele se pot afla în stări excitate și ca urmare a fluctuațiilor locale ce decurg în mediul biologic, acestea pot primi energie. Datorită interacțiunilor de tip coulomb dintre dipolii colectivi ai celulei, energia asimilată de fiecare dipol este transmisă dipolilor vecini.

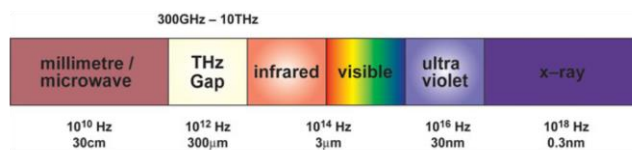


Fig. 1. Reprezentarea schematică a spectrului electromagnetic din domeniul undelor MM și THZ

Interacțiunile și conexiunile neliniare care decurg datorită fluctuațiilor polarizabile pot conduce sistemul de molecule către o stare metastabilă cu energie mare. Așa tip de

transformare este numit pompaj biologic. În urma expunerii sistemului biologic la o sursă de energie externă de fluctuații electromagnetice din domeniul undelor milimetrice (sau terahertz), starea metastabilă se transformă și devine starea de bază, proporțională cu puterea de excitare a unui singur tip de fluctuații dipolare. Drept urmare se crează un dipol colectiv gigant corespunzător stării coerente a sistemului biologic ce se caracterizează prin aceeași direcție a vectorului de undă.

Se presupune că astfel de fluctuații acoperă anumite regiuni ale membranelor biologice sau porțiuni semnificative ale bio-macromoleculor. Aceasta poate fi echivalent cu formarea condensatului Bose-Einstein în sistemele condensate. Conform ipotezei lui Fröhlich excitarea coerentă în celulele vii poate conduce la rândul său la consecințe biologice semnificative cum ar fi: modificări conformaționale, atracția selectivă a moleculelor și dezvăluirea porțiunilor complexe de ADN. Drept urmare, acțiunea asupra sistemului biologic cu unde electromagnetice de aceeași frecvență poate conduce la amplificarea activității biologice a moleculelor.

Modelul cercetat în acest articol este reprezentat în Figura 2 și constă dintr-un generator de unde milimetrice cu ajutorul căruia are loc iradierea mediului biologic. Iradierea sistemului de celule este caracterizată de așa numitul parametru de pompaj P . Câmpul electromagnetic emis de către sistemul de celule este utilizat pentru amplificarea și iradierea ulterioară a sistemului cu ajutorul unui feedback optic, τ fiind timpul de propagare a fotonilor emiși prin amplificator.

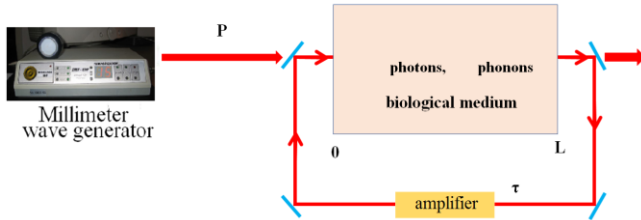


Fig.2. Schema de iradiere a mediului biologic cu unde MM sau THZ

Dinamica sistemului de molecule (celule) la iradierea acestora cu unde electromagnetice MM și THZ poate fi descrisă de următorul sistem de ecuații diferențiale [15]:

$$\frac{dY_1}{dT} = -\sigma Y_1 - (\tilde{\delta} - \tilde{\omega}_0) Y_2 + 2\alpha \tilde{\gamma} Y_3 + \alpha \left\{ 2\tilde{\gamma} [\delta - \nu(Y_3^2 + Y_4^2)] - 1 \right\} Y_4 + \Gamma [\cos(\varphi) Y_1(t - \tau) + \sin(\varphi) Y_2(t - \tau)] + P, \quad (1)$$

$$\frac{dY_2}{dT} = (\tilde{\delta} - \tilde{\omega}_0) Y_1 - \sigma Y_2 + 2\alpha \tilde{\gamma} Y_4 - \alpha \left\{ 2\tilde{\gamma} [\delta - \nu(Y_3^2 + Y_4^2)] - 1 \right\} Y_3 + \Gamma [\cos(\varphi) Y_2(t - \tau) - \sin(\varphi) Y_1(t - \tau)], \quad (2)$$

$$\frac{dY_3}{dT} = -\alpha Y_2 - Y_3 - [\delta - \nu(Y_3^2 + Y_4^2)] Y_4, \quad (3)$$

$$\frac{dY_4}{dT} = \alpha Y_1 + [\delta - \nu(Y_3^2 + Y_4^2)] Y_3 - Y_4. \quad (4)$$

unde $Y_1^2 + Y_2^2 = I$ reprezintă intensitatea fotonilor Fröhlich emiși, iar $Y_3^2 + Y_4^2 = n$ concentrația fononilor generați de sistemul biologic.

În sistemul de ecuații (1)-(4) au fost utilizate următoarele mărimi adimensionale:

$$\delta = \frac{\Delta}{\gamma}, \quad \tilde{\delta} = \frac{\omega^2 - c^2 k^2}{2\omega\gamma}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{\omega\Omega_0}{2\gamma^2}}, \quad \Omega_0 = \frac{4\pi d^2}{V_0 h},$$

$$\tilde{\omega}_0 = \frac{\Omega_0}{\gamma}, \quad \tilde{\gamma} = \frac{\gamma}{\omega}, \quad \sigma = \frac{\gamma_f}{\gamma}, \quad T = \gamma t,$$

unde ω este frecvența undelor electromagnetice, iar Ω energia fononilor. $\Delta = \omega - \Omega$ reprezintă abaterea de la rezonanță, γ coeficientul de atenuare a fononilor, γ_f este coeficientul de atenuare a câmpului electromagnetic exterior, d - momentul dipolului electric, k - vectorul de undă, c - viteza luminii în vid, iar V_0 este volumul celulelor. Γ și φ sunt amplitudinea și, respectiv, faza feedback-ului optic.

În sistemul de ecuații diferențiale neliniare (1) – (4) s-a ținut cont de termenii $\gamma_f \tilde{E} + \tilde{E}_o$, care au fost introduși fenomenologic și caracterizează atenuarea câmpului milimetric generat în sistemul de celule precum și câmpul electromagnetic exterior. Așadar sistemul de ecuații (1) – (4) descrie pe deplin evoluția concentrației fononilor condensati de tip Bose și a câmpului electromagnetic milimetric generat de sistemul de molecule (celule) reprezentat în Figura 2. Aceste ecuații stau la baza explicării posibilității apariției diferitor structuri temporale în sistemul fononilor dipol-activi din condensatul Bose și a fotonilor interni Fröhlich ca urmare a excitării sistemului de molecule cu ajutorul unei surse exterioare de pompaj coerent. Sistemul de molecule considerat admite pierderi ale fotonilor emiși, care pot fi utilizați la reexcitarea ulterioară a mediului.

III. REZULTATE NUMERICE

În continuare vom cerceta evoluția în timp a sistemului de ecuații (1) – (4) pentru diferite valori ale parametrilor sistemului. Calculele numerice au fost realizate cu ajutorul unui program scris în Matlab unde au fost fixați următorii parametri adimensionali: $\tilde{\omega}_0 = 0.1$, $\sigma = 10$, $\nu = 1$, $\tilde{\gamma} = 1.1$, $\tau = 0.1$.

Figura 3 descrie evoluția în timp a puterii fotonilor emiși, portretul de fază și spectrul de putere în absența feedback-ului optic, $\Gamma = 0$. Observăm ca dependența de timp a puterii fotonilor emiși este periodică, iar traiectoria de fază tinde către un ciclu limită stabil. După cum se poate observa, maximum spectrului de putere corespunde frecvenței 180 GHz.

Influența feedback-ului optic asupra evoluției dinamicii neliniare a fotonilor emiși precum și portretele de fază sunt reprezentate în Figura 4. Pentru $\Gamma = 5$ și $\varphi = \pi/4$ traiectoriile de fază tind către un ciclu limită stabil cu dublare de perioadă și frecvență de emisie (vezi Fig. 4a). Astfel, se poate observa o amplificare a spectrului de emisie ce decurge la frecvențele de 120 GHz și de 225 GHz. Figura 4b) descrie influența parametrului δ (abaterii de la

rezonanță) și a fazei feedback-ului optic asupra evoluției sistemului de fononi și fotoni. Pentru $\delta = 33$ și $\varphi = 3\pi/2$ pot fi observate bifurcații în dinamica numărului mediu de fotoni.

Pentru valori mari ale feedback-ului optic ($\Gamma = 30$) în sistem pot apărea oscilații haotice, iar traiectoriile de fază descriu un comportament destul de complex (vezi Fig. 4c).

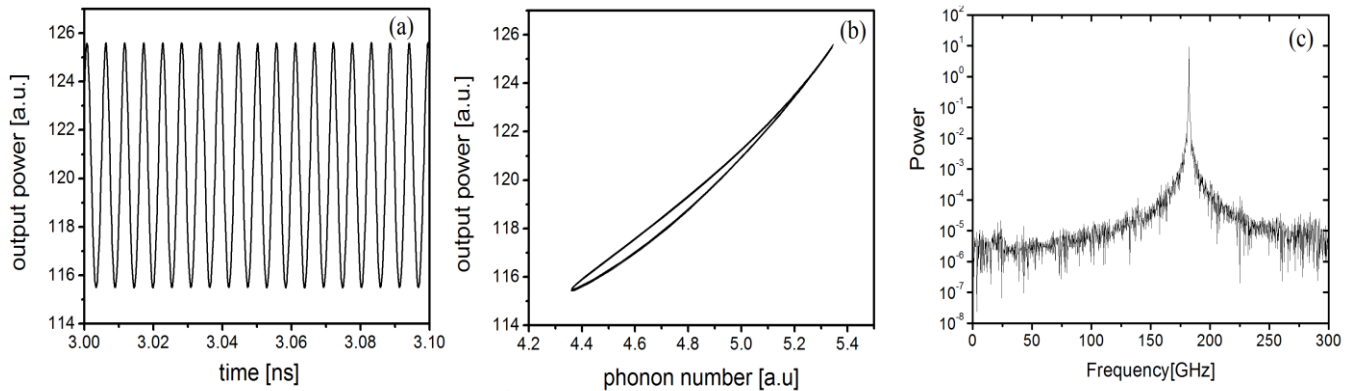


Fig.3. Dependența de timp a puterii fotonilor emiși (stânga), portretul de fază (centru) și spectrul de putere (dreapta) pentru următoarele valori: $P = 85$, $\alpha = 25$, $\delta = -5$, $\tilde{\delta} = 0.1$, $\Gamma = 0$, $\varphi = 0$.

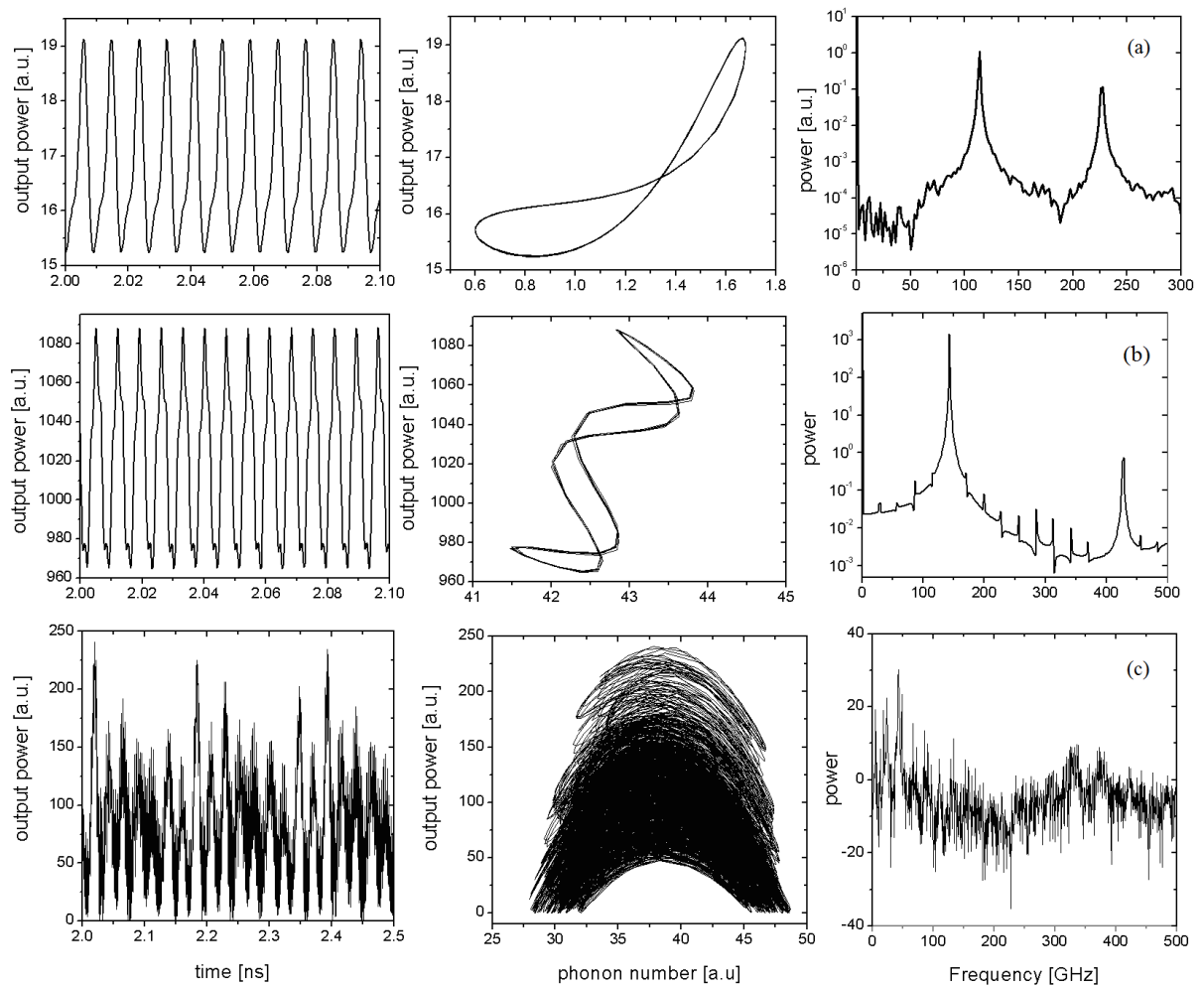


Fig.4. Dependența de timp a puterii fotonilor emiși (stânga), portretul de fază (centru) și spectrul de putere (dreapta) pentru următoarele valori ale parametrilor: a) $P = 85$, $\alpha = 20$, $\delta = -5$, $\tilde{\delta} = 0.1$, $\Gamma = 5$, $\varphi = \pi/4$, b) $P = 95$, $\alpha = 20.3$, $\delta = 33$, $\tilde{\delta} = 1.1$, $\Gamma = 5$, $\varphi = 3\pi/2$, c) $P = 75$, $\alpha = 15.3$, $\delta = 38$, $\tilde{\delta} = 0.1$, $\Gamma = 30$, $\varphi = \pi/4$.

În Figura 5 este redată diagrama bifurcațiilor pentru cazul când intensitatea feedback-ului optic este parametru ce variază. Diagrama descrie dependența puterii numărului mediu maxim și minim de fotoni emiși în funcție de Γ . Pentru valori mici ale feedback-ului optic ($\Gamma=4\div 12$) se poate observa un regim de oscilații continue, dar cu creșterea acestuia în sistem apar bifurcații Hopf cu dublare de perioadă. Pentru valori mari ale parametrului de bifurcație $\Gamma > 22$, dinamica sistemului de molecule are un comportament haotic.

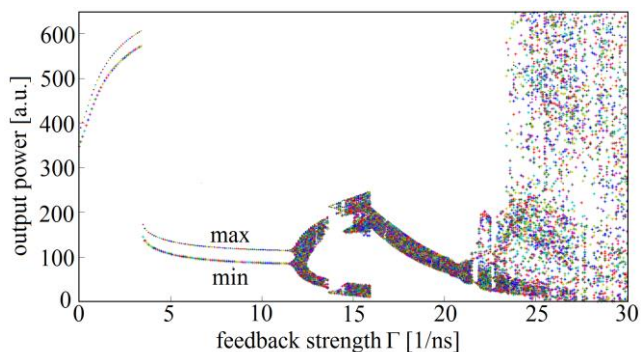


Fig.5. Diagrama bifurcațiilor puterii fotonilor emiși în funcție de parametrul de bifurcație Γ pentru următoarele valori ale parametrilor: $P = 85$, $\alpha = 25$, $\delta = 5$, $\tilde{\delta} = 0.1$, $\varphi = \pi/4$.

IV. CONCLUZII

În aceasta lucrare este descris un model teoretic în care se studiază dinamica generării undelor electromagnetice în sistemele vii, care este echivalentă cu formarea condensatului Bose-Einstein în materia condensată. Dinamica neliniară a interacțiunii undelor milimetrice și terahertz cu fononii generați de sistemul de molecule a fost cercetată pentru diferite valori ale amplitudinii și fazei feedback-ului optic, ale abaterilor de la rezonanță, ale numărului mediu de fotoni, ale pompajului exterior, ale parametrului de atenuare a fononilor emiși.

După cum a fost observat, în absența feedback-ului optic, evoluția în timp a puterii fotonilor emiși este periodică, iar traiectoriile de fază tind către un ciclu limită stabil. La introducerea feedback-ului optic în sistem apar bifurcații cu dublarea perioadei de oscilație, iar pentru valori mari ale acestuia apar regimuri haotice.

A fost obținută diagrama bifurcațiilor puterii fotonilor emiși în funcție de parametrul de bifurcație Γ . Astfel, în sistemul de molecule pot apărea oscilații periodice, haotice la fel și bifurcații de tip Hopf cu dublare de perioadă.

MULTUMIRI

Acest articol a fost realizat cu ajutorul suportului financiar acordat în cadrul proiectului tineri cercetători 16.80012.02.27F. Autorii mulțumesc dl Dr. S. Rusu pentru discuții asupra lucrării.

BIBLIOGRAFIE

[1] A. G. Davies, E. H. Linfield, M. B. Johnston, "The development of terahertz sources and their

applications", *Phys. Med. Biol.*, 47, pp. 3679–3689, 2002.

[2] I. A. Titushkin, V. S. Rao, W. F. Pickard et al., "Altered calcium dynamics mediates P19-derived neuron-like cell responses to millimeter-wave radiation", *Rad. Res.* 172, pp. 725-736, 2009.

[3] A. Ramundo-Orlando, "Effects of Millimeter Waves Radiation on Cell Membrane - A Brief Review", *J. Infrared Milli. Terahz Waves* 31, pp. 1400-1411, 2010.

[4] T. Globus, M. Bykhovskaia, D. Woolard et al., "Sub-millimetre wave absorption spectra of artificial RNA molecules", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36, pp.1314–1322, 2003.

[5] S. Hadjiloucas, M.S. Chahal and J.W. Bowen, "Preliminary results on the non-thermal effects of 200–350 GHz radiation on the growth rate of *S. cerevisiae* cells in microcolonies", *Phys. Med. Biol.* 47, pp. 3831–3841, 2002.

[6] D. R. Black, L. N. Heynick, "Radiofrequency (RF) Effects on Blood Cells, Cardiac, Endocrine and Immunological Functions", *Bioelectromagnetics Supplement* 6, pp. 187-195, 2003.

[7] M. Markovic, L. Manderson, N. Wray et al., "Complementary medicine use by Australian women with gynaecological cancer", *Psycho-Oncology* 15, pp. 209-220, 2006.

[8] X. H. Li, J.T. Tang, Y. P. Liao et al., "Millimeter wave in the treatment of acute radiation-induced cervical skin ulcers", *J. Clin. Rehab. Tissue Eng. Res.* 12, pp. 663-666, 2008.

[9] M. K. Logani, I. Szabo, V. Makar et al. "Effect of millimeter wave irradiation on tumor metastasis", *Bioelectromagnetics Supplement* 27, pp. 258-264, 2006.

[10] H. Fröhlich, "Bose condensation of strongly excited longitudinal electric modes", *Phys. Lett. A* 26, pp. 402-403, 1968.

[11] V.I. Geletyuk, V.N. Kazachenko, N.K. Chemeris, E.E. Fesenko, "Dual effects of microwaves on single Ca²⁺-activated K⁺ channels in cultured kidney cells Vero", *FEBS Letters* 359, pp. 85-88, 1995.

[12] M. Zhadobov, R. Saileau, V. Viè et al., "Interactions between 60-GHz millimeter waves and artificial biological membranes: dependence on radiation parameters", *IEEE Tras. MW Theory and Tec.* 54, pp. 2534-2542, 2006.

[13] M. Zhadobov, C. N. Nicolaz, R. Sauleau et al., "Evaluation of the Potential Biological Effects of the 60-GHz Millimeter Waves Upon Human Cells", *IEEE Tans. on Antennas and Propagation* 57, pp. 2949-2956, 2009.

[14] H. Bolterauer, J. A. Tuszyński, and M. V. Sataric, "Fröhlich and Davydov regimes in the dynamics of dipolar oscillations of biological membranes", *Phys. Rev. A* 44, pp. 1366, 1991.

[15] N. Ciobanu, S. Rusu, V. Z. Tronciu, "Dynamical behavior of Bose-condensed dipole-active phonons and internal Fröhlich photons in biological media", *Procc. Of The 5th IEEE International Conference on E-Health and Bioengineering - EHB 2015*, pp. 978, 2015.