ISSN 1512-1232

უაკ. 621.395:654:15
UDC. 621.395:654:15

ელექტრომაგნიტური ველის ნაკადის სიმკვრივის კვლევა მობილური ტელეკომუნიკაციის რადიოსიხშირულ დიაპაზონში

ლომსაძე სიმონი[1] , შამანაძე ომარი[2]

[1]აკადემიური დოქტორი, ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, კოსტავას 77

[2]ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი, სრული პროფესორი, ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, კოსტავას 77

ანოტაცია

სტატიაში განხილულია მობილური ოპერატორების რადიო დაშვების ქსელში ჩატარებული სიგნალის გაზომვების შედეგები, რომლის გამოსხივებაც ხდება შესაბამისი ტექნოლოგიებისათვის გამოყოფილი რადიოსიხშირული დიაპაზონის სპექტრში. რაც საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ საბაზო სადგურის ანტენების მიერ გამოსხივებული ელექტრომაგნიტური ველის ნაკადის სიმკვრივე და შევაფასოთ ადამიანზე ზემოქმედების ზღვრულად დასაშვები დონეები, რომელიც უნდა შეესაბამებოდეს როგორც საერთაშორისო IEEE, ასევე სახელმწიფოს კანონებისა და ნორმატიული აქტებით განსაზღვრულ დადგენილებებს.

საკვანძო სიტყვები: *ელექტრომაგნიტური ეკოლოგია, უსაფრთხოება, ფიჭური ტელეკომუნიკაცია*

ელექტრომაგნიტური ველი ბუნებრივი მოვლენაა, რომელიც მატერიის ერთგვარ ფორმად მიიჩნევა, რომლის წყაროსაც წარმოადგენს დედამიწის ელექტრული და მაგნიტური ველები, ატმოსფეროს ელექტრული მოვლენები, ასევე მზისა და გალაქტიკების გამოსხივება. ბუნებრივი სახით ე.მ.ვ-ის (**ე**ლექტრო **მ**აგნიტური **ვ**ელი) არსებობა ერთგვარ დამცავ საშუალებას წარმოადგენს ჩვენი პლანეტისათვის, თუმცა ცივილიზაციის განვითარება, საყოფაცხოვრებო და საწარმოო ტექნოლოგიური პროგრესი, ხელს უწყობს ე.მ.ვ-ის ფონის მუდმივ ზრდას ჩვენს გარემოში, რაც პირველ რიგში განპირობებულია სამომხმარებლო ელექტრული ტექნიკის, მაღალი ძაბვის გადამცემი ხაზების, ტელე/რადიო, სატელეკომუნიკაციო, კოსმოსური და თანამგზავრული კავშირის სადგურების მიერ დაგენერირებული სიგნალებით.

როდესაც სივრცის მოცემულ წერტილში ე.მ.ვ-ის ნაკადის სიმკვრივე დასაშვებ ზღვარს აღემატება ადგილი აქვს გარემოს ეკოლოგიურ დაბინძურებას, რაზედაც პირდაპირ გავლენას ახდენს საწარმოო ტექნიკის გამოსხივება (ელექტრომომარაგების სადენები და კომპიუტერული ტექნიკა) სიხშირით 50 - 400-ჰც და გამოსხივება რადიოსიხშირული სპექტრის დიაპაზონში - 0.03-მგ/ჰც დან 300-გ/ჰც-დე. რაც იმის მანიშნებელია, რომ იცვლება გარემოს ფიზიკური პარამეტრები და მაგნიტური ველის ანტროპოგენული წყაროს გამოსხივება მნიშვნელოვნად აჭარბებს კრიტიკულად დასაშვებ ზღვარს.

ISSN 1512-1232

აღნიშნული წყაროების მიერ გასხივებული ე.მ.ვ-ის ზღვრულად დასაშვები ფონი და უსაფრთხოების საკითხები აქტუალურია და მას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება, როგორც ქვეყნის შიგნით ასევე საერთაშორისო დონეზე [1, 2, 3, 4]. ჩვენი კვლევის მიზანს წარმოადგენს ე.მ.ვ-ის ფონის შესწავლა, რომლის ძირითად წყაროსაც წარმოადგენს, რადიოსიხშირულ სპექტრში მომუშავე მობილური ქსელის რადიოგადამცემი მოწყობილობები, გარემოს ელექტრომაგნიტური ველის ხარისხობრივი მდგომარეობის ნორმების დაცვის მიზნით. აღნიშნული საკითხი აქტუალობას იძენს ელექტრული ენერგიის პირველადი გამოყენების პერიოდიდან და დიდი მნიშვნელობა შეიძინა გასული საუკუნის მეორე ნახევარში, ხოლო დღეისათვის უკვე განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა, რომლის გადაჭრაც მოითხოვს საკითხისადმი კომპლექსურ დამოკიდებულებას [5, 6, 7].

აღნიშნული პრობლემის გადასაწყვეტად დღეისათვის გამოიყენება მიდგომა, რომელიც ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ფონის შესამცირებლადაა მიმართული და გულისხმობს შესაბამისი ელექტრომაგნიტური სანიტარული ნორმების დაცვას, რომელსაც თითოეული სახელმწიფო ადგენს ინდივიდუალურად. რადიოგამოსხივების შემცირება შესაძლებელია მიღწეული იქნას როგორც პოტენციური ტექნიკურ სააპარატო საშუალებების ტექნიკური პარამეტრების დახვეწით, ასევე მათი ექსპლუატაციის მკაცრი მონიტორინგის გზით.

ჩვენი კვლევის ამოცანას წარმოადგენს მობილური ოპერატორების სატელეკომუნიკაციო კომპანიის რადიო დაშვების ქსელში ჩატარებული სიგნალის გაზომვების შედეგები, რომლის გამოსხივებაც ხდება შესაბამისი ტექნოლოგიებისათვის გამოყოფილი რადიოსიხშირული დიაპაზონის სპექტრში. რაც საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ საბაზო სადგურის ანტენების მიერ გამოსხივებული ელექტრომაგნიტური ველის ნაკადის სიმკვრივე და შევაფასოთ ადამიანზე ზემოქმედების ზღვრულად დასაშვები დონეები, რომელიც უნდა შეესაბამებოდეს როგორც საერთაშორისო IEEE - (Institute of Electrical and Electronics Engineers) ორგანიზაციის შესაბამისი დოკუმენტებით

განსაზღვრულ რეკომენდაციებს [8], ასევე სახელმწიფოს კანონებისა და ნორმატიული აქტებით განსაზღვრულ დადგენილებებს [9].

ცხრილი - 1

Name	ARFCN	Uplink(MHz)	Downlink(MHz)
GSM 900 MHz	1 - 58	890.2 - 901.6	935.2 - 946.6
GSM 900/U900	1 - 32	890.2 - 896.4	935.2 - 941.4
UMTS 900 MHz	34 - 58	896.7 - 901.7	941.7 - 946.7
DCS 1800 MHz	612 -661	1730.2 - 1740.2	1825.2 - 1835.2

Name	Band	Uarfcn DL	Downlink (MHz)	Uarfcn UL	Uplink (MHz)
UMTS 900MHz	8	3021	941.7-946.7	2796	896.7-901.7
UMTS 2100MHz	1	10712	2139.9-2144.9	9762	1949.9-1954.9
	1	10737	2144.9-2149.9	9787	1954.9-1959.9
	1	10762	2149.9-2154.9	9812	1959.9-1964.9

Name	ARFCN	Band	MODE	Earfcn DL	Downlink (MHz)	Earfcn UL	Uplink (MHz)
LTE 1800MHz	512 - 611	3	FDD	1300	1805-1825	19300	1710-1730
LTE 800 MHz		20	FDD	6225	796-801	24225	837-842
LTE 900 MHz		8	FDD	3642	941.7-946.7	21642	896.7-901.7

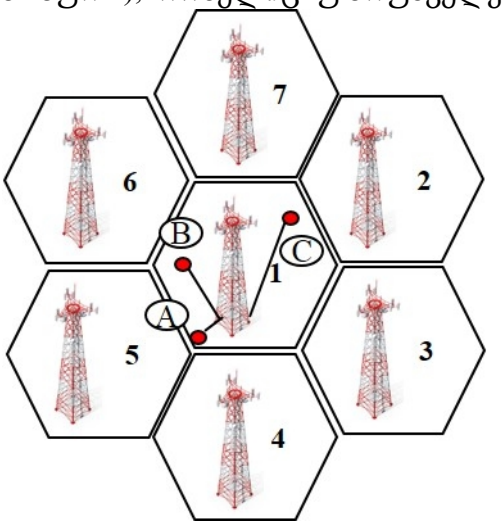
Name	ARFCN	Band	MODE	Earfcn	Earfcn Range
LTE2300 MHz		40	TDD	38750/38948	2300-2320/2320-2339.8

ამ მიზნით მიზანშეწონილად მიგვაჩნია ფიჭური სატელეკომუნიკაციო ოპერატორების რადიოსიხშირული სპექტრის, მობილური საბაზო სადგურების ექსპლოატაციის წესებისა და სანიტარული ნორმების მიმოხილვა. ფიჭური

ISSN 1512-1232

ტელეკომუნიკაციის ოპერატორები იყენებენ რადიოსიხშირულ სპექტრს რომელიც მოცემულია 1 ცხრილში. საბაზო სადგურის ანტენების განთავსება შესაძლებელია როგორც ანძებზე ასევე საცხოვრებელი სახლების სახურავებზე, მხოლოდ კანონის თანახმად მიღებული რეგულაციების შესაბამისად, რადგან სახელმწიფოს პოლიტიკა გარემოსა და ჯანმრთელობის დაცვის სფეროში, ასახავს აუცილებლობას, რომ სახელმწიფოს ეკონომიკური პოტენციალის ამაღლება არ უნდა განხორციელდეს გარემოზე უარყოფითი ზემოქმედების ხარჯზე და აუცილებელია გარემოს დაცვითი საკითხების გათვალისწინება ადამიანის ჯანმრთელობისა და ეკოლოგიური წონასწორობის შენარჩუნებისათვის. ითვალისწინებენ რა გარემოსა და ჯანმრთელობის მიმართულების კანონები აღნიშნულს, ე.მ.ვ-ის ნაკადის სიმკვრივის ზღვრულად დასაშვები დონე, ჩვენს მიერ ზემოთაღნიშნული რადიოსიხშირული დიაპაზონებისათვის განისაზღვრება 10 მკვტ/სმ^2-ზე სიდიდით.

ექსპერიმენტის ჩასატარებლად ჩვენს მიერ არჩეული იქნა მობილური ქსელის ფრაგმენტი (კლასტერი) (იხ. სურ-1), რომელიც უზრუნველყოფს მჭიდროდ



სურ.1 ექსპერიმენტის ჩასატარებლად არჩეული კლასტერი

განლაგებული, დასახლებული პუნქტის GSM, UMTS, LTE რადიოდაფარვას. როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ კვლევის მიზანს წარმოადგენს მობილურ სატელეკომუნიკაციო ქსელში მოპოვებული გაზომვითი ანათვლების საფუძველზე მიღებული სტატისტიკური მონაცემების შეფასება, რომელიც შესაძლებლობას გვაძლევს განვსაზღვროთ ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სიგნალის სიმძლავრე სივრცის მოცემულ წერტილში და დავადგინოთ ადამიანზე ზემოქმედების სიგნალის დონეები. ექსპერიმენტის მსვლელობის დროს, გაზომვების ჩატარების მთლიანი პერიოდის განმავლობაში, ქსელის არჩეული ფრაგმენტის ფარგლებში არ დაფიქსირებულა დატვირთვის მკვეთრი ცვალებადობა, არ განხორციელებულა საბაზო სადგურებზე სიმძლავრის ცვლილება და არაფერი შეცვლილა არც რადიოდაფარვის მიმართულებითაც.

მობილური ქსელის მომხმარებელთა რაოდენობა მუდმივად მზარდია, რასაც პირველ რიგში განაპირობებს ახალი ტექნოლოგიები (AI & IoT - Artificial Intelligence & Internet of Things) ამიტომ მობილური ქსელის ოპერატორები მუდმივად ცდილობენ გააფართოვონ საკუთარი ქსელის რადიოდაფარვა, რათა მომხმარებელი უზრუნველყოფილი იქნას შესაბამისი ტექნოლოგიების მომსახურების მაღალი

ISSN 1512-1232

ხარისხით. ამ მიზნით გამოიყენება სპეციალური დანიშნულების პროგრამული საშუალებები, რომელთა დამუშავება ხდება ოპერატორის მოთხოვნების შესაბამისად, პროგრამული საშუალებების და შესაბამისი აპარატურის მწარმოებლების მიერ ან უშუალოდ ოპერატორის ტექნიკური პერსონალის ძალისხმევით.

ტექნიკური სააპარატო და შესაბამისი პროგრამული უზრუნველყოფა საშუალებას იძლევა მოვახდინოთ ოპერატორის მობილურ ქსელში საბაზო სადგურის დაგეგმარება და რადიოდაფარვის პროგნოზირება დროის ნებისმიერ მომენტში. მაგალითად, მობილური ოპერატორების რადიო განყოფილებაში, ქსელის რადიო დაგეგმარებისა და შესაბამისი გაზომვების ჩასატარებლად გამოყენება ფრანგული მწარმოებლების – FORSK/INFOVISTA მიერ დამუშავებული პროგრამული საშუალებები ATOLL/TEMS Investigation & Discovery, რომლებიც შესაძლებლობას გვაძლევს განხორციელებული იქნას რადიო დაფარვის პროგნოზირება და სიგნალის სიმძლავრის შეფასება. შესაბამისად შესაძლებელია ელექტრომაგნიტური ველის ნაკადის სიმკვრივის გამოთვლა.

ქსელის ფრაგმენტზე დაკვირვება და გაზომვების ჩატარება განხორციელდა ერთი ფიჭის ფარგლებში შემთხვევითი შერჩევის მეთოდით – A, B და C წერტილებში, ასევე მთლიან კლასტერში, ე.წ. “Drive Test” მეთოდით, PCTEL სკანერის გამოყენებით, სადაც ელექტრომაგნიტური დაძაბულობის შექმნის თვალსაზრისით ძირითად როლს თამაშობს აღნიშნული და მის ირგვლივ შექმნილი აქტიური ფიჭები. ასევე მობილური აპარატები, რომლებიც აღნიშნულ კლასტერში მუშაობენ.

თუ დავუშვებთ, რომ თითოეული ფიჭის მუშაობის რადიუსი დაახლოებით 1 კმ-ია, რომლის ცენტრშიც განთავსებულია საბაზო სადგური – BTS, რომლის მაქსიმალური სიმძლავრეცაა 40ვტ და ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტია 15 dBi. MS - მობილური აპარატის მაქსიმალური სიმძლავრეს ჩავთვლით, რომ 2 ვტ-ია და გაძლიერების კოეფიციენტი 1 dBi, მაშინ A, B და C წერტილებში ელექტრომაგნიტური ველის სიმძლავრის სიმკვრივე, რომლებიც შემთხვევითი შერჩევის მეთოდითაა შერჩეული, ანტენის აზიმუტის მიმართულებით, საბაზო სადგურიდან 100, 300 და 500 მეტრის დაშორებით, მიწის ზედაპირიდან 1 მ-ის სიმაღლეზე, განისაზღვრება ფორმულით:

$$\prod_{MS} = \sum_{1}^{N} (P_{MSj}.G_{MSj})/(4.\pi.r_j^2); \qquad (1)$$

სადაც P_{MSj} - J აპარატის ანტენის გამოსხივების სიმძლავრეა, ხოლო G_{MSj} - J აპარატის ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტი. r - J აპარატის მანძილია, A, B და C წერტილებამდე. ხოლო nBS–ეს საბაზო სადგურის გამოსხივების სიმძლავრის სიმკვრივე იანგარიშება ფორმულით:

$$\prod_{BS} = \sum_{i=1}^{N} (P_{BSi}.G_{BSi})/(4.\pi.r_i^2); \qquad (2)$$

სადაც P_{BSi} i საბაზო სადგურის ანტენის გამოსხივების სიმძლავრეა. G_{BSi} i საბაზო სადგურის ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტია, ხოლო r - i საბაზო სადგურის მანძილია, A, B და C წერტილებამდე.

ელექტრომაგნიტური ველის თეორიიდან ცნობილია, რომ ანტროპოგენული წყაროდან მიღებული ემვ-ის ნაკადის სიმკვრივე გამოითვლება ვექტორულად, ამიტომ საჭიროა მათი გეომეტრიული შეკრება ჩვენს მიერ არჩეულ წერტილებში

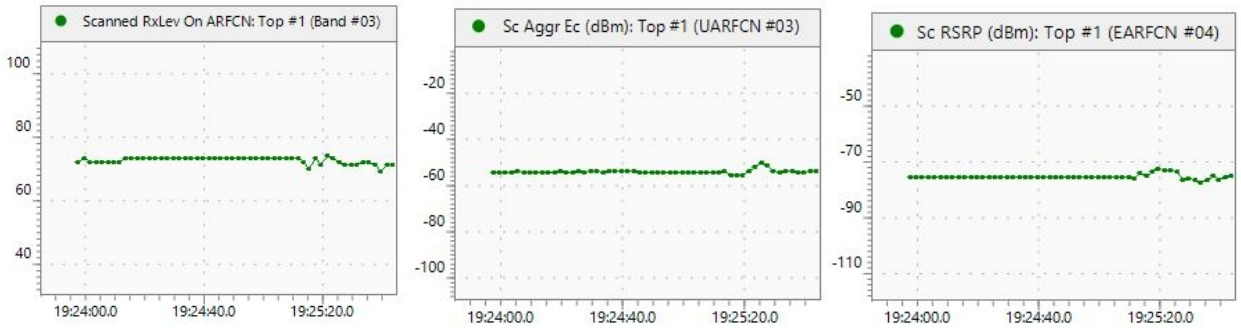
ISSN 1512-1232

და ვიპოვოთ მიღებული პოიტინგის ვექტორის მოდული. შედეგად ვღებულობთ შემდეგ გამოსახულებას:

$$\prod = \left\{ \sum_{j=1}^{N} (P_{MSj}.G_{MSj})/(4.\pi.r_j^2) + \sum_{i=1}^{N} (P_{BSi}.G_{BSi})/(4.\pi.r_i^2) \right\}^{1/2} \quad (3)$$

რომელიც ადასტურებს ჩვენს მიერ მიღებულ შედეგებს, რომლის მიხედვითაც გაზომვები, რომლებიც განხორციელდა PCTEL სკანერით, GSM-900 MHz, UMTS-2100 MHz და LTE-1800 MHz ტექნოლოგიების შესაბამისი რადიოსიხშირული დიაპაზონის ქსელის არჩეული ფრაგმენტისათვის მოცემულია გრაფიკზე #1. რომლიდანაც ჩანს, რომ სიგნალის სიმძლავრის საშუალო მნიშვნელობებია -71,2 დბმ, -60,9 დბმ და -74,9 დბმ. რომელიც შეესაბამება ელექტრომაგნიტური ველის სიმძლავრის სიმკვრივეს, სიდიდით 0,019-მკვ/მ^2 0,121- მკვ/მ^2, 0,015- მკვ/მ^2 [10].

გრაფიკი #1.



ექსპერიმენტის განსახორციელებლად ჩვენს მიერ გამოყენებული იქნა პროგრამული უზრუნველყოფა "ATOLL", რომელის დანიშნულებაა ენერგეტიკული, ლოგიკური და ფიზიკური პარამეტრების საფუძველზე რადიოდაფარვის პროგნოზირება. აღნიშნული პროგრამა საშუალებას გვაძლევს განვახორციელოთ მობილური ოპერატორის ქსელის რადიოსიხშირული დაგეგმარება, ოპტიმიზაცია და რადიოსიგნალის ხარისხის კონტროლი.

ასევე გამოყენებული იქნა კომპანია "INFOVISTA"-ს მიერ წარმოებული პროგრამული პროდუქტი "TEMS Investigation & Discovery", რომელიც საშუალებას იძლევა უზრუნველვყოთ რადიო სიგნალების გავრცელების მონიტორინგი და განვახორციელოთ სხვადასხვა სირთულის ამოცანების გადაწყვეტა: რადიომიერთების ქსელში გამოყენებული სიხშირეების დადგენა და შესაბამისი სიხშირის ხარისხის განსაზღვრა. პროგრამა საშუალებას გვაძლევს გავაანალიზოთ რადიო ქსელში გამოყენებული მოდულაციის ტიპი, მოვიპოვოთ მონაცემები საბაზო სადგურსა და მობილურ სადგურებს შორის დიალოგის შესახებ – L3 Messages, დავადგინოთ რადიოსიგნალის ხარისხი. გვაძლევს ცნობებს ისეთი პარამეტრების შესახებ, როგორებიცაა ანტენის მიერ გასხივებული სიგნალის დონე სივრცის კონკრეტულ წერტილში და ინფორმაციას წარმატებით/წარუმატებლად განხორციელებული ზარების შესახებ. იძლევა ქსელის რადიო ნაწილის ყველა შესაძლო მონაკვეთზე დაკვირვების განხორციელების საშუალებას, ინტერნეტ ტრაფიკის მონიტორინგისა და აბონენტებისათვის წარმოდგენილი მომსახურებებით სარგებლობის სტატისტიკური მონაცემების აღრიცხვის შესაძლებლობას, მათი

ISSN 1512-1232

შემდგომი დამუშავების მიზნით, რაც გულისხმობს შეგროვებული სტატისტიკური მონაცემების დამუშავებას და ანალიზს, რომლის საფუძველზედაც ხორციელდება რეკომენდაციების შემუშავება რადიოდაშვების ქსელში ხარისხის გაუმჯობესების მიზნით, ქსელის შემდგომი ოპტიმიზაციის განსახორციელებლად.

ჩატარებული ექსპერიმენტის საფუძველზე მივიღეთ შემდეგი შედეგები:

- ჩატარდა გაზომვები მობილური ტელეკომუნიკაციის ქსელში გამოყენებული რადიოსიხშირული დიაპაზონებისათვის, რომლებშიდაც ფუნქციონირებს დღეისათვის გამოყენებული ტექნოლოგიები - GSM, UMTS, LTE;
- განისაზღვრა გაზომვების საშუალო მნიშვნელობები თითოეული ტექნოლოგიისათვის, რომლის მიხედვითაც დადგინდა, რომ ემვ-ის სიმკვრივის საშუალო სიდიდეებია 0,019-მკვ/მ^2 0,121-მკვ/მ^2, 0,015-მკვ/მ^2;
- დადგენილი იქნა, რომ ელექტრომაგნიტური ველის სიმძლავრის სიმკვრივის საშუალო მნიშვნელობები არ აჭარბებს კანონით დადგენილ ნორმატიულ აქტებს, რომლის მნიშვნელობაც შესაბამისი კანონების მიხედვით არ უნდა აჭარბებდეს 10 მკვტ/სმ^2 –ზე.

მიუხედავად იმისა, რომ ჩვენს მიერ ჩატარებული ექსპერიმენტი ადასტურებს ფიჭური ტელეკომუნიკაციის უსაფრთხოებას, მიგვაჩნია, რომ აუცილებელია ჯამური გაზომვების ჩატარება, რომელიც საშუალებას გვაძლევს დავადგინოთ ელექტრომაგნიტური ველის ნაკადის ჯამური სიმკვრივე სივრცის მოცემულ წერტილში, რომელსაც ქმნის კონკურენტი ოპერატორების დამოუკიდებელი ანტროპოგენური წყაროები და რომლის გაზომვაც შესაძლებელია იზოტროპული გამზომი ხელსაწყოს მეშვეობით. თუმცა აღნიშნული წარმოადგენს ახალი კვლევის საშუალებას და ახალი ექსპერიმენტის ჩატარების საფუძველს.

ISSN 1512-1232

გამოყენებული ლიტერატურა

[1] IEEE C95.1-2019 - IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz, https://standards.ieee.org/standard/C95_1-2019.html ;

[2] საქართველოს კანონი "ჯანმრთელობის დაცვის შესახებ". თბილისი, 1997;

[3] საქართველოს კანონი "საზოგადოებრივი ჯანდაცვის შესახებ". 2007;

[4] სახელმწიფო სტანდარტი 12.1.006-84 "რადიოსიხშირის ელექტრომაგნიტური გამოსხივება, დასაშვები დონეები სამუშაო ადგილზე და მოთხოვნები კონტროლის განხორციელებისადმი", 1986;

[5] Arthur Firstenberg, "The Invisible Rainbow: A History of Electricity and Life", 2020;

[6] Nicolas Pineault, November 1, 2017 - "The Non-Tinfoil Guide to EMFs";

[7] Lloyd Burrell, "EMF Practical Guide", 2019;

[8] IEEE C95.1a-2010 - IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz Amendment 1: Specifies Ceiling Limits for Induced and Contact Current, Clarifies Distinctions between Localized Exposure and Spatial Peak Power Density, https://standards.ieee.org/standard/C95_1a-2010.html ;

[9] საქართველოს კანონქვემდებარე ნორმატიული აქტები. საქართველოს შრომის, ჯანმრთელობისა და სოციალური დაცვის მინისტრის 2001 წლის 16 აგვისტოს #297/ნ ბრძანება "გარემოს ხარისხობრივი მდგომარეობის ნორმების დამტკიცების შესახებ". "რადიოსიხშირის დიაპაზონის ელექტრომაგნიტური გამოსხივება". შანიტარული წესები და ნორმები. – "საქართველოს საკანონმდებლო მაცნე" #90. თბილისი, 24.08.2001წ.

[10] https://aaronia.com/basics/conversion-between-units/ .

სტატია მიღებულია: 2021-04-12