

გაბნეული რადიოტალღების სტატისტიკური მახასიათებლების შესწავლა დედამიწის ატმოსფეროში

1. კვლევის სიახლე, მიზანი და ამოცანები

1.1 პრობლემის აქტუალობა და კვლევის სიახლე

• პროექტი ეძღვნება დაბალი სიხშირის მაგნიტოჰიდროდინამიკული (მჰდ) ტალღებისა და მაღალი სიხშირის რადიოტალღების გავრცელების თავისებურებების **კომპლექსურ შესწავლას** შესაბამისად დედამიწის ატმოსფეროს ქვედა ფენებში და ტურბულენტურ დაჯახებად მაგნიტოაქტიურ ანიზოტროპულ იონოსფერულ პლაზმაში (შემოკლებით, „**დაჯახებად პლაზმაში**“). **პრობლემის აქტუალობა** განისაზღვრება იონოსფეროში მიმდინარე ტალღური პროცესებისა და იქ არსებული პლაზმური არაერთგვაროვნებების სივრცით-დროითი ფლუქტუაციების გავლენით კლიმატის ცვლილებაზე და რადიო სისტემებზე.

• **პროექტში განვაზოგადებთ ჩვენს მიერ პირველად მიღებულ ორიგინალურ შედეგებს**, რომლებიც მიეძღვნება მრავალჯერად გაბნეული ჩვეულებრივი და არაჩვეულებრივი ტალღების კუთხური სპექტრის სიმძლავრის სტატისტიკური მახასიათებლების შესწავლას „დაჯახებად პლაზმაში“. გავანალიზებთ რადიოტალღების სცინტილაციის **ახალ ეფექტებს** და მათ გავლენას რადიოლოკაციურ სისტემებზე. გამოვიკვლევთ ჩვენს მიერ აღმოჩენილი „**ორბურცობიანი ეფექტის**“ ახალ თავისებურებებს და მივცემთ რეკომენდაციებს მათი პრაქტიკული გამოყენებისათვის.

1. შესავალი

მიწისძვრები, ვულკანური ამოფრქვევები, ქარიშხლები და სხვა მოვლენები იწვევენ ქვედა ატმოსფეროს მეტეოროლოგიური პარამეტრების ვარიაციებს, იონოსფეროში ელექტრონების კონცენტრაციის ცვლილებებს, ელექტრული და გეომაგნიტური ველების ფლუქტუაციებს და, მაშასადამე, კლიმატის ცვლილებას. იონოსფერო წარმოადგენს დისპერსიულ ტურბულენტურ გარემოს მასში მუდმივად არსებული არაერთგვაროვნებით. ამიტომ ტალღური პროცესების კომპლექსური შესწავლა ატმოსფეროში დედამიწის ზედაპირიდან სხვადასხვა სიმაღლეებზე და გაბნეული მაღალი სიხშირის რადიოტალღების სტატისტიკური მახასიათებლების შესწავლა ტურბულენტურ პლაზმურ ფენებში დღეისათვის წარმოადგენს **აქტუალურ პრობლემას და აქვს პრაქტიკული გამოყენება** როგორც ბუნებრივ, ასევე ლაბორატორიულ პლაზმაში [1-3]. იონოსფერულ ეფექტებს აკვირდებიან ხელსაწყოებით, რომლებიც დამონტაჟებულია მფრინავ აპარატებზე და თანამგზავრებზე.

სხვადასხვა დეტერმინისტული და სტატისტიკური მეთოდებით შევისწავლეთ ატმოსფეროში მიმდინარე ტალღური პროცესები და მივიღეთ **ორიგინალური შედეგები** [4-19]. სტატისტიკური მიდგომა არსებითად განსხვავდება დეტერმინისტულისგან როგორც შინაარსით,

ასევე მათემატიკური აპარატით და რიცხვითი მეთოდების გამოყენებით [20-23]. დღეისათვის სინათლის გავრცელების თავისებურებები შემთხვევითად არაერთგვაროვან გარემოებში საკმარისად კარგადაა შესწავლილი [24-26]. ტურბულენტობა ატმოსფეროში იწვევს პირველადი გამოსხივების გაბნევას, სპექტრალური და ენერგეტიკული მახასიათებლების ცვლილებებს, როგორებიცაა: ინტენსიობა, ენერჯის სიმკვრივე და სპექტრალური სიმძლავრე. ელექტრონების კონცენტრაციის შემთხვევითი ფლუქტუაციები იწვევენ რადიოტალღების გაბნევას და განაპირობებენ მიღებული სიგნალის ამპლიტუდისა და ფაზის შემთხვევით ვარიაციებს. იონოსფერო მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს რადიოტალღებზე, რომლებიც ხასიათდებიან სივრცესა და დროში ცვლადი ხუთი ძირითადი პარამეტრით: ამპლიტუდით, ფაზით, სიხშირით, გავრცელების მიმართულებითა და პოლარიზაციით [27, 28]. რადიოტალღების გავრცელება და გაბნევა შემთხვევით გარემოებში დაკავშირებულია კომუნიკაციასთან, რადარულ სისტემებთან და საფრენ აპარატებზე დამონტაჟებულ გამზომ ხელსაწყოებთან. რადიო სიგნალის ფლუქტუაციები დაკავშირებულია გარემოს დისპერსიასთან, ფარადეის ეფექტთან და სცინტილაციებთან [29-32]. რადიოტალღების გავრცელების შესწავლისას იონოსფეროში პროექტში განვიხილავთ ორ ძირითად ეფექტს. **პირველია** ჯგუფური დაგვიანება და ფარადეის ეფექტი. ეს უკანასკნელი დაკავშირებულია სხივების ორმაგ გარდატეხასთან [33]. ფარადეის კუთხე პირდაპირპროპორციულია ელექტრონების სრული კონცენტრაციისა ტალღის გავრცელების მიმართულებით, მაგნიტური ველის დამაბულოობისა და კუთხის კოსინუსისა თანამგზავრ-დედამიწის შემაერთებელ წრფესა და მაგნიტური ველის ძალწირებს შორის; ხოლო პოლარიზაციის სიბრტყის ბრუნვა უკუპროპორციულია სიხშირის კვადრატისა. ფარადეის ეფექტი სერიოზულ გავლენას ახდენს კომუნიკაციაზე და რადარულ სისტემებზე. **მეორე ეფექტია** სცინტილაცია [34], რომელიც დაკავშირებულია სიგნალის ამპლიტუდის, ფაზის, მოსვლის კუთხისა და პოლარიზაციის სივრცით-დროით ფლუქტუაციებთან. სცინტილაციები დაბალ განედებზე ძირითადად განპირობებულია იონოსფეროს F-ფენის განრთხმით. ეს გამოწვეულია ამ ფენში ღეროს ფორმის მაგვარი გლობულების არსებობით. მაღალ განედებზე კი სცინტილაციები გამოწვეულია ავრორა ეფექტით, მზის ქარით, დედამიწისა და მზის ქარის მაგნიტურ ველთა ძალწირების თანაკვეთით.

- პროექტში **განვაზოგადებთ ჩვენს მიერ მიღებულ ორიგინალურ შედეგებს** და მიექვნიება მრავალჯერად გაბნეული მაღალი სიხშირის რადიოტალღების სტატისტიკური მახასიათებლების კომპლექსურ შესწავლას „დაჯახებად პლაზმაში“, სადაც გავითვალისწინებთ ელექტრონებისა და გარეშე მაგნიტური ველის ფლუქტუაციებს (სიდიდითა და მიმართულებით).

- პროექტში მიღებულ შედეგებს ექნებათ **პრაქტიკული გამოყენება**: კომუნიკაციაში, იონოსფეროსა და კოსმოსური პლაზმის რადიოტალღებით ზონდირებაში; ეკოლოგიაში დამაბინძურებელი ინგრადიენტების განაწილების დაკვირვებისას. მიწისძვრების, ვულკანური ამოფრქვევებისა და მაგნიტური ქარიშხლებისას დადგინდება ატმოსფეროს ქვედა ფენებში პასიურ მინარევთა გადატანის ტრეკტორიები.

2. გაბნეული რადიოტალღების სტატისტიკური მახასიათებლები ტურბულენტურ დაჯახებად მაგნიტოაქტიურ პლაზმაში

გეომაგნიტური ველის არსებობა იონოსფეროში განაპირობებს დიელექტრიკული შეღწევადობის ტენზორის ანიზოტროპულობას. შთანთქმა „დაჯახებად პლაზმაში“ იწვევს რადიოტალღების ამპლიტუდის მიღევას და გაბნეული ველის კუთხური სპექტრის სიმძლავრის მნიშვნელოვან დეფორმაციას. ეს უკანასკნელი ექვივალენტურია სიკაშკაშისა [35,36] რომელიც შედის გამოსხივების გადატანის სტოქასტურ დიფერენციალურ განტოლებაში. კუთხურ სპექტრს აქვს დიდი პრაქტიკული გამოყენება და დაიმზირება ექსპერიმენტზე. ანალიზურად ის მიიღება გაბნეული ველის კორელაციური ფუნქციიდან ფურიე გარდაქმნით [1,36]. შთანთქმის არსებობის გამო სპექტრი ხდება ასიმეტრიული: მისი მაქსიმუმი მნიშვნელოვნად წინაცვლებს და ანომალურად განივრდება. ახალი ეფექტები აღიძვრება რადიოტალღის დაცემის კუთხის გაზრდით არაერთგვაროვანი გარემოს ფენზე, როცა გარემოს ანიზოტროპულობა და ტალღის დახრილად დაცემა ერთი რიგისაა. პრობლემის ასიმეტრიულობა განპირობებულია არა მხოლოდ ტალღის დახრილად დაცემით პლაზმა-ვაკუუმის ზედაპირზე, არამედ ის შეიძლება იყოს დაკავშირებული თვით მაგნიტოაქტიური პლაზმის თვისებებთან. კუთხური სპექტრის სიმძლავრის სტატისტიკური მახასიათებლები (გაგანიერება და მისი მაქსიმუმის წინაცვლება) ტურბულენტურ დაუჯახებელ პლაზმაში ელექტრონების კონცენტრაციის ფლუქტუაციების გათვალისწინებით გამოვიკვლიეთ სტოქასტურ ეიკონალის განტოლებაზე დაყრდნობით, ხოლო სტატისტიკური მოდელირება შევასრულეთ მონტე-კარლოს მეთოდით. გარეშე მაგნიტური ველის შემთხვევითი ვარიაციები გავითვალისწინეთ ნაშრომებში [37-39].

- პროექტში **გავაგრძელებთ ჩვენი სამეცნიერო მიმართულების განვითარებას. ანალიზურად და რიცხვობრივად გამოვიკვლიეთ:** გაბნეული ჩვეულებრივი და არაჩვეულებრივი ტალღების ფაზისა და ამპლიტუდის ფლუქტუაციების კორელაციურ ფუნქციებს, მოსვლის კუთხეებს მთავარ და პერპენდიკულარულ სიბრტყეებში, სცინტილაციის ინდექსებს, სტოქსის პარამეტრებს, დეპოლარიზაციის კოეფიციენტებს, ფარადეის კუთხეებს და ტალღურ სტრუქტურულ ფუნქციებს პლაზმის ფლუქტუირებადი პარამეტრების კორელაციური ფუნქციების სხვადასხვა სპექტრებისათვის, რომლებიც შესაბამისობაშია ექსპერიმენტულ დაკვირვებებთან. ფაზისა და ამპლიტუდის ფლუქტუაციების გამოთვლისას გავითვალისწინებთ გარემოს დისპერსიასა და დიფრაქციულ ეფექტებს.

- გაბნეული გამოსხივების სტატისტიკურ მახასიათებლებში **გავითვალისწინებთ:** ამოცანის გეომეტრიას, ფენის სისქეს, შთანთქმის კოეფიციენტს, დაცემის კუთხეს, კუთხეს ფენის ნორმალსა და გარეშე მაგნიტურ ველს შორის; აგრეთვე არაერთგვაროვნებების ანიზოტროპიას. გაბნეული რადიოტალღების ფაზისა და ამპლიტუდის ფლუქტუაციების კორელაციური ფუნქციებისთვის აიგება ორ და სამ განზომილებიანი ფაზური პორტრეტები რომლებიც დაკავშირებულია გარეშე მაგნიტური ველის მიმართულების ცვლილებებთან.

- **მიღებული შედეგები სამართლიანი იქნება** პლაზმის ფლუქტუირებადი პარამეტრების ნებისმიერი კორელაციური ფუნქციებისათვის პლაზმური ფენიდან ახლო და შორ მანძილებზე. გამოვითვლით ისეთ მნიშვნელოვან პარამეტრს როგორცაა სცინტილაციის ინდექსი S_4 , რომელიც მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს რადარული სისტემების აპერტურაზე და ახასიათებს ჩვეულებრივი და არაჩვეულებრივი ტალღების მიღევის სიღრმეს „დაჯახებად პლაზმაში“ გავრცელებისას [41]; გავითვალისწინებთ ამოცანის გეომეტრიას, დაცემული ტალღის სიხშირეს და პლაზმის არაერთგვაროვნებების სტრუქტურას დედამიწის ზედაპირიდან სხვადასხვა სიმაღლეებზე.

- მეორე რიგის სტატისტიკური მომენტების რიცხვითი გამოთვლები ჩატარდება ელექტრონების კონცენტრაციის არაერთგვაროვნებებისა და გარეშე მაგნიტური ველის ფლუქტუაციების სხვადასხვა სპექტრალური ფუნქციისათვის.

- მიღებული შედეგები გამოყენებას ჰპოვებენ იონოსფეროსა და კოსმოსური პლაზმის ზონდირების ახალი პრინციპების დანერგვაში. წარმოვადგენთ გაბნეული რადიოტალღების ფაზური პორტრეტების მოდელირების ვიდეო პრეზენტაციას „დაჯახებად პლაზმაში“ გამოწვეულს გარეშე მაგნიტური ველის მიმართულების ფლუქტუაციებით. ამგვარი მოდელირება საშუალებას მოგვცემს აღვადგინოთ ან ვიწინასწარმეტყველოთ ატმოსფეროში მიმდინარე მოვლენები, რომლებიც წარმოიშვება მაგნიტური ქარიშხლების, მიწისძვრებისა და სხვა მოვლენებისას.

3. „ორბურცობიანი ეფექტი“

ანიზოტროპული არაერთგვაროვნებები სხვადასხვა ბუნებისაა. მაგალითად, თერმოტროპული თხევადი კრისტალის მოლეკულის სიგრძე დაახლოებით 20 ანგსტრემია, ხოლო გასწვრივი და განივი ხაზოვანი მასშტაბების შეფარდებაა $4 \div 8$. შედარებით დიდი სტრუქტურები ფორმირდება ლიოტროპულ სისტემებში, სადაც ეს შეფარდება შეიძლება აღმატებოდეს 15. წყალმცენარეების ქლოროპლასტებს აქვთ ელიფსოიდის ფორმა რომელთა დიამეტრი $1 \div 5$ მიკრონია, ხოლო სიგრძე $1 \div 10$ მიკრონი. წაგრძელებული არაერთგვაროვნებები იონოსფეროში ძირითადად ორიენტირებულია დედამიწის მაგნიტური ველის ძალწირების გასწვრივ [42-45].

პროექტის მეორე მიზანია ჩვენს მიერ აღმოჩენილი „ორბურცობიანი ეფექტის“ ახალი თავისებურებების შესწავლა რადიოტალღის დახრილად დაცემისას „დაჯახებად პლაზმაზე“ დიფრაქციული ეფექტების გათვალისწინებით. სტატისტიკურმა მოდელირებამ მონტე-კარლოს მეთოდით აჩვენა, რომ მრავალჯერად გაბნეული ელექტრომაგნიტური ტალღების სივრცითი სპექტრის სიმძლავრეს აქვს ორბურცობიანი ფორმა, როცა ტალღა დახრილად ეცემა შემთხვევითად არაერთგვაროვანი გარემოს საზღვარს წაგრძელებული არაერთგვაროვნებებით [46-52]. თავდაპირველად კუთხური სპექტრი განივრდება, წარმოიშვება ღრმული და მერე ფორმირდება ორბურცობიანი ზედაპირი. ღრმულის სიდიდე მატულობს მანძილთან ერთად ტალღის გავრცელებისას ანიზოტროპულ შემთხვევითად არაერთგვაროვან გარემოში.

„ორბურცობიანი ეფექტი“ დაუჯახებად მაგნიტოაქტიურ პლაზმაში ელექტრონების კონცენტრაციის ანიზოტროპული არაერთგვაროვნებებითა და გარეშე მაგნიტური ველის ფლუქტუაციებით დიფრაქციული ეფექტების გათვალისწინებით ანალიზურად და რიცხვობრივად პირველად შევისწავლეთ ნაშრომთა ციკლში [4]. გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ კუთხური სპექტრის სიმძლავრეს გაბნეული ჩვეულებრივი და არაჩვეულებრივი ტალღებისათვის აქვს ორბურცობიანი ზედაპირი. გარეშე მაგნიტური ველი გაბნეული ჩვეულებრივი ტალღისათვის იწვევდა კუთხური სპექტრის შევიწროვებას, სპექტრის მაქსიმუმი უმნიშვნელოდ წინაცვლებდა, ხოლო სპექტრში ღრმულის სიდიდე იზრდებოდა წაგრძელებული არაერთგვაროვნებების მიმართულების გასწვრივ. კუთხური სპექტრის ზედაპირის ორბურცობიანი ფორმა და ანომალური გაგანიერება შედეგია პრობლემის ასიმეტრიულობისა [49,50].

- „ორბურცობიანი ეფექტის“ შესწავლისას ჩვენ განვიხილავთ კუთხური სპექტრის ღრმულის ევოლუციის **ახალ თავისებურებებს** „დაჯახებად პლაზმაში“ ელექტრონების კონცენტრაციის ფლუქტუაციების კორელაციური ფუნქციის სხვადასხვა ანიზოტროპული სპექტრისათვის დედამიწის ზედაპირიდან სხვადასხვა სიმაღლეებზე. გავითვალისწინებთ წაგრძელებული არაერთგვაროვნებების ანიზოტროპიის კოეფიციენტსა და მათი დახრილობის კუთხეს გარეშე მაგნიტური ველის მიმართ; მხედველობაში მივიღებთ გარეშე მაგნიტური ველის ფლუქტუაციებსაც.

- შთანთქმისა და გარეშე მაგნიტური ველის შემთხვევითი ვარიაციების გათვალისწინება „დაჯახებად პლაზმაში“ რადიოტალღების დახრილად დაცემისას ტურბულენტურ გარემოზე **აქტუალურს გახდის** „ორბურცობიანი ეფექტის“ **გამოყენებას** მაგნიტოაქტიური იონოსფერული პლაზმის პარამეტრების დასადგენად და კომუნიკაციაში.

4. ტურბულენტური დიფუზია და პასიურ მინარევთა გადატანა ატმოსფეროს ქვედა ფენებში

პროექტის მესამე მიზანია პასიურ მინარევთა გადატანის **ტურბულენტური დიფუზიის ახალი სტატისტიკური თეორია** ატმოსფეროს ქვედა ფენებში, სადაც მინარევთა და სითბოს გადატანა სწარმოებს ორი განსხვავებული მექანიზმით. ერთის მხრივ, მოლეკულური დიფუზიის პროცესი გამოწვეულია ტემპერატურის, სიმკვრივის და სიჩქარეთა ვექტორული ველის ცვლილებებით, რაც იწვევს მოლეკულური სითბოს გადატანას, ჩვეულებრივ და ამბიპოლარულ დიფუზიებს. მეორის მხრივ, ლამინარული და ტურბულენტური მოძრაობები იწვევენ ტემპერატურისა და სიმკვრივის გადანაწილებას ატმოსფეროში. ამ შემთხვევაში ყურადღება უნდა მიექცეს მოლეკულური და კონვექციური დიფუზიების ერთდროულ მოქმედებას მინარევთა გადატანაზე, რომელთა კონცენტრაცია ატმოსფეროში დამოკიდებულია წყაროს სიმძლავრეზე და გარემოს თვისებებზე.

- პასიურ მინარევთა გადატანის **ახალი სტატისტიკური თეორია დაეფუძნება** სტოქასტური პარაბოლური ტიპის დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემის ამოხსნას სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით. მიიღება ეფექტური ტურბულენტური დიფუზიის კოეფიციენტის ანალიზური გამოსახულება, რომელიც გაითვალისწინებს მოლეკულურ და ტურბულენტურ დიფუზიებს. აიგება იზოხაზები და სამგანზომილებიანი ზედაპირები, რომლებიც ნათლად წარმოაჩენენ პასიურ მინარევთა გადატანას წყაროდან სხვადასხვა მანძილებზე სხვადასხვა მეტეოროლოგიურ პირობებში.

- **რიცხვითი გამოთვლების ჩატარებისას** გამოვიყენებთ ESA, NASA-ს და მეტეოროლოგიური სადგურების დაკვირვებების მონაცემთა ბაზებს. მიღებულ შედეგებს ექნებათ პრაქტიკული გამოყენება ეკოლოგიაში, მიწისძვრებისას, ვულკანური ამოფრქვევებისას, მაგნიტური ქარიშხლებისას და სხვა მოვლენებისას როცა დააკვირდებიან მინარევთა ინგრადიენტების გადანაწილებას და მათი გადატანის ტრანექტორიებს ატმოსფეროს ქვედა ფენებში.

ლიტერატურა

1. Ishimaru A. *Wave Propagation and Scattering in Random Media, Volume I: Single scattering and transport theory; Volume II: Multiple scattering, turbulence, rough surfaces and remote sensing*. 572 pages. An IEEE Press-Oxford University Press Classic Reissue, IEEE Press, Piscataway, New Jersey and Oxford University Press, England, 1997.
2. Booker H.G. *Cold Plasma Waves*. Boston, Lancaster, Martinus Nijhoff Publishers. 1984.
3. Gershman B.N., Erukhimov L.M., Iashin Iu.A. *Wave phenomena in the Ionosphere and Cosmic Plasma*. Nauka. 1984.
4. www.georgejandieri.ge
5. Jandieri G.V., Ishimaru A., Surmava A.A. *The Open Atmospheric Science Journal*, vol. 5, pp. 33-42, 2011 (in the special issue “Waves Propagation in the Upper Atmosphere”, Ed. G.V. Jandieri).
6. Jandieri G.V., Surmava A.A., Gvelesiani A.I. *International J. of Geosciences*, vol. 2, pp. 13-28, 2011.
7. Jandieri G.V., Khantadze A.G., Ishimaru A., *Annales Geophysicae*, vol. 28, pp. 1387-1399, 2010.
8. Jandieri G.V., Khantadze A.G., Jandieri V.G. *Annales Geophysicae*, vol. 27, pp. 3489-3495, 2009.
9. Jandieri G.V., Ishimaru A., Jandieri V.G. *The Open Atmospheric Science J.*, vol. 3, pp. 147-157, 2009.
10. Jandieri G.V. Khantadze A.G. *J. of Atmospheric and Solar-Terr. Phys.*, vol. 71, # 1, pp. 45-48, 2009.
11. Jandieri G.V., Khantadze A.G. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 71, pp. 45-48, 2009.
12. Jandieri V.G., Khantadze A.G., Jandieri G.V. *Plasma Physics Reports*, vol. 34, # 6, pp. 480-485, 2008.
13. Khantadze A.G., Jandieri G.V. *Doklady Earth Sciences*, vol. 420, # 4, pp. 672-675, 2008.
14. Jandieri G.V., Kaladze T.D., Wu D.J., *Physics Letters A*, vol. 365, pp. 140-143, 2007.
15. Jandieri G.V., Kaladze T.D., Stenflo L., Shah H.A. *Physica Scripta*, vol. 76, pp. 343-348, 2007.
16. Jandieri G.V., Aburjania G.D., Chargazia Kh.Z., Khantadze A.G., Kharshiladze O.A., Lominadze J.G. *Planetary and Space Science*, volume 53, # 9, pp. 881-901, 2005.
17. Jandieri G.V., Khantadze A.G., Aburjania G.D. *Plasma Physics Report*, vol. 30, # 1, pp. 88–95, 2004.
18. Aburjania G.D., Chargazia Kh. Z., Jandieri G.V., *Annales Geophysicae*. vol. 22, # 4, pp. 508–517, 2004.
19. Jandieri G.V., Aburjania G.D., *J. Atmospheric and Solar-Terr. Physics*, vol. 65, # 6, pp. 661-671, 2003.
20. Chew W.C. *Waves and Fields in Inhomogeneous Media*. New York: IEEE Press, 1994.
21. Felsen L.B., Marcuvitz N. *Radiation and Scattering of Waves*. New Jersey. 1973.
22. Tatarskii V.I. *Wave Propagation in a Turbulent Medium*. McGraw–Hill Book Company, Inc., New York, 1961.
23. Chernov L.A. *Wave Propagation in Random Medium*. New York, McGraw-Hill, 1960.
24. Ginzburg V.L. *Propagation of Electromagnetic Waves in Plasma*. New York: Gordon and Beach, 1961.
25. Tsitovich V.N. *Theory of Turbulent Plasma*. Moscow, Atomizdat. 1971 (in Russian).
26. Kravtsov Yu.A., Feizulin Z.I., Vinogradov A.G. *Penetration of Radio Waves Through the Earth's Atmosphere*. Moscow, Radio and communication. 1983. 224 p. (in Russian).
27. Frolov, V. L., Bakhmet'eva N. V., Belikovich V. V., et al. *Usp. Phys. Nauk.* vol. 50, pp. 315-325, 2007.
28. Xu, Z.-W., Wu J., Wu Z.-S. *Waves in Random media*, vol. 14, pp. S189-S273, 2004.
29. Wernik, A.W., Secan J.A., Fremouw E.J. *Advances Space Research.*, vol. 31, # 4, pp. 971–981, 2003.
30. Wu, Z.-S., Wei H.-Y., Yang R.-K. Guo L.-X., *PIER*, vol. 80, pp. 277-293, 2008.

31. Russkin, V. M., Stadnik A. M. *Geomagnetizm an Aeronomy*, vol. 27, pp. 682-684, 1987.
32. Yeh, K.C. Liu C.H. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. AP-15, pp. 539-542, 1967.
33. Eroglu, A., Lee J. K., *Progress In Electromagnetics Research, PIER*, vol. 62, pp. 237-260, 2006.
34. Wernik A.W., Liu C.H. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, vol. 36, pp. 871-879, 1974.
35. Gavrilenko, V.G., Stepanov N.S. *Radiofizika*, vol. 30, # 1, pp. 3-25, 1987 (in Russian).
36. Rytov S.M., Yu.A. Kravtsov and V.I. Tatarskii, *Principles of Statistical Radiophysics. vol.4. Waves* Berlin, New York, Springer, 1989. *Propagation Through Random Media.*
37. Jandieri G.V., Zhukova N.N., Jandieri I.V. *J. Electromagnetic Analysis, Appl.*, vol. 4, pp. 243-251, 2012.
38. Jandieri G.V., Jandieri V.G. *J. Electromagnetic Analysis and Appl.*, vol. 3, # 11, pp. 71-478, 2011.
39. Jandieri G.V., Ishimaru A., Jandieri V.G., Zhukova N.N. *PIER*, vol. 112, pp. 63-75, 2011.
40. Jandieri G.V., Ishimaru A., Zhukova N.N., Diasamidze M.R. *PIER B*, vol. 22, pp. 121-143, 2010.
41. Jandieri G.V., Ishimaru A., Jandieri V.G., Khantadze A.G., *PIER*, vol. 70, pp. 307-328, 2007.
42. Brown, G.H. Wolken J.J., *Liquid Crystals and Biological Structures*, New York, 1979.
43. Nakagaki, M. Heller W. *Journal of Polymer Science*, vol. 38, pp. 117-131, 1959.
44. Eskin, V.E. *Light Scattering by Polymer Solutions and Macromolecule Properties*, Leningrad, Nauka.
45. *Sound Transmission Through a Fluctuating Ocean*, Editor S.M. Flatte. Cambridge University Press, London-New York- Melbourne, 1980.
46. Gribova, E.Z., Saichev A.I. *Acoustic Journal*, vol. 39, pp. 1050-1058, 1993 (in Russian).
47. Aistov, A.V., Gavrilenko V.G. *Optics and Spectroscopy*, vol. 83, pp. 427- 432, 1997.
48. Jandieri G.V., Gavrilenko, V.G., Aistov A.V. *Waves Random Media*, vol. 10, pp. 435-445, 2000.
49. Jandieri G.V., Ishimaru A., Mchedlishvili N.F., Takidze I.G. *PIER M* vol. 25, pp. 87-100, 2012.
50. Jandieri G.V., Gavrilenko V.G., Ishimaru A., Jandieri V.G., *PIER B*, vol. 7, pp. 191-208, 2008.
51. Jandieri G.V., Aburjania G.D., Jandieri V.G., In book *Wave Propagation, Scattering and Emission in Complex Media*. Science Press (Beijing, China), World Scientific (Singapore City, Singapore). Editor: Ya-Qiu Jin. pp. 207-214, 2004.
52. Jandieri G.V., Gavrilenko V.G., Sorokin A.V., Jandieri V.G. *Plasma Physics Report*, vol. 31, # 7, pp. 604-615, 2005.