

მიხეილ ნოდიას გეოფიზიკის ინსტიტუტი

# შრომების კრებული

ИНСТИТУТ ГЕОФИЗИКИ ИМ. М. НОДИА

# СБОРНИК ТРУДОВ

MIKHEIL NODIA INSTITUTE OF GEOPHYSICS

# TRANSACTIONS

LXXII



2020

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი  
მიხეილ ნოდია სახელობის გეოფიზიკის ინსტიტუტი

**Ivane Javakhishvili Tbilis State University  
Mikheil Nodia Institute of Geophysics**

**Тбилисский Государственный Университет  
им. И.Джавахишвили  
Институт Геофизики им. М. З. Нодиа**

**შრომების კრებული**

**ტ. LXXII**

**TRANSACTIONS**

**vol. LXXII**

**СБОРНИК ТРУДОВ**

**т. LXXII**

**2020**



**უნივერსიტეტის  
გამომცემლობა**

**Ivane Javakhishvili Tbilis State University**

**Mikheil Nodia Institute of Geophysics**

**Тбилисский Государственный Университет им. И. Джавахишвили**

**Институт геофизики им. М. З. Нодиа**

**TRANSACTIONS**

**vol. LXXII**

**СБОРНИК ТРУДОВ**

**т. LXXII**

**Tbilisi - Тбилиси  
2020**

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი  
მიხეილ ნოდუას სახელობის გეოფიზიკის ინსტიტუტი

## შრომების კრებული

ტ. LXXII

თბილისი

2020

მთავარი რედაქტორი: ამირანაშვილი ა.

Editor-in-Chief: Amiranashvili A.

Главный редактор: Амиранашвили А.Г.

სარედაქციო-საგამომცემლო საბჭო:

ადამია შ., აჯიევი ა. (ყაბარდო-ბალკარეთის რესპუბლიკა, რუსეთი), ბენდერევი ა. (ბულგარეთი), ბერძენიშვილი ნ., ბოლაშვილი ნ., გამყრელიძე ე., † გველესიანი ა., გვენცაძე თ., გოგიჩაიშვილი ა. (მექსიკა), დარახველიძე ლ. (მთავარი რედაქტორის მოადგილე), დემეტრაშვილი დ., დვალი ნ., ელიზბარაშვილი ე., ვარამაშვილი ნ., ზაალიშვილი ვ. (რესპუბლიკა ჩრდილოეთ ოსეთი-ალანია, რუსეთი), თავართქილაძე კ., კვინიკაძე მ., კერესელიძე ზ., მამმადლი ტ. (აზერბაიჯანი), მელიქაძე გ., მეტრეველი გ., მინდელი პ., ნიკოლაიშვილი მ. (მდივანი), პეტროსიანი ჰრ. (სომხეთი), პოვოლოცკაია ნ. (რუსეთი), ჟოვინსკი ე. (უკრაინა), სენიკი ი. (რუსეთი), ტატიშვილი მ., ქირია თ., ქირია ჯ., ღლონტი ნ., ჩაგელიშვილი გ., ქელიძე თ., ხარშილაძე ო., ხვედელიძე ზ.

#### THE EDITORIAL AND PUBLISHING BOARD:

Adamia Sh., Adjiev A. (Kabardino-Balkar Republic, Russia), Benderev A. (Bulgaria), Berdzenishvili N., Bolashvili N., Chagelishvili G., Chelidze T., Darakhvelidze L. (Associate Editor), Demetrashvili D., Dvali N., Elizbarashvili E., Gamkrelidze I., Ghlonti N., Gogichaishvili A. (Mexico), † Gvelesiani A., Gventsadze T., Kereselidze Z., Kharshiladze O., Khvedelidze Z., Kiria J., Kiria T., Mammadli T. (Azerbaijan), Kvinikadze M., Melikadze G., Metreveli G., Mindeli P., Nikolaishvili M. (secretary), Petrosyan Hr. (Armenia), Povolotskaia N. (Russia), Senik I. (Russia), Tatishvili M., Tavartkiladze K., Varamashvili N., Zaalishvili V. (Republic of North Ossetia-Alania, Russia), Zhovinsky E. (Ukraine).

#### РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ СОВЕТ:

Адамия Ш. А., Аджиев А. Х. (Кабардино-Балкарская Республика, Россия), Бендерев А. Д. (Болгария), Бердзенишвили Н. М., Болашвили Н. Р., Варамашвили Н. Д., Гамкрелидзе И. П., † Гвелесиани А. И., Гвенцадзе Т. Г., Глонти Н. Я., Гогичаишвили А. Т. (Мексика), Дарахвелидзе Л. К. (заместитель главного редактора), Двали Н. С., Деметрашвили Д. И., Жовинский Э. Я. (Украина), Заалишвили В. Б. (Республика Северная Осетия-Алания, Россия), Квиникадзе М. С., Кереселидзе З. А., Кириа Дж. К., Кириа Т. В., Маммадли Т. (Азербайджан), Меликадзе Г. И., Метревели Г. С., Миндели П. Ш., Николайшвили М. М. (секретарь), Петросян Г. М. (Армения), Поволоцкая Н. П. (Россия), Сеник И. А. (Россия), Таварткиладзе К. А., Татишвили М. Р., Харшиладзе О. А., Хведелидзе З. В., Чагелишвили Г. Д., Челидзе Т. Л., Элизбарашвили Э. Ш.

კრებული გამოდის 1936 წლიდან და მოიცავს გეოფიზიკის ყველა მიმართულებას. კრებულში იბეჭდება სამეცნიერო სტატიები, მონოგრაფიები, მიმოხილვები, მოკლენიფორმაციები, დისკუსიები, წიგნების მიმოხილვები, განცხადებები სამ – ქართულ, ინგლისურ და რუსულ – ენაზე. პუბლიკაციები უფასოა. კრებული არის საერთაშორისო რეფერირებადი, რეცენზირებადი და ციტირებადი გამოცემა; ჩართულია საერთაშორისო ელექტრონულ საბიბლიოთეკო მონაცემთა ბაზა **DSpace** - ში. მისი ინდექსირება ხდება **Google Scholar** და **Publish or Perish** - ში. გამოდის, როგორც წესი, წელიწადში ერთხელ, სტატიების დაგროვების მიხედვით. საჭიროების შემთხვევაში შესაძლებელია წელიწადში რამდენიმე კრებულის გამოცემა.

The Transactions include all branches of the Geophysics. It is published since 1936. Types of contributions are: research papers, monographs, reviews, short communications, discussions, book reviews, and announcements on any of three languages - Georgian, English, Russian. Publications are free of charge. Transactions are international referred, peer-reviewed and cited edition; they are included in the international electronic library data base **DSpace**, indexed in **Google Scholar** and **Publish or Perish**. The Transactions published in proportion to the accumulation of articles, usually once per annum. If necessary, several publications per annum are possible.

Сборник охватывает все направления геофизики. Издается с 1936 года. В сборнике публикуются научные статьи, монографии, обзоры, краткие информации, дискуссии, обзоры книг, объявления на любом из трех языков – грузинский, английский, русский. Публикации бесплатные. Сборник является международным реферируемым, рецензируемым и цитируемым изданием; включен в международную электронную библиотечную базу данных **DSpace**. Индексируется в **Google Scholar** и **Publish or Perish**. Издается по мере накопления статей, обычно раз в год. При необходимости возможно несколько изданий в год.

**სარედაქციო-საგამომცემლო საბჭოს მისამართი:**

საქართველო, 0160, თბილისი, ალექსიძის ქ. 1, მ. ნოდიას სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი  
Tel.: 233-28-67; Fax: (99532) 2332867; e-mail: [avtandilamiranashvili@gmail.com](mailto:avtandilamiranashvili@gmail.com);  
[geophysics.transactions@tsu.ge](mailto:geophysics.transactions@tsu.ge)

**Address of the Editorial and Publishing Board:**

M. Nodia Institute of Geophysics, 1 Alexidze Str., 0160 Tbilisi, Georgia  
Tel.: 233-28-67; Fax: (99532) 2332867; e-mail: [avtandilamiranashvili@gmail.com](mailto:avtandilamiranashvili@gmail.com);  
[geophysics.transactions@tsu.ge](mailto:geophysics.transactions@tsu.ge)

**Адрес редакционно-издательского совета:**

Грузия, 0160, Тбилиси, ул. Алексидзе, 1. Институт геофизики им. М. З. Нодиа  
Тел: 233-28-67; Fax: (99532) 2332867; e-mail: [avtandilamiranashvili@gmail.com](mailto:avtandilamiranashvili@gmail.com);  
[geophysics.transactions@tsu.ge](mailto:geophysics.transactions@tsu.ge)

**ელექტრონული ვერსიის მისამართი:**

The address of electronic version:

Адрес электронной версии:

<https://scholar.google.com/citations?user=EdMkYoYAAAAJ&hl=en>

<http://dspace.gela.org.ge/handle/123456789/254>

© ივ. ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის გამომცემლობა, 2020

© Publish Hous of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, 2020

© Издательство Тбилисского государственного университета им. И. Джавахишвили, 2020

ISSN 1512-1135

## მაგნიტური (დუშეთი 1935-1989 წწ) მიხრილობის სტატისტიკა და ღრმა თვითსწავლებადი მოდელი

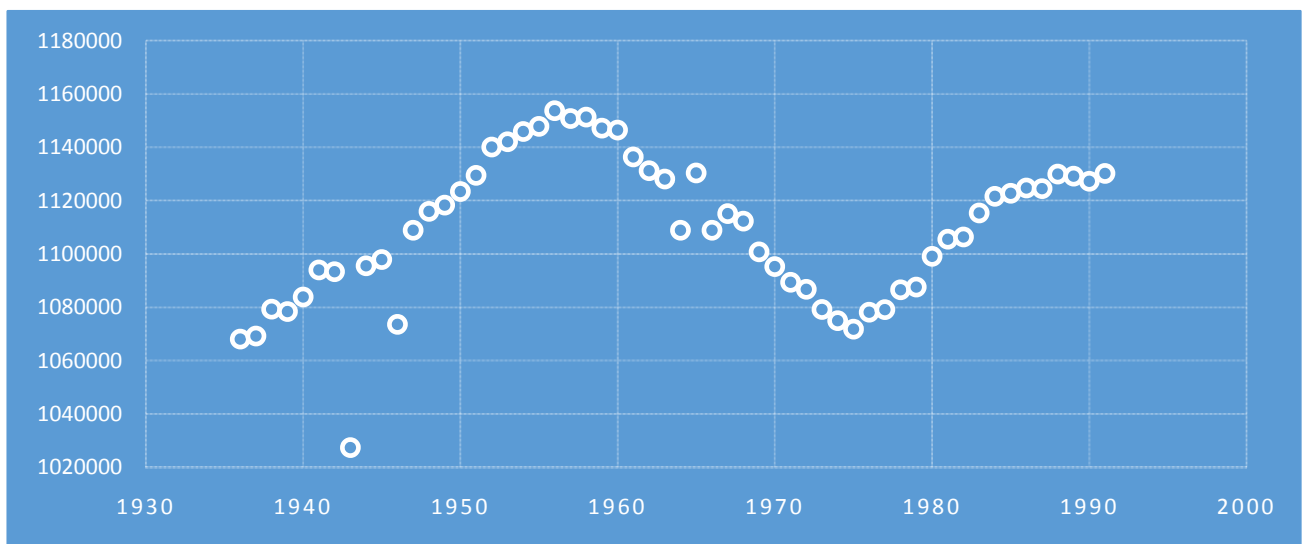
ქირია თ., ნიკოლაიშვილი მ., ლომაძე ე., ბერიშვილი გ., მებალიშვილი ნ.

თსუ, მ. ნოდია სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი

დღეისათვის, ინტენსიურად იქმნება ახალი შესაძლებლობები დედამიწის მაგნიტური ველის პარამეტრების უფრო მაღალი სიზუსტით და მეტი დისკრეტიზაციით შესასწავლად. ამასთან, ვითარდება მონაცემთა დამუშავების ტექნიკა თანამედროვე, ძლიერი მათემატიკური აპარატის საფუძველზე.

იმისათვის, რომ საკმაოდ ხანგრძლივი სტატისტიკა შევისწავლოთ, საჭიროა მთელი რიგი სტატისტიკური სამუშაოების ჩატარება. საჭიროდ ჩავთვალეთ, სტანდარტულად აგვეგო მაგნიტური მიხრილობისთვის ვარიაციების მწკრივი თვეების და წლების მიხედვით. კერძოდ, მნიშვნელოვანია დროში დავაკვირდეთ ვარიაციულ მწკრივს, ასევე ცალკე აღებულ მწკრივებს 2 და 3(3) ნაწილებისთვის. საინტერესო თვისებებს ავლენს ეს ორი სერია წლების მიხედვით. ცხადია, მნიშვნელოვანია რა სიმკვრივით ნაწილდებიან ამ კლასტერებში ჩვენი სტატისტიკური მონაცემები. აქვთ თუ არა მათ რაიმე განაწილების წესი ან ქცევა დინამიკაში.

ცხადია, მონაცემებში ყოველთვის არის მათი ობიექტურობის ხარისხის პრობლემა (აპარატურული დეფექტები და სხვა) და მნიშვნელოვანია სუბიექტური სტატისტიკის გამორიცხვა. ამ უკანასკნელზე შემუშავებულია მრავალი ტექნიკა. ფილტრაციის ამოცანები პროგრამულ დონეზე საკმაოდ კარგადაა დღეს კომპიუტერულ ტექნოლოგიებში და ჩვენმა მონაცემებმა მკაცრი ფილტრები გაიარა. მთავარი ინფორმატიული ანომალიები რა თქმა უნდა შენარჩუნებულია, რაც უდავოდ მნიშვნელოვანია.

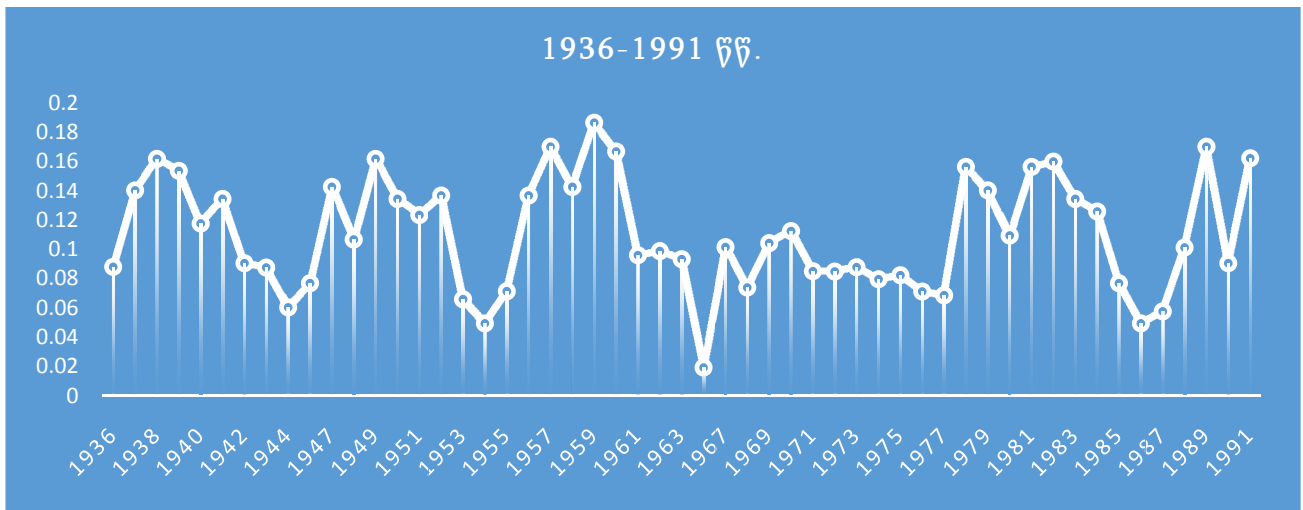


ნახ.1. მაგნიტური მიხრილობის წლიური საშუალო მნიშვნელობების დინამიკა (1936 – 1991 წ.წ.).

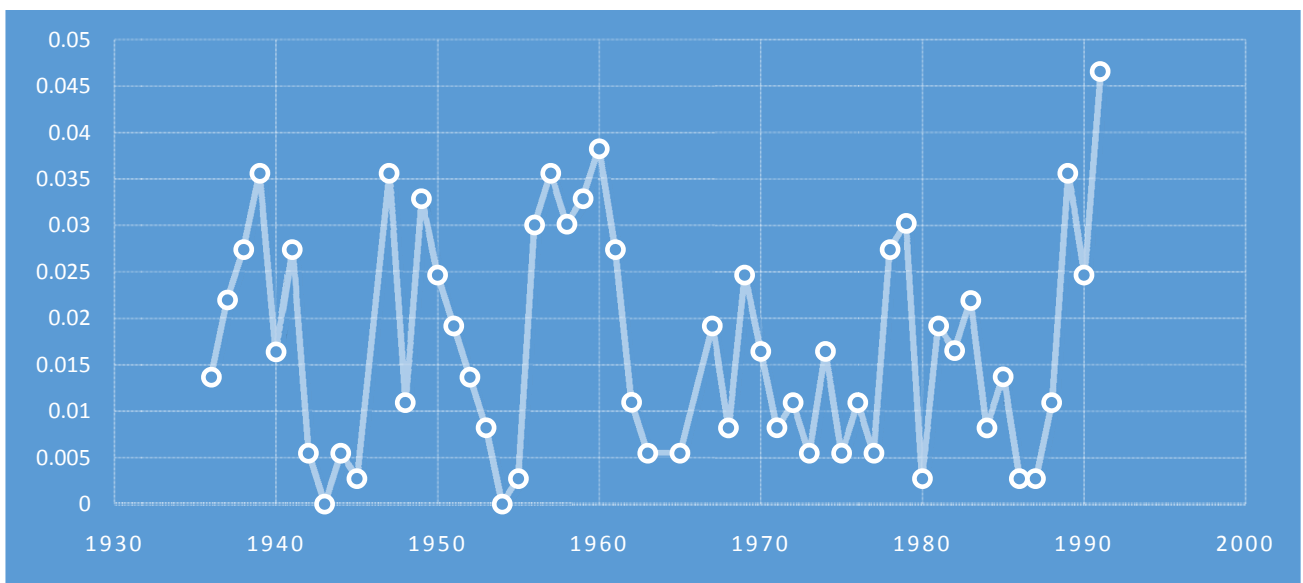
ნახ.1-ზე მიღებული საშუალო წლიური მნიშვნელობები პერიოდული და მოწესრიგებული სტრუქტურისაა. არის გამონაკლისი სტატისტიკა დუშეთის ობსერვატორიის მონაცემების 1941-1942 და 1964-1966 წლების საშუალო წლიურის მიხედვით. ეს ორი ეპიზოდი დასაშვებია,



მაგრამ სრულიად ობიექტური მიზეზების შედეგია, რომ იყოს სხვა, კერძოდ, აპარატურის ლოკაციასთან რაიმე ძლიერი ხელოვნური ანომალიის ზეგავლენების არსებობით გამოწვეული. ნახაზის მიხედვით შეიძლება ითქვას, რომ ვარიაციათა საშუალოებს აქვთ დაახლოებით 40 წლიანი ციკლები და ე.წ. ტალღური ქცევა იკვეთება.



ნახ. 2. 1936-1991 წ.წ. მაგნიტური ველის მიხრილობის 2σ რიგის ანომალიების რაოდენობრივი ანალიზი დროში



ნახ. 3. 1936-1991 წ.წ. მაგნიტური ველის მიხრილობის 3σ რიგის ანომალიების რაოდენობრივი ანალიზი დროში

ნახ.2 გვიჩვენებს კონკრეტულ წელს 2σ -ზე მეტ ანომალიათა რაოდენობის, წილობრივად წლის მთლიან მონაცემებში. მაგალითად: 1936 წელს, ანომალიები მიხრილობის მთლიან მონაცემებში საშუალოდ 2σ-ზე მეტად გადახრილისულ იყო 8 % შემთხვევაში. ასევე, 1959 წელს ასეთ ანომალიათა რაოდენობა ამ წლის მონაცემთა მხოლოდ 20%- მდე გვაქვს. ამ ნახაზში გამოკვეთილიწლების მიხედვით ანომალურობის ზომადობის საკითხი სიხშირული დათვლებით საკმაოდ ინფორმაციულია.

ნახ.3 გვიჩვენებს კონკრეტულ წელს, 3σ -ზე მეტ ანომალიათა რაოდენობის, წილობრივად წლის მთლიან მონაცემებში. აქ უკვე სტატისტიკური მდგრადობის საკითხი ექვეყნება, და ძლიერი ანომალური ზონების სტატისტიკურ ჰიპოთეზათა გადამოწმებას ხელი ეშლება, ვინაიდან, მათი სანდოობის საკითხი საეჭვოა. ისმის კითხვა, რატომ? იმიტომ რომ, მათი წილობრივი მონაწილეობა მთელს მონაცემებში საკმაოდ ცოტაა. თუმცა 1936 წლიდან 1960 -მდე, 3σ უფრო მეტი

იკვეთება, ვიდრე 1960-1985 წლებში, ხოლო წინა საუკუნის 80 - იანი წლების მიწურულს 1936-1960 წლების მსგავსი პროცესები მიმდინარეობს.

ნახ.1, ნახ. 2 და ნახ.3 -დან შეიძლება დავასკვნათ, რომ მონაცემებში გვაქვს მაგნიტური მიხრილობის აღზევების (მეტი დინამიკურობის) და დაცხრომის მონაცვლეობა. საინტერესოა, ამ მონაცემთა გაგრძელება დღემდე, ინარჩუნებს თუ არა ამ თვისებას ჩვენთვის საინტერესო მაგნიტური მიხრილობის პარამეტრი. ამასთან, იკვეთება მიხრილობის საშუალოს წლიდან-წლამდე მონაცვლეობა, საშუალო ე.წ UP-ზე და საშუალო ე.წ Down-ზე. ეს პარამეტრის როგორც წლიურ საშუალოდან, ისე უფრო მეტ დისკრეტიზაციაზე. მაგალითად, თვეების მიხედვით საშუალოებით ე.წ UP-ზე და ე.წ Down -ზე (ასვლა -ჩასვლის ხშირი განმეორებადობა) კარგი პროგნოზული მოდელის აგების შესაძლებლობას უნდა იძლეოდეს.

თუ შემოვიღებთ შემდეგ აღნიშვნებს ჩვენი მაგნიტური მიხრილობის სტატისტიკის სთვის:

$$X_i, \quad \text{სადაც } (i \text{ იცვლება } 1:19332)$$

ჩვენ შეგვიძლია ავაგოთ შემდეგი ტიპის მატრიცა:

ყოველი  $i$  წვერისათვის ამოვწევროთ დროში წინა 30 მონაცემი. ჩვენი ამოცანაა, ვიპოვოთ ისეთი ფუნქცია  $F$ , რომელიც იპოვოს კავშირს ნებისმიერ  $X_i$ -ს და დანარჩენ 30 წინამორბედ ჩანაწერს შორის.

ამ გზით მიიღება შემდეგი:

$$F(X_i, X_{i+1}, X_{i+2} \dots X_{i+30}) \cong X_{i+31} (1)$$

$F$ -ის ოპტიმიზაციას ეთმობა მთელი მანქანური სწავლების თეორია, რომელიც იყენებს სხვადასხვა ალგორითმებს. ჩვენს ნაშრომში მოვიყვანთ ადამის (1) ღრმა სწავლების ალგორითმს (Adam Optimization Algorithm for Deep Learning).

(1) ფორმულისთვის ნორმირებული სასწავლო შერჩევა რეალური ცხრილის სახით ასე გამოიყურება:

X1	X2	X3	..	..	..	X29	X30	X(31)
2899	2898	2893	..	..	..	2922	2925	2921
2898	2893	2898	..	..	..	2925	2921	2920
2893	2898	2902	..	..	..	2921	2920	2917
2898	2902	2908	..	..	..	2920	2917	2917
2902	2908	2918	..	..	..	2917	2917	2920
2908	2918	2930	..	..	..	2917	2920	2913
..	..	..	..	..	..	..	..	..
..	..	..	..	..	..	..	..	..
..	..	..	..	..	..	..	..	..
..	..	..	..	..	..	..	..	..
2917	2911	2912	..	..	..	2925	2925	2925
2911	2912	2910	..	..	..	2925	2925	2919

საბოლოოდ, მივიღეთ 30 შემავალის და ერთი გამომავალის მქონე სასწავლო შერჩევა.

მნიშვნელოვანია დეტალი ალგორითმიდან, რომელიც პოულობს ყოველ ანათვალსა და მის 30 წინამორბედს შორის კავშირს, უფრო სწორად, ჩვენ ავაგებთ ისეთ მოდელს, როცა შეგვეძლება ყოველი წინა 30 ანათვალთ ავაწყოთ ოპტიმალური პროგნოზი ადამის ქსელის გამოყენებით.

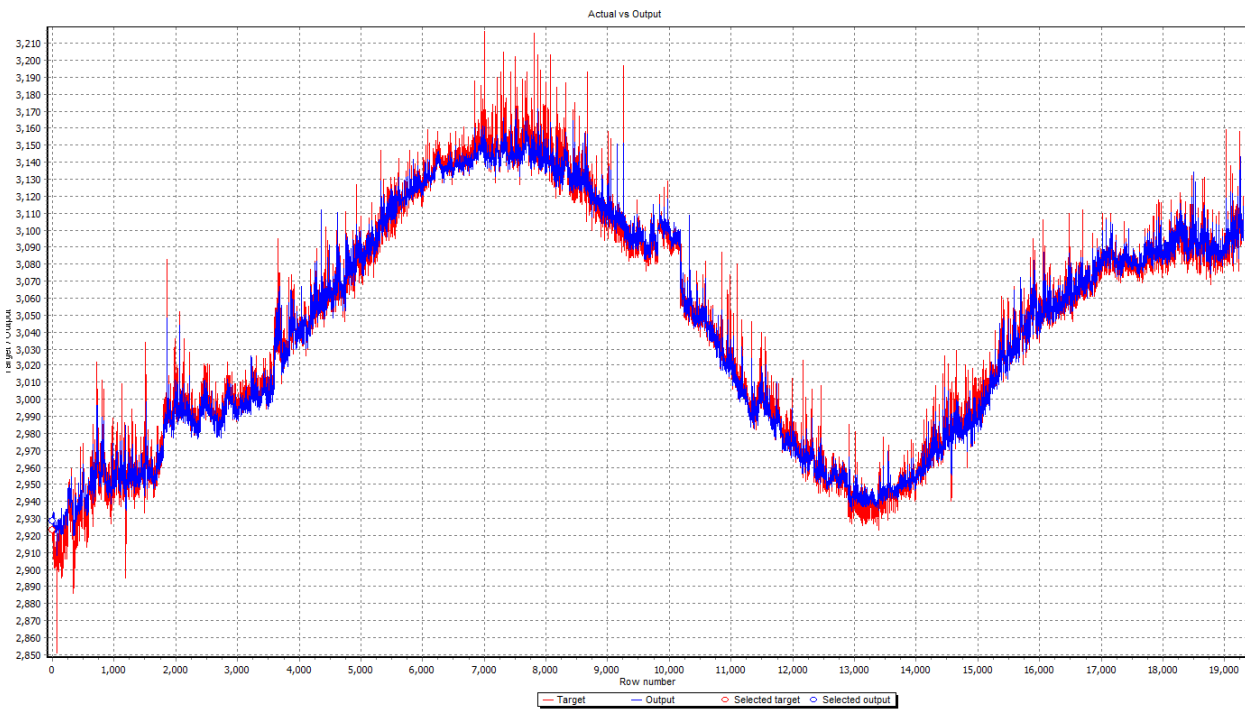
$$w_{t+1} = (1 - \lambda)w_t - \eta \nabla f_t(w_t) \quad (2)$$

როგორც ვიცით, (1)-ის ოპტიმიზაცია სწორედ ადამის ალგორითმში წონათა შერჩევითვის (2) განტოლების ამოხსნა ყოველი საჭირო იტერაციისთვის, (სტანდარტულად 1000 იტერაცია), სადაც  $\lambda$  არის წონათა ვარდნის სამართავი ჰიპერპარამეტრი. აქ, რა თქმა უნდა გვაქვს L2 რეგულარიზაცია გაუმართლებელი წონების შესამცირებლად, რომელიც ემყარება ე.წ ჯარიმების პრინციპს, საბოლოოდ, საძიებელი ფუნქციის მოდიფიცირებას, რომ შეიცავდეს წონათა ვექტორის L2 -ნორმას (4).

ცხრილი 1. 1936-1991 წ.წ. მაგნიტური ველის მიხრილობის 30 დღიანი წინამორბედებით პროგნოზის კონფუზიის (სიცხადის) მატრიცა

Target output:	Network output:									
	<2851	2851 .. 2887.6	2887.6 .. 2924.2	2924.2 .. 2960.8	2960.8 .. 2997.4	2997.4 .. 3034	3034 .. 3070.6	3070.6 .. 3107.2	3107.2 .. 3143.8	3143.8 .. 3180.4
2851 .. 2887.6	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0
2887.6 .. 2924.2	0	0	65	158	1	0	0	0	0	0
2924.2 .. 2960.8	0	0	0	1810	70	0	0	0	0	0
2960.8 .. 2997.4	0	0	0	197	1813	37	0	0	0	0
2997.4 .. 3034	0	0	0	2	444	1224	73	0	0	0
3034 .. 3070.6	0	0	0	0	1	100	1598	142	0	0
3070.6 .. 3107.2	0	0	0	0	1	3	90	2624	165	2
3107.2 .. 3143.8	0	0	0	0	0	0	0	105	1432	39
3143.8 .. 3180.4	0	0	0	0	0	0	0	2	401	494
3180.4 .. 3217	0	0	0	0	0	0	0	1	3	25

ცხრილი 1 გვიჩვენებს მიღებული პროგნოზული მოდელის ხარისხობრივ შეფასებას, მათი ინტერვალური (კლასტერული) გადანაწილების მიხედვით. კონკრეტულად, აქ მოცემულია ჭეშმარიტი და მცდარი დამთხვევები პროგნოზული და რეალური მონაცემების, გამოხატული რაოდენობრივად და კლასტერის მიხედვით.



ნახ. 4. 1936-1991 წ.წ. მაგნიტური ველის მიხრილობის 30 დღიანი წინამორბედებით პროგნოზების გრაფიკი

ნახაზ 4-ზე კარგად ჩანს სასწავლო შერჩევასა და პროგნოზული მოდელის თანხვედრა. წითელი ფერით არის რეალური მონაცემები, ხოლო ლურჯით – პროგნოზული მნიშვნელობები. აშკარაა, რომ ძლიერი ანომალიების გამოცნობა, რომელიც 40-50 წლებში იყო არ არის სანდო, მაგრამ ამ ანომალიების გათვალისწინებით მოდელმა ასეთივე ძლიერი რიგის ანომალიები 80-

იანი წლების ბოლოს გაცილებით კარგად გამოიწვნო. საბოლოოდ, აგებული მოდელისთვის გვაქვს შემდეგი მახასიათებლები:

	Target	Output	AE	ARE
Mean:	3042.505371	3041.840249	5.740834	0.001887
Std Dev:	68.173232	67.271728	5.886604	0.001927
Min:	2851	2908.161365	0.000849	2.71E-07
Max:	3217	3171.404207	101.941242	0.033066
Correlation: 0.992766				
R-squared: 0.98506				

მიღებული შედეგი ცხადყოფს, რომ ნებისმიერი დღის მაგნიტური მიხრილობის მნიშვნელობასა და მის წინამორბედ 30-დღიან მონაცემებს შორის არის მჭიდრო კორელაცია (0.992766). შესწორებული დეტერმინაციის კოეფიციენტი 0,98506 ნიშნავს, რომ ჩვენი პროგნოზული მოდელი თითქმის 99%-ით ახსნის ერთი დღით ადრე, წინა 30 დღეზე დაყრდნობით მოსალოდნელ მომდევნო დღის მიხრილობის მნიშვნელობას.

### დასკვნა

დუშეთის ობსერვატორიის (1935 – 1950 წ.წ.სულ 19332 ანათვალი) მაგნიტური მიხრილობის სტატისტიკურმა კვლევამ აჩვენა, რომ საშუალო ყოველწიური მნიშვნელობების დინამიკა 45 წლიანი ციკლით ხასიათდება. გამოკვეთილია, მაგნიტური მიხრილობის ვარიაციათა მატების - სტატისტიკურად მდგრადი პერიოდულობა. კერძოდ, მინიმალურიდან პიკამდე ასვლას სჭირდება დაახლოებით 15 წელი. 1952 წელს იყო ასეთი ვარიაციების პიკი, ხოლო შემდეგ იწყება კლება 15 წლის მანძილზე. შემდგომ, კი ისევ ასეთივე 15-წლიანი აღმასვლაა მიხრილობის ვარიაციებში.

ამ ყველაფრის გათვალისწინებით, ნაშრომში ავაგეთ ღრმა მანქანური სწავლების ადამის ქსელი და მიღებულია მაღალი ხარისხის საპროგნოზო მოდელი, რომელიც შეიძლება გამოვიყენოთ როგორცყოველდღიური პროგნოზის, ასევე უფრო გრძელვადიანი პროგნოზირების გენერაციისთვის.

### ლიტერატურა - REFERENCES – ЛИТЕРАТУРА

1. Glatzmaier, Gary A .; Roberts, Пол X. (1995). «Трёхмерное самосогласованное компьютерное моделирование разворота геомагнитного поля». Природа. 377(6546): 203–209.
2. Ilya Loshchilov, Frank Hutter. Fixing Weight Decay Regularization in Adam. 2017. arXiv:1711.05101v2.
3. Diederik P. Kingma, Jimmy Ba. A Method for Stochastic Optimization. 22 Dec 2014 (v1), last revised 30 Jan 2017 (this version, v. 9).
4. Kratsios, Anastasis . Deep Arbitrage-Free Learning in a Generalized HJM Framework via Arbitrage-Regularization Data". 2020.

**მაგნიტური (დუშეთი 1935–1989 წწ.) მიხრილობის სტატისტიკა  
და ღრმა თვითსწავლებადი მოდელი**

**ქირია თ., ნიკოლაიშვილი მ., ლომაძე ე., ბერიშვილი გ., მებაღიშვილი ნ.**

რ ე ზ ი უ მ ე

ნაშრომში წარმოდგენილია დუშეთის ობსერვატორიის მაგნიტური მიხრილობის საკმაოდ ხანგრძლივ (1935–1950 წ.წ., სულ 19332 ანათვალი) მონაცემთა ჯერ სტატისტიკური, ხოლო შემდეგ დღეისათვის ფართოდ გავრცელებული ე. წ. მანქანური სწავლების (ML) მეთოდის შესაძლებლობები. მოყვანილია ჰიპოთეზები ზოგიერთი გეომაგნეტური პარამეტრისთვის გარკვეული ფარული კანონზომიერებების და პერიოდულობის დასასაბუთებლად. დადგენილია მაღალი სტატისტიკური მდგრადობის მქონე ე. წ. „მეხსიერებები“. სწორედ ესაა ეტალონური ნიმუშები, რომელსაც ე. წ. ადამის ღრმა სწავლების ქსელის გამოყენებით მიკუთვნების ფუნქციის ასაგებად ვიყენებთ.

**MAGNETIC (DUSHETI 1935-1989) INCLINATION STATISTICS AND  
DEEP SELF-TAUGHT MODEL**

**Kiria T., Nikolaishvili M., Lomadze E., Berishvili G., Mebaghishvili N.**

**A b s t r a c t**

The paper presents a rather long-term (1935 - 1950, total 19332 records) data of Dusheti Observatory on the statistics of magnetic inclination and considers the possibilities of so called machine learning (ML), a widespread method nowadays. It gives hypotheses to prove certain hidden regularities and periodicity of some geomagnetic parameters and determines so called “storages” of high statistical reliability, which are the etalon samples we use to build attribution function by use of so called Adam Deep Learning network.

**СТАТИСТИКА МАГНИТНОГО СКЛОНЕНИЯ (ДУШЕТИ, 1935-1989 г.г.) И МОДЕЛЬ  
ГЛУБОКОГО САМООБУЧЕНИЯ**

**Кириа Т., Николайшвили М., Ломадзе Э., Беришвили Г., Мебагишвили Н.**

**Р е ф е р ა ტ**

В статье представлены довольно длительные (1935 - 1950 г.г., всего 19332 отсчетов) данные магнитного склонения обсерватории Душети, сначала статистические, а затем широко используемый, метод машинного обучения (ML). Приводятся гипотезы для обоснования определенных скрытых закономерностей и периодичности некоторых геомагнитных параметров. Установлена т. н. "устойчивость", с высокой статистической стабильностью. Это те стандартные образцы, которые мы используем с помощью сети глубокого обучения Адама, для построения функции принадлежности.

## КРИТЕРИИ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ

**Китовани Д.Ш.**

Институт геофизики им. Михаила Нодиа Тбилисского государственного университета им. Ивана Джавахишвили, 0160, Тбилиси, ул. М. Алексидзе, 1  
[Kitovani56@mail.ru](mailto:Kitovani56@mail.ru)

Выявление и прослеживание тектонических нарушений имеет большое практическое значение в сейсморазведке, так как к ним часто приурочены месторождения полезных ископаемых. Важно также знать наличие и тип разрывных нарушений (степень, сброс, сдвиг, зона дробления и т.д.) при строительстве крупных объектов для их безопасной эксплуатации.

При определении параметров разрывных нарушений необходимо решать следующие задачи:

1. Определение положения разрыва в плане
2. Определение глубины залегания преломляющей границы на крыльях нарушения, следовательно, и амплитуда разрыва;
3. Определение граничных скоростей по обе стороны от нарушения;

На основании анализа особенностей волнового поля в области сброса, в сейсморазведочной литературе сформулированы критерии для выделения разрывов преломляющей границы.

Эти критерии основаны на особенностях формы годографов, малой амплитуде и аномальном затухании дифрагированных волн. Для уверенного выявления и трассирования сброса необходимы встречные и нагоняющие системы. Повторение особенностей волновой картины над сбросом на нагоняющих годографах при продольном профилировании КМПВ является важным критерием.

Наиболее яркие особенности в волновом поле над сбросом отмечаются при расположении источников возбуждения над поднятым крылом [1,2]

По данным модельных исследований [2,3] и полевых наблюдений [1,4] при возбуждении над поднятым крылом предлагаются следующие критерии выделения сброса:

1. Разрыв годографа со смещением по времени годографов волн от поднятого и опущенного крыльев сброса.
2. Уменьшение кажущейся скорости сопровождающееся локальным или общим понижением интенсивности.
3. Наличие на записи интенсивных волн во вторых вступлениях (головная волна от опущенно-гокрыла и преломленно-дифрагированная волна)

При возбуждении колебаний над опущенным крылом, предлагаются следующие критерии для выделения сброса [2].

1. Увеличение  $V^*$  и смещение годографа.
2. Резкое уменьшение интенсивности волны, вплоть до полного исчезновения в области увеличения  $V^*$ .
3. Наличие интенсивных волн во вторых вступлениях (головная волна от опущенного крыла и преломленно-дифрагированная волна)

В работах [1,4] отмечается, что при любом расположении пункта взрыва в последующих вступлениях наблюдаются быстро следующие друг за другом волны, прослеживающиеся на коротких

интервалах профиля. Эти волны могут быть связаны с отражением или преломлением различных волн на плоскости сместителя и служить косвенным признаком существования сброса.

А.М. Епинатьевой в работах [4,-6] предложены дополнительные критерий для выделения разрывных нарушений. Эти критерий основаны на использовании графиков  $V_{г, инт.}$ . Интервальная граничная скорость  $V_{г, инт.}$  определяется на малой базе  $L$  из соотношения  $V_{г, инт.} = L/\Delta t$ , где  $\Delta t$  – разность времён между двумя соседними изохронами ;  $L$  – расстояние по границе , равное диагонали ромба, образованного системой встречных изохронна преломляющей границе. В результате строится график  $V_{г, инт.}$  вдоль профиля  $V_{г, инт.} = f(x)$ . Для повышения точности определения  $V_{г, инт.}$  применяется сглаживание [ Число точек  $n$ , окно сглаживания  $d = (n-1)L$  ], позволяющее уменьшить помехи случайного характера в  $\sqrt{n}$  раз. Выбирая  $n$  (или  $d$ ), можно настраивать сглаживающие фильтры на выделение неоднородностей с определёнными размерами [1].

Возможность выделения нарушений по графикам  $V_{г, инт.}(x)$  связана с тем, что над сбросами образуются характерные аномалии  $V_{г, инт.}$ , возникающие вследствие интерпретации дифрагированных и проходящих волн как головных. Форма аномалии  $V_{г, инт.}$  при сглаживании способом скользящего среднего по 3 точкам, приведена на рисунке.

Характерный вид аномалий  $V_{г, инт.}$  и рельефа преломляющей границы над сбросом позволил сформулировать новые критерий для выделения сброса [6].

1. Аномальные значения  $V_{г, инт.}$  на локальных участках профиля. Аномалий двух знаков : повышенные и пониженные по сравнению с нормальным значением  $V_{г.}$
2. На графиках  $V_{г, инт.}(x)$  построенных способом полей времён и интервальных граничных скоростей [1,5], зоны повышенных и пониженных значений расположены рядом.
3. Максимум выражен сильнее минимума.
4. Зонам аномальных значений  $V_{г, инт.}$  соответствует плавный изгиб преломляющей границы с погружением ее от положительной части аномалий к отрицательной.

Эти критерии, обладают следующими принципиальными преимуществами:

1. Используется информация по встречной системе наблюдений, а не по отдельным годографам.
2. Информация переносится на преломляющую границу, при этом становится возможной увязка характеристик сейсмических волн с рельефом и скоростными неоднородностями преломляющей границы. Появляется возможность отделить особенности волнового поля, связанные с локальными аномалиями в рельефе преломляющей границы и в граничной скорости, от особенностей, связанных с разрывными нарушениями.

Использование дополнительных критериев [6] позволяет повысить надёжность выделения нарушений. В работах [4,5,6] показано, что с помощью этих критериев могут быть выделены сбросы, которые по другим критериям не выделяются.

Использование при разведке критериев, основанных на анализе волнового поля, позволяет уверенно выделять разрывные нарушения с амплитудами порядка 500 м и более. Применение дополнительных критериев позволяет выделять нарушения с амплитудой 300 м.

Использование критериев, приведённых ниже, ограничивается отсутствием теоретических оценок о минимальных размерах нарушений, которые могут быть выделены по тем или иным критериям, а также отсутствием оценок о минимальных расстояниях между нарушениями при которых они могут быть разделены. Отсутствие подобных данных ограничивает достоверность выделения нарушений, и не позволяет оценить разведочную эффективность сформулированных критериев.

### Амплитуда сброса

Амплитуда определяется по характерным точкам аномалии  $V_{г, инт.}$  над сбросом. В качестве одного из возможных способов приводится приближенное решение задачи, основанное на использовании ширины  $\Delta x$  зоны минимума. Формула для  $\Delta x$  выведена в предположении что волна от источника возбуждения, расположенного над поднятым крылом, достигает верхнего и нижнего ребер сброса одновременно

$$\Delta x = [nh + (h^2 + 2Nh)^{1/2}] / (1-n^2)^{1/2} n = V_1 / V_2$$

Величина  $\Delta x$  тем больше, чем больше глубина  $H$ , скорость  $V_1$  и амплитуда  $h$ , и чем меньше  $V_2$ . Главное влияние на  $\Delta x$  оказывает  $h$ . Для определения амплитуды сброса необходимо знать  $V_1, V_2, H, \Delta x$ .  $V_1$  полагается известной.  $H$  и  $V_2$  определяются при интерпретации годографов вне сброса.

#### **ლიტერატურა - REFERENCES- ЛИТЕРАТУРА**

1. Авербух Г.А. Интерпретация материалов сейсморазведки преломленными волнами, М. Недра 1975.
2. Рогоза Е.В., Гаранин А.П. О природе и особенностях волн наблюдаемых при трассировании сбросов в КМПВ. Прикладная геофизика, №34, 1962.
3. Стадник Г.Г. Особенности сейсмических волн в угловой области образуемой неоднородностью среды типа сброса. Сборник "Методика и геологические результаты геофизических исследований в Припятской впадине", Минск, 1967/
4. Епинатьева А.М. Применение КМПВ для изучения разрывных нарушений и зон разломов. Обзор ВИЭМС. Серия региональная, разведочная и промысловая геофизика., М., 1982.
5. Епинатьева А.М. Применение КМПВ для разведки тектонических нарушений в некоторых сложно-построенных средах. Геофизический сборник, вып.85, Киев, 1978.
6. Епинатьева А.М. Дополнительный критерий для разведки тектонических нарушений методом КМПВ. Геофизический сборник, вып.78, Киев, 1977.

#### **რღვევის გამოყოფი სკრიტიუმიების შესახებ**

**კიტოვანი დ.**

**რ ე ზ ი უ მ ე**

სტატიაში მოყვანილია კრიტერიუმები, რომელთა საშუალებით შესაძლებელია ტექტონიკური რღვევის აღმოჩენა და მისი პარამეტრები სდადგენა.

#### **ABOUT THE CRITERIAS OF SEPARATION OF TECTONIC DISTURBANCES**

**Kitovani D.**

**A b s t r a c t**

The article is referred to the criterias useful for finding the tectonic disturbances and defining their parameters.

#### **КРИТЕРИИ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ**

**Китовани Д.Ш.**

**Р е ф е р а т**

В статье приводятся критерии, с помощью которых возможно обнаружить и установить параметры тектонических нарушений.



## СЛУЧАЙНЫЕ ПОМЕХИ В ИНТЕРВАЛЬНОЙ ГРАНИЧНОЙ СКОРОСТИ ( $V_{Г.инт}$ )

**Китовани Д. Ш.**

Институт геофизики им. Михаила Нодиа Тбилисского государственного университета  
им. Иванэ Джавахишвили, 0160, Тбилиси, ул. М. Алексидзе, 1  
[Kitovani56@mail.ru](mailto:Kitovani56@mail.ru)

Годографы преломленных волн, полученные при полевых наблюдениях, также как и результаты любых геофизических наблюдений осложнены случайными помехами (геологическими и техническими). Эти случайные помехи при интерпретации приводят к появлению флуктуаций граничной скорости и рельефа преломляющей границы, носящих также случайный характер. Для подавления помех широко используется пространственная фильтрация графиков  $V_{Г.инт}(x)$ . Однако вопрос о выборе наиболее эффективных для выделения нарушений параметров фильтрации практически не рассматривается. В [1,2] сформулированы лишь требования к фильтрам и указывается, что для  $h \leq 1.5$  км. предлагается использовать сглаживание по 11 точкам. Для выбора оптимальных параметров фильтрации и оценки ее эффективности необходимо знать закон распределения и параметры случайной помехи. На основании исследования указанных параметров ниже оценивается точность определения  $V_{Г.инт}$  при сглаживании способом скользящего среднего в зависимости от числа точек. Напомним, что интервальная граничная скорость определяется на малой базе  $L$  из соотношения  $V_{Г.инт} = L / \Delta t$  где  $\Delta t$  разность времен между двумя соседними изохронами.  $L$  - расстояние по границе, равное диагонали ромба, образованного системой встречных изохрон на преломляющей границе. В результате строится график интервальной граничной скорости вдоль профиля  $V_{Г.инт} = f(x)$ . Для повышения точности определения  $V_{Г.инт}$  применяется метод математического сглаживания [число точек  $n$ , окно сглаживания  $d=(n-1)L$ ] позволяющее уменьшить помехи случайного характера  $\sqrt{n}$  раз. Выбирая  $n$  (или  $d$ ), можно настраивать сглаживающие фильтры на выделение неоднородностей с определенными размерами [3].

### Определение параметров случайной помехи

Стандартные приемы оценки параметров случайной помехи требуют ее аддитивности и линейности. При оценке параметров по множеству наблюдений требуется также стационарность помехи [4]. Определим условия, при которых эти требования выполняются.

Пусть прямой и обратный годографы представлены в виде  $t(x) = t_d(x) + t_{сл}(x)$  (для прямого годографа),  $t(x) = t_d(x) + t_{сл}(x)$  (для обратного годографа), где  $t_d$  и  $t_{сл}$  детерминированная и случайная компоненты. Рассмотрим горизонтальную преломляющую границу, вдоль которой  $V_G$  меняется по закону  $V_G(x)$ . Дифференцируя эти формулы получим в точках профиля  $X_1, X_2$  сопряженных с точкой границы  $X$ :

$$1/V(X_1) = 1/V_d(X) + dt_{сл}(X) / dx \quad (\text{прямой годограф})$$

$$1/V(X_2) = 1/V_D(X) + dt_{сл}(X) / dx \quad (\text{обратный годограф})$$

Суммируя эти две формулы, получим:

$$2/V_{Г}(X) = 2V_D(X) + dt_{сл}(X) / dx \quad (\text{прямой}) + dt_{сл}(X) / dx \quad (\text{обратный})$$

$$\text{Введем обозначение } t'_{сл}(X) = 1/2(dt_{сл}(X) / dX \text{ (пр)} + dt_{сл}(X) / dx \text{ (обр)})$$

$$\text{Полагая что } t'_{сл}(X) \ll 1/V_{Г}^2(X) \text{ получим: } V_{Г}(X) = V_D(X) - V_D^2 \cdot t'_{сл}(X).$$

Отсюда следует, что случайная погрешка в граничной скорости  $V_{Г}$  может считаться аддитивной, если ее уровень значительно ниже детерминированной компоненты и преломляющая граница близка к плоской. Поскольку случайная компонента пропорциональна квадрату детерминированной компоненты ( $V_{Г,сл} = -V_D^2(x)t'_{сл}(x)$ ), ее можно считать линейной и стационарной только, если колебания  $V_D(x)$  по множеству наблюдений незначительны.

### **Закон распределения случайной погрешки**

Оценка закона распределения проводилась путем математического моделирования. Эта модель обеспечивает выполнение условий стационарности и линейности погрешки (модель с постоянной граничной скоростью и горизонтальной преломляющей границей). В прямолинейные годографы головных волн вводилась равномерно распределенная случайная погрешка с дисперсией  $\sigma_t$ . При интерпретации этих годографов получен график  $V_{Г\text{ инт}}(x)$  также осложненный случайной погрешкой с дисперсией  $\sigma_{сл}$ . Величина  $\sigma_t$  изменялась в таких пределах, что  $\sigma_{сл} \ll V_2$ , где  $V_2$  скорость заданная в модели. Это условие обеспечивает аддитивность погрешки. Поскольку случайная погрешка аддитивна, линейна и стационарна, корреляционная функция и закон распределения могут быть определены по множеству наблюдений.

### **Точность определения $V_{Г\text{ инт}}$**

Варьирование  $\sigma_t$  показало, что дисперсия случайной погрешки в интервальной граничной скорости  $\sigma_{сл}$  линейно возрастает с ростом  $\sigma_t$ . Точность вычисления  $V_{Г\text{ инт}}$  таким образом определяется дисперсией случайной погрешки в годографе, которая обусловлена геологическими и тектоническими погрешками. Для подавления случайной погрешки в  $V_{Г\text{ инт}}$  эффективно применение сглаживающей фильтрации [1,5]. Наличие отрицательной корреляционной связи между соседними значениями  $V_{Г\text{ инт}}$  приводит к тому, что с ростом числа точек сглаживания  $n$ , нормированная дисперсия  $\sigma_{сл,n} / \sigma_{сл}$  убывает быстрее, чем  $1/\sqrt{n}$ . С ростом  $\sigma_{сл}$  корреляционная связь между соседними точками ослабевает и зависимость  $\sigma_{сл,n} / \sigma_{сл}$  от  $n$  приближается к  $1/\sqrt{n}$ . Таким образом, точность определения интервальной граничной скорости при использовании сглаживающих фильтров возрастает с ростом базы сглаживания по квазилинейному закону, если считать, что точность обратно пропорциональна дисперсии случайной погрешки. При ручной интерпретации полей времен в графиках  $V_{Г\text{ инт}}$  появляются погрешки, связанные с ошибками графических построений тестовых примеров. Компьютерная обработка данных повышает не только скорость, но и точность интерпретации. Это доказано многочисленными тестами.

## ლიტერატურა - REFERENCES- ЛИТЕРАТУРА

1. Епинатьева А.М. Применение КМПВ для изучения разрывных нарушений и зон разломов. Обзор ВИЭМС. Серия региональная, разведочная и промысловая геофизика., М., 1982.
2. Епинатьева А.М. Применение КМПВ для разведки тектонических нарушений в некоторых сложно-построенных средах. Геофизический сборник, вып. 85, Киев, 1978.
3. Епинатьева А.М. Невский М.В. Граничная скорость. Геофизический сборник АН УССР. вып.65, Киев, 1975.
4. Рогоза Е.В., Гаранин А.П. О природе и особенностях волн наблюдаемых при трассировании сбросов в КМПВ. Прикладная геофизика, №34, 1962.
5. Епинатьева А.М. Дополнительный критерий для разведки тектонических нарушений методом КМПВ. Геофизический сборник, вып.78, Киев, 1977.

### შემთხვევითი ცდომილებები ინტერვალურ საზღვრით სიჩქარეში ( $V_{\text{инт}}$ ) კიტოვანი დ.

რ ე ზ ი უ მ ე

სტატიაში ლაპარაკია იმაზე, თუ რა პირობებშია შესაძლებელი შემთხვევითი ცდომილებების მინიმიზაცია ინტერვალური საზღვრითი სიჩქარის გრაფიკში.

### RANDOM INTERFERENCE AT INTERVAL BOUNDARY SPEED ( $V_{\text{инт}}$ ) Kitovani D.

A b s t r a c t

The article describes in what cases it is possible minimize random noise in the graph of the interval boundary velocity.

### СЛУЧАЙНЫЕ ПОМЕХИ В ИНТЕРВАЛЬНОЙ ГРАНИЧНОЙ СКОРОСТИ ( $V_{\text{инт}}$ )

Китовани Д.Ш.

Р е ф е р а т

В статье говорится при каких условиях можно минимизировать случайные помехи в графике интервальной граничной скорости.

## ИНЕРЦИОННОСТЬ УРОВНЯ ВОДЫ В ГЛУБОКИХ СКВАЖИНАХ ГРУЗИИ

**Кобзев Г. Н., Кереселидзе З. А., Меликадзе Г. И., Джимшеладзе Т. Дж.**

Институт геофизики им. Михаила Нодиа Тбилисского государственного университета им. Ивана Джавахишвили, 0160, Тбилиси, ул. М. Алексидзе, 1  
[kobzev47@gmail.com](mailto:kobzev47@gmail.com)

### Аннотация

Существует несовпадение между временем достижения экстремума гравитации и экстремума колебаний воды,  $timeDifference$ , в скважинах. Существуют также разные способы вычисления связи между изменением гравитации и уровнем воды в линейной форме.

Для глубоких скважин Грузии показано: если колебания уровня воды следуют за изменениями гравитации, то  $timeDifference$  подчиняется нормальному закону распределения с медианой  $\mu$  и стандартным отклонением  $\sigma$ . Указаны скважины с медианой  $\mu=0$  и  $\mu \neq 0$ . Если медиана  $\mu \neq 0$ , то, искусственно изменяя время для уровня воды, можно более точно определить коэффициент линейной связи.

### Предисловие

Гравитация и атмосферное давление оказывают воздействие на уровень воды в скважине, в результате на графике уровня воды видны четкие колебательные движения.

На первый взгляд все просто: под воздействием, например, гравитации вода перемещается из скважины в окружающие породы, а потом наоборот. Такое движение должно осуществляться с задержкой, ибо приходится преодолевать сопротивление в породах, окружающих скважину. Задержка во времени (инерционность,  $timeDifference$ ) должна быть, видимо, всегда и в обычных условиях постоянна. Но так ли это?

### Вопросы

- а) Вода обычно с задержкой реагирует на  $tidalZ$  ( $timeDifference > 0$ ). Существуют примеры, когда вода “опережает”  $tidalZ$  ( $timeDifference < 0$ ). Какому же закону подчиняется  $timeDifference$ ?
- б) Существует ли связь между  $timeDifference$  и линейным коэффициентом  $A$ , который определяют при выяснении линейной связи между скоростью воды и скоростью  $tidalZ$ ?
- б) Изменяется ли для скважины линейный коэффициент  $A$  в разные годы?
- в) При сравнении скорости воды (на оси  $Y$ ) со скоростью гравитации  $tidal$  (на оси  $X$ ) обнаружено, что между ними имеется линейная связь с коэффициентом  $A$  [1]. Насколько существенна связь между задержкой во времени и амплитудой воды, реагирующей на воздействие  $tidal$ ?
- г) Вычислим для скважин Марнеули, Кобулет, Накалакеви значения  $timeDifference$ . Если они  $\neq 0$ , то увеличится ли коэффициент  $A$ , если время задержки воды по отношению к  $tidal$  уменьшать, искусственно смещая  $timeDifference$  к 0?

## Определение

$tidal = -tidalZ$ , где  $tidalZ$  есть Z-составляющая гравитации.

Перейдем к изучению временных задержек  $timeDifference$  в скважинах.

Определимся со способом подсчета  $timeDifference$ . График на рис.1 предназначен для пояснений.

$TimeDifference$  будет определено двумя способами:

- 1) Разница между временем достижения *минимума* в *tidal* и временем достижения *минимума* в *water*.
- 2) Разница между временем достижения *максимума* в *tidal* и временем достижения *максимума* в *water*.

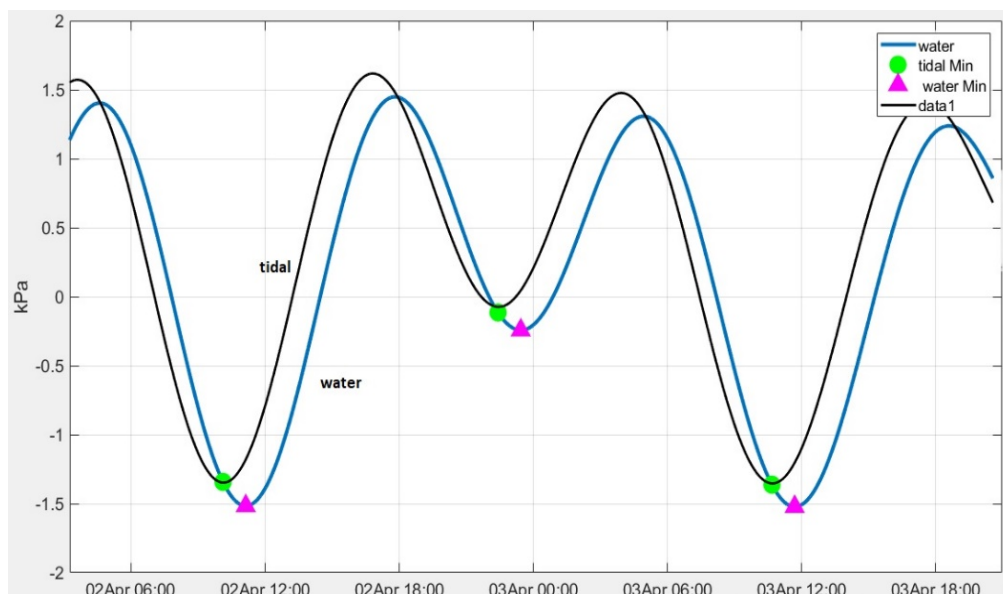


Рис.1.  $TimeDifference$  здесь определено как время между достижением минимума в *tidal* и минимума в *water* (вода). Голубая линия – вода, черная – гравитация

## Факты

Обработка данных для скважин Марнеули, Кобулети, Накалакеви показала, что значения  $timeDifference$  распределены по закону нормального распределения (табл.1). Однако это правило не выполняется для Ахалкалаки.

На рис.2 приведены значения  $timeDifference$  для Марнеули, вычисленные при сравнении точек минимума ( $timeMinPoints$ ) между собой, а также при сравнении точек максимума ( $timeMaxPoints$ ). Для скважины  $timeDifference$  подчиняется закону нормального распределения с медианой  $\mu = -5.75$  мин и стандартным отклонением сигма  $\sigma = 39$  мин. Присутствуют отдельные отклонения в 100, а также -100 мин.

Для Марнеули существует как задержка, так и опережение времени экстремумов гравитации. Это связано с инерционностью процесса взаимодействия скважины с окружающей средой. Формирование точек минимума или максимума у воды может измениться (задержаться/ускориться) при расширении или сжатии в среде, окружающей скважину. Надо также учитывать и технический момент – наличие мелких колебаний (шумы) при записи значений уровня воды, что приводит к неоднозначности определения времени экстремума.

## Связь медианы $\mu$ задержки времени и коэффициента связи $A$

Существует связь между инерционностью реакции воды, точнее со значением медианы  $\mu$ , и вычисленным коэффициентом линейной связи  $A$  между скоростью гравитации и скоростью воды. Для реального уровня воды необходимо ориентироваться на его медиану.

**Пример 1.** Медиана  $\mu=0$ .

В 2019 г. для Марнеули медиана  $\mu$  равна  $-5.7$  мин., т.е.  $\approx 0$ . Коэффициент связи  $A$  между скоростью гравитации и скоростью воды оказался максимальным, что выяснилось после экспериментов по изменению времени воды и пересчете коэффициента  $A$ .

**Пример 2.** Медиана  $\mu \neq 0$ .

В 2020 г. для Кобулету медиана  $\mu=+48$  мин.,  $\sigma=45$  мин. и  $A=0.119$ . Если истинное время воды уменьшить на 48 мин. (тогда медиана  $= 0$ ), то значение  $A$  увеличится на 8.5%.

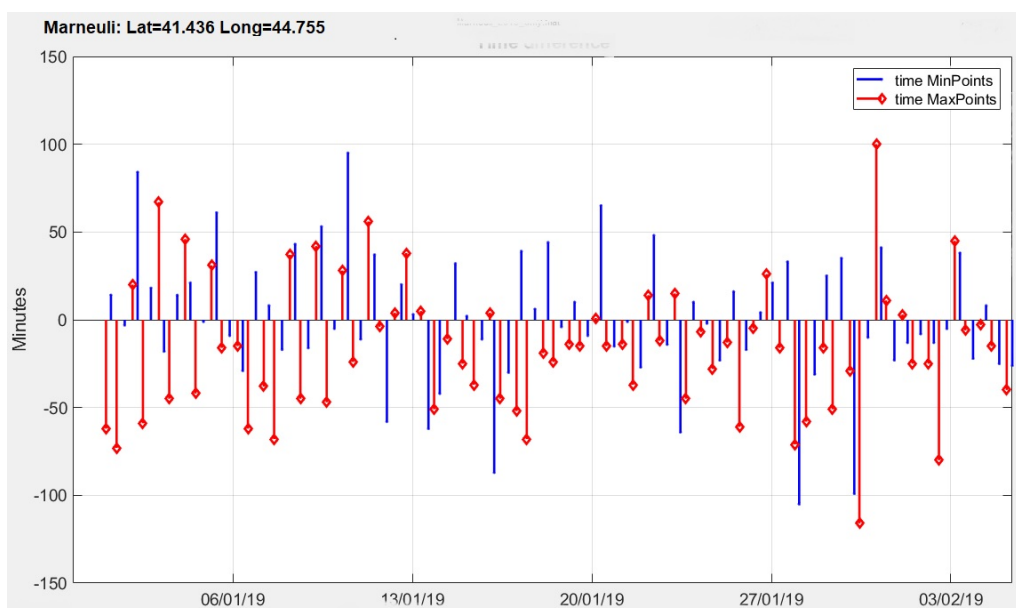


Рис.2. Отклонения во времени, timeDifference, Марнеули, 2019 г.

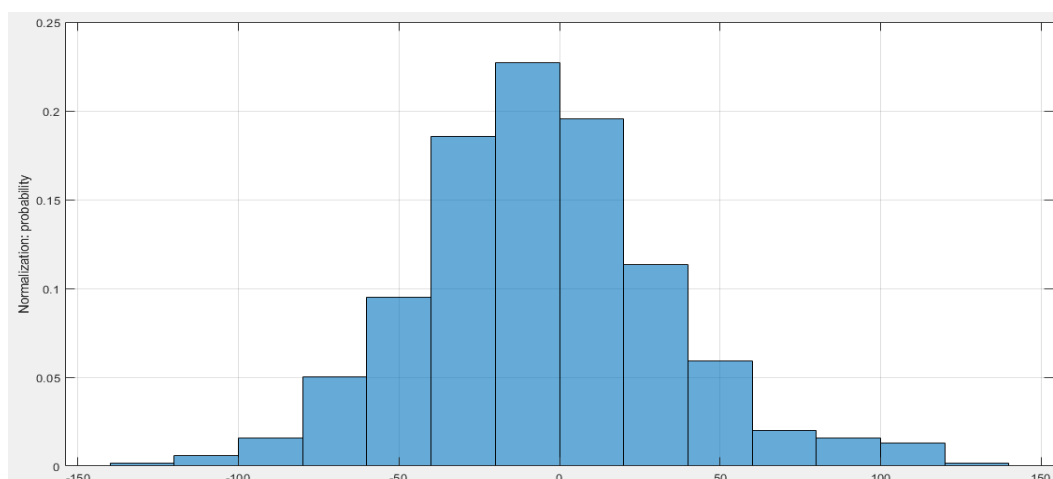


Рис.3. Гистограмма timeDifference для Марнеули, 01/01/2019-01/07/2019.  
 $\mu=-5.75$  мин.,  $\sigma=39$  мин.

**Таблица 1.** TimeDifference скважин

Скважина, год	Медиана минуты	μ, Сигма σ, минуты
Марнеули, 2019	-6	39
Марнеули, 2020 (3мес,6 мес)	-3, -3.8	34, 42.7
Накалакеви, 2019	-0.4	55
Накалакеви, 2020, (3 мес, 6 мес)	-4, -3.8	53, 77.8
Кобулети, 2018	52	42
Кобулети, 2019	46	45
Кобулети, 2020 (3 мес, 6 мес)	48, 50.6	45, 53
Лагодехи, 2019	130	51
Лагодехи, 2020, (3 мес, 6 мес)	125, 128.6	53, 82.1

Из табл.1 видно, что в Марнеули колебания воды совпадают с колебаниями гравитации. Для Кобулети характерна задержка колебания воды на 46-52 мин, а в Лагодехи присутствует задержка на 125-130 мин. по сравнению с колебаниями гравитации. Стандартные отклонения σ для всех скважин сопоставимы (34-55 минут).

### Следствие из таблицы 1

Если выдвигается гипотеза о линейной связи изменения уровня воды и гравитационной компоненты tidalZ:

$$water = a * atmos + b * tidalZ + \dots$$

то она может быть справедлива, если медиана  $\mu=0$ . Если же  $\mu \neq 0$ , то при нахождении коэффициентов уравнения имеет смысл изменить (уменьшить или увеличить) время для *water* с тем, чтобы медиана стала равна 0 и лишь потом искать коэффициенты.

### Изменения коэффициента А для скорости в разные годы

#### Определение.

Пусть X - некоторая переменная, измеренная в момент  $t=1,2,3,\dots$

Для подсчета скорости в момент t при  $\Delta t=360$  минут, скорость

$$v(X)=d(X)/dt=(X(t+\Delta t/2)-X(t-\Delta t/2))/\Delta t$$

Таким способом подсчитывается скорость воды  $v(water)$  и гравитации  $v(tidal)$ .

В данном эксперименте пары чисел  $v(water(i))$  и  $v(tidal(i))$  накапливаются 3 дня и вычисляется один коэффициент А линейной связи  $v(water)=A*v(tidal)+B$  для этих трех дней. Далее 3х-дневное окно сдвигается на 1 час и процедура вычисления А повторяется.

Выясним изменения коэффициента скорости А между скоростью воды и скоростью tidal в разные годы. Условие: сдвиг 360 минут, накопление 3 дня, передвижение 1 час.

Изучим значения уровня воды за 6 месяцев для 2016, 2017,2019 гг., а также за 3 месяца для 2018 г., начиная с 1 января соответствующего года.

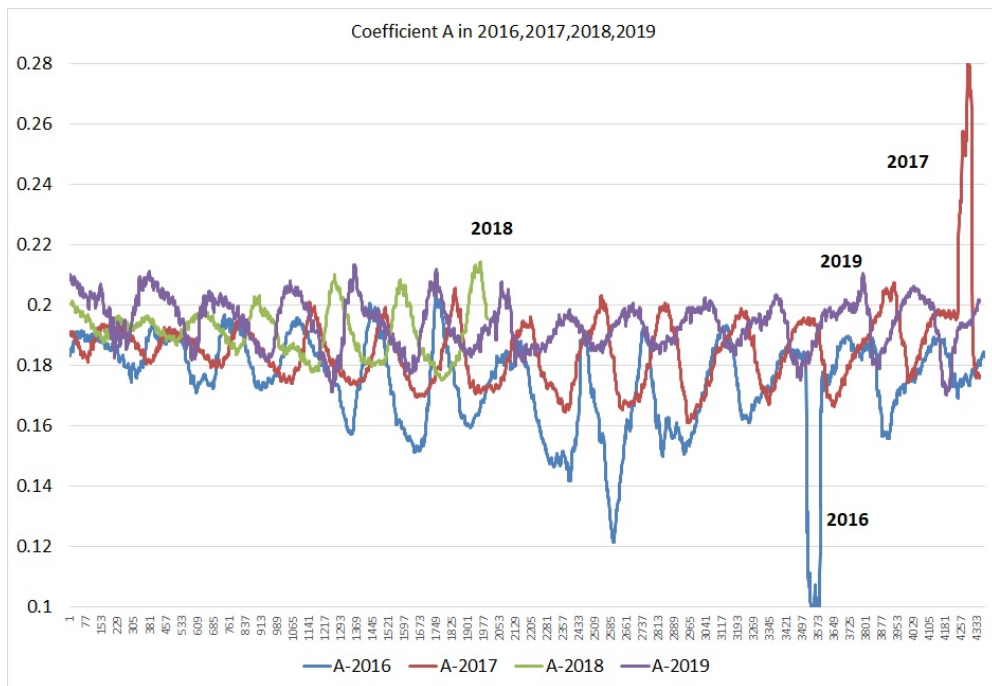


Рис.4. Изменения в Марнеули коэффициента А в 2016-2019 годы, считая от 1 января.

Сравнения для 360 минут, накопления – 3 дня, окно сдвигается на 1 час.

Для Марнеули в значениях коэффициента А наблюдается периодичность. В первом полугодии каждого года есть 13 циклов, период одного цикла равен 14 дней. Относительно своего стартового значения величина А изменяется, но незначительно.

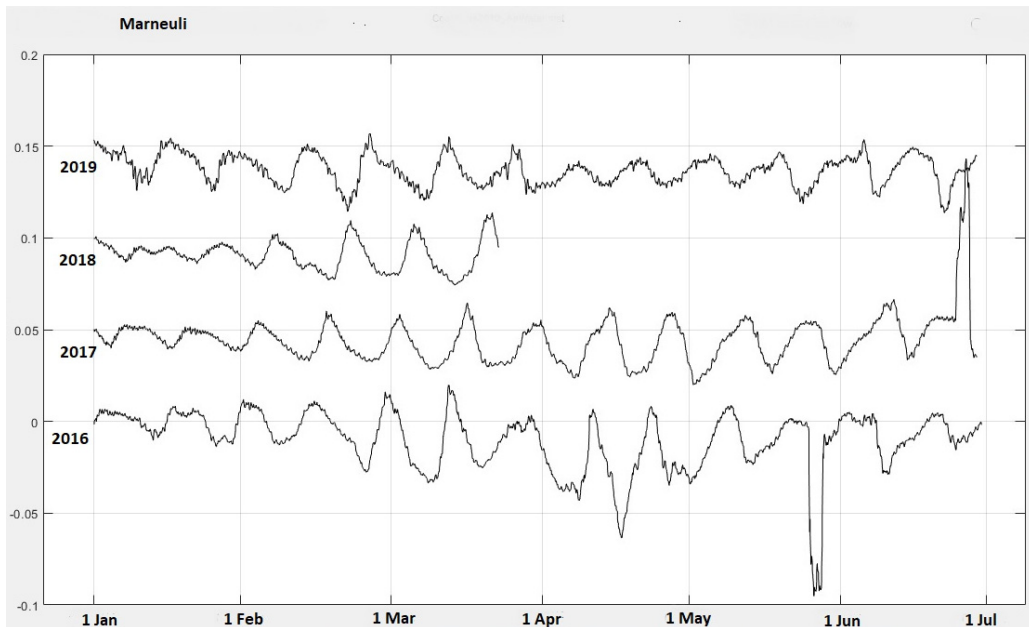


Рис.5. Марнеули. Изменения коэффициента А за 6 месяцев в 2016-2019 гг. Значения искусственно сдвинуты один выше другого на 0.05.



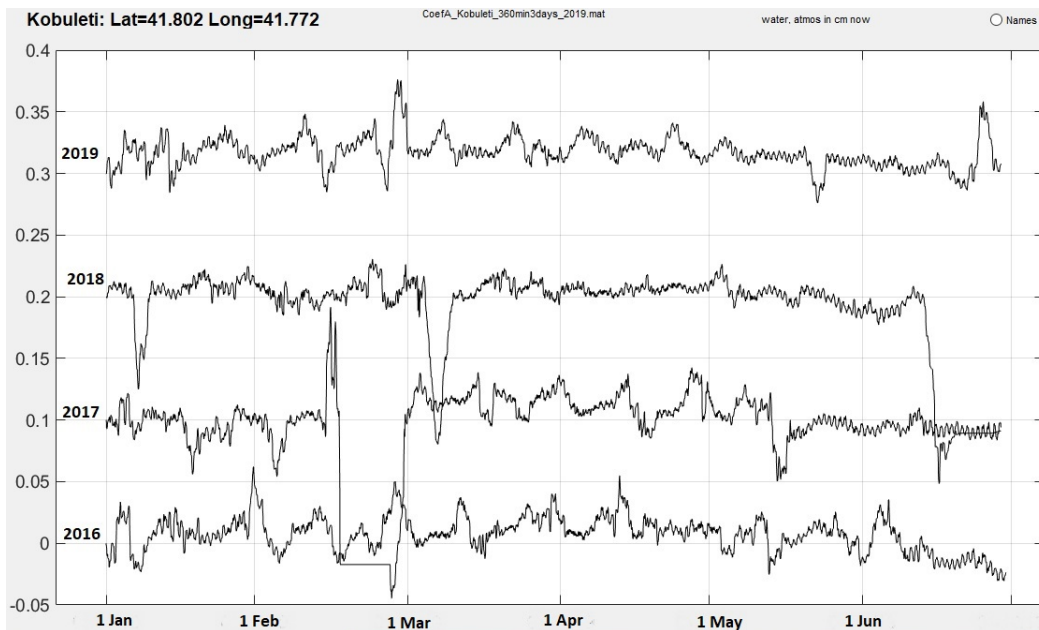


Рис.6. Кобулет. Изменения коэффициента А за 6 месяцев в 2016-2019 гг.  
Значения А искусственно сдвинуты один выше другого на 0.1.

Для расчета коэффициента линейной связи между гравитацией и уровнем воды можно привлечь, как метод, разложение Фурье. Тогда, если осуществить выборку в Марнеули (2020 г.) только для интервала [0.4-0.52] дня, то получим строго линейную зависимость с  $A=0.18112$ . При выборке только из интервала [0.9-1.12] дня коэффициент  $A=0.21419$ . Но подсчитанный методом скоростей коэффициент А также находится в диапазоне [0.18-0.21], изменяясь периодически (рис.4,5). Кстати, периодичность является причиной того, почему при получении тренда уровня воды и использовании единого коэффициента А приводит к ограниченному успеху.

## Выводы

Если в скважине изменения уровня воды хорошо следуют за изменением гравитации, то задержки во времени `timeDifference` подчинены нормальному распределению с медианой  $\mu$  и стандартным отклонением  $\sigma$ .

Для Марнеули медиана равна 0 и все значения `timeDifference` оказываются в интервале [-100 100] мин. Для Кобулет медиана  $\neq 0$ , поэтому задержки во времени `timeDifference` по сравнению с гравитацией являются постоянными. Значения меняются от +10 до +100 минут. Изредка наблюдаются отрицательные значения.

Коэффициенты линейной связи между скоростью воды и скоростью гравитации, меняясь во времени периодически, остаются в определенном интервале. Наблюдаются и отклонения от нормы, что представляет определенный интерес.

**Благодарность.** Работа выполнена при поддержке национального научного фонда Грузии им. Шота Руставели – Грант– № FR17\_633.

## ლიტერატურა – REFERENCES- ЛИТЕРАТУРА

1. Кобзев Г.Н., Кереселидзе З., Меликадзе Г. И., Джимшеладзе Г. Дж. Реакция воды на гравитацию в глубоких скважинах Грузии. Методы вычислений. pp.133-143. Труды Института геофизики им. М. Нодиа. ISSN 1512-1135, т. LXX, 2019.

## **წყლის დონის ინერციულობა საქართველოს ღრმა ჭაბურღილებში**

**კობზევი გ., კერესელიძე ზ., მელიქაძე გ., ჯიმშელაძე თ.**

**რ ე ზ ი უ მ ე**

გამოთვლილ იქნა საქართველოს ტერიტორიაზე განლაგებულ ჭაბურღილებში წყლის დაგვიანებული რეაქცია გრავიტაციაზე. განისაზღვრა წყლისა და გრავიტაციის სიჩქარეებს შორის კავშირის A კოეფიციენტის ცვლილების პერიოდულობა, ასევე კოეფიციენტზე წყლის დაგვიანებული რეაქციის გავლენა.

## **TIME DIFFERENCE OF WATER LEVEL IN DEEP BOREHOLES OF GEORGIA**

**Kobzev G., Kereselidze Z., Melikadze G., Jimsheladze T.**

**A b s t r a c t**

The delay times of water reaction to gravity in deep boreholes of Georgia are calculated. The periodicity of the change in the coefficient A of the relationship between the speed of water and the speed of gravity, as well as the influence of the delay in the reaction of water on the coefficient is noted.

## **ИНЕРЦИОННОСТЬ УРОВНЯ ВОДЫ В ГЛУБОКИХ СКВАЖИНАХ ГРУЗИИ**

**Кобзев Г., Кереселидзе З., Меликадзе Г., Джимшеладзе Т.**

**Р е ф е р ა ტ**

Вычислены времена задержки реакции воды на гравитацию в глубоких скважинах Грузии. Отмечена периодичность изменения коэффициента A связимежду скоростью воды и скоростью гравитации, а также влияние задержки реакции воды на коэффициент.

## გეოდინამიკური მონიტორინგის ორგანიზება ენგურის კაშხლის მგომარეობის შეფასების მიზნით

**მელიქაძე გ., გოგუაძე ნ.**

ივ. ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი,  
მიხ. ნოდია სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი  
[melikadze@gmail.com](mailto:melikadze@gmail.com); [ninogogvadze2@gmail.com](mailto:ninogogvadze2@gmail.com)

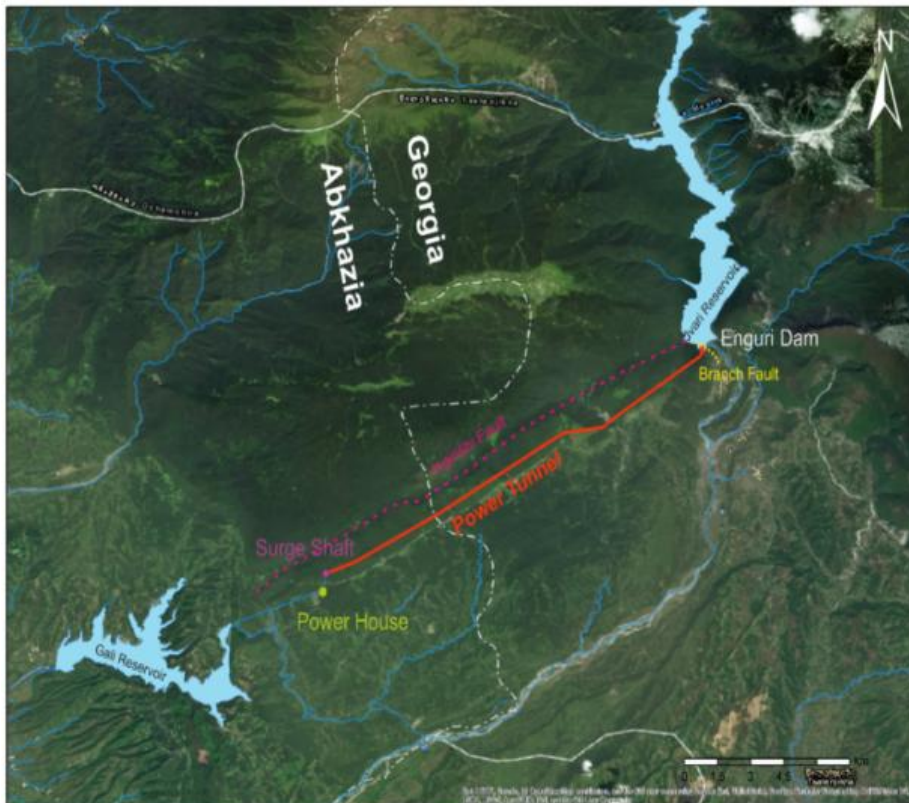
### შესავალი

გერმანიის ფედერალური განათლებისა და კვლევის სამინისტროს მიერ დაფინანსებული გრანტის „ენგურის კაშხალთან ინგურიშის რღვევის რეაქტივაციის პოტენციალის შეფასების“ ფარგლებში 2020 წლის მეორე ნახევარში დაიწყო კვლევები ენგურის კაშხლის გეოდინამიკური სიტუაციის შესწავლისა და მისი უსაფრთხოების შეფასების მიზნით. გრანტი ასევე დაფინანსებულია შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონის ახალაგაზრდა მეცნიერთა კვლევების გრანტით დაფინანსების კონკურსი 2019-ით. კვლევები ითვალისწინებენ მუდმივ მოქმედი მონიტორინგის ორგანიზაციას კაშხლის მიმდებარე ტერიტორიაზე.

როგორც ცნობილია ენგურის წყალსაცავს საქართველოსთვის დიდი ეკონომიკური მნიშვნელობა აქვს (სარწყავი და სასმელი წყლის წყალმომარაგება, წყალდიდობისგან დაცვა, განახლებადი ენერჯია, ენერგოდამოუკიდებულება). შესაბამისად, მეტად მნიშვნელოვანია მისი უსაფრთხოების და მდგრადობის უზრუნველყოფა.

საქართველოში ენგურის კაშხალი საიმედოდ და უსაფრთხოდ დაიგეგმა და აშენდა 1977 წელს, იმ პერიოდის არსებული თანამედროვე ტექნიკის შესაბამისად. უსაფრთხოების უზრუნველყოფის მიზნით წყალსაცავის წყლით შევსებასთან ერთად პარალელურად მიმდინარეობდა სეისმური მონიტორინგი. სხვა რეზერვუარებთან შედარებით, როგორც არის მაგალითად „კოინა ვარნას“ რეზერვუარი, სადაც წლიური წყლის დონის ცვლილებები შეადგენს მხოლოდ 30 მ-ს და რომელმაც გამოიწვია 6.5 მაგნიტუდის მიწისძვრა, წყლის დონის ცვლილება ენგურის წყალსაცავში ბევრად უფრო მაღალია და შეადგენს 100 მ. წყლის დონის ცვლილებები (სეზონური), ასევე კლიმატურ ცვლილებებთან დაკავშირებული ინტენსიური წვიმის მოვლენები და ასევე ნელი, მაგრამ მოულოდნელი ნალექების გადაადგილება, ყველა ეს ფაქტორიც უნდა განიხილებოდეს ახლო მდებარე ტექტონიკური რღვევების გააქტიურების (რეაქტივაციის) მიზეზად.

„ენგურის კაშხალთან ინგურიშის რღვევის რეაქტივაციის პოტენციალის შეფასების“ პროექტი მიზნად ისახავს ენგურის კაშხლის ტერიტორიაზე მდებარე „ინგირიშის“ სეისმოაქტიური რღვევის შესაძლო გააქტიურებით გამოწვეული ინდუცირებული სეისმურობის შესწავლას, რეზერვუარის დღევანდელი გეოდინამიკური მდგომარეობის იდენტიფიცირებას, მასზე მონიტორინგს და საქართველოსთვის მნიშვნელოვანი ენერგომომარაგების სისტემის უსაფრთხო და ეფექტური ფუნქციონირების უზრუნველყოფას.



ნახ. 1. საკვლევი ტერიტორიის მიმომხილველი რუკა

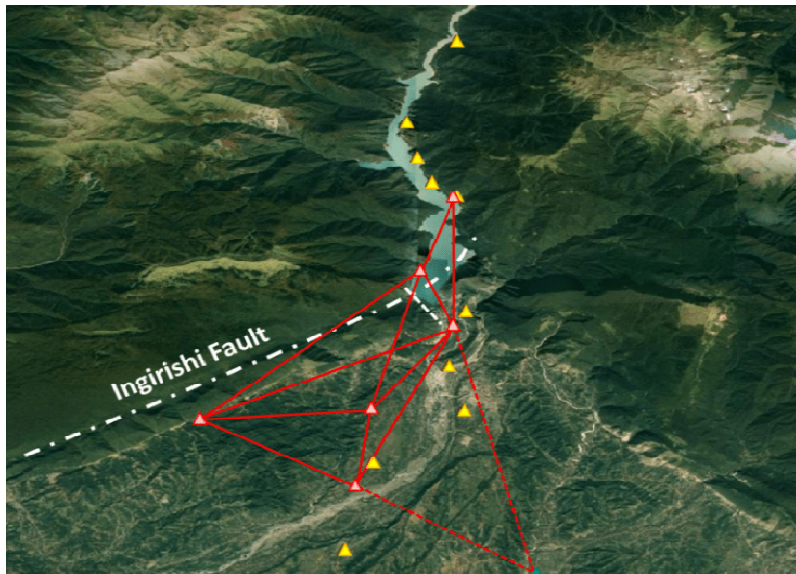
ლურჯი ფერით დატანილია ჯვარის და გალის წყალსატევები, წითელი ფერით-ენგურის კაშხლისა და გალის წყალსატევის ზემოთ მდებარე ენერგო სადგურის დამაკავშირებელი გვირაბი.

### კვლევის მეთოდика

კაშხალთან დღემდე მოქმედებს სეისმოლოგიური დაკვირვებების მცირე რაოდენობის სამონიტორინგი სადგურები და კაშხლის ტანში არსებული გეოდინამიკური მონიტორინგის მცირე რაოდენობის დახრისმზომები. კვლევის მიზნის მისაღწევად, კერძოდ, ინგირის რღვევის გასწვრივ სეისმურობის პროცესების შესწავლის მიზნით, დაიგეგმა კომპლექსური მონიტორინგის სისტემების განახლება და მოდერნიზაცია. დამატებით, არსებული რღვევების გეოლოგიური გამოკვლევა, მათ შორის სეისმოაქტივობის გამოყოფის მიზნით.

გეოდინამიკური პროცესების დროში განვითარების მონიტორინგისთვის, კერძოდ, ქანის ფორებში წყლის წნევის, ტემპერატურისა და სხვა. პარამეტრების, შესწავლის მიზნით დაიგეგმა და განხორციელდა ჭაბურღილების ბურღვა. მათ შორის 2 ღრმა (250 და 300 მ. სიგრძის) და 6 არაღმა ჭაბურღილი. ამ ჭაბურღილებში პარალელურად დაიწყო სეისმოსადგურების მონტაჟი. ღრმა ჭაბურღილებში კაროტაჟის მეშვეობით შესწავლილი იქნება დამაბულობის ცვლილება და წნევის პირობები.

სადგურების ტერიტორიების შერჩევის მიზნით განხორციელდა ერთობლივი საველე ექსპედიცია საკვლევი ტერიტორიის ჩრდილო-დასავლეთ უბანზე, სადაც 30 კმ. სიგრძის პროფილის გასწვრივ შეირჩა 10 პოტენციური უბანი, ჯიპიესების GNSS დასამონტაჟებლად და შერჩეული ადგილები დატანილი იქნა რუკაზე (სურ. 2).



ნახ. 2. კაშხალზე და ინგირიშის რღვევაზე მუდმივი სადგურის ქსელი ყვითელი სამკუთხედებით აღნიშნულია ჯიპიეს -GNSS მუდმივი ქსელის სადგურების განლაგება.

ეს გეოდინამიკური ქსელი განკუთვნილია დამაბულობის მონიტორინგისა და შემდგომში შესაძლო გადაადგილების დასაფიქსირებლად.

ასვე დაიგეგმა 2 ღრმა ჭაბურღილსა და 3 არაღრმა ჭაბურღილში ჰიდროდინამიკური დაკვირვებების ორგანიზება გეოდინამიკური პროცესების ჰიდროსფეროზე რეაქციის დასადგენად.

### შედეგები

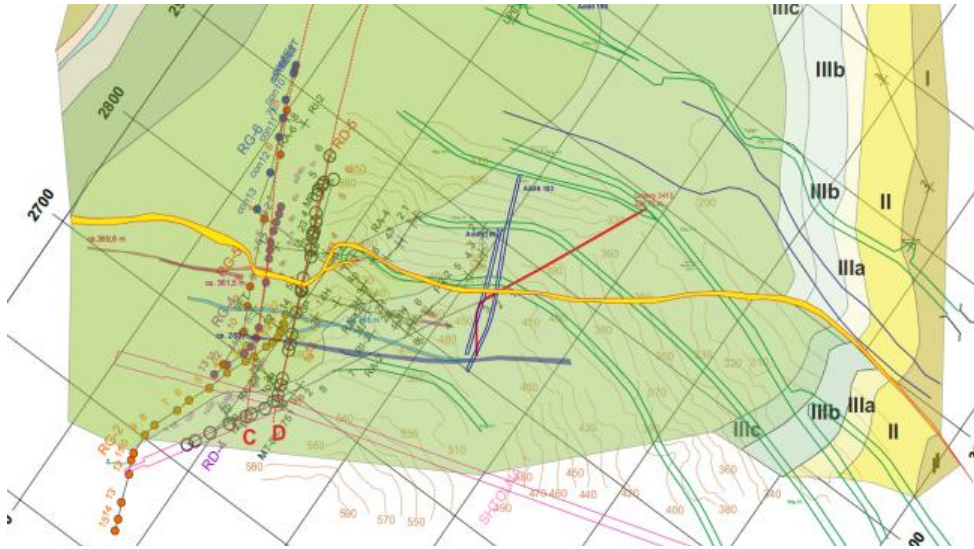
სამუშაოები დაწყებული იქნა გერმანულ (AGW Working Group Technical Petrophysics და Piewak & Partner-თან) მხარესთან ინტენსიური თანამშრომლობით. კერძოდ, მოხდა სამი სხვადასხვა საკოორდინატო სისტემის ძველი რუკებისა და ისეთი რუკების, რომლებიც საერთოდ არ შეიცავს რაიმე საკოორდინატო სისტემას, გადაყვანა არსებულ საკოორდინატო სისტემაზე. შედეგად დადგინდა:

– ვრცელ ტერიტორიაზე გვხვდება შეცოცებები, რომლებიც დაახლოებით ჩრდილო-აღმოსავლეთი მიმართულებით  $120^\circ$  კუთხით კავკასიონის პარალელურად მიემართებიან და ჩრდილოეთიდან აღწევენ კავკასიაში. ამ რღვევათა სისტემის აქტიურობა ვლინდება სეისმურობაში მთელი კავკასიის გასწვრივ. აქ დომინირებს ტექტონიკური შეცოცებები, მაქსიმალურად ჰორიზონტალური დამაბულობებით, რომლებსაც გააჩნიათ ჩრდილო-სამხრეთული ორიენტაცია.

ამ რეგიონალურ რღვევათა სისტემას ემთხვევა ინგირიშის რღვევა, რომელზეც დაკვირვებები შეიძლება გავრცელდეს კაშხლიდან, 20 კილომეტრის მანძილზე გალის წყალსაცავამდე.

– ადგილობრივად, ენგურის კაშხალზე დომინირებს ე.წ. რღვევათა განშტოება. ის გასდევს აღმოსავლეთ-დასავლეთით და ღრმავდება  $70^\circ$ -ით სამხრეთისაკენ. ამ რღვევის ინტენსივობა შესაძლებელია შესწავლილი იქნეს ორი დეფორმოგრაფის მეშვეობით, რომლებიც განლაგდება კაშხლის გვირაბებში.

– კერის კვლევებმა აჩვენა LV- დომინანტური მიმართულების ტექტონიკური შეცოცება მაქსიმალურად ჰორიზონტალური დამაბულობით.



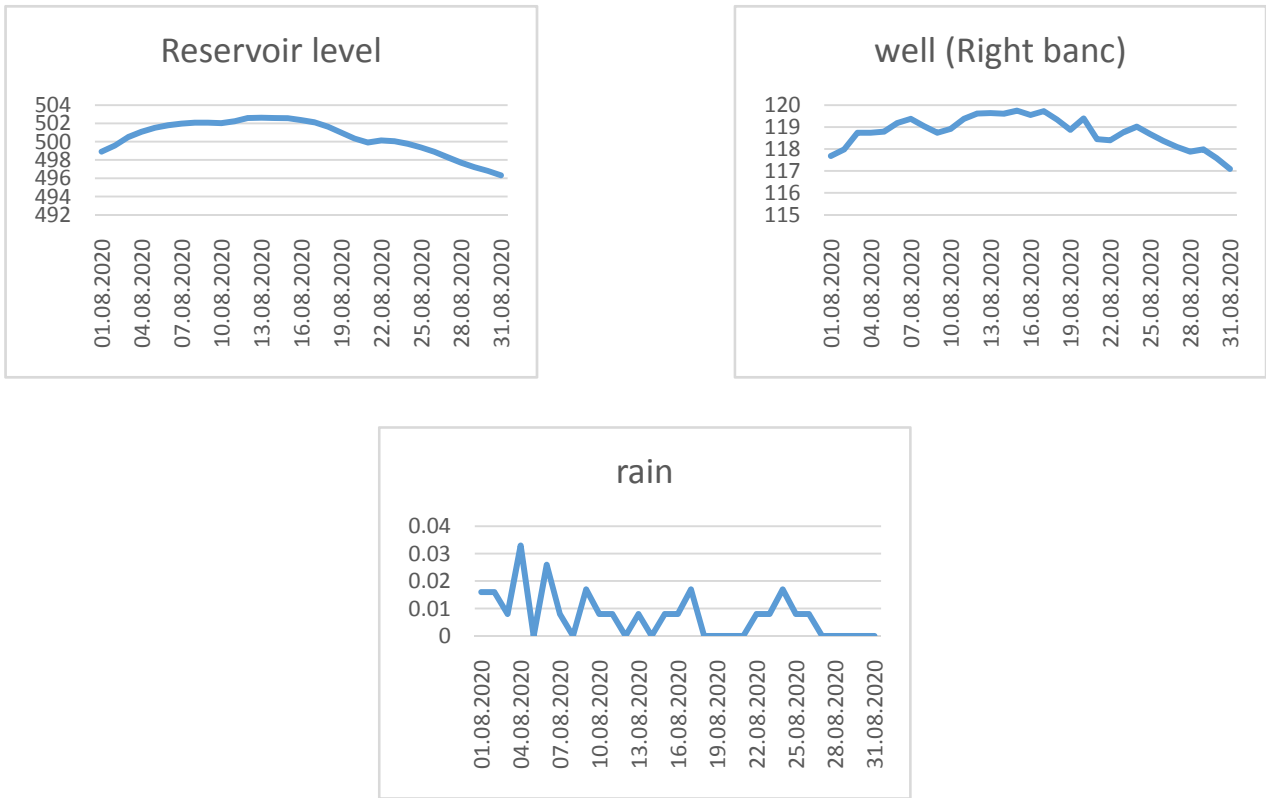
სურ. 3. დეტალური რუკა რღვევების და კაშხლის გვირაბის

2020 წლის ივნისის ბოლოს ივლისის დასაწყისში, ორგანიზებული იქნა ჰიდროდინამიკური დაკვირვებები ენგურის კაშხლის წინ, მდ. ენგურის მარცხენა და მარჯვენა ნაპირზე ადრე გაბურღილ ჭაბურღილებში. ისინი განლაგებულია კირქვის დანაპრალებულ ქანებში და ხსნიან კარსტულ წყლების ჰორიზონტს. ჭაბურღილებში დამონტაჟდა კომპანია “HOBO”-ს წარმოების სპეციალური ავტომატური ხელსაწყოები, რომლის საშუალებითაც ხდება ერთი საათის ინტერვალით წყლის დონისა და ტემპერატურის მონაცემების ჩაწერა. მონაცემების მოხსნა და დამუშავება ხორციელდება პერიოდულად. დაგეგმილია წყლის დონესა, ტემპერატურასა და გამტარებლობაზე დაკვირვებების ორგანიზება სამ ახლად გაბურღილს ჭაბურღილებზე (2 ღრმა და 1 არა ღრმა) ახლად შექმნილი ავტომატიზირებული ხელსაწყოებით, რომლებიც აღჭურვილია ასევე ინფორმაციის GPRS გადაცემის სისტემით



სურ. 4. აპარატურის მონტაჟის პროცესი

მოკლე პერიოდის დაკვირვებებმა უკვე დაადასტურეს მიზეზ-შედეგობრივი კავშირი ატმოსფერულ ნალექებსა, ზედაპირულ და მიწისქვეშა წყლებს შორის.



სურ.5. ატმოსფერული ნალექების, წყალსაცავში და ჭაბურღილში წყლის დონის ვარიაციები

ატმოსფერული ნალექების გავლენა კაშხალში წყლის დონეზე იგვიანებს 10-15 დღით და იმავე პერიოდში აისახება ჭაბურღილში წყლის დონის ცვლილებაზე, რაც მეტყველებს ამ უკანასკნელის ზედაპირულ ხასიათზე.

წყალშემცველ ჰორიზონტზე ეგზოგენური ფაქტორების (ატმოსფერული ნალექები და წნევა) გავლენის შესწავლის მიზნით ენგურგესის კომპანია სისტემატიურად გვაწვდის ინფორმაციას ენგურგესის წყალსაცავში წყლის დონის მნიშვნელობებსა და მეტეომონაცემებზე, კაშხალზე არსებული მეტეოსადგურიდან. ეს მონაცემები, მიწისქვეშა წყლის ჰიდროდინამიურ და ჰიდროქიმიურ პარამეტრებზე დაკვირვების მონაცემებთან ერთად შემდგომში საშუალებას მოგცემს შესწავლილი იქნას გეოდინამიკური პროცესების გავლენა ჰიდროსფეროზე და გამოვლენილი იქნას დამაბულობის ცვლილების ანომალური მნიშვნელობები.

*ადიარება: კვლევა განხორციელდა შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით, YS-19-1497 - "ენგურის კაშხალთან ინგურიშის რღვევის რეაქტივაციის პოტენციალის შეფასება".*

## გეოდინამიკური მონიტორინგის ორგანიზება ენგურის კაშხლის

### მდგომარეობის შეფასების მიზნით

#### მელიქაძე გ., გოგუაძე ნ.

##### რ ე ზ ი უ მ ე

ენგურის კაშხალთან ინგურიშის რღვევის რეაქტივაციის პოტენციალის შეფასების მიზნით დაიწყო კვლევები სეისმოაქტიური რღვევის გააქტიურებით გამოწვეული სეისმურობის და გეოდინამიკური სიტუაციის შესწავლისთვის. გეოდინამიკური პროცესების დროში განვითარების მონიტორინგისთვის განხორციელდა ჭაბურღილების ბურღვა კაშხლის მიმდებარე ტერიტორიაზე, სადაც დაიწყო წყლის დონესა და ტემპერატურაზე დაკვირვებები, რამაც უნდა უზრუნველყოს დაძაბულობის ველის ცვლილების შესწავლა. წყალსაცავში და კაშხლის წინ, ადრე გაბურღილ ჭაბურღილებში, ჩატარებულმა დაკვირვებებმა დაადასტურეს ურთიერთ კავშირი ატმოსფერულ ნალექებს, ზედაპირულ და მიწისქვეშა წყლებს შორის.

#### IN ORDER TO ASSESSMENT CONDITION OF ENGURY DAM ORGANISE GEODYNAMIC MONITORING

Melikadze G., Gogvadze N.

##### A b s t r a c t

In order to assess reaction Inguri Dam on the activation of the seismically active Engurgheshifault, were launched to study the seismicity and geodynamic situation. To monitor the development of geodynamic processes, were drilled the boreholes in the vicinity of the dam and where water level and temperature observations started to provide information about the stress field variation. Observations conducted in the reservoir of dam and in wells previously drilled in front of the dam, have confirmed the interrelationship between atmospheric precipitation, surface and groundwater.

#### ОРГАНИЗАЦИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА С ЦЕЛЮ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИНГУРСКОЙ ПЛОТИНЫ

Меликадзе Г., Гогвадзе Н.

##### Р е ф е р а т

Для установления происхождения и распространения карстовых вод, были начаты съемочные работы с использованием методики стабильных изотопов, на территории Западной Грузии. Было изучено распространение стабильных изотопов на территории, происхождение подземных вод, ареалы их питания и разгрузки.



## ქ. საჩხერის მიმდებარე ტერიტორიის წყალშემცველი ჰორიზონტის ჰიდროდინამიკური პარამეტრების დადგენა და საექსპლუატაციო მარაგების შეფასება

**მელიქაძე გ., ხუნდაძე ნ., რაზმაძე-ბროკიშვილი თ.**

ივ. ჭავჭავიძეშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი  
მიხ. ნოდია სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი

[melikadze@gmail.com](mailto:melikadze@gmail.com)

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამთო-გეოლოგიური ფაკულტეტი

[tamuna-razmadze@mail.ru](mailto:tamuna-razmadze@mail.ru)

### შესავალი

მტკნარი მიწისქვეშა წყლები წარმოადგენს ყველაზე ძვირფას სასარგებლო წიაღისეულს და სასმელად ვარგისი, უმაღლესი ხარისხის წყლების, ყველაზე საიმედოდ დაცულ წყაროს. იგი წარმოადგენს ადამიანის სიცოცხლისთვის უპირველეს მოთხოვნილებას ჰაერის შემდეგ და ამიტომაც ითვლება უნიკალურ წიაღისეულად. საქართველო, მიწისქვეშა წყლების რაოდენობის მხრივ, ერთ-ერთ უმდიდრეს ქვეყანად ითვლება.

კვლევის მიზანია საჩხერის მუნიციპალიტეტის მიწისქვეშა წყლების ძებნა-ძიება საყოფაცხოვრებო სასმელი წყლის დეფიციტის დაძლევის მიზნით, წყლის რესურსების მარაგების შეფასება და მისი გაზრდის შესაძლებლობების დადგენა.

საკვლევი ტერიტორიის ფარგლებში გავრცელებული წყალშემცველი ჰორიზონტი მდებარეობს ქ. საჩხერიდან 1.5-2.0 კმ მანძილზე. დაკავშირებულია მდ. ყვირილის და მისი შენაკადების ალუვიურ ნალექებთან, წარმოდგენილია კაჭარ-კენჭნარით ქვიშის შემავსებლით. ეს ჰორიზონტი ლოკალურად გავრცელებულია მდინარის ხეობის საზღვრებში და ძირითადად განვითარებულია სოფ. ჭალადან ქ. საჩხერემდე. მდინარის აუზის გარეთ ალუვიური ნალექები გავრცელებულია ლოკალურად და თიხის შემავსებლის გამო, ხასიათდება სუსტი წყალშემცველობით. სოფ. ჭალიდან ქ. საჩხერემდე ხეობის მონაკვეთზე გავრცელებული ალუვიური ჰორიზონტი ძლიერ წყალუხვია. დეტალური ჰიდროგეოლოგიური კვლევების შედეგად, აღნიშნული ჰორიზონტიდან, შეიძლება მივიღოთ სამეურნეო – სასმელად გამოსაყენებელი მიწისქვეშა წყალი, რაოდენობით 600 ლ/წმ [1].

საკვლევი ტერიტორიის ფარგლებში გავრცელებული წყალშემცველი ჰორიზონტის ჰიდროდინამიკური პარამეტრების დასადგენად, 2019 წლის სექტემბერ-დეკემბრის თვეებში, წინასწარი გეოფიზიკური კვლევებით შერჩეულ ადგილებში, სადაც დაფიქსირდა წყალშემცველი ჰორიზონტის ყველაზე დიდი სიმძლავრე, გაიბურღა 7 ჭაბურღილი 219 მმ დიამეტრით. თითოეულ ჭაბურღილებს შორის დაშორება 50 მეტრია, ხოლო ყველა ჭაბურღილის სიღრმე 30 მ.

### მეთოდოლოგია

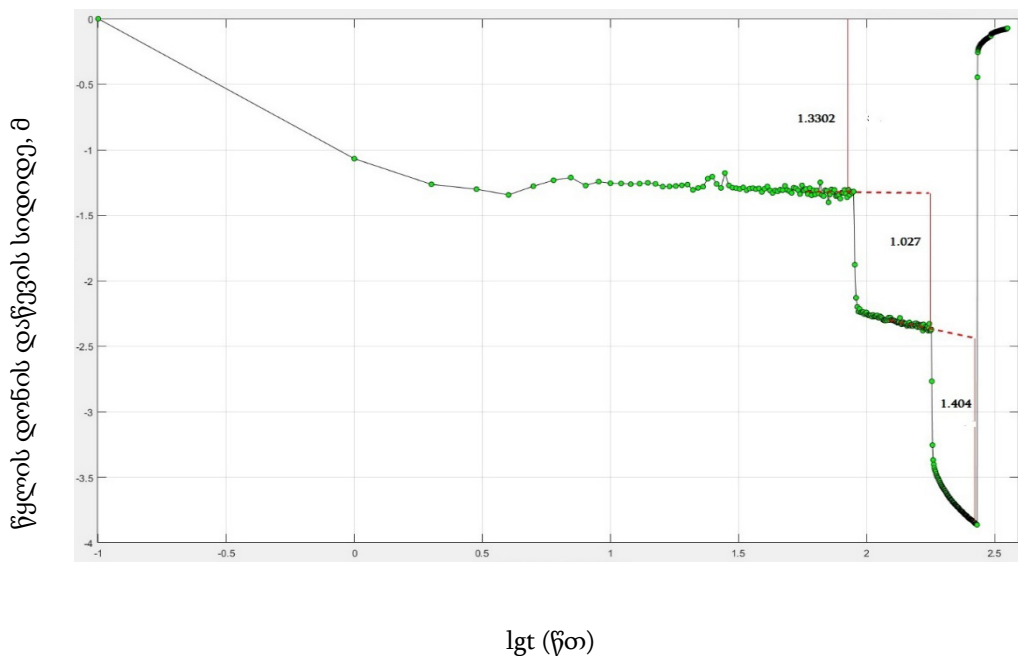
ბურღვის შემდეგ, წყალშემცველი ფენის ჰიდროდინამიკური პარამეტრების დადგენის მიზნით ყველა ჭაბურღილში ჩატარდა საცდელ-ფილტრაციული საფეხურებრივი და ხანგრძლივი ტესტირებები. მიმდინარეობდა მონაცემების ყოველდღიური შეგროვება და მათი კამერალური დამუშავება - ხდებოდა ტემპერატურის, გამტარებლობის და ჰიდროდინამიკური პარამეტ-

რების დროითი ვარიაციების გრაფიკების აგება და მათი სისტემური ანალიზი. მიღებული მონაცემების დამუშავება მიმდინარეობდა ლიცენზირებული პროგრამების (Aquifer-TestPro 4.2, Excel, Matlab) საშუალებით, რომლის შედეგად შეფასებულ იქნა წყალშემცველი ჰორიზონტის ჰიდროდინამიკური პარამეტრები (ფილტრაციის კოეფიციენტი -  $K$  (მ/დღ.დ), წყალგამტარებლობის კოეფიციენტი -  $T$  (მ<sup>2</sup>/დღ.დ), ხვედრითი ხარჯი -  $Sc$  (მ<sup>3</sup>/დღ.დ), წყლის ოპტიმალური დებიტი -  $Q$  (მ<sup>3</sup>/დღ.დ) და გავლენის რადიუსი -  $R$  (მ).

საცდელ-ფილტრაციული სამუშაოები ჩატარდა ყველა ჭაბურღილში, მაგრამ წინამდებარე ნაშრომში განხილულია ჭაბურღილი #3-ის სამსაფეხურიანი და ხანგრძლივი ტესტირება. ტესტირების დაწყებამდე ჭაბურღილ #3-ში წყლის სტატიკური დონე იყო 8.56 მ, ხოლო მისგან 50 მ-ით დაშორებულ სათვალთვალო ჭაბურღილ #4-ში - 8.47 მ.

სამსაფეხურიანი ტესტირება დაიწყო 2020 წლის 27 სექტემბერს თითოეული საფეხურის ხანგრძლივობა შეადგენდა 90 წუთს, ტუმბოს გამორთვის შემდეგ სტატიკურ დონემდე აღდგენის დრო - 90 წთ. ტუმბო დამონტაჟებული იყო 24 მ სიღრმეზე. თითოეული საფეხურის ტესტირებისას წყლის ხარჯი იზომებოდა და მოწმდებოდა.

წყლის დონის დაწვევის სიდიდის ( $S$ ) დროის ლოგარითზე ( $lgt$ ) დამოკიდებულების გრაფიკი ასახულია ნახაზ 1-ზე.



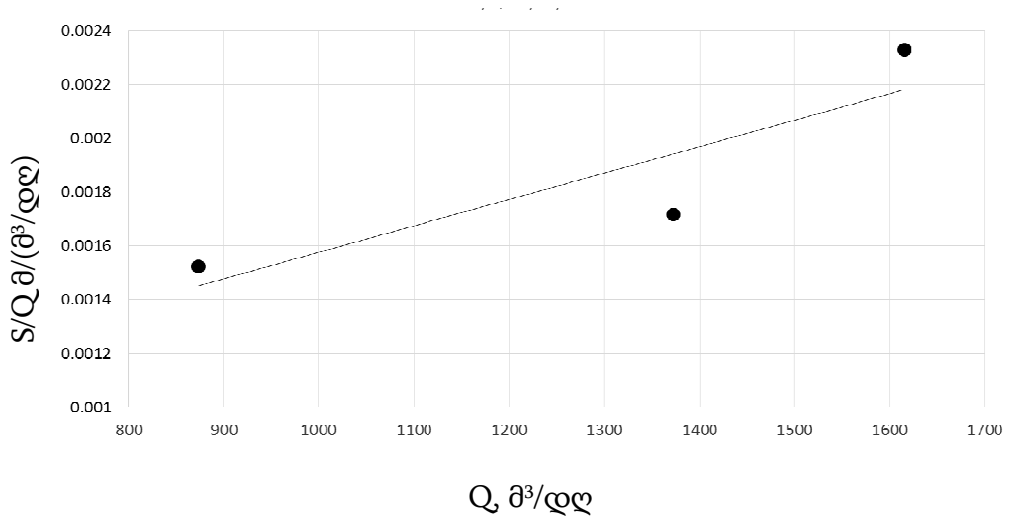
ნახ.1.  $\Delta S$  -ის გამოთვლა ჰანთუმ-ბიერშენსკის მეთოდით (ჭაბ.#3)

ტესტირების პროცესში გაზომილი წყლის ხარჯის შესაბამისი წყლის დონის დაწვევის ( $\Delta S$ ) სიდიდეები აღებულ იქნა გრაფიკიდან (ნახაზ 1), რომლის მონაცემები ასახულია ცხრილი 1-ში.

ცხრილი 1. ტესტირების პროცესში წყლის ხარჯის და დონის დაწვევის მნიშვნელობები

საფეხურის N	$Q$ , მ <sup>3</sup> /დღ	$\Delta S$ , მ	$S$ , მ	$S/Q$ , მ <sup>3</sup> /დღ
1	872.75	1.330	1.330	0.0015
2	1371.77	1.027	2.358	0.0017
3	1614.95	1.404	3.763	0.0023

ჰანტუშ-ბიერშენკის (Hantush-Bierschenk) მეთოდის თანახმად აუცილებელია მონაცემების შესწორება წრფივი B და არაწრფივი C კოეფიციენტებით [2]. წყლის დონის დაწვევის სიდიდის მნიშვნელობა შესწორდა  $S=B*Q+C*Q^2$  ფორმულის გამოყენებით (ნახ.2 და ცხრ.2).

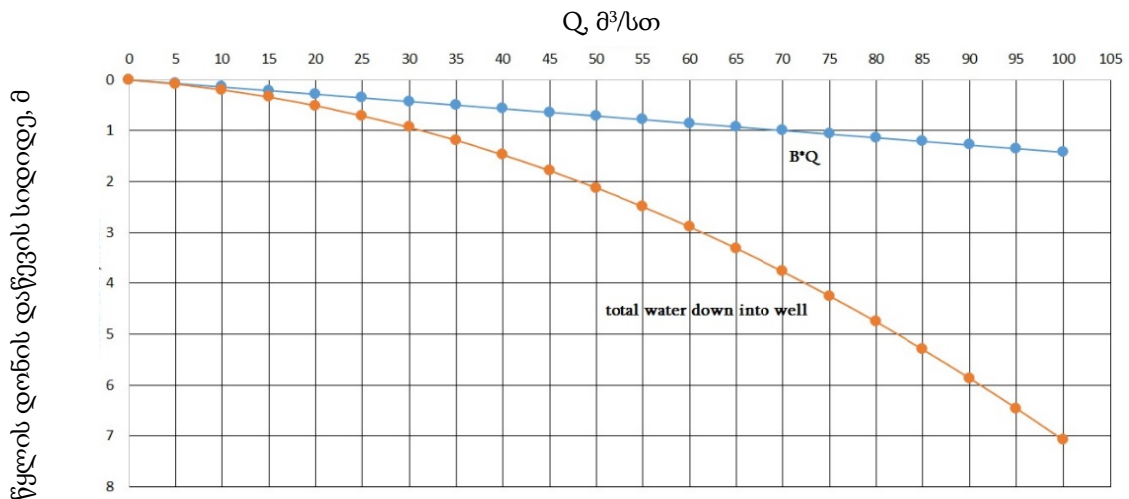


ნახ. 2 S/Q-ს Q-ზე დამოკიდებულების გრაფილი

ცხრილი 2. B და C კოეფიციენტები  $S=B*Q+C*Q^2$  ტოლობისთვის

B	0.0005939
C	9.82E-07

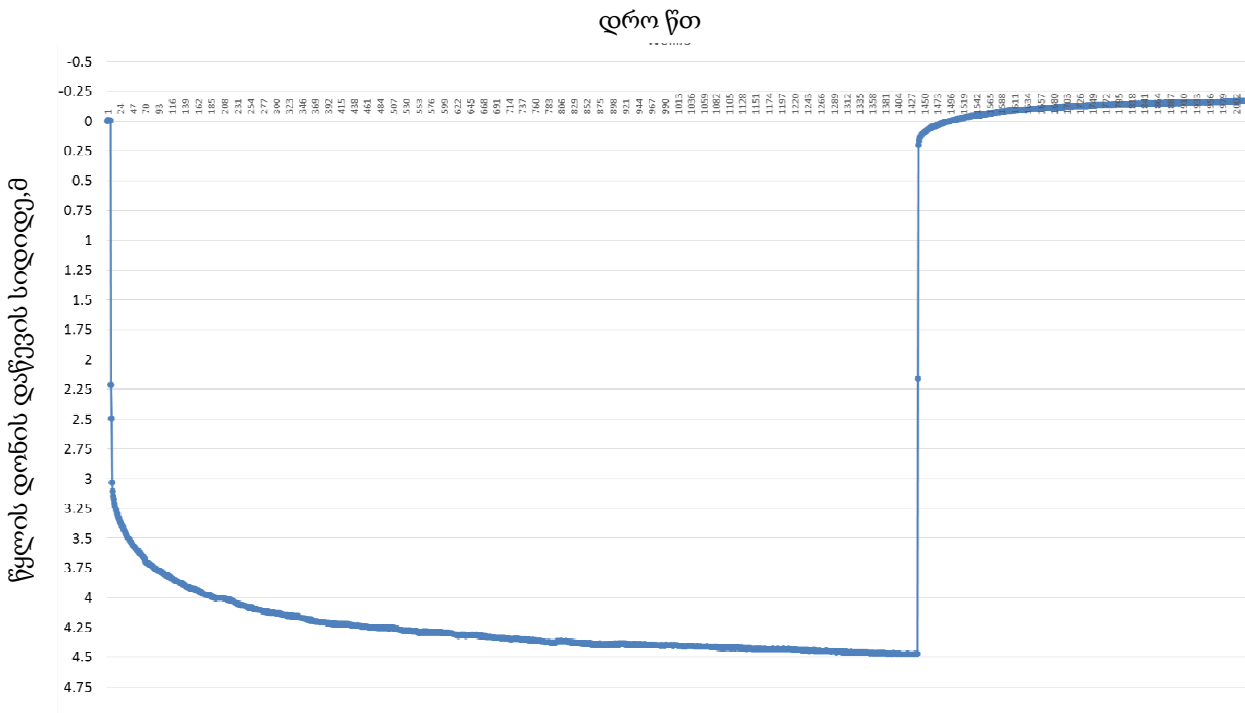
დაგროვილი მონაცემების საფუძველზე აიგო წყლის დონის ვარდნის წყლის ხარჯზე დამოკიდებულების გრაფიკი (ნახაზ 3).



ნახ.3. ჭაბურღილ #3-ში წყლის დონის ვარდნის (S) წყლის ხარჯზე (Q) დამოკიდებულების გრაფიკი.

ნახ.3-ზე პირველი გრაფიკი (გრავიკი ზემოთ) მიუთითებს (Q-ს (S)-ზე წრფივ დამოკიდებულებას ( $S=B*Q$ ), ხოლო მეორე გრაფიკი (გრავიკი ქვემოთ) - (Q-ს (S)-ზე არაწრფივ დამოკიდებულებას ( $S=B*Q+C*Q^2$ ).

ხანგრძლივი ტესტირება ჭაბურღილ #3-ში დაიწყო 2019 წლის 27 სექტემბერს და გაგრძელდა 24 საათი. აღდგენის პერიოდი გაგრძელდა 10 საათი. წყლის ხარჯი სატბილურია  $Q=67.29$  მ<sup>3</sup>/სთ. ტესტირების დაწყებამდე, წყლის სტატიკური დონე იყო 8.63 მ. თუ წყლის სტატიკურ დონეს ჩავთვლით ნულოვან დონედ, მაშინ შეიძლება ითქვას, რომ წყლის დონის სრული ვარდნა არის 4.47 (ნახ. 4)



ნახ. 4. ჭაბურღილ #3-ში წყლის დონის ვარდნა ხანგრძლივი ტესტირებისას, როცა  $Q=67.29$  მ<sup>3</sup>/სთ.

მიღებული მონაცემებით გამოთვლილია ხვედრითი ხარჯი  $q=Q/S$  (ცხრ.4)

ცხრილი 4. ხვედრითი ხარჯი  $S_c=Q/S$ . (ჭაბ.#3)

ხვედრითი ხარჯი $q=Q/S$ :	Q (ლ/წმ)	Q (მ <sup>3</sup> /სთ)	Q (მ <sup>3</sup> /დღ)
$Q/4.47$	4.18	15.05	361.26

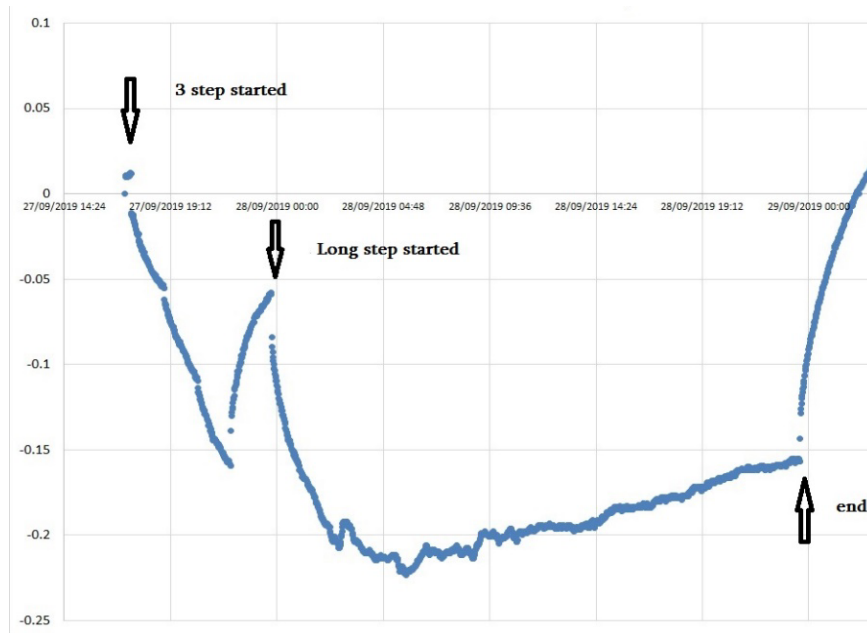
### ოპტიმალური ხარჯის გამოთვლა

რომ არ მოხდეს წყალშემცველი ფენის გადარიბება, ჭაბურღილიდან ამოტუმბვითი სამუშაოების დროს, წყლის დონის დაწვევის სიდიდე არ უნდა აღემატებოდეს წყალშემცველი ფენის სიმძლავრის 40%-ს.

რადგან წყალშემცველი ჰორიზონტის სიმძლავრე  $H=12$  მეტრია, დასაშვები წყლის დონის დაწვევის სიდიდე შეადგენს 4.8 მეტრს.

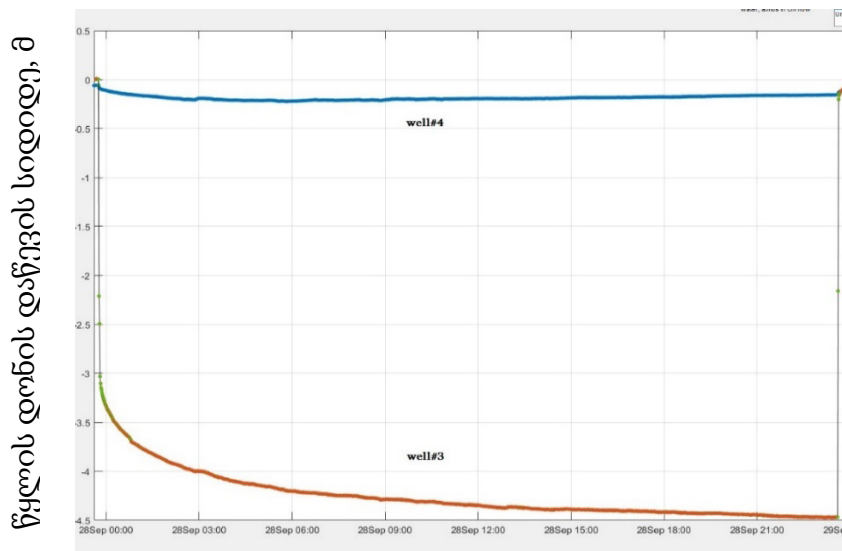
$Q_1 = 4.8 * 15.05$  მ<sup>3</sup>/სთ = 74.5 მ<sup>3</sup>/სთ ან  $4.8 * 4.18$  ლ/წმ = 20.1 ლ/წმ ე.ი ჭაბურღილი #3-სთვის წყლის ოპტიმალური ხარჯი დაახლოებით არის 75 მ<sup>3</sup>/სთ. ეს დამოკიდებულება კარგად ჩანს ნახ.3-დანაც.

### ჭაბურღილი #3-ის გავლენა ჭაბურღილ #4-ზე



ნახ 5. წყლის დონის დაწევა ჭაბურღილ #4-ში, ჭაბურღილ #3-დან წყლის მოპოვებისას.

ჭაბურღილ #4-ში  $t = 3 \cdot 1.5 + 24 = 28.5$  სთ-ის განმავლობაში ამოტუმბვისას, წყლის დონის მაქსიმალური ვარდნა იყო 0.22 მ, ხოლო ხანგრძლივი ტესტირებისას - 0.16 მ (ნახ.5). ჭაბურღილი #3-ის გავლენა ჭაბურღილ #4-ზე გრაფიკულად ასახულია ნახაზ 6-ზე.



ნახ. 6. ჭაბურღილ #3-ში ხანგრძლივი ტესტირებისას წყლის დონის ვარდნა ჭაბურღილ #3-ში (გრაფიკი ქვემოთ) და ჭაბურღილ #4-ში (გრაფიკი ზემოთ).

წყლის ტემპერატურა ჭაბურღილებში 12°C შეადგენს და უცვლელი რჩება საფეხურიანი და ხანგრძლივი ტესტირებისას.

წყალგამტარებლობის კოეფიციენტი (T) გამოსათვლელად ვიყენებთ Agarval-ის აღდგენის მეთოდს. ჭაბურღილ #3 და #4-სთვის დონის აღდგენის პერიოდი იყო 10 საათი, აგებულია  $S_a - S$   $\lg(t_a)$  - ზე დამოკიდებულების გრაფიკი (ნახ. 7).

$$S_a = S_p - S', \text{ ხოლო } \lg(t_a) = \lg(t_p * t') / (t_p + t')$$

სადაც  $S_p$  - წყლის დონის დაწვევის სიდიდე ხანგრძლივი ტესტირების დასასრულს;

$t_p$  - ხანგრძლივი ტესტირების დრო;

$t'$  - დრო წყლის დონის აღდგენის პერიოდში;

$S'$  - წყლის დონის ცვლილების სიდიდე  $t'$  დროის განმავლობაში;

გრაფიკის სწორ უბანზე გავლებული წრფის განტოლებაა:

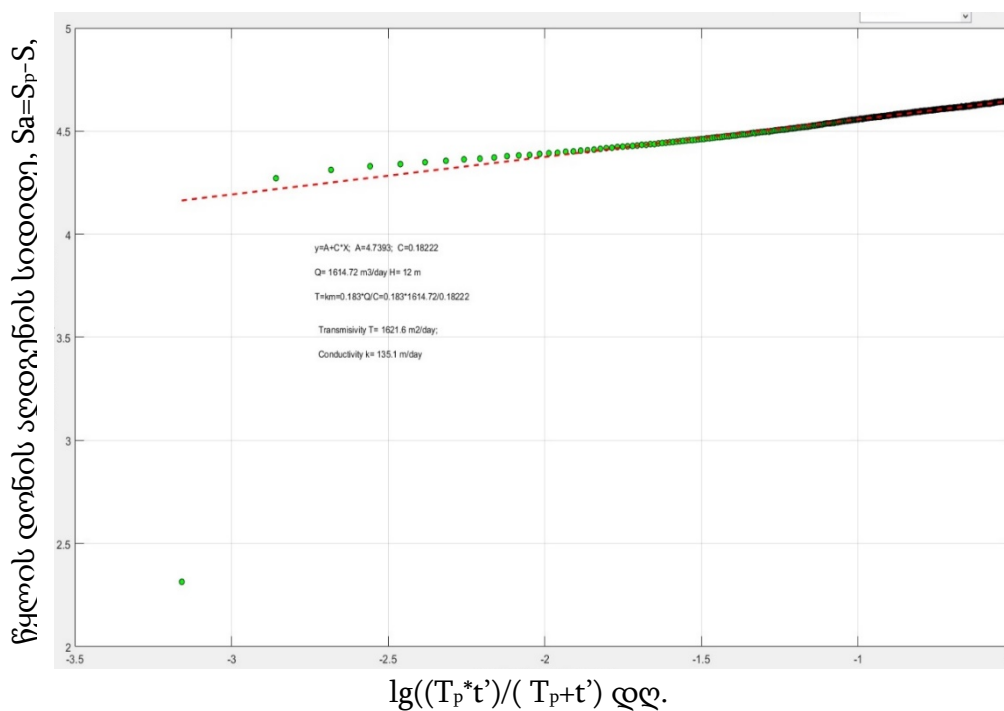
$$Y = A + C * X \text{ სადაც, } A = 4,7393 \text{ } C = 0.18222$$

$$Q = 1614,72 \text{ მ}^3/\text{დღ. } H = 12 \text{ მ.}$$

$$T = 0,183 * Q / C = 0.183 * 1614,72 / 0.18222 = 1621 \text{ მ}^2/\text{დღ.}$$

$$T = 1621 \text{ მ}^2/\text{დღ.}$$

$$T = K * H \Rightarrow K = T / H = 1621 / 12 = 135,1 \text{ მ}/\text{დღ}$$



ნახ.7. ჭაბურღილ #3-ში Agarval-ის აღდგენის მეთოდით წყალგამტარებლობის გრაფიკი გავლენის რადიუსი გამოსათვლელად ვიყენებთ ფორმულას

$$\lg R = (S_1 \lg r_2 - S_2 \lg r_1) / (S_1 - S_2) \quad [3]:$$

სადაც,

$r_1 = 50 \text{ მ}$  - მანძილი ცენტრალური ჭაბურღილიდან I სათვალთვალო ჭაბურღილამდე;

$S_1 = 0.22 \text{ მ}$  - წყლის დონის დაწვევის სიდიდე I სათვალთვალო ჭაბურღილში;

$r_2 = 100 \text{ მ}$  - მანძილი ცენტრალური ჭაბურღილიდან II სათვალთვალო ჭაბურღილამდე;

$S_2 = 0 \text{ მ}$  - წყლის დონის დაწვევის სიდიდე II სათვალთვალო ჭაბურღილში;

$$\lg R = (0.22 * \lg 100 - 0 * \lg 50) / (0.22 - 0) = 0.22 * 2 / 0.22 = 2$$

$$R = 100 \text{ (მ)}$$

საექსპლუატაციო მარაგები გამოთვლილია დიუპუსის ფორმულით [4]:

$$Q=(1,366*K(2H-S)*S)/(lg(R/r_0))$$

სადაც,

K=135.1 მ/დღ - ფილტრაციის კოეფიციენტი;

H=12 მ - წყალშემცველი ფენის სიმძლავრე;

R= 100 მ - გავლენის რადიუსი;

r<sub>0</sub>=0.1095 მ - ჭაბურღილის რადიუსი;

ა) როცა S=4.47 - წყლის დონის დაწვევის სიდიდე ხანგრძლივი ტესტირებისას;

$$Q=(1.366*135.1*(2*12-4.47)*4.47)/(lg100/0.1095)=16110.75/ 2.96=5442 \text{ მ}^3/\text{დღ.ღ} (62.98 \text{ ლ/წმ})$$

ბ) როცა S=4.8 - წყლის დონის დაწვევის სიდიდის მაქსიმალური დასაშვები მნიშვნელობა;

$$Q=(1.366*135.1*(2*12-4.8)*4.8)/(lg100/0.1095)=17007.81/ 2.96=5745 \text{ მ}^3/\text{დღ.ღ} (66.49 \text{ ლ/წმ})$$

ანალოგიური მეთოდებით არის დათვლილი თითოეული პარამეტრი დანარჩენ ჭაბურღილებში, მათი შესაბამისი მნიშვნელობები მოყვანილია ცხრილ 5-ში.

ცხრილი.5. სრული ინფორმაცია ჭაბურღილების მახასიათებლების შესახებ

	ჭაბურღილი #1	ჭაბურღილი #2	ჭაბურღილი #3	ჭაბურღილი #4	ჭაბურღილი #5	ჭაბურღილი #6	ჭაბურღილი #7
ჭაბურღილის რადიუსი r <sub>0</sub> , (მმ)	109.5	109.5	109.5	109.5	109.5	109.5	109.5
სტატიკური დონე ცენტრალურ ჭაბურღილში, S <sub>0</sub> , (მ)	8.5	8.55	8.56	8.37	8.44	8.23	8.67
სტატიკური დონე სადამკვირვებლო ჭაბურღილში, S (მ)	8.57	#1 - 8.17 #3 - 8.46	8.47	#6 - 8.27 #3 - 8.57	8.51	#3 - 8.59 #4 - 8.39 #5 - 8.25	#6 - 8.17 #5 - 8.31
წყლის დონის დაწვევის სიდიდე ცენტრალურ ჭაბურღილში, S <sub>0</sub> , (მ)	2.42	7.13	3.86	2.42	2.98	1.92	6.73
წყლის დონის დაწვევის სიდიდე სათვალთვლო ჭაბურღილში, ΔS, (მ)	0.33	0.04	0.22	#6 - 0.63 #3 - 0.17	0.17	0.29	0.33
წყლის დონის დაწვევის სიდიდე ცენტრალურ ჭაბურღილში, ΔS <sub>01</sub> , (მ) ხანგრძლივი ტესტირება	2.67	1.43	4.47	2.46	3.31	1.87	6.99
გავლენის რადიუსი, R, (მ)	100	100	100	129	100	100	100

წყალშემცველი ჰორიზონტის სიმძლავრე, H, (მ)	11	11	12	12	12	10	9
წყალგამტარებლობის კოეფიციენტი, T (მ <sup>2</sup> /დღ)	1484	1039	1621	1305	1246.7	975.3	880.6
ფილტრაციის კოეფიციენტი, K (მ/დღ)	134.9	94.5	135.1	108.8	103.9	97.5	97.8
დებიტი ხანგრძლივი ტესტირებისას Q (მ <sup>3</sup> /დღ / ლ/წმ)	1489.66 17.24	828 9.59	1614.95 18.69	1630.19 18.87	1614.85 18.69	1614.95 18.69	1477 17.09
ხვედრითი ხარჯი, Q <sub>დ</sub> (მ <sup>3</sup> /დღ)	557.7	579.6	361.26	662.14	492.5	863.6	211
რეკომენდირებული დებიტი Q <sub>დ</sub> (მ <sup>3</sup> /სთ / ლ/წმ)	72 20	34 9.5	72 20	72 20	72 20	72 20	<60 <16.7
საექსპლუატაციო მარაგი Q (ΔS <sub>01</sub> ) - ლ/წმ	37.18	14.8	63.0	29.7	38.0	17.7	40.2
საექსპლუატაციო მარაგი დასაშვები დონის დაწვევისას Q (4.8 მ) - ლ/წმ	59.5	41.7	66.5	51.6	51.1	38.0	38.1

შენიშვნა #<sub>6</sub> - არის ცენტრალური ჭაბურღილი, რომელიც დაშორებულია ჭაბურღილი #4-დან 3.8 მ-ით.

### დასკვნები

როგორც უკვე ავღნიშნეთ, ნაშრომში ნახსენები 7 ჭაბურღილი გაბურღულია პროფილის გასწვრივ, რომელიც წარმოადგენს მდ. ყვირილის პარალელურ უახლოეს პროფილს და წყალშემცველ ჰორიზონტს აქვს დიდი სიმძლავრე. ამ ჭაბურღილების წარმადობა არის 346 ლ/წმ ანუ, საექსპლუატაციო მარაგი, როცა დონის დაწვევის სიდიდე არის მაქსიმალურად დასაშვები - 4.8 მ.

სამხრეთ-აღმოსავლეთით, წყალშემცველი ჰორიზონტი სხვა ადგილთან შედარებით ხასიათდება საკმაოდ მაღალი სიმძლავრით. გავლენის რადიუსის გათვალისწინებით – 100-100 მ დაშორებით კიდევ სამ რიგად, შესაძლებელია დამატებით 21 ჭაბურღილის (ერთ რიგში 7 ჭაბურღილი) გაბურღვა რომელთა საერთო დებიტი იქნება  $346 \times 3 = 1038$  ლ/წმ; ასეთ შემთხვევაში მთლიანად იქნება ათვისებული წყალშემცველი ჰორიზონტის ბუნებრივი მარაგები, რითაც შესაძლებელი გახდება მთლიანად რაიონში წყალმომარაგების მოგვარება.

საექსპლუატაციო მარაგების კატეგორიზაცია მიღებული სამშენებლო ნორმებისა და წესების მოთხოვნის თანახმად [5], რომლის საფუძველზეც:

A კატეგორიზაციას შეიძლება მივაკუთვნოთ 7 ჭაბურღილიდან ამოტუმბულ ფაქტიური ჯამური დებიტი - 240 ლ/წმ.

B კატეგორიზაციას კი დებიტის რეზერვს, ანუ 106 ლ/წმ, რომელიც მიღებულია 346 ლ/წმ, (დებიტი დასაშვები მაქსიმალური დონის დაწვევისას - 4.8 მ), გამოკლებული – 240 ლ/წმ-ი (ხანგრძლივი ტესტირებისას მიღებული ფაქტიური ჯამური დებიტი).

C კატეგორიზაციას - საპროგნოზო ჯამურ დებიტს, 1038 ლ/წმ, რომელიც შეიძლება მივიღოთ მომავალში გასაბურღი 21 ჭაბურღილიდან.



ბაზგასმით უნდა აღინიშნოს, რომ მიწისქვეშა წყლების ბაზაზე შეთავაზებული წყალმომარაგების ვარიანტი ზოგადი ფრაზებით არ არის შემოფარგლული და ფაქტობრივად არსებულ ჰიდროგეოლოგიურ პირობებზე დაყრდნობით და სხვადასხვა ფაქტორების გათვალისწინებით, მეცნიერულად არის დასაბუთებული. ეს იდეა ნაშრომის კვიტესენციას წარმოადგენს და მისი პრაქტიკულად განხორციელება სავსებით რეალურია.

როგორც ვხედავთ, არსებული ბუნებრივი სიმდიდრე სრულყოფილად ათვისებული ჯერ-ჯერობით არ არის და ეს ქვეყნის ეკონომიკისთვის უაღრესად მნიშვნელოვანი საკითხის გადაწყვეტა მომავლის საქმეა.

## ლიტერატურა - REFERENCES- ЛИТЕРАТУРА

1. Мамулия Г. и др. „Отчет по гидрогеологическим изысканиям грунтовых водоносных отложений р. Квирила, с подсчетом запасов для водоснабжения Чиатура-Сачхерского горнопромышленного района“, Управление геологии Грузии 1966-68.
2. Well-performance tests <http://content.alterra.wur.nl/Internet/webdocs/ilri-publicaties/publicaties/Pub47/Pub47-h14.pdf>
3. ზვიადაძე უ., მარდაშოვა მ., კვიციანი ნ. „მიწისქვეშა წყლების დინამიკა“ – „ტექნიკური უნივერსიტეტი“ - თბილისი 2013.
4. ნადარეიშვილი ა. მიწისქვეშა წყლების მარაგების შეფასების მეთოდები. გამომცემლობა „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, თბილისი, 2001.
5. Инструкция по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод к месторождениям пресных вод. Москва, 1978.

### ქ. სანხერის მიმდებარე ტერიტორიის წყალშემცველი ჰორიზონტის ჰიდროდინამიკური პარამეტრების დადგენა და საექსპლუატაციო მარაგების შეფასება

#### მელიქაძე გ., ხუნდაძე ნ., რაზმაძე-ბროკიშვილი თ.

#### რ ე ზ ი უ მ ე

ნაშრომში აღწერილია საკვლევ ტერიტორიაზე გაბურღულ ჰაზურღილებში ჩატარებული საცდელ-ფილტრაციული სამუშაოები (ამოტუმბვითი ტესტირება, კერძოდ საფეხურიანი და ხანგრძლივი ტესტირებები), ასევე, ტემპერატურის, გამტარებლობის და ჰიდროდინამიკური პარამეტრების დროითი ვარიაციების გრაფიკები. მიღებული მონაცემების დამუშავების შედეგად გათვლილია წყალშემცველი ჰორიზონტის ჰიდროდინამიკური პარამეტრები (ფილტრაციის კოეფიციენტი (K), წყალგამტარებლობის კოეფიციენტი (T), ხვედრითი ხარჯი (q) წყლის ოპტიმალური დებიტი (Q<sub>1</sub>), გავლენის რადიუსი (R)). გამოთვლილი პარამეტრების გამოყენებით შესაძლებელი გახდა საკვლევ ტერიტორიაზე არსებული წყალშემცველი ჰორიზონტის საექსპლუატაციო მარაგის გამოთვლა და გაცა ახალი რეკომენდაცია წყლის რესურსების მარაგების გაზრდის მიზნით.

### DETERMINING THE HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF THE AQUIFER AND ASSESSMENT OF PROVEN RESERVES IN THE TERRITORY ADJACENT TO THE CITY OF SACHKHERE

Melikadze G., Khundadze N., Razmadze-Brokishvili T.

#### Abstract

The paper describes the test filtration work accomplished in the wells drilled in the study area (pumping tests, in particular, step and long tests), as well as the graphs of time variations of temperature, conductivity and hydrodynamic parameters. Following the processing the obtained data, the hydrodynamic

parameters of the aquifer were calculated (filtration coefficient ( $K$ ), water conductivity coefficient ( $T$ ), specific discharge ( $q$ ), optimal yield of water ( $Q_1$ ) and radius of influence ( $R$ )). By using the calculated parameters, it was possible to calculate the proven reserves of the aquifer in the study area and a new recommendation was given regarding the increase of the water resources in the area.

**УСТАНОВЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОДОНОСНОГО  
ГОРИЗОНТА И ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ НА ТЕРРИТОРИИ,  
ПРИЛЕГАЮЩЕЙ К Г. САЧХЕРЕ**

**Меликадзе Г., Хундадзе Н., Размадзе-Брокишвили Т.**

**Реферат**

В работе описаны опытно-фильтрационные работы, проведенные в скважинах, пробуренных на исследуемой территории (откачивающее тестирование, в частности, ступенчатое и продолжительное тестирования), а также графики временных вариаций температуры, проводимости и гидродинамических параметров. В результате обработки полученных данных, рассчитаны гидродинамические параметры водоносного горизонта (коэффициент фильтрации ( $K$ ), коэффициент водопроницаемости ( $T$ ), удельный расход ( $q$ ), оптимальный дебит воды ( $Q_1$ ) и радиус влияния ( $R$ )). При помощи вычисленных параметров стало возможно вычислить эксплуатационный запас имеющегося на исследуемой территории водоносного горизонта и были даны новые рекомендации с целью увеличения запасов водных ресурсов.

## საქართველოში, ხობის წმ. სოფიოს ეკლესიის მიმდებარე ტერიტორიის არქეოგეორადიოლოკაციური გამოკვლევის შედეგები

ოდია ვაძე დ., ქელიძე თ., ქირია ჯ., ღლონტი ნ.,  
იავოლოვსკაია ო.

თსუ, მ. ნოდია სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი

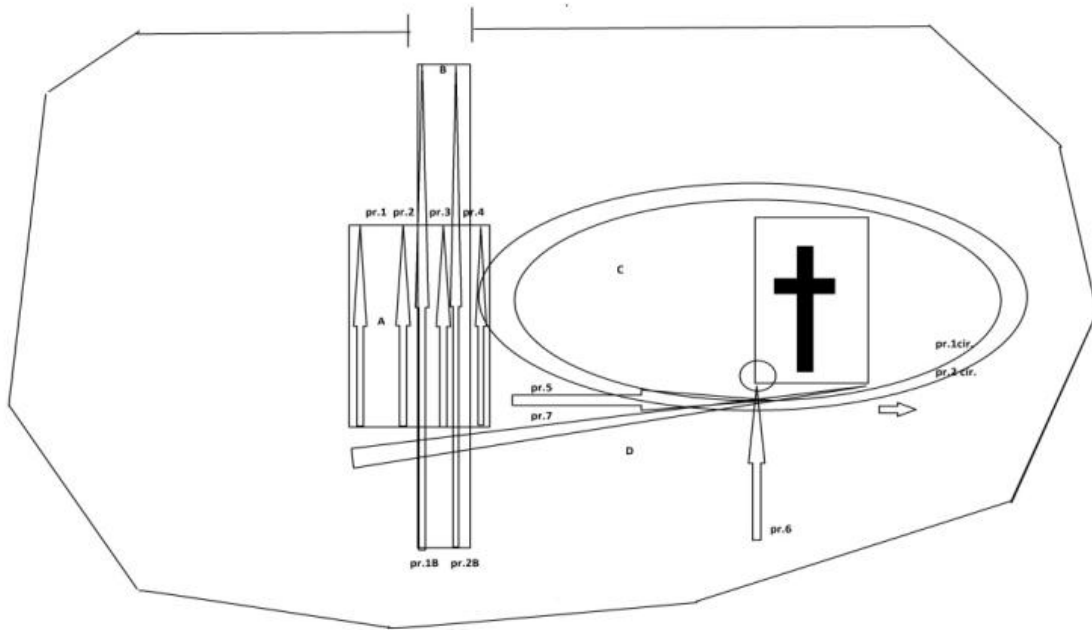
### შესავალი

წმ.სოფიოს ეკლესია 17 საუკუნის დასაწყისში აუგიათ მცირე გორაკის მოსწორებულ ზედაპირზე, რომელიც ეზოს გადმოჰყურებს 3-4მ სიმაღლიდან და მნიშვნელოვან წილად იფარება ეკლესიის ნაგებობით. კვლევის მიზანს წარმოადგენდა გალავანს შიდა ტერიტორიის მონიშნული ფართებზე რადიოსახეების მიხედვით ახლოქვეყნედაპირული განთავსების ობიექტების რაობის განსაზღვრა, არქეოლოგიურად პერსპექტული უბნების დაფიქსირება.

### მასალები და მეთოდები

2019 წლის ნოემბერში გეოფიზიკის ინსტიტუტის გამოყენებითი და ექსპერიმენტალური გეოფიზიკის სექტორის მიერ ჩატარდა არქეოგეორადიოლოკაციური ექსპედიცია ქ.ხობის წმ. სოფიოს მონასტრის გალავანს შიდა ტერიტორიაზე. გამოკვლევები ხორციელდებოდა გეორადარ „Zond 12-e“ თავისი საშტატო მიმღებ-გადამცემი ეკრანირებული ანტენით 500 მჰგც ცენტრალურ სიხშირეზე. გეორადარული მონაცემები მიღებული და დამუშავებულ იქნა გეორადარ „Zond 12-e“-ის საშტატო პროგრამული უზრუნველყოფით „Prizm 2.5“, სამგანზომილებიანი გრაფიკა განხორციელდა გეორადარულ მონაცემთა იმპორტირებით პროგრამული უზრუნველყოფა „Prizm 2.5“-დან პროგრამა „Voxler 3D“ შიდა მისი რესურსების გამოყენებით (RADAR Systems, Inc. Prizm 2, Software Package, Version 2.5 Users Manual Riga, 2010 pp. 38-44.). გეორადიოლოკაციური პროფილების ინტერპრეტაციისას, რადიოსახეების დაზუსტებისათვის გამოყენებულ იქნა ელექტროდინამიკის პირდაპირი და შებრუნებული ამოცანების გადაწყვეტის მსგავსობის ფიზიკური მოდელების ხერხი[1,2,3,4,5].

პირველადი გეორადიოლოკაციური გამოკვლევებისათვის შერჩეულ იქნა სამი უბანი: მონასტრის ეზოს შედარებით ჰორიზონტალური უბანი (ორი 30 მ პარალელური პროფილი, ოთხი 14 მ პარალელური პროფილი), მონასტრის ამაღლებულ ფერდობზე გამავალი სამი პროფილი (მათ შორის 16მ, რომელიც გადის მონასტრის კედლის გასწვრივ), ორი მეტ ნაკლებად კონცეტრული 80 და 86 მ-იანი პროფილი მონასტრის გარშემო (ნახ.1).



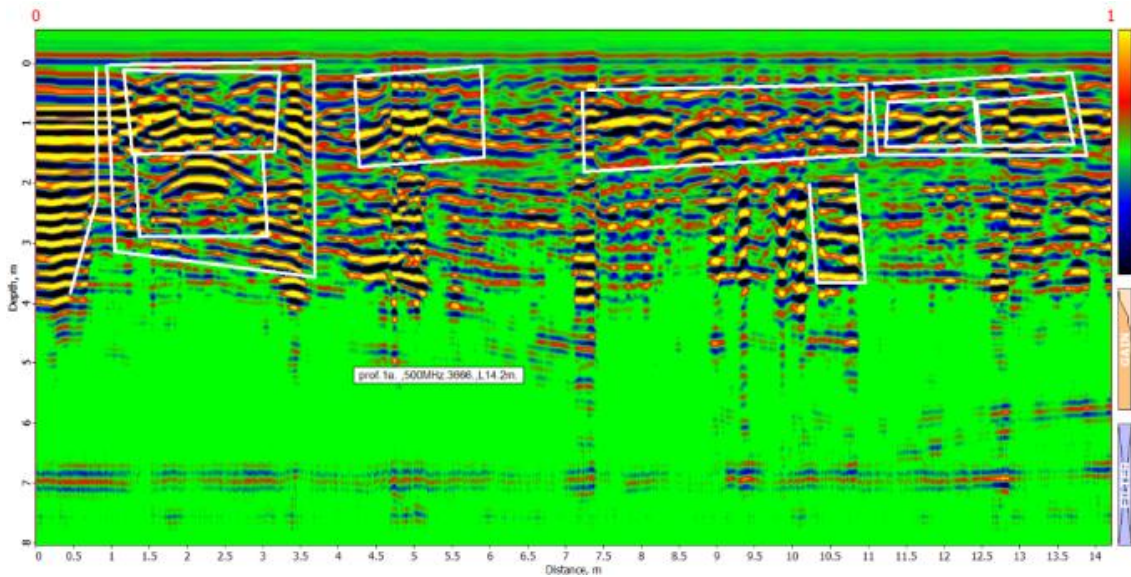
ნახ. 1. პროფილები დაჯგუფებულები არიან უბნების მიხედვით, უბანი-A მოიცავს ოთხ 14მ გეორადიოლოკაციურ პროფილს, უბანი-B მოიცავს ორ 30მ გეორადიოლოკაციურ პროფილს, უბანი-C მოიცავს 2 კონცენტრულ წრიულთან მიახლოებულ ჩაკეტილ პროფილებს (80 და 86მ), უბანი-D მოიცავს ორ ურთიერთ მართობულ (12მ) და ერთ მახვილი კუთხით განთავსებულ პროფილებს (16მ).

### შედეგები და დისკუსია



ნახ 2. უბანი-A ოთხი ჩატარებული პროფილებით 1A, 2A, 3A, 4A.

უბანი - A. ილუსტრაციისთვის ოთხი პროფილიდან (1-4 A) მოგვყავს პროფ 1A.

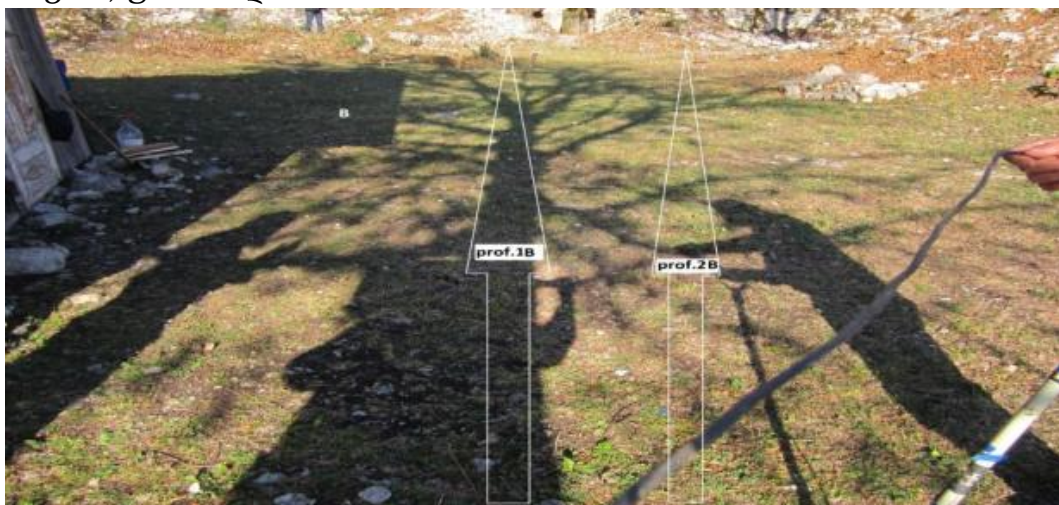


ნახ.3. პროფ.1A, გეორადარული კვეთა შესრულდა 500 მჰც ანტენით 14 მ სიგრძის პროფილზე, სიღრმით 7 მ. პარალელურ 2A, 3A, 4A პროფილებზე მიღებულია განგრძობითი მილისებრი სიღრუვის ობიექტების რადიოსახეები.

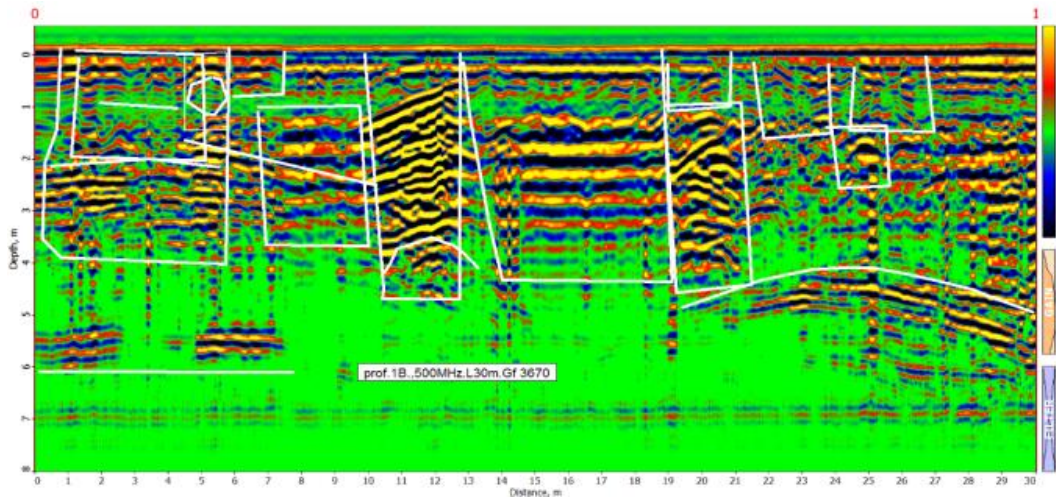
პროფ. 1A-ზე 1-3 მ დისტანციებზე გამოიკვეთა ორმოს ტიპის სიღრუვის დამახასიათებელი რადიოსახე 1.5 მ სიღრმემდე, რომლის ქვევითაც იკითხება მილის კვეთისმაგვარი სიღრუვე. 4-5-6 მ დისტანციებზე შემოკონტურდა „ორმოს“ მსგავსი სიღრუვის შესაბამისი რადიოსახე (ე.წ - ბოუ-თაი). 7.5-10მ დისტანციებზე მოინიშნა რთული ფორმის სხეულის რადიოსახე, სავარაუდოდ არქიტექტურული კონსტრუქციის ფრაგმენტები უნდა იყოს. მომდევნო დისტანციებზე ისევ შემოკონტურდა სიღრუვის ტიპის სიღრუვის შესაბამისი რადიოსახეები. 2მ სიღრმის ქვევით შემოკონტურებულია და იკვეთება ფუნდამენტის ნარჩენების შესაბამისი რადიოსახეები.

შეიძლება ითქვას, რომ გამოკვლეული უბანი-A, ოთხი პარალელური გეორადიოლოკაციური ერთმანეთის მსგავსი ჭრილით, მონიშნავს რთული არქიტექტურული კომპლექსის რადიოსახეს მიწისქვეშ განლაგებულ არქეოლოგიური არქიტექტურული ობიექტისთვის.

უბანი-B. გატარდა ორი პარალელური გრძივი 30მ სიგრძის გეორადიოლოკაციური პროფილი სამხრეთის მიმართულებით გალავნის შემოსასვლელამდე. პროფილების მიმართულება და დასახელება ნაჩვენებია გამჭვირვალე ისრებით. ილუსტრირებისათვის განვიხილავთ ერთ პროფილს (პროფ 1.B) უბანი B-დან.



ნახ. 4.უბანი B - მონიშნულია ორი პარალელური გრძივი 30მ. გეორადიოლოკაციური პროფილი სამხრეთის მიმართულებით გალავნის შემოსასვლელ კარამდე.

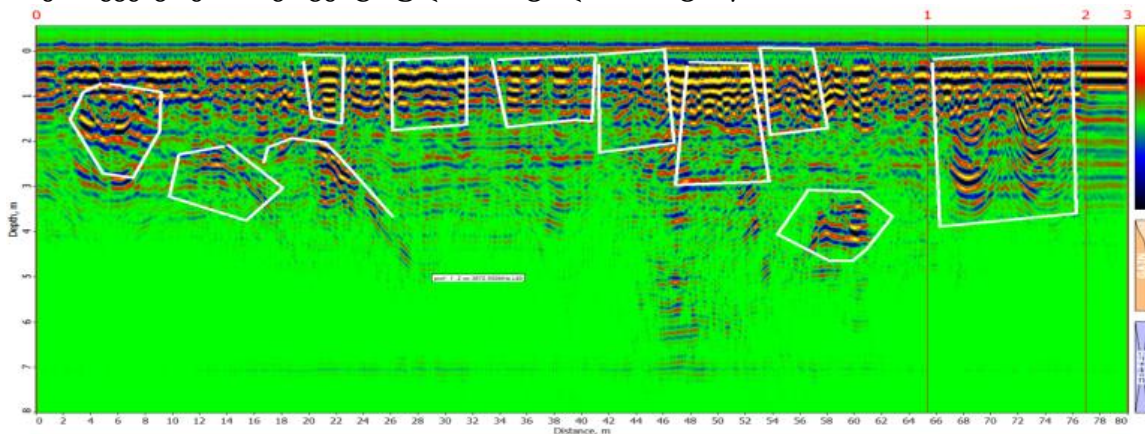


ნახ. 5. წარმოდგენილია რადაროგრამა პროფილ-1.ბ-ზე, სიგრძე 30მ, ხოლო ჩაწვდენის სიღრმე შემოსაზღვრულია 7მ.

რადაროგრამაზე (ნახ. 5) გამოიკვეთა ახლოკვე ზედაპირული განლაგების რიგი ობიექტების რადიოსახეები. სიმეტრიული და ამდენად ანტროპოგენული ნიშნების მატარებელი სივრცის სახე ზედაპირიდან 4 მ სიღრმემდე 0-დან 6 მ დისტანციამდე აღინიშნება ფრაგმენტირებული ორი ერთიმეორეზე განლაგებული 2-2 მეტრი სიმძლავრის კონსტრუქცია. ამასთან, პირველი ზედა ნაწილობრივ ჩაშლილია, ხოლო ქვედა შედარებით დაცული უნდა იყოს. 11-13მ დისტანციებზე გამოიყო შესაძლო ფუნდამენტის ნარჩენები, რომლის ზედა მხარე დახრილია ჰორიზონტის მიმართ და რომლის ქვემოთ 3-4 მ სიღრმეზე სიღრუვე იკითხება. 8-10 მ დისტანციებზე და 14-19 მ სიღრმეზე იკითხება ერთგვაროვანი სინფაზურობის ღერძების ტექსტურის მქონე, მკაფიო გეომეტრიის სივრცე, რომელიც მოინიშნა 3.5მ სიღრმემდე. ის შესაძლოა, ანტროპოგენული წარმოშობის ობიექტი იყოს, რომელიც გადახურულია ტალღოვან-თაღოვანი გადაფარით. ეს კონსტრუქცია ებჯინება ფუნდამენტის ნარჩენებს, შემოფარგლულს 19-21 მ დისტანციებზე, სიღრმით 4მ-მდე. მოინიშნება მსხვილი კონსტრუქციული ობიექტების რადიოსახეები 6 მ სიღრმეზე 0-3მ, 5-8მ და 20-30 მ (რკალოვანი საზღვრით) და სიმძლავრით 1მ. მოინიშნა ზედაპირთან ახლოს სიღრუვეები 5-6 და 25-26 მ დისტანციებზე.

რიგი ობიექტებისა ფიქსირდება როგორც პირველ, ასევე მეორე პარალელურ პროფილებზე, რაც მიუთითებს მათ განგრძობით მიწისქვეშა განთავსებაზე.

უბანი-ც. მონასტრის გარშემო, ეზოს ტერიტორიაზე, გატარდამეტ-ნაკლებად კონცენტრულიელიფსური ფორმის პროფილები (იხ.ნახ. 1) სიგრძით 80 და 86 მ. ილუსტრაციისათვის ნახ. 6-ზე მოგვყავს ერთი კონცენტრული პროფილი (პროფ. 1წრ.)



ნახ.6. პირველი წრიული პროფილის (პროფ. 1წრ. სიგრძით 80მ).

რადაროგრამაზე (ნახ. 6) ელექტრომაგნიტური ტალღების სინფაზურობის დერმების კონფიგურაციებიდან იკვეთება არაერთგვაროვნებისა, რომლებიც შეიძლება არქიტექტურული ობიექტების რადიოსახეებს წარმოადგენდნენ. 4-8მ დისტანციაზე და 1-3 მ სიღრმეზე მოინიშნა გადაფარული სიღრუვის მქონე სივრცე, ობიექტის რადიოსახე საკმაოდ სიმეტრიულია და ამდენად შეიძლება ანტროპოგენული წარმოშობის ობიექტს შეესაბამებოდეს. დისტანციებზე 12-14 და 18-22 მ იკითხება ნაწილობრივ დაზიანებული ოვალური გადაფარვის სიღრუვეები 2-2.5მ სიღრმეებზე. 24მ დისტანციაზე მოინიშნა სავარაუდოდ ფუნდამენტის ნარჩენები 0.5-1.5მ სიღრმეზე; ასევე ფუნდამენტის ნარჩენები უნდა იყოს 26-32მ, 36-40 მ დისტანციებზე 0-2მ სიღრმეებზე. „ორმოს“ ტიპის სიღრუვის რადიო სახეა 42-46მ დისტანციებზე. სიღრუვეა ასევე 48-54მ დისტანციებზე 3მ სიღრმემდე, რომელიც გადაფარულია მყარი საფარით, სისქით 0.6-0.8მ. 58-62მ დისტანციებზე და სიღრმით 3.5-5მ მოინიშნა შესაძლო სიღრუვე, ხოლო 66-76მ დისტანციებზე მოინიშნა სიღრუვე, გადაფარული მყარი საფარით და დაყრდნობილი მრავალი ფრაგმენტის მქონე ორ პარალელურ „ფუნდამენტზე“.

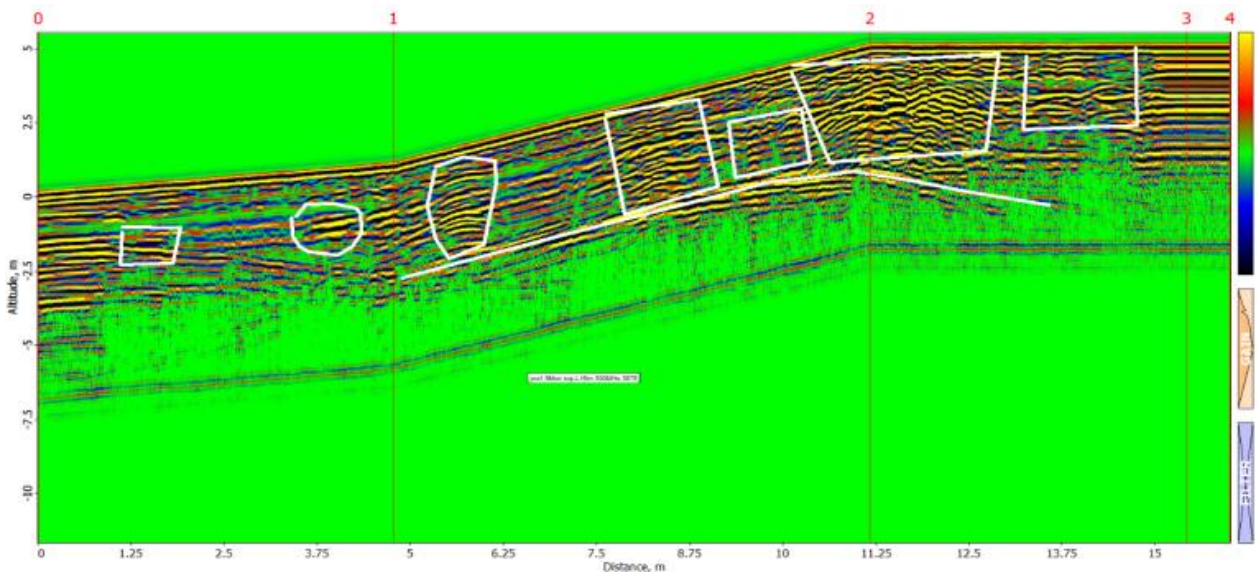
პროფ.2 წრ-ზე დაფიქსირებულია პროფ. 1 წრ-ის შესაბამისი, მკაფიოდ გამოხატული განგრძობითი ობიექტის სახე დისტანციებზე 58-64მ. დასიღრმეზე 4-7მ. „ორმოს“ ტიპის სიღრუვის რადიოსახეა 42-46მ დისტანციებზე, ასევე სიღრუვეა 48-54მ დისტანციებზე 3მ სიღრმემდე. სიღრუვე გადაფარულია მყარი საფარით, სისქით 0.6-0.8მ. 58-62მ დისტანციებზე და სიღრმით 3.5-5მ მოინიშნა შესაძლო სიღრუვე. 76-82მ დისტანციებზე, ისევე როგორც პროფ.1 წრ-ზე, მოინიშნა მყარი საფარით გადაფარული სიღრუვე, დაყრდნობილი მრავალი ფრაგმენტის მქონე ორ პარალელურ ფუნდამენტზე.



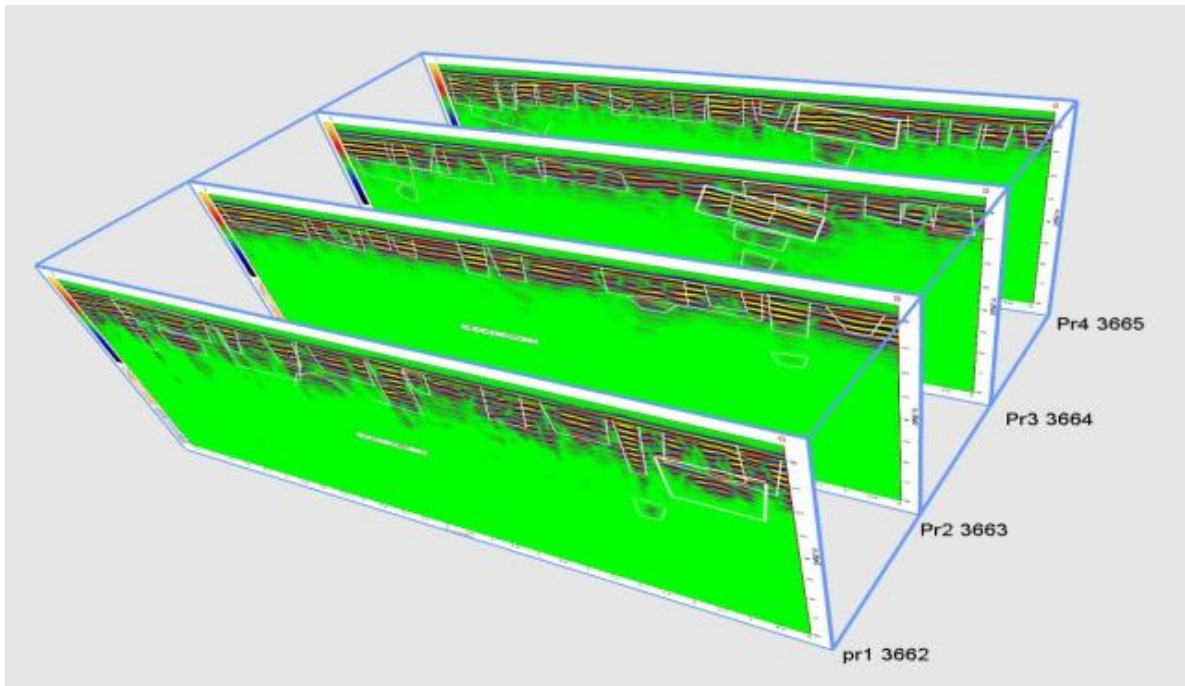
ნახ. 7. ნახაზზე დატანილია პროფილების გატარების მიმართულებები და დასახელებები, იხ. ნახ. 1, უბანი-D, ისრით მითითებული შენობის კუთხის GPS კოორდინატებია :0736017; 4693635.

უბანი-D. ილუსტრაციისთვის მოგვყავს პროფ-7, გეორადარული კვეთი გატარდა მონასტრის განთავსების გორაკზე ასასვლელი ბილიკის გასწვრივ მონასტრის მეორე კუთხემდე. პროფილის სიგრძე 16მ. პროფილის რელიეფური წარმოდგენა მოგვყავს ნახ 8-ზე.

2-3.5მ დისტანციებზე და 0-1მ სიღრმეზე მოინიშნა ორმოს ტიპის რადიოსახე მყარი გადაფარვით. 5.5-6.5მ დისტანციებზე მოინიშნა ორი, ერთიმეორის თავზე განთავსებული მილის ტიპის ობიექტების რადიოსახეები 1 და 2.5მ სიღრმეებზე. მოინიშნა მათ გასწვრივ „ორმოს“ ტიპის რადიოსახეები - ასევე, ერთიმეორის თავზე განლაგებით, 7.5-9.5მ დისტანციებზე. მკაფიოდ გამოიყო სიმეტრიული მიწისქვეშა ობიექტი 10-14 მ დისტანციებზე 3მ სიღრმემდე.



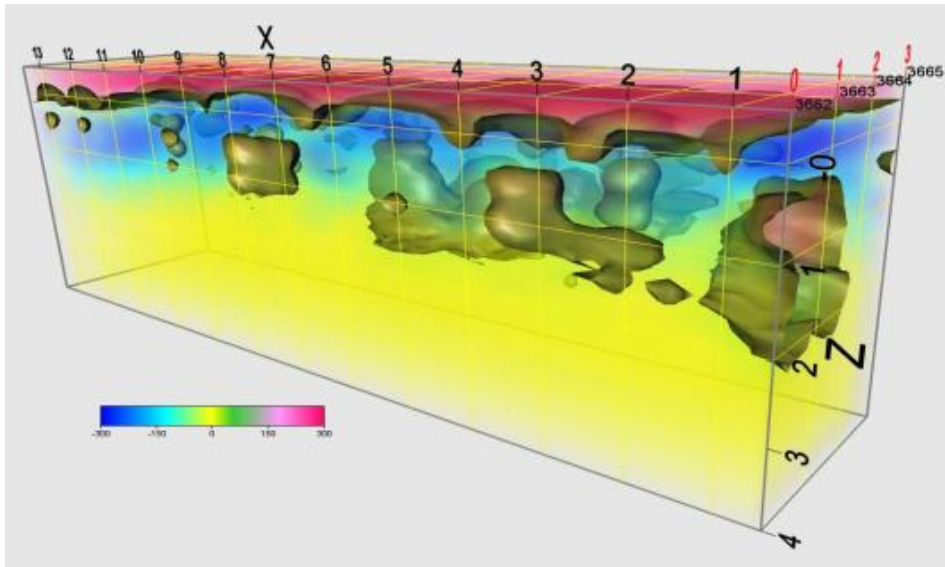
ნახ.8. პროფილი-7, რელიეფურად წარმოდგენილია იმ ანომალიების განთავსების ლოკაციები, რომლებიც დეტალურად განვიხილეთ ინტერპრეტაციისას. ყველა განსაკუთრებულობა დატანილია რელიეფთან შესაბამისობაში.



ნახ. 9.პარალელური პროფილების პრ1, პრ2, პრ3, პრ4 სივრცული სურათი - გამდიერების ერთნაირი ფუნქციის ოპციით დამუშავებულია უბანი-A. იკითხება რადიოსახეების განგრძობითი განვრცობა-განთავსება ოთხივე პროფილზე 2-3მ სიღრმეებისთვის.

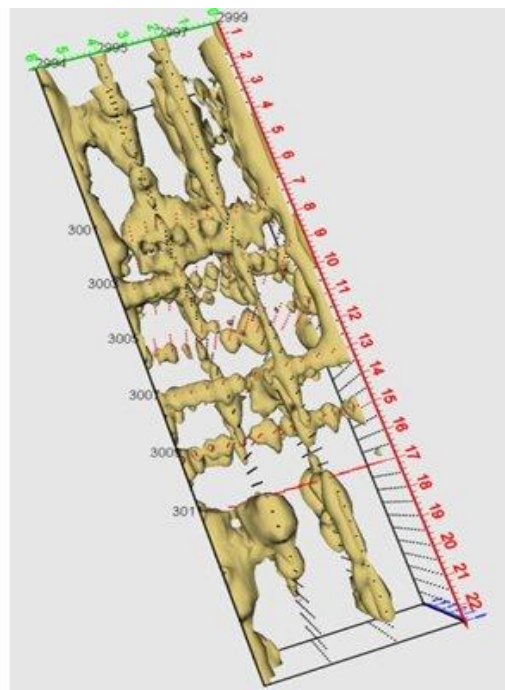
ნახ. 10-ზე მოყვანილია უბან-A-ზე მიღებული შედეგები სამგანზომილებიანი წარმოდგენით, შესრულებული „Voxler 3D“ პროგრამის გამოყენებით, საიდანაც ნათლად იკვეთება თითქმის ტოლ შეზღუდულ თაღისებურ სივრცეთა სტრუქტურირებული პერიოდულობა, რაც უნდა მიუთითებდეს მათ ანტროპოგენულ წარმოშობაზე.





ნახ. 10.A უბნის 1,2,3,4 პარალელურ პროფილებზე ახლოქვედაპირულ შესადმო სიღრუვეთა რეგულარული განლაგება. პროფილთა წარმოდგენა შესრულებულია „Prizm 2.5” პროგრამულ უზრუნველყოფასთან თავსებადი „Voxler 3D“ პროგრამის გამოყენებით.

ნაგებობის თაღვანი გადაფარვების რადიოსახეები, რომლებიც ახასიათებენ მთლიანად ოთხივე პარალელურ გეორადარულ კვეთებს, ააშკარავებენ არქიტექტურული ნაგებობის ნარჩენების არსებობას მიწისქვეშ. აქვე მოგვყავს[5] ნახ.11 იმავე მეთოდით შესრულებული გეორადიოლოკაციური სამუშაოს დასკვნითი და დადასტურებული ფოტოგრაფიული შედეგი, ხობის ღვთისშობლის მიძინების ტაძრის გალავნის მიმდებარე ტერიტორიის არქეოლოგიური გათხრის წინა და გათხრის შემდგომი სამგანზომილებიანი წარმოდგენა მიწისქვეშა განთავსების არქიტექტურული ობიექტისათვის.



ნახ. 11. ხობის ღვთისშობლის მიძინების ტაძრის გალავნის მიმდებარე ტერიტორიის გამოკვლევული ფოტო გათხრების შემდეგ. დატანილია 1,2,3,4 პროფილები, ნაჩვენებია პარალელურ პროფილებზე ახლოქვედაპირულ სიღრუვეთა, კედლების,ფუნდამენტის, კიბეების და ა.შ.განლაგება.პროფილთა წარმოდგენა შესრულებულია „Prizm 2.5” პროგრამულ უზრუნველყოფასთან თავსებადი „Voxler 3D“ პროგრამის გამოყენებით.

## დასკვნა

გამომდინარე პირველადი გამოკვლევებისთვის მონიშნული უბნების „Prizm 2.5“ პროგრამით გეორადიოლოკაციური ინტერპრეტაციიდან (30მ სიგრძის ორი პარალელური პროფილი, 80-86 მ სიგრძის ორი კონცენტრული წრიული პროფილი, ორი მართობული პროფილი მონასტრისკუთხესთან გადაკვეთით, 16 მ სიგრძის რელიეფური პროფილი და 14 მ სიგრძის ოთხი პარალელური პროფილი) შეიძლება ითქვას, რომ 1-6 მ სიღრმეებზე გამოიკვეთა ერთიანი, რთული, არქიტექტურული კომპლექსის რადიოსახე. მიღებულია დამარბული სტრუქტურების სამგანზომილებიანი ინტერპრეტაციის სურათები „Prizm 2.5“ და „Voxler 3D“ პროგრამის გამოყენებით.

**რეკომენდაციები:** 1. გაგრძელდეს წმ. სოფიოს მონასტრისა და მიმდებარე ტერიტორიის დეტალური გეორადიოლოკაციური გამოკვლევა; 2. აღნიშნული ტერიტორია ცნობილ იქნეს არქეოლოგიური კვლევებისთვის მნიშვნელოვანი პერსპექტივის მქონედ.

**მადლობები:** ავტორები მადლობას უხდებიან საქართველოს საპატრიარქოს ფოთისა და ხობის საეპისკოპოსოს, რომელთაგან ჩვენი მოწვევისა და მუშაობაში ხელშეწყობის გარეშე გეორადიოლოკაციური პირველადი კვლევები ვერ შესრულდებოდა.

## ლიტერატურა - REFERENCES - ЛИТЕРАТУРА

1. Odilavadze D.T., Chelidze T.L. Geophysical modelling of the georadiolocation field in direct and inverse tasks of Electrodynamics. Geophysical Journal, V.35, №4, 2013,(in Russian).
2. Odilavadze D.T., Chelidze T.L. Physical modeling of lava tubes in the GPR. Transactions of Mikheil Nodia Institute of Geophysics, vol. LXVII, Publishing House of Tbilisi State University, Tbilisi, 2017, pp. 129-142, (in Russian).
3. Odilavadze D., Chelidze T., Tskhvediasvili G. Georadiolocation physical modeling for disk-shaped voids. Journal of the Georgian Geophysical Society. Vol 18, Physics of Solid Earth, 2015, pp. 26-39
4. Odilavadze D., Chelidze T., Ghlonti N., Kiria J., Tarkhishvili A. Physical modelling of a layered wedge type model in direct and inverse tasks of georadiolocation. Transactions of Mikheil Nodia Institute of Geophysics, vol. LXIX, Publishing House of the Tbilisi State University, Tbilisi, 2018, pp.44-61 (in Russian).
5. Odilavadze, D., Chelidze, T., Ghlonti, N., Qiria, J., Iavolovskaia, O., Tarkhishvili, A. Results of GPR Survey of Buried Archaeological Objects on the Southern Part of Territory of the Blessed Virgin Mary Assumption Khobi Monastery. Transactions of Mikheil Nodia Institute of Geophysics, vol. LXX; Tbilisi, 2019, pp.16-25, (in Russian).

**საქართველოში, ხობის წმ. სოფიოს ეკლესიის მიმდებარე ტერიტორიის  
არქეოგეორადიოლოკაციური გამოკვლევის შედეგები**

**ოდილავაძე დ., ქელიძე თ., ქირია ჯ., ღლონტი ნ., იავოლოვსკაია ო.**

## რ ე ზ ი უ მ ე

თსუ, გეოფიზიკის ინსტიტუტის მიერ ხობის წმ. სოფიოს ეკლესიის მიმდებარე ტერიტორიაზე ჩატარდა პირველადი არქეოგეორადიოლოკაციური გამოკვლევა. მიღებული შედეგების ორ- და სამგანზომილებიანმა ინტერპრეტაციამ „Prizm 2.5“ და „Voxler 3D“ პროგრამების გამოყენებით წარმოაჩინა ახლო ქვეზედაპირული განლაგების დაფარული რთული ნაგებობის ნაშთების არსებობის შესაძლებლობა. ორ- და სამგანზომილებიან სივრცეში გამოჩნდა პერიოდული განლაგების მქონე სტრუქტურირებული ობიექტის რადიოსახე, რაც შესაძლებელია არქიტექტურულ ობიექტს უკავშირდებოდეს.

## **IN GEORGIA, KHOBI, RESULTS OF A ARCHEOGEORADIOLOCATION SURVEY OF THE AREA SURROUNDING THE CHURCH OF ST.SOPHIA**

**Odilavadze D., Chelidze T., Kiria J., Ghlonti N., Yavolovskaya O.**

### **A b s t r a c t**

TSU, Institute of Geophysics conducted primary archaeogeoradiolocation research using „Zond 12 e”, in the vicinity of the church of St. Sophia. Two-dimensional and three-dimensional interpretation of the results using the software “Prizm 2.5” and “Voxler 3D” showed the possibility of the existence of near-surface remains of a complex underground structure of anthropogenic origin. A radio image of a structured object was revealed with a periodic arrangement of arched-type ceilings in two- and three-dimensional spaces, which can be associated with an architectural object.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ АРХЕОГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ТЕРРИТОРИИ ХОБСКОЙ ЦЕРКВИ СВ. СОФИИ В ГРУЗИИ**

**Одилавадзе Д., Челидзе Т., Кирия Дж., Глonti Н., Яволоовская О.**

### **Р е ф е р а т**

Институт геофизики ТГУ провёл первичные археогордиолокационные исследования в окрестностях церкви св. Софии (г. Хоби) с использованием аппаратуры „Zond 12 e”. Двумерная и трехмерная интерпретация результатов с использованием программных обеспечений „Prizm 2.5” и „Voxler 3D” показала возможность существования приповерхностных остатков сложной подземной структуры антропогенного происхождения. Выявился радиообраз структурированного объекта с периодическим расположением перекрытий арочного типа в двух- и трехмерных пространствах, которое может быть связано с архитектурным объектом.

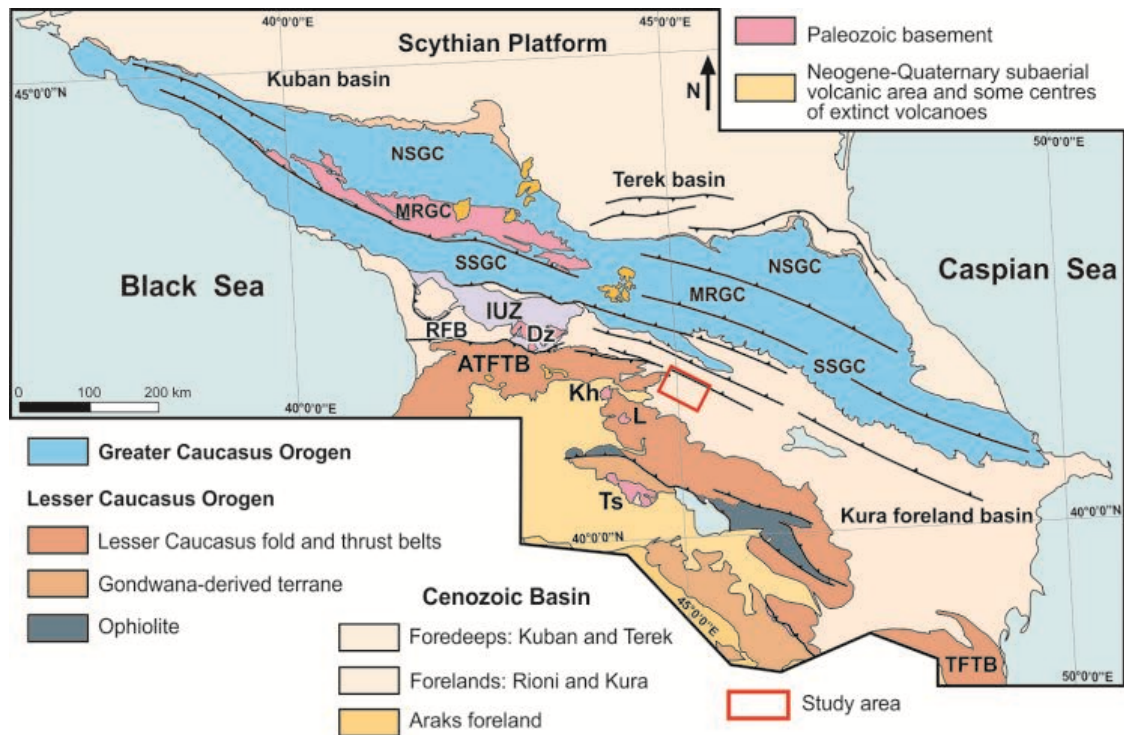
## მტკვრის ფორლანდის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის გეოლოგიური აგებულება დასავლეთ გარეკახეთის მაგალითზე

რაზმაძე ა.

თსუ, მ. ნოდია სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი  
[alrazmadze@gmail.com](mailto:alrazmadze@gmail.com)

### 1. შესავალი

მტკვრის ფორლანდის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელი გვიანკაინოზოური კონტინენტური მთათწარმოშობის ერთ-ერთი მკაფიო მაგალითია, რომელიც მოქცეულია კავკასიონს და მცირე კავკასიონს შორის და განლაგებულია არაბეთ-ევრაზიის კოლიზიური ზონის უკიდურეს ჩრდილოეთ ნაწილში. მტკვრის ფორლანდის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელი მოიცავს საქართველოს და აზერბაიჯანის ტერიტორიებს და ზედაპირზე ძირითადად წარმოდგენილია ნეოგენური და მეოთხეული ასაკის ნალექებით (ნახ. 1).



ნახ. 1. კავკასიის ტექტონიკური რუკა [5]. აბრევიატურა: SSGC-კავკასიონის სამხრეთ ფერდი; MRGC-კავკასიონის მთავარი ქედი; NSGC-; RFB-რიონის ფორლანდური აუზი; IUZ-იმერეთის აზეგების ზონა; ATFTB-აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელი; TFTB-თალიშის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელი; Dz-ძირულა; Kh-ხრამი. ოთხკუთხედი წითელი ფერის ჩარჩოთი აღნიშნულია საკვლევი ტერიტორია.

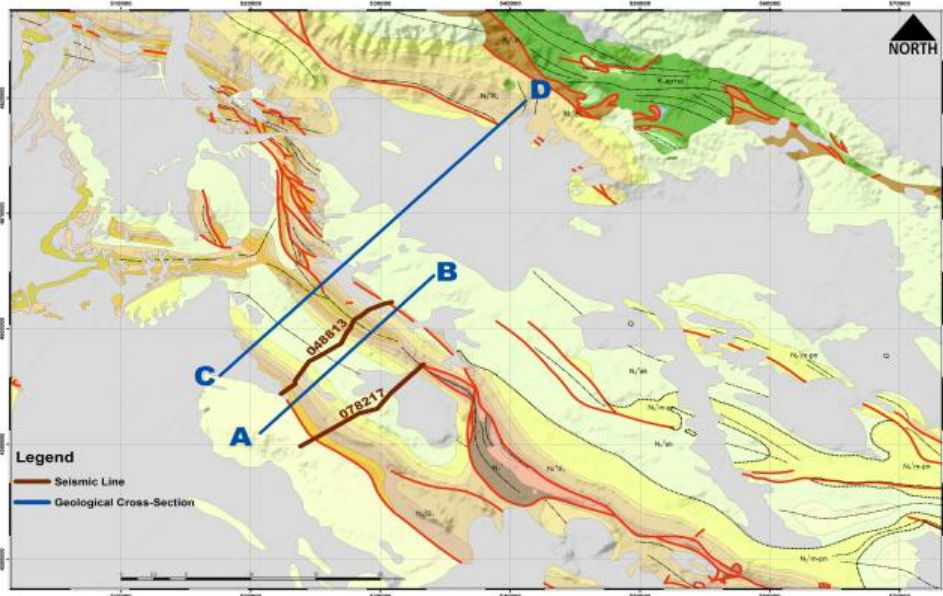
თანამედროვე შეხედულებების თანახმად მტკვრის ფორლანდი ოლიგოცენურიდან ქვედა-მიოცენის ჩათვლით წარმოადგენდა ტიპურ ფორლანდურ აუზს, რომელმაც შუამიოცენურ -

პლიოცენურ-პლეისტოცენურ დროში განიცადა კუმშვითი დეფორმაცია და მისი თანამედროვე გეომეტრია წარმოდგენილია სამხრეთ-ვერგენტული შეცოცებებით [1-6]. მტკვრის ფორლანდი აქტიური ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელია, რაზეც მიუთითებს თანამედროვე მიწისძვრების და GPS მონაცემები [7-9].

კვლევის ობიექტს წარმოადგენს დასავლეთ გარეკახეთის ტერიტორია, რომელიც მტკვრის ფორლანდის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის შემადგენელი ნაწილია (ნახ. 2). სტატიაში წარმოდგენილია გარეკახეთის დასავლეთ ნაწილის გეოლოგიური აგებულება. სეისმური პროფილების, ბურღილების და ზედაპირული გეოლოგიის მონაცემებზე დაყრდნობით აგებულია გეოლოგიური ჭრილები. გამოთქმულია მოსაზრება, რომ ანტიკლინები ძირითადად წარმოდგენილია რღვევა-გავრცელებადი ნაოჭებით და მათ შორის განვითარებულია შეცოცებებთან დაკავშირებული აუზები.

## 2. გეოლოგიური აგებულება

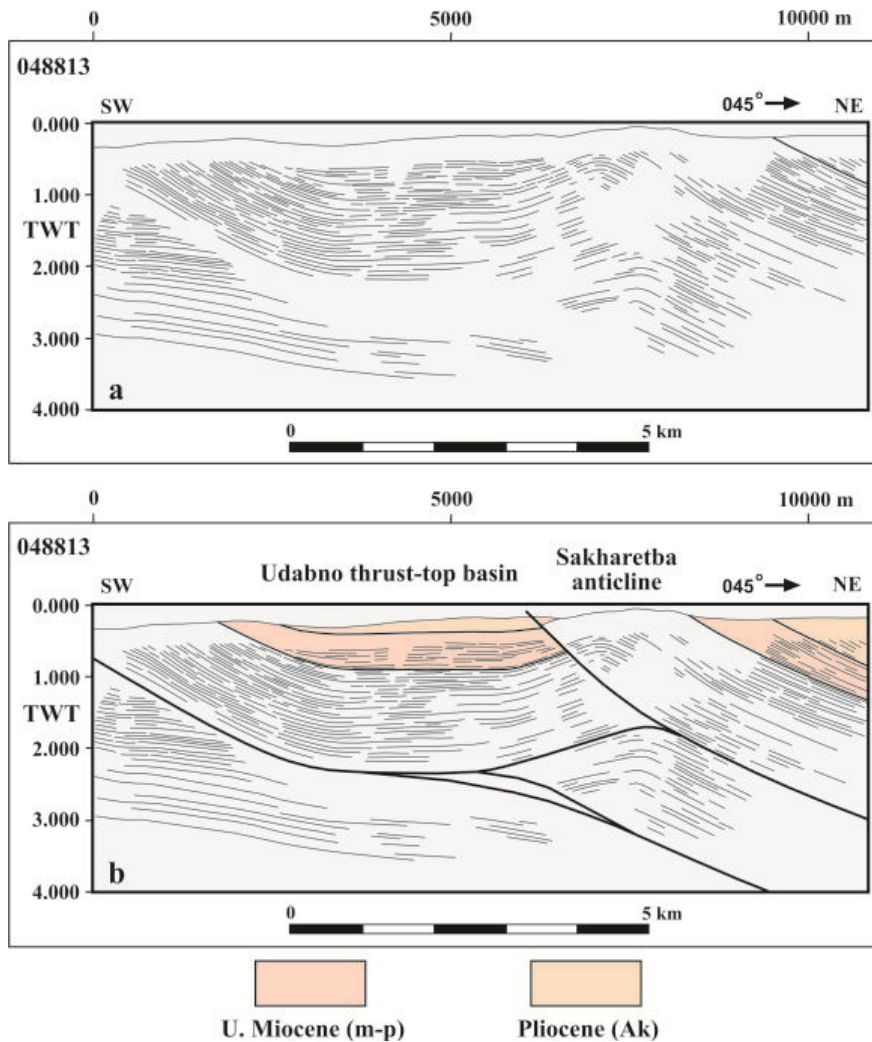
მტკვრის ფორლანდის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის ოროგრაფია წარმოდგენილია მთაგრეხილებით და დეპრესიებით. მთაგრეხილებს ძირითადად აქვთ თითქმის განედური მიმართულება და მათ აგებულებაში მონაწილეობენ ნეოგენურ-მეოტხეული ასაკის ნალექები. საკვლევი ტერიტორიის სტრატეგრაფია ძირითადად ასახავს მტკვრის ფორლანდური აუზის ევოლუციას. ოლიგოცენ-ქვედამიოცენური, შუა-გვიანმიოცენური და პლიოცენ-პლეისტოცენური ნალექები წარმოდგენილია მარჩხი ზღვის და სქელი კონტინენტური ნალექებით. ოლიგოცენ-ქვედამიოცენური ნალექები ე.წ. მაიკოპური ფაციესით არის წარმოდგენილი, ოკეანესთან შეზღუდული კავშირის მქონე ზღვიური (ევქსინური) წარმონაქმნი. მის შემადგენლობაში წამყვანია თაბაშირიანი და იაროზიტის თიხები, დამორჩილებული - ქვიშაქვები [2, 10]. შუამიოცენი არის მარჩხი ზღვის, უპირატესად წარმოდგენილი წვრილნატეხოვანი ტერიგენული კლასტოლითებით, კირქვებით (ხშირია ლუმამელი) და მერგელებით კონგლომერატების იშვიათი შუამრევებით. მისი სიმძლავრე გარე კახეთში შეადგენს 100-120მ [2].



ნახ. 2. დასავლეთ გარეკახეთის გეოლოგიური რუკა ო. სეფაშვილის [11] მონაცემებზე დაყრდნობით.

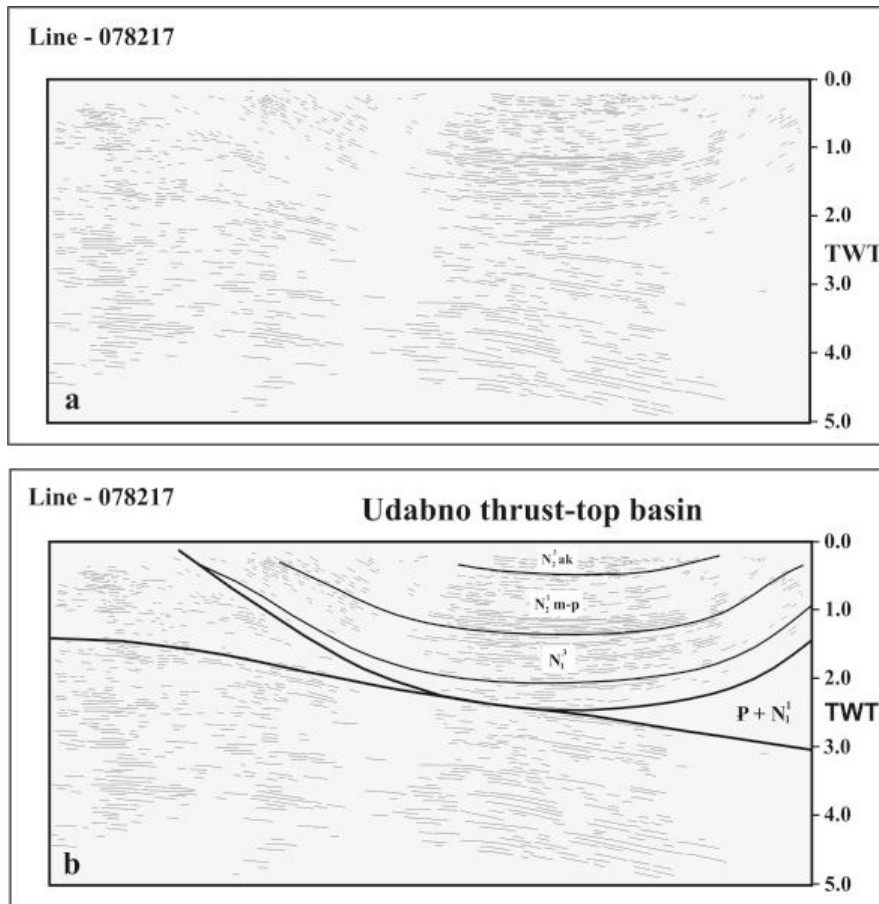
გვიანმიოცენური ნალექები მარჩხი ზღვის და კონტინენტური ნალექებით არის წარმოდგენილი (ქვიშაქვები, გრაველითები, ქვიშიანი თიხები და კონგლომერატები; სიმძლავრე 2000-3000მ). ამ ნალექებში კარგად დაიკვირვება ლითოლოგიური სხვაობა მტკვრის ფორლანდის

ჩრდილო და სამხრეთ პერიფერიებს შორის. ჩრდილოურ ფაციესში ქვარგვალები კავკასიონის ფლიშით არის წარმოდგენილი, ხოლო სამხრეთში – მცირე კავკასიონის ვულკანური, მაგმური, მეტამორფული და სხვ. ქანებით [2, 12]. პლიოცენ-პლეისტოცენური (აღჩაგილ-აფშერონული) ნალექები წარმოდგენილია როგორც ზღვიური, ასევე კონტინენტური ნალექებით [2, 10]. აღმოსავლეთ საქართველოში მეოტურ-პონტური ასაკის ზედა მოლასას სტრატиграფიული ხარვეზით უთანხმოდ მოყვება პლიოცენურ-პლეისტოცენური ნალექები და წარმოდგენილია ქვიშაქვების, ქვიშიანი თიხების, გრაველითებისა და კონგლომერატების მორიგეობით. მათი სიმძლავრე ცვალებადია, მერყეობს ათეულიდან ათასეული მეტრის ფარგლებში (მაგ. გარე კახეთი, შირაქი, -1500მ) [10].



ნახ. 3. (a) არაინტერპრეტირებული და (b) ინტერპრეტირებული სეისმოპროფილები. პროფილის განლაგება ნაჩვენებია მე-2 ნახაზზე.

მტკვრის ფორლანდის ფარგლებში განვითარებულია მორფოლოგიურად კარგად გამოხატული ხაზოვანი ნაოჭები, რომლებიც გართულებულია შესხლეტვა-შეცოცხებით [11]. გარეკახეთის დასავლეთ ნაწილში სტრუქტურები წარმოდგენილია სამხრეთ-ვერგენტული ნაოჭებით (უდაბნო, სახარეტბა, სათიბე, ლამბალო, წიწმატიანი, მწარეხევი, ნაცვალწყალი, კაკაბეთი). ნაოჭებისთვის დამახასიათებელია ვიწრო ანტიკლინები და ფართო სინკლინები [10, 11, 13]. სინკლინები ძირითადად ამოვსებულია მათზე უთანხმოდ განლაგებული აღჩაგილ-აფშერონული ნალექებით [3, 10, 11, 13, 14].



ნახ. 4. (a) არაინტერპრეტირებული და (b) ინტერპრეტირებული სეისმოპროფილები. პროფილის განლაგება ნაჩვენებია მე-2 ნახაზზე.

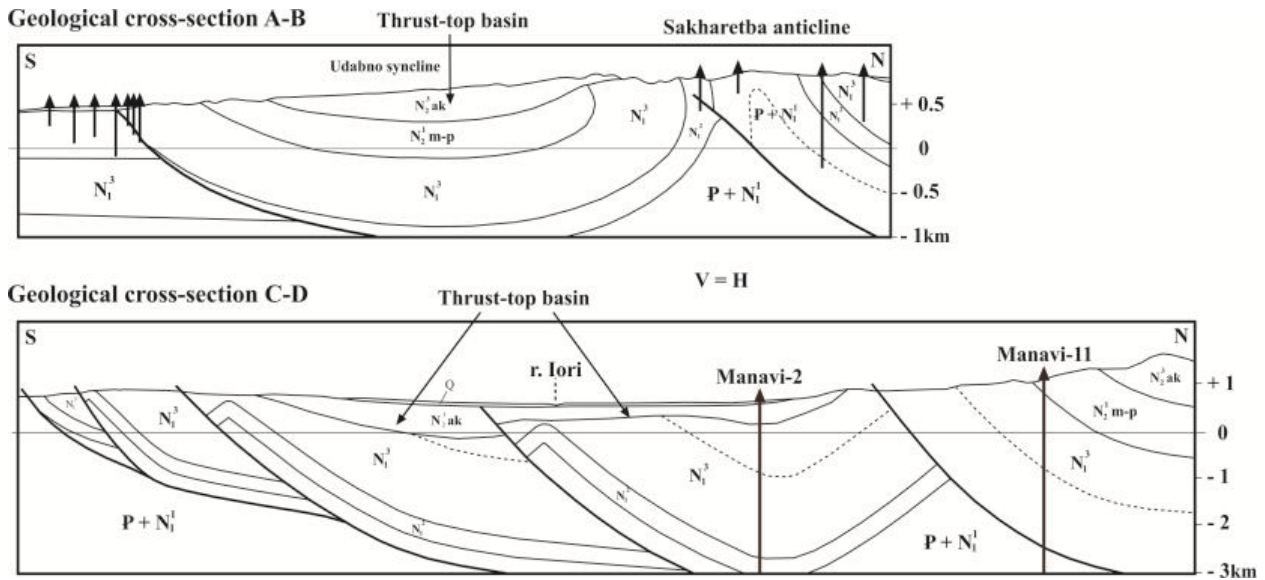
### 3. გეოლოგიური ჭრილები

გეოლოგიური ჭრილების (A-B, C-D) აგებისათვის გამოყენებული იყო ო. სეფაშვილის 1:50,000 მასშტაბის გეოლოგიური რუკა [11], ბურღილების და ზედაპირული გეოლოგიის მონაცემები (ნახ. 2). გეოლოგიური ჭრილების აგებისას გამოყენებული იყო, როგორც გამოქვეყნებული [15], ასევე არსებული სეისმოპროფილები (ნახ. 3 და 4). გეოლოგიურ ჭრილებზე კარგად დაიკვირვება სტრუქტურების გეომეტრია. სტრუქტურები ძირითადად წარმოდგენილია სამხრეთ-ვერგენტული, რღვევებთან დაკავშირებული ნაოჭებით და ძირითადი მოწყვეტის ზედაპირი განვითარებულია მაიკოპურ ნალექებში (ნახ. 5).

### 4. დისკუსია

განსხვავებული მოდელებია წარმოდგენილი მტკვრის ფორლანდის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყლის დეფორმაციის სტრუქტურული სტილის, გეომეტრიის და დეფორმაციის კინემატიკის თვალსაზრისით [1-6, 13, 16, 17]. მკვლევართა ერთი ნაწილის მიხედვით მტკვრის ფორლანდის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელი თხელ-ზეწრული სტრუქტურაა, ანუ დეფორმაციაში ფუნდამენტი არ მონაწილეობს [1-6], ხოლო მეორე შეხედულების თანახმად კი დეფორმაციაში დანაღეპ საფართან ერთად ფუნდამენტიც მონაწილეობს და მტკვრის ფორლანდის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელი სქელ-ზეწრული სტრუქტურაა [13, 16, 17]. ასევე განსხვავებული მონაცემებია ნაოჭების ტიპების თვალსაზრისითაც. ფორტეს და სხვათა მიხედვით [6] მტკვრის ფორლანდის ფარგლებში ძირითადად განვითარებულია სამხრეთ-ვერგენტული რღვევა-გალუ-

ნული ნაოჭები. ვ. ალანას და სხვათა მიხედვით [3, 4] კი კუმშვითი სტრუქტურები წარმოდგენილია სამხრეთ-ვერგენტული რღვევებთან დაკავშირებული ნაოჭებით (რღვევა-გავრცელებადი და რღვევა-გალუნული ნაოჭებით) და დუბლექსებით. მე-5 ნახაზიდან ჩანს, რომ დასავლეთ გარე კახეთის ანტიკლინები სამხრეთ-ვერგენტული "breakthrough" რღვევა-გავრცელებადი ნაოჭებია [18] და აგებულია მაიკოპური (ოლიგოცენ-ადრემიოცენი), შუამიოცენური, გვიანმიოცენური და პლიოცენური ნალექებით. თხელ-ზეწრული და სქელ-ზეწრული ტექტონიკის კონცეფციიდან [19] გამომდინარე, სავარაუდოთ დასავლეთ გარეკახეთის სტრუქტურა თხელ-ზეწრულია.



ნახ. 5. გეოლოგიური ჭრილები (A-B, C-D). ჭრილების განლაგება ნაჩვენებია მე-3 ნახაზზე.

ცნობილია, რომ შეცოცებებთან დაკავშირებული აუზები (ან "ფიგბექ" აუზები) მნიშვნელოვანი საკვანძო ელემენტია ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყლების ტექტონიკური ევოლუციის დასადგენად [20, 21]. შეცოცებებთან დაკავშირებული აუზებში განვითარებული ნალექები მთლიანად ასახავენ დეფორმაციის დროს, ევოლუციას და ინტენსივობას [20-23]. მსგავს აუზებში ანტიკლინურ ფორმებთან სინტექტონიკური ნალექები უთანხმოდაა განლაგებული და მის ზრდასთან ერთად თვითონაც განიცდიან დეფორმაციას. კერძოდ სინკლინის ცენტრალურ ნაწილებში მათი სიმძლავრე დიდია ანტიკლინების ფრთებთან უთანხმოდ განლაგებულ ნალექებთან შედარებით. ამგვარ ნალექებს ხშირად "მზარდ" ნალექებსაც უწოდებენ [22]. მსგავსი აუზები დადგენილია მტკვრის ფორლანდის ნაოჭა-შეცოცებითი სატყელის ცენტრალურ ნაწილში, კერძოდ გამოყოფილია ალაზნის [2, 4, 6, 24-26] და დიდი შირაქის აუზები [3-5, 14, 27]. უდაბნოს, წიწმატიანის და ბერების სერის სინკლინებში დაიკვირვება ზედა მიოცენური (მეოტურ-პონტური) და პლიოცენური (აღჩაგილ-აფშერონული) ასაკის შეცოცებებთან დაკავშირებული აუზებისათვის დამახასიათებელი გეომეტრია. ნალექებისათვის დამახასიათებელია დეფორმირებული ფორმები, რომლებიც ანტიკლინების ზურგის და წინა ფრთებზე უთანხმოდ, ცალკეული სექვენსების სახით არიან განლაგებული (ნახ. 3 და 4).

მტკვრის ფორლანდის ნაოჭა-შეცოცებით სარტყელში გვიანმიოცენური (სარმატული და შირაქის წყება) ნალექები ნავთობშემცველი კომპლექსებია და მათთანაა დაკავშირებული მტკვრის ფორლანდის ძირითადი ნავთობის საბადოები და უმეტესი ნავთობგამოვლინებები, როგორც ზედაპირზე, ასევე ჭაბურღილებში. დასავლეთ გარეკახეთის ტერიტორიაზე გამოვლენილია მწარეხევის საბადო, რომელიც აღჩაგილ-აფშერონულ ნალექებთანაა დაკავშირებული [11]. როგორც ცნობილია ნაოჭა-შეცოცებით სარტყლებში ნახშირწყალბადების ყველაზე კარგ სტრუქტურულ დამჭერებად რამპანტიკლინები (რღვევა-გალუნული და რღვევა-გავრცელებადი



ნაოჭები) ითვლება [28]. ნაპრალოვანი კოლექტორების ფორმირებისთვის და მათში ნახშირწყალბადების დაგროვებისათვის ყველაზე ხელსაყრელი პირობები რამპანტიკლინების თაღურ ნაწილებში და დუპლექსებშია შენარჩუნებული [28]. ამ მხრივ კი დასავლეთ გარეკახეთის ტერიტორია მეტად საინტერესო უნდა იყოს. პერსპექტიულ სტრუქტურულ დამჭერად შეიძლება განვიხილოთ სამხრეთ-ვერგენტული რღვევა-გავრცელებადი ნაოჭები, რომლებიც აგებულია მაიკოპური და შუა-გვიანმიოცენური ნალექებით (ნახ. 5).

## 5. დასკვნა

შედეგები, რომლებიც იყო მიღებული სეისმური პროფილების ინტერპრეტაციის და აგებული გეოლოგიური ჭრილებიდან გვამღვეს საშუალებას გავცეთ პასუხები დასახულ მიზნებსა და ამოცანებს:

- დასავლეთ გარეკახეთის სტრუქტურები ძირითადად წარმოდგენილია სამხრეთ-ვერგენტული "breakthrough" რღვევა-გავრცელებადი ნაოჭებით.
- დასავლეთ გარეკახეთის სინკლინები ამოვსებულია მათზე უთანხმოდ განლაგებული გვიანმიოცენური (მეოტურ-პონტური) და პლიოცენური (აღჩაგილ-აფშერონული) ასაკის სინტექტონიკური ნალექებით.
- დასავლეთ გარეკახეთის ფარგლებში კუმშვითი დეფორმაცია დაიწყო გვიანმიოცენურ-პლიოცენურ დროში და განვითარდა შეცოცებებთან დაკავშირებული აუზების სერია.

ნაშრომი შესრულებულია შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის მხარდაჭერით (#PHDF-19-268; "დასავლეთ გარეკახეთის ნახშირწყალბადების დამჭერების გეომეტრიის დადგენა, 2 და 3 განზომილებიანი სტრუქტურული მოდელირებით").

## ლიტერატურა - REFERENCES- ЛИТЕРАТУРА

1. Adamia Sh., Alania V., Ananiashvili G., Bombolakis E., Chichua G., Girshiashvili D., Martin R., Tatarashvili L. Late Mesozoic-Cenozoic geodynamic evolution of the eastern Georgian oil-gas bearing basins. *Geologica Carpathica*, 53, 2002, 155-159.
2. Adamia Sh., V. Alania A. Chabukiani G. Chichua O. E nukidze N. Sadradze. Evolution of the Late Cenozoic basins of Georgia (SW Caucasus): a review. Geological Society, London, Special Publication, 340, 2010, 239-259.
3. Alania V., E nukidze O., Koiava K., Razmadze A., Sanishvili A. Thrust systems and time of deformation of the Gare Kakheti foothills, eastern Georgia (Georgia). *Bollettino di Geofisica, teorica ed applicata*, 49, 2008, 207-208.
4. Alania V., Chabukiani A., Chagelishvili R., E nukidze O., Gogrichiani K., Razmadze A., Tsereteli N. Growth structures, piggyback basins and growth strata of Georgian part of Kura foreland fold and thrust belt: implication for Late Alpine kinematic evolution. Geological Society, London, Special Publications, 428, 2017, 171-185.
5. Alania V., E nukidze O., Glonti N., Razmadze A., Chabukiani A., Giorgadze A., Glonti B. V., Koiava K., Beridze T., Khutsishvili S., Chagelishvili R. Structural architecture of the Kura foreland fold-and-thrust belt using seismic reflection profile, Georgia. *Universal Journal of Geoscience*, 6, 2018, 184-190.
6. Forte A., Cowgill E., Bernardin T., Kreylos O., Hamann B. Late Cenozoic deformation of Kura fold-thrust belt, southern Greater Caucasus. *Geological Society of America Bulletin*, 122 (3-4), 2010, 465-486.
7. Adamia Sh., Alania V., Chabukiani A., Kuloshvili S., Maisuradze G., Gotsiridz G. Seismic source zone models of recent earthquakes of Georgia. 5th International Symposium of Eastern Mediterranean Geology, Proceedings, Thessaloniki, Greece, 2004, 545-548.
8. Reilinger R.E., et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research*, 111(B5), 2006, 1-26.
9. Tsereteli N., Tibaldi A., Alania V., Gventsadze A., E nukidze O., Varazanashvili O., Müller B. I. R. Active tectonics of central-western Caucasus, Georgia. *Tectonophysics*, 691, 2016, 328-344.
10. Buleishvili D. Geology and oil-bearing of intermountain basin of the eastern Georgia. Leningrad, 1960, 239 p., (in Russian).
11. Sepashvili O. Geological structure of the Gare Kakheti. *Gruzneft*, Tbilisi, 1976, 230 p., (in Russian).
12. Chubinishvili K. Neogene continental molasses of the eastern Georgia. Tbilisi, 1982, 316 p., (in Russian).
13. Basheleishvili L., Kumelashvili M. Geometry and genesis of thrust structures of the molasse depression of the Eastern Georgia. *Georgian Oil and Gas*, 14, 1995, 39-46.

14. Alania V., Bukhsianidze M., Chabukiani A., Chagelishvili R., Enukidze O., Glonti V., Tsertsvadze S. The Kinematic Evolution of Kura Foreland Fold and Thrust Belt, Eastern Georgia (Georgia). 2<sup>nd</sup> International Black Sea Region Geology Symposium (ISGB), Ankara, Turkey, 2009, p. 18.
15. Razmadze, A., Alania, V. Geometry and kinematic evolution of a thrust-top basin: an example from the western part of the Kura foreland fold and thrust belt, Georgia. IGCP 610 Fourth Plenary Conference and Field Trip, Tbilisi, Georgia, 2-9 October 2016, 136-137.
16. Nemcok M., Glonti B., Yukler A., Marton B. Development history of the foreland plate trapped between two converging orogens: Kura Valley, Georgia, case study. Geological Society, London, Special Publications, 377, 2013, 159-188.
17. Philip H., Cisternas A., Gvishiani A., Gorshkov, A. The Caucasus: an actual example of the initial stages of continental collision: Tectonophysics, 161, 1989, 1-21.
18. Shaw J. H., Connors C. D., Suppe J. Seismic interpretation of contractional fault-related folds. AAPG Studies in Geology, 2006, 156 p.
19. Pfiffner O. A. Thick-skinned and thin-skinned styles of continental contraction. Geological Society of American Special Paper, 414, 2006, 153-177.
20. DeCelles G., Giles K. N. Foreland basin systems. Basin Research, 8, 1996. 105-123.
21. Ori G. G., Friend P. G. Sedimentary basins, formed and carried piggyback on active thrust sheets. Geology, 12, 1984, 475-478.
22. Suppe J., Chou G.T., Hook C. Rates of folding and faulting determined from growth strata. Thrust tectonics, Chapman and Hall, London, 1992, 105-121.
23. Vergés J., Marzo M., Muñoz, J.A. Growth strata in foreland settings. Sedimentary Geology, 146, 2002, 1-9.
24. Adamia Sh., Alania V., Chagelishvili, R., Chabukiani A., Enukidze O., Jaoshvili G., Razmadze A., Sadradze N. Tectonic setting of Georgia (Caucasus). Supplement to GEO-ECO-MARINA, 17, 2011, 11-13.
25. Alania V., et al. Structural Style in the Georgian part of Caucasus thrust and fold Belts, Georgia. 32<sup>nd</sup> IGC Florence, Italy, 2004, 502-503.
26. Mosar J., et al. (2010). Cenozoic–Recent tectonics and uplift in the Greater Caucasus: a perspective from Azerbaijan. Geological Society, London, Special Publications, 340, 261-279.
27. Alania V., Enukidze O. 2009. Didi Shiraki piggyback basin in the Georgian part of Kura foreland: implications for timing and development of the thrust wedge (south-east Georgia). Geophysical Research Abstracts, 11, 2008, EGU2009-12313.
28. Mitra S. Fault-propagation folds: Geometry, kinematic evolution and hydrocarbon traps. AAPG Bulletin, 74 (6), 1990, 921 - 945.

**მტკვრის ფორლანდის ნაოჭა-შეცოცხებითი სარტყელის გეოლოგიური აბაზულება დასავლეთ ბარეკახეთის მაგალითზე**

**რაზმაძე ა.**

**რ ე ზ ი უ მ ე**

წარმოსადგენია დასავლეთ გარეკახეთის გეოლოგიური მოდელი. ინტერპრეტირებულ სეისმურ პროფილებზე და ბურლილების მონაცემებზე დაყრდნობით, აგებულია გეოლოგიური ჭრილები. გეოლოგიური ჭრილები გვიჩვენებს, რომ დასავლეთ გარეკახეთში სტრუქტურები წარმოდგენილია სამხრეთ-ვერგენტული "breakthrough" რღვევა-გავრცელებადი ნაოჭებით. დასავლეთ გარეკახეთის ფარგლებში გვიანმიოცენურ-პლიოცენურ დროში განვითარდა შეცოცხებთან დაკავშირებული აუზების სერია.

საკვანძო სიტყვები: მტკვრის ფორლანდის ნაოჭა-შეცოცხებითი სარტყელი, გარეკახეთი, რღვევა-გავრცელებადი ნაოჭი, შეცოცხებთან დაკავშირებული აუზები.

## **GEOLOGICAL STRUCTURE OF THE KURA FORELAND FOLD-AND-THRUST BELT: AN EXAMPLE FROM THE GAREKAKHETI**

**Razmadze A.**

### **A b s t r a c t**

The geological model of the western Garekakhети is presented here. On the basis of the interpreted seismic profiles and oil-well data has been constructed of geological cross-sections. The geological cross-sections show that the main structures within western Garekakhети are represented by breakthrough fault-propagation folds. Within the western Garekakhети during Upper Miocene-Pleistocene, a series of thrust-top basins developed.

**Key words:** Kura foreland fold-and-thrust belt, Garekakhети, fault-propagation fold, thrust-top basin

## **ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ СКЛАДЧАТО-НАДВИГОВОГО ПОЯСА КУРИНСКОГО БАССЕЙНА, НА ПРИМЕРЕ ЗАПАДНОГО ГАРЕКАХЕТИ**

**Размадзе А.**

### **Р е ф е р а т**

Представлена геологическая модель западного Гарекახети. На основе интерпретированных сейсмических профилей и данных бурения построены геологические разрезы. Геологические разрезы показывают, что структуры в западной Гарекახети представлены южно-вергентными "breakthrough" взбросо-складками. В пределах западной части Гарекახети в позднемиоцен-плиоценовый период образовался ряд бассейнов, связанных с надвигами.

**Ключевые слова:** Складчато-надвиговый пояс Куринского бассейна, Гарекახети, Взбросо-складки, бассейны, связанные с надвигами.

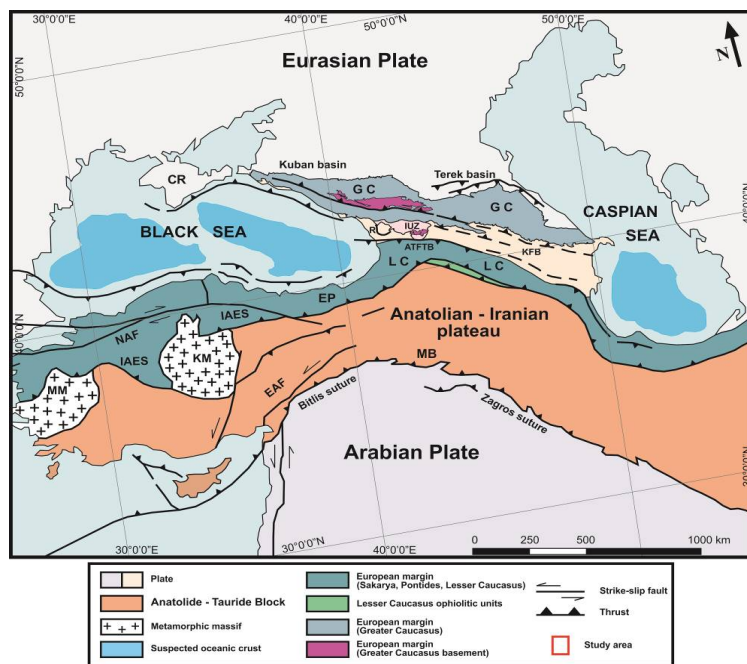
## აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის ფრონტული ნაწილის სტრუქტურული არქიტექტურა: მიმოხილვა

### ენუქიძე ო.

თსუ, მ. ნოდია სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი  
[Onise.enukidze@tsu.ge](mailto:Onise.enukidze@tsu.ge)

### 1. შესავალი

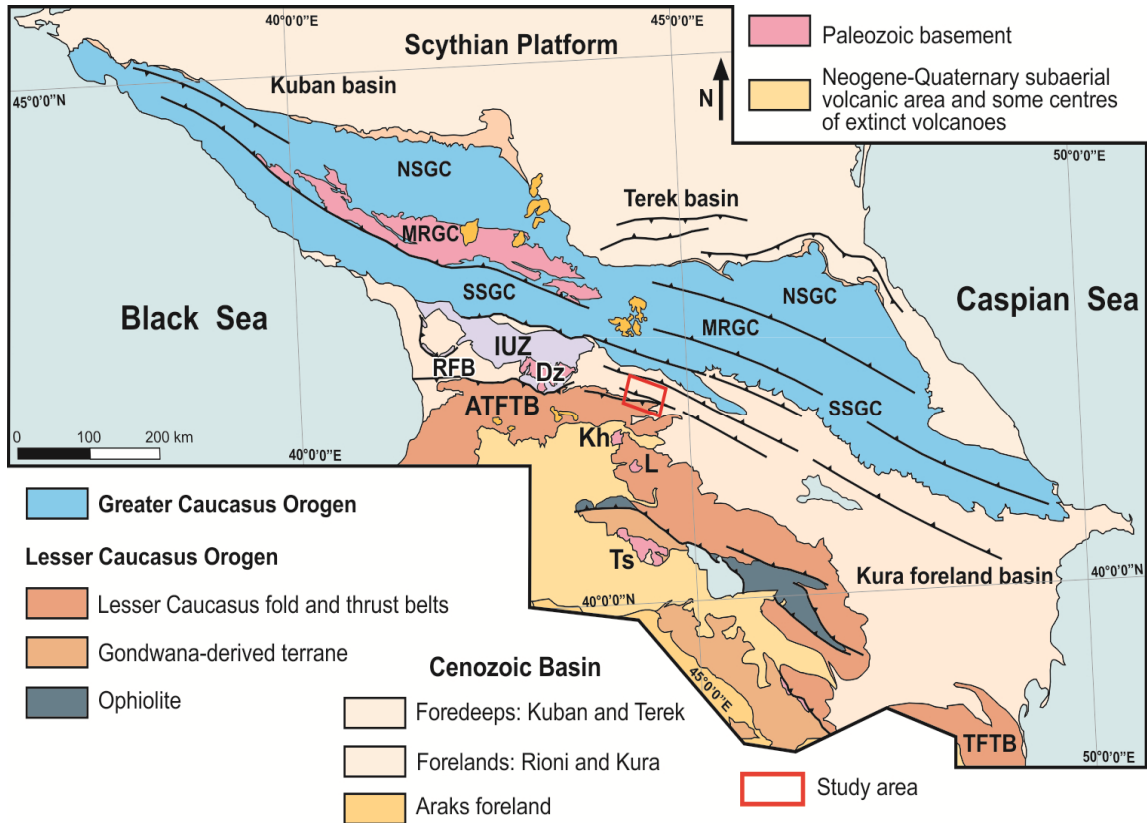
საქართველო როგორც კავკასიის რეგიონის ნაწილი, მოქცეული ევრაზიის და არაბეთის ლითონფერული ფილების კონტინენტური კოლიზიის ვრცელ არეში (ნახ. 1), წარმოადგენს ერთიანი ალპურ-ჰიმალაური ოროგენული სარტყლის ნაწილს [1-5]. მისი დღევანდელი სტრუქტურა როგორც შიდამატერიკული მთიანი ნაგებობისა ჩამოყალიბდა გვიანკაინოზოურ დროში [6-9]. არაბეთ-ევრაზიის ფილაქნების კოლიზიის შედეგად ადგილი ჰქონდა კიდურა აუზების ინვერსიას და კავკასიონის და აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყლების ფორმირებას [1,2,4,5,10-12]. აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელი განლაგებულია მცირე კავკასიონის ჩრდილოეთ ნაწილში (ნახ. 2).



ნახ. 1. არაბეთ-ევრაზიის კოლიზიური ზონის ტექტონიკური რუკა [13]. აბრევიატურა: CR-ყირიმი; GC-კავკასიონი; LC-მცირე კავკასიონი; R-რიონი; IUZ-იმერეთის აუზების ზონა; Dz-ძირულა; KFB-მტკვრის ფორლანდის აუზი; ATFTB-აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელი; MB-მუსის აუზი; EP-აღმოსავლეთ პონტიდები; KM-კირშეხირის მასივი; EAF-სამხრეთ ანატოლიის რღვევა; NAF-ჩრდილოეთ ანატოლიის რღვევა; IAES-იზმირი-ანკარა-ერზიჯანის სუტურული ზონა; MM-მენდერესის მასივი.

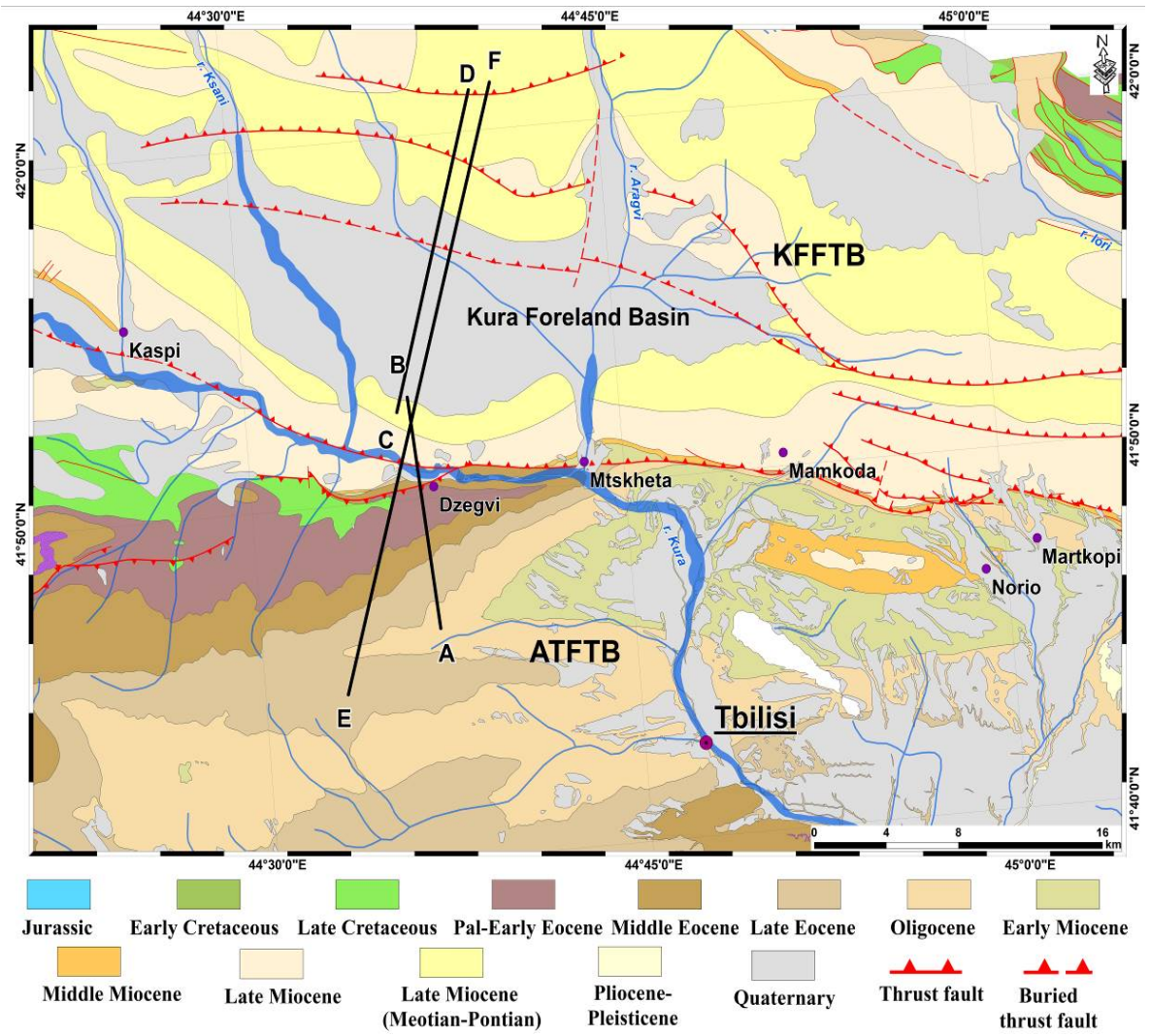
მცირე კავკასიონის ოროგენის ფარგლებში დადგენილია ორი (სამხრეთიდან ჩრდილოეთი მიმართულებით) ძირითადი დომენი: (1) სამხრეთ სომხეთის ბლოკი და (2) ევრაზიული

ფილაქნის სამხრეთ ნაწილი, რომელიც ერთმანეთისაგან გამოყოფილია სევანის ოფიოლიტური ნაკერით [11,12]. ამ ბლოკის (ან ტერეინის) კავკასიური შემადგენელია ნახჭევანი, სომხეთისა და აზერბაიჯანის ის ნაწილები, რომლებიც სევანის ოფიოლიტური ნაკერის სამხრეთით არიან განლაგებული [11,12]. მცირე კავკასიონის ოროგენის ფორმირება დაკავშირებული იყო სამ ძირითად ტექტონიკურ მოვლენასთან: (1) ზედა ცარცულ დროში ოფიოლიტების ობდუქცია სამხრეთ სომხეთის ბლოკზე, (2) სამხრეთ სომხეთის ბლოკის და ევრაზიის აქტიური კიდის კოლიზია პალეოცენ-ეოცენურ დროში და (3) არაბეთ-ევრაზიის კოლიზია ოლიგოცენ-მიოცენურ დროში [11] ან მიოცენურ დროში [14]. აჭარა-თრიალეთი აქტიური ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელია, რაზეც მიუთითებს თანამედროვე და ისტორიული მიწისძვრების და GPS მონაცემები 15-18].



ნახ. 2. კავკასიის ტექტონიკური რუკა [13]. აბრევიატურა: SSGC-კავკასიონის სამხრეთ ფერდი; MRGC-კავკასიონის მთავარი ქედი; NSGC-; RFB-რიონის ფორლანდური აუზი; IUZ-იმერეთის აზეგების ზონა; ATFTB-აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელი; TFTB-თალიშის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელი; Dz-ძირულა; Kh-ხრამი.

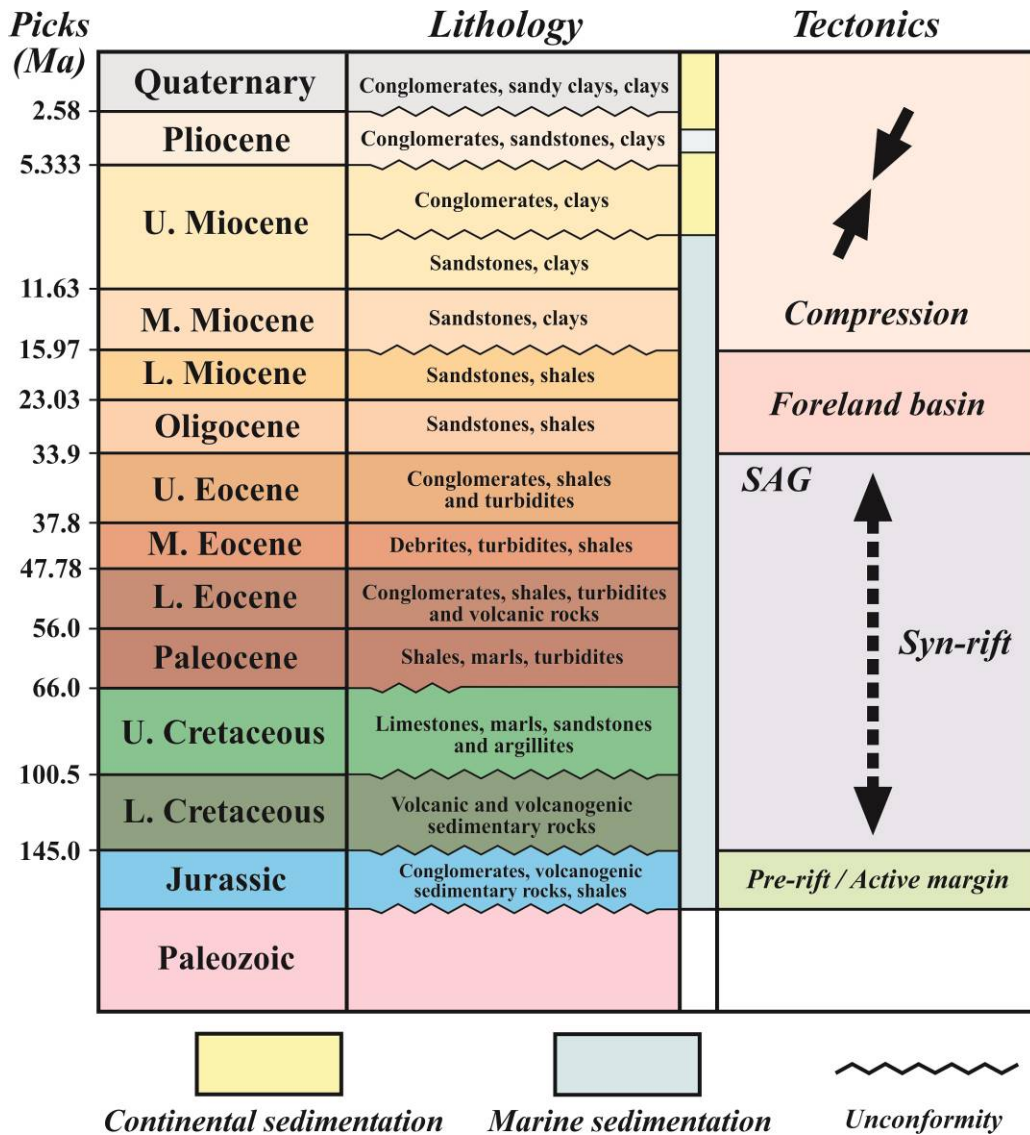
სტატიაში განხილულია აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის ფრონტული ნაწილის (ნახ. 3) აგებულების შესახებ არსებული კვლევების მიმოხილვა. ბოლო 20-25 წლის განმავლობაში მნიშვნელოვნად შეიცვალა წარმოდგენები აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის აგებულების შესახებ [8,9,13,19,20]. განსაკუთრებით აღსანიშნავია აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ფრონტული ნაწილი (მეგვი-კავთისხევის ფართობი) სადაც მნიშვნელოვანი მოცულობის სეისმური სამუშაოებია ჩატარებული. სეისმოპროფილების ინტერპრეტაციის შედეგები და მათზე დაყრდნობით აგებული მოდელები მნიშვნელოვნად განსხვავდება ადრინდელი კვლევებისაგან. სეისმური პროფილების ინტერპრეტაციის საფუძველზე სხვადასხვა ავტორების მიერ გამოთქმულია მოსაზრება, რომ აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ფრონტული ნაწილი ტიპიური სამკუთხა ზონაა [8,9,13,19-27].



ნახ. 3. აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის და მტკვრის ფორლანდური აუზის გეოლოგიური რუკა დ. პაპავას [28] მონაცემებზე დაყრდნობით.

## 2. გეოლოგიური აგებულება

შ. ადამიას და სხვათა მიხედვით [29] საქართველოს ტერიტორიის ფარგლებში გამოიყოფა შემდეგი ტექტონიკური ერთეულები: (1) კავკასიონის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელი; (2) საქართველოს ბელტი (ფორლანდი - რიონის და მტკვრის ფორლანდი); (3) აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელი და (4) ართვინ-ბოლნისის ბელტი. განსახილველი ტერიტორია მოიცავს აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ფრონტულ და მტკვრის ფორლანდის სამხრეთ ნაწილებს (ნახ. 3). ზემოთ აღნიშნული ტერიტორიის ტექტონო-სტრატოგრაფიული სვეტი მოცემულია მე-4 ნახაზზე. აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ფრონტული და მტკვრის ფორლანდის სამხრეთ ნაწილების დანალექი საფარი (> 6კმ) წარმოდგენილია იურული, ცარცული, პალეოგენური, ნეოგენური და მეოთხეული ღრმა ზღვის, მარჩხი ზღვის და მძლავრი კონტინენტური ნალექების თანმიმდევრობით [6,7].



ნახ. 4. აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის და მტკვრის ფორლანდური აუზის ტექტონო-სტრატოგრაფიული სვეტი [13].

იურული ნალექების სიმძლავრე დაახლოებით 200-600მ-ია და წარმოდგენილია ქვედაიურული ქვიშაქვებით, თიხაფიქლებით, კონგლომერატებით. შუაიურული წარმოდგენილია ბაიოსური ვულკანოგენურ-დანალექი ფორმაციით რომელსაც უთანხმოდ მოყვება ზედაიურული კირქვები და ვულკანოგენურ-დანალექი ქანები [28]. ცარცული და პალეოგენური კომპლექსის სიმძრავრე შეადგენს 3500-4000მ. ქვედაცარცული წარმოდგენილია აპტ-ალბური ასაკის ვულკანიტებისა და ვულკანოგენურ-დანალექი ქანებისაგან, ხოლო ზედაცარცული კი შედგება კირქვების, მერგელების, ქვიშაქვების და არგილიტების მორიგეობით [6,28]. პალეოგენი წარმოდგენილია პალეოცენით (თიხაფიქლები, მერგელები, ტურბიდიტები; სიმძლავრე 50-450მ), ქვედაეოცენით (კონგლომერატები, თიხაფიქლები, ტურბიდიტები და დაციტური ვულკანიტები; სიმძლავრე 500-1000მ), შუაეოცენით (დებრიტები, ტურბიდიტები, თიხაფიქლები; სიმძლავრე 300-800მ) და ზედაეოცენით (კონგლომერატები, ტურბიდიტები და თიხაფიქლები; სიმძლავრე 400-800მ) [6,28,30]. ოლიგოცენ-ქვედა მიოცენური (მაიკოპი) ნალექები ხშირ შემთხვევებში თანხმობით მოყვება ზედაეოცენურ ნალექებს და ძირითადად წარმოდგენილია ქვიშაქვების და თიხაფიქლების მორიგეობით [7]. შუა-ზედამიოცენური და პლიოცენური ასაკის სინ-ტექტონიკური (ან

მზარდი) ნალექები წარმოდგენილია მარჩხი ზღვის და კონტინენტური ნალექებით, რომელთა სიმძლავრე შეადგენს 1500-2000მ [8].

აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის ფრონტული ნაწილის და მოსაზღვრე ტერიტორიების სტრუქტურები აღწერილია დ. ბულიეშვილის [31], პ. გამყრელიძის [32], ე. გამყრელიძის [33], დ. პაპავა [28] და სხვათა მიერ. სტრუქტურები წარმოდგენილია ასიმეტრიული ნაოჭებით, ჩრდილო და სამხრეთ-ვერგენტული შესხლეტვებით და შეცოცებებით [28, 32-34].

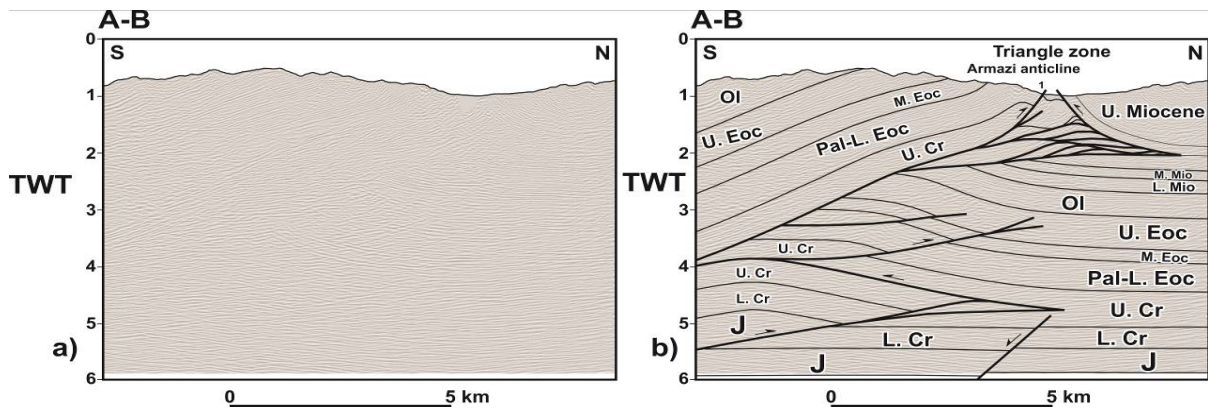
პ. გამყრელიძის მიხედვით [32] თრიალეთის ქედი წარმოადგენს აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა სისტემის აღმოსავლეთ ნაწილს და მოქცეულია საქართველოს (ჩრდილოეთით) და ართვინ-ბოლნისის (სამხრეთით) ბელტებს შორის და იყოფა ჩრდილოეთ, ცენტრალურ და სამხრეთ ზონებად. ჩრდილოეთი ზონა იყოფა კოდმანი-ხვედურეთის და ხაშური-მეტეხის ქვეზონებად. ცენტრალური ზონა თავის მხრივ დაყოფილია ორ ქვეზონად: აბასთუმანი-ბოშურის აზეგების და კავთისხევის დაძირვის ქვეზონები. აბასთუმანი-ბოშურის აზეგების ქვეზონის აგებულებაში მონაწილეობს ცარცული ასაკის ვულკანოგენური და კარბონატული ნალექები, პალეოცენ-ქვედაეოცენის ფლიშური ნალექები და შუაეოცენის ვულკანოგენური ქანები. ამ ქვეზონაში სტრუქტურები წარმოდგენილია ხაზობრივი ნაოჭებით (რამზეტის, ზირთის, არმაზის, მცხეთის და სხვა), გართულებული შეცოცებებით და შესხლეტვებით. კავთისხევის ქვეზონა წარმოადგენს ცენტრალური ზონის დაძირულ ნაწილს და აგებულია ოლიგოცენური და მიოცენური ასაკის ნალექებით. კავთისხევის ქვეზონა აბასთუმანი-ბოშურის ქვეზონისგან გამოყოფილია რღვევით, სადაც ცარცული და ქვედაეოცენური ასაკის ქანები (სამხრეთიდან ჩრდილოეთი მიმართულებით) შეცოცებულია კავთისხევის ქვეზონის მიოცენური ასაკის ნალექებზე [32]. დ. პაპავამ [28], საქართველოს ბელტის და თრიალეთის ნაოჭა-სისტემის საზღვარზე გამოყოფილია დაძირვის ზონა, რომელიც მოიცავს საქართველოს ბელტის სამხრეთ ნაწილს და თრიალეთის ქედის დასავლეთ (ხაშური-მეტეხის ქვეზონა) და ცენტრალურ (კავთისხევის დაძირვის ქვეზონა) ზონებს.

### 3. სტრუქტურული მოდელები

დღემდე არსებული სტრუქტურული მოდელები ერთმანეთისაგან მნიშვნელოვნად განსხვავდება. მკვლევართა ერთი ჯგუფის მიხედვით აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის ფრონტული ნაწილი გადაფარულია სამხრეთ-ვერგენტული შეცოცებით, რომელიც დინამიურ კავშირშია კავკასიონის მასების ჩრდილოეთიდან სამხრეთი მიმართულებით გადაადგილებასთან [17,28,33,34]. მეორე ჯგუფის მიხედვით კი ფრონტული ნაწილი წარმოდგენილია სამკუთხა ზონით და სამხრეთ ვერგენტული შეცოცება წარმოადგენს “პასიური ზურგის შეცოცებას“. მისი ფორმირება სამკუთხა ზონის ფარგლებში დაკავშირებულია სამხრეთიდან ჩრდილოეთი მიმართულებით გადაადგილებულ დუპლექსებთან [8,9,13,19,20,25-27].

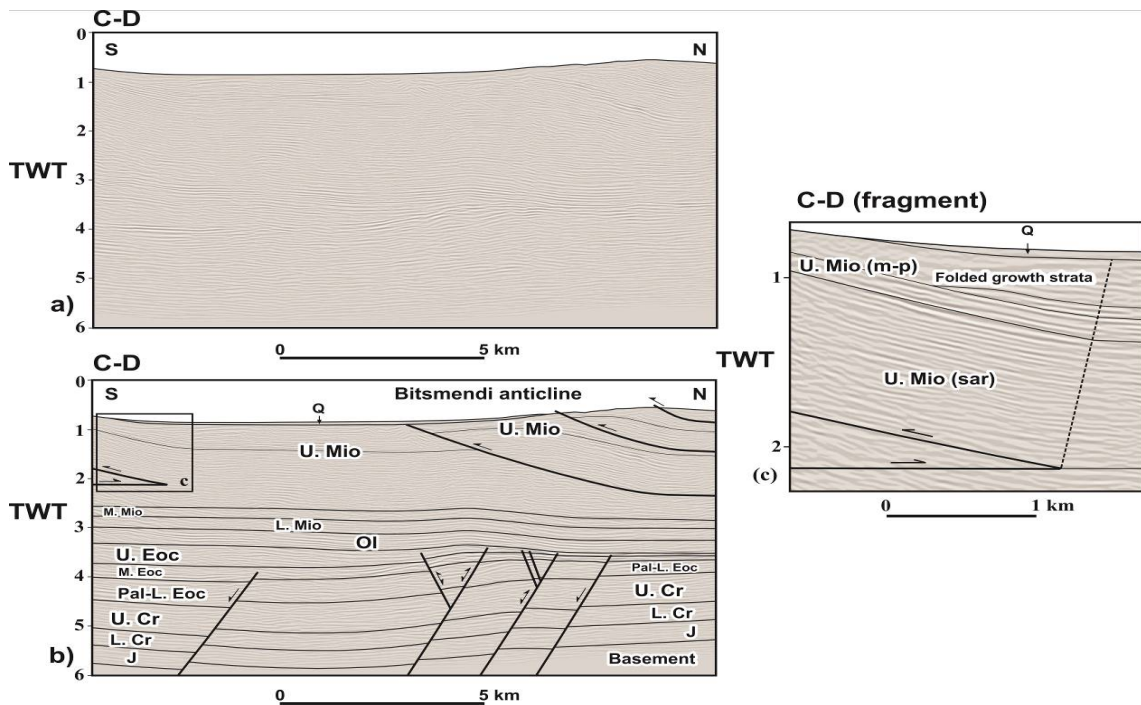
ახალი სეისმო-გეოლოგიური მონაცემების მიხედვით აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელი (სამხრეთიდან ჩრდილოეთი მიმართულებით) იყოფა შემდეგ სტრუქტურულ ერთეულებად: (1) ზურგის შეცოცებების ზონა, (2) წინა შეცოცებების ზონა და (3) სამკუთხა ზონა [21]. სტრუქტურული ერთეულები წარმოდგენილია ჩრდილო და სამხრეთ-ვერგენტული რღვევებთან დაკავშირებული ნაოჭებით (რღვევა-გალუნული და რღვევა-გავრცელებადი ნაოჭები), დუპლექსებით და სტრუქტურული სოლებით [8,13,19,21-26].





ნახ. 5. (a) არაინტერპრეტირებული და (b) ინტერპრეტირებული სეისმოპროფილები A-B [23]. პროფილის განლაგება ნაჩვენებია მე-3 ნახაზზე.

სეისმური პროფილების (A-B, C-D) ინტერპრეტაციიდან ჩანს, რომ აღმოსავლეთ აჭარათრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის ფრონტული ნაწილისთვის დამახასიათებელია რთული აგებულება (ნახ. 5 და 6).



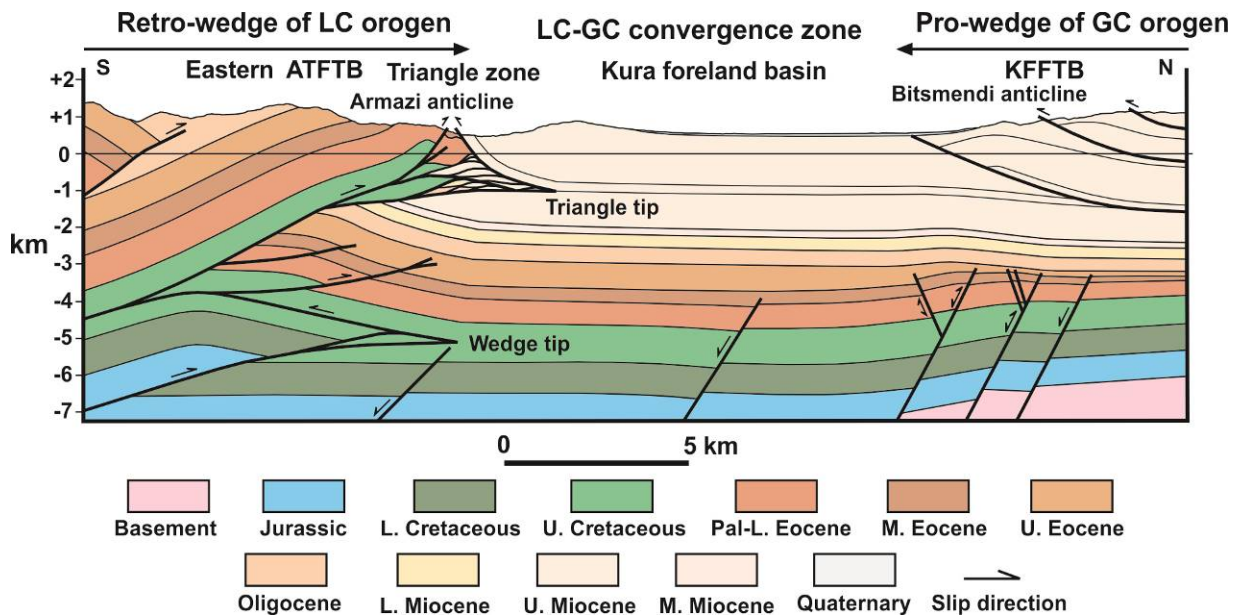
ნახ. 6. (a) არაინტერპრეტირებული, (b) ინტერპრეტირებული სეისმოპროფილები C-D და (c) C-D სეისმოპროფილის ფრაგმენტი [13]. პროფილის განლაგება ნაჩვენებია მე-3 ნახაზზე.

სოფ. ძეგვის მიდამოებში გამავალი სეისმური პროფილი (ნახ. 5) გვიჩვენებს ზედა და ქვედა სტრუქტურული კომპლექსების არსებობას. სეისმური პროფილიდან ჩანს, რომ სტრუქტურები ძირითადად წარმოდგენილია ჩრდილო და სამხრეთ-ვერგენტული შეცოცებებით, ჩრდილო-ვერგენტული დუბლექსებით და სტრუქტურული სოლით. ზედა სტრუქტურული კომპლექსი წარმოდგენილია სამკუთხა ზონით და მისი დაბოლოება განლაგებულია მიოცენურ ნალექებში. ქვედა სტრუქტურული კომპლექსი წარმოდგენილია სტრუქტურული სოლით, ხოლო მისი დაბოლოება განლაგებულია ზედაცარცულ ნალექებში. სეისმური პროფილი გვიჩვენებს, რომ არმაზის ანტიკლინი ტიპიური რღვევა-გავრცელებადი ნაოჭია და განვითარებულია ტექტონიკური ზეწრის თავზე [23].

საინტერესო სურათი დაიკვირვება აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ფრონტული ნაწილის ჩრდილოეთით, მტკვრის ფორლანდური აუზის ფარგლებში (ნახ. 6). სეისმური პროფილიდან (C-D) ჩანს, რომ ბიწმენდის ანტიკლინი განლაგებულია დასავლეთ მტკვრის ფორლანდის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის ფრონტულ ნაწილში. რამპანტიკლინი განვითარებულია ძირითადი მოწყვეტის ზედაპირის თავზე, ხოლო შეცოცება წარმოადგენდა ბიწმენდის ანტიკლინის წარმომქმნელი რღვევა-გავრცელებადი დანაოჭების მთავარ მაკონტროლებელ ფაქტორს. ბიწმენდის რღვევა-გავრცელებადი ნაოჭის აღმოსავლეთ სეგმენტში დაიკვირვება ნაწევური სტრუქტურა (იხ. ნახ. 3). ბიწმენდის ანტიკლინის და მტკვრის ფორლანდური აუზის (არადეფორმირებული ნაწილი) ქვევით კარგად დაიკვირვება ნახსლეტები, რომელთა ნაწილმა კუმშვითი დეფორმაციის სტადიაზე განიცადეს რე-აქტივიზაცია (ნახ. 6). სეისმური პროფილის (C-D) სამხრეთ ნაწილში, ზედამოცენურ (მეოტის-პონტი) ნალექებში კარგადაა გამოხატული მზარდი ნალექების გეომეტრია (ნახ. 6c).

#### 4. დისკუსია

მსგავსად კავკასიონისა, მცირე კავკასიონიც ორმაგი სოლის (ბივერგენტული) ოროგენია [13]. მე-7 ნახაზზე ნაჩვენებია კავკასიონის პრო-სოლის და მცირე კავკასიონის რეტრო სოლის კონვერგენციის (დაახლოების) ზონა. კავკასიონის პრო-სოლის ფრონტული (ან დეფორმაციის ფრონტი) ნაწილი წარმოდგენილია ბიწმენდის რღვევა-გავრცელებადი ნაოჭით [13,22,24,35], ხოლო მცირე კავკასიონის რეტრო-სოლის ფრონტული ნაწილი კი სამკუთხა ზონით [8,13,23,25-27], რომელთა შორის განლაგებულია მტკვრის ფორლანდის არადეფორმირებული ნაწილი [13,24]. მტკვრის აუზი, რომელიც ოლიგოცენ-ადრემიოცენურ დროში ვითარდებოდა როგორც ფორლანდური აუზი ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელად ჩამოყალიბდა შუამიოცენ-პლეისტოცენურ დროში [35-37]. დასავლეთ მტკვრის ფორლანდის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის სტრუქტურები ძირითადად წარმოდგენილია სამხრეთ-ვერგენტული შეცოცებებით [8,35].



ნახ. 7. სტრუქტურული ჭრილი (E-F) [13]. სტრუქტურული ჭრილის განლაგება ნაჩვენებია მე-3 ნახაზზე. აბრევიატურა: GC-კავკასიონი; LC-მცირე კავკასიონი; ATFTB-აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელი; KFFTB-მტკვრის ფორლანდის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელი.

აპატიტებზე ჩატარებული ტრეკული მონაცემები გვიჩვენებს, რომ მცირე კავკასიონის ოროგენის ფარგლებში არაბეთ-ევრაზიის ფილაქნების კოლიზიის შედეგად ადგილი ჰქონდა ორ თანმიმდევრულ ექსპუმაციის სტადიას: (1) ადრეული-შუა მიოცენი და (2) შუა მიოცენი-პლიოცენი [14,38]. აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის ფარგლებში

დაბალ-ტემპერატურიანი თერმოქრონოლოგიური მონაცემები (აპატიტებზე ტრეკული და (U-Th)/He ანალიზი) გვიჩვენებს, რომ აჭარა-თრიალეთის აუზის ინვერსია და მისი ნაოჭა-შეცოცებით სარტყელად ჩამოყალიბება დაიწყო დაახლოებით 14-10 მილიონი წლის უკან [39]. ზედაპირულ გაშიშვლებებში და სეისმოპროფილებში, მზარდი (ან სინტექტონიკური) ნალექების გეომეტრიის და ასაკების გათვალისწინებით აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის ფრონტულ ნაწილში და მტკვრის ფორლანდის აუზში კუმშვითი დეფორმაცია დაიწყო შუა-გვიან მიოცენიდან და მაქსიმალურ პიკს მიაღწია პლიოცენის დასაწყისში [8, 37].

ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყლების ფრონტული ნაწილები ხშირ შემთხვევაში ნახშირწყალბადების დაგროვების მნიშვნელოვან არეალს წარმოადგენს [40]. მსგავსი სურათი დაიკვირვება აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის ფრონტულ ნაწილში (მეგვი-კავთისხევის ფართობი) სადაც სტრუქტურულ და პარამეტრულ ჭებში, მესამეული და ცარცული ასაკის კომპლექსებში დადგენილია ნავთობისა და გაზის გამოვლინებები [41]. მეგვი-კავთისხევის ფართობის ფარგლებში დაიკვირვება ის სამი ძირითადი წინაპირობა, რომელთანაც დაკავშირებული უნდა იყოს მომავალში კომერციული ნავთობის და გაზის ბუდობების აღმოჩენა: (1) ნავთობბადი ქანები, (2) რეზერვუარი და (3) სტრუქტურული დამჭერი. ნავთობბად ქანებად მიჩნეულია ზედაეოცენური და ოლიგოცენ-ქვედამიოცენური (მაიკოპური) ასაკის თიხაფიქლები [41]. რეზერვუარის ქანები ძირითადად წარმოდგენილია ქვედაცარცული და შუა ეოცენური, ინტენსიურად დანაპრალიანებული ვულკანოგენურ-დანალექი ქანებით [41]. რაც შეეხება მე-3 წინაპირობას, სტრუქტურულ დამჭერებს, ცნობილია, რომ ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყლების ფარგლებში ყველაზე კარგ სტრუქტურულ დამჭერად მიჩნეულია სამკუთხა ზონები [40].

## 5. დასკვნა

ამრიგად, უახლესი კვლევების მიმოხილვა და ანალიზი გვიჩვენებს, რომ:

- სეისმურ პროფილების ინტერპრეტაციის საფუძველზე აგებული სტრუქტურული მოდელი გვიჩვენებს, რომ აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის ფრონტული ნაწილისთვის დამახასიათებელია რთული აგებულება.
- სეისმურ პროფილებზე კარგად დაიკვირვება ზედა და ქვედა სტრუქტურული კომპლექსების არსებობა.
- სტრუქტურები ძირითადად წარმოდგენილია ჩრდილო და სამხრეთ-ვერგენტული შეცოცებებით, ჩრდილო-ვერგენტული დუპლექსებით და სტრუქტურული სოლით.
- ზედა სტრუქტურული კომპლექსი წარმოდგენილია ზედაპირული სამკუთხა ზონით და მისი დაბოლოება განლაგებულია მიოცენურ ნალექებში.
- ქვედა სტრუქტურული კომპლექსი წარმოდგენილია სტრუქტურული სოლით და მისი დაბოლოება განლაგებულია ზედაცარცულ ნალექებში.
- ზედაპირული სამკუთხა ზონა და სტრუქტურული სოლი უნდა განვიხილოთ, როგორც პერპექტიული ნახშირწყალბადების სტრუქტურული დამჭერები.

## ლიტერატურა - REFERENCES - ЛИТЕРАТУРА

1. Adamia Sh., Lordkipanidze M., Zakariadze G. Evolution of an active continental margin as exemplified by the alpine history of the Caucasus. *Tectonophysics*, 40, 1977, 183–199.
2. Adamia Sh., Chkhouta T., Kekelia M., Lordkipanidze M., Zakariadze G. Tectonics of the Caucasus and adjoining areas: implications for the evolution of the Tethys Ocean. *Journal of Structural Geology*, 3, 1981, 437–447.
3. Dewey J., Pitman W., Ryan W., Bonnin J. Plate tectonics and the evolution of the Alpine system. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 84 (10), 1973, 3137-3180.
4. Gamkrelidze I. Geodynamic evolution of the Caucasus and adjacent areas in Alpine time. *Tectonophysics*, 127, 1986, 261–277.
5. Khain V. Structure and main stages in the tectonomagmatic development of the Caucasus: An attempt at geodynamic interpretation: *American Journal of Science*, 275 A, 1975, 131–156.
6. Adamia Sh., Alania V., Ananiashvili G., Bombolakis E., Chichua G., Girshiashvili D., Martin R., Tatarashvili L. Late Mesozoic-Cenozoic geodynamic evolution of the eastern Georgian oil-gas bearing basins. *Geologica Carpathica*, 53, 2002, 155-159.
7. Adamia Sh., V. Alania A. Chabukiani G. Chichua O. Enukidze N. Sadradze. Evolution of the Late Cenozoic basins of Georgia (SW Caucasus): a review. *Geological Society, London, Special Publication*, 340, 2010, 239-259.
8. Alania V., Chabukiani A., Chagelishvili R., Enukidze O., Gogrichiani K., Razmadze A., Tsereteli N. Growth structures, piggyback basins and growth strata of Georgian part of Kura foreland fold and thrust belt: implication for Late Alpine kinematic evolution. *Geological Society, London, Special Publications* 428, 2017, 171-185.
9. Banks C., Robinson A., Williams M. Structure and regional tectonics of the Achara-Trialeti fold belt and the adjacent Rioni and Kartli foreland basins. *Republic of Georgia. AAPG Memoir*, 68, 1997, 331-346.
10. Mosar J., et al. Cenozoic–Recent tectonics and uplift in the Greater Caucasus: a perspective from Azerbaijan. *Geological Society, London, Special Publications*, 340, 2010, 261–279.
11. Sosson M., Rolland Y., Danelian T., Muller C., Melkonyan R., Adamia S., Kangarli T., Avagyan A., Galoyan G. Subductions, obduction and collision in the Lesser Caucasus (Armenia Azerbaijan, Georgia), new insights. *Geological Society, London, Special Publications*, 340, 2010, 329–352.
12. Sosson M., Stephenson S., Sheremet Y., Rolland Y., Adamia Sh., Melkonian R., Kangarli, T., Yegorova T., Avagyan A., Galoyan G., Danelian T., Hässig M., Meijers M., Müller C., Sahakyan L., Sadradze N., Alania V., Enukidze O., Mosar J. The Eastern Black Sea-Caucasus region during Cretaceous: new evidence to constrain its tectonic evolution. *Compte-Rendus Geosciences*, 348, 2016, 23-32.
13. Alania V., Beridze M., Enukidze O., Chagelishvili R., Lebanidze Z., Maqadze D., Razmadze A., Sadradze N., Tevzadze N., The Geometry of the Two Orogens Convergence and Collision Zones in Central Georgia: New Data from Seismic Reflection Profiles. In: Bonali, F.L., et al. (Eds.), *Building Knowledge for Geohazard Assessment and Management in the Caucasus and other Orogenic Regions*, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, Springer, 2020, [https://doi.org/10.1007/978-94-024-2046-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-024-2046-3_6)
14. Cavazza W, Albino I, Zattin M et al. Thermochronometric evidence for Miocene tectonic reactivation of the Sevan-Akera suture zone (Lesser Caucasus): a far-field tectonic effect of the Arabia-Eurasia collision? *Geological Society, London, Special Publications*, 428, 2017, 187-198.
15. Adamia Sh., Alania V., Chabukiani A., Kuloshvili S., Maisuradze G., Gotsiridz G. Seismic source zone models of recent earthquakes of Georgia. 5th International Symposium of Eastern Mediterranean Geology, Proceedings, Thessaloniki, Greece, 2004, 545-548.
16. Reilinger R.E., et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research*, 111(B5), 2006, 1-26.
17. Sokhadze G., Floyd M., Godoladze T., King R., Cowgill E. S., Javakhishvili Z., Hahubia G., Reilinger R. Active convergence between the Lesser and Greater Caucasus in Georgia: Constraints on the tectonic evolution of the Lesser–Greater Caucasus continental collision. *EPSL*, 481, 2018, 154–161.
18. Tsereteli N., Tibaldi A., Alania V., Gventsadse A., Enukidze O., Varazanashvili O., Müller B. I. R. Active tectonics of central-western Caucasus, Georgia. *Tectonophysics*, 691, 2016, 328–344.
19. Alania V. M. The structures of the thrust-front of the east Achara-Trialeti thrust and fold belt, south-east Georgia. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, vol.30, (7), 1998, 115-116.
20. Sosson M., Adamia Sh., Muller C., Rolland Y., Alania V., Enukidze O., Hassig M. From Greater to Lesser Caucasus: new insights from surface and subsurface data along a N-S trending transect (Georgia): Thick-skin versus thin-skin tectonics. *Darius News*, 3, 2013, 5-7.
21. Alania V., Chabukiani A., Enukidze O., Razmadze A., Sosson M., Tsereteli N., Varazanashvili O. Structural model of the eastern Achara-Trialeti fold and thrust belt using seismic reflection profiles. *Geophysical Research Abstracts*, 19, 2017, EGU2017-5064.
22. Alania V., Chabukiani A., Enukidze O., Gogrichiani, K., Mikeladze Z., Tatishvili G. Bitsminda Anticline: South Kura Foreland Fold and Thrust Belt, Georgia. *Atlas of Structural Geological Interpretation on Seismic Images* (Eds., M., Achyuta & M., Soumyajit), Published by Wiley Blackwell, 2017, 39-40.

23. Alania V., Beridze T., Enukidze O., et al. Structure of frontal part of the eastern Achara-Trialeti fold-and-thrust belt using seismic profile, Georgia. Bull. Georg. Nat. Acad. Sci. 14 (2), 2020, 62-66.
24. Alania V., Enukidze O., Sadradze N., Boichenko G., Sadradze G., Chabukiani A., Kiria T., Kvavadze N., Gventsadze A. 3D Structural Model of the Bitsmendi Anticline Using Seismic Reflection Profiles, Georgia. Bull. Georg. Nat. Acad. Sci. 14 (1), 2020, 61-67.
25. Enukidze O., Alania V., Bluashvili D., Chabukiani A. Structure of frontal part (Dzegvi-Kavtiskhevi area) of the eastern Achara-Trialeti fold-and-thrust belt, Georgia. Geophysical Research Abstracts, 21, 2019, EGU2019-7598-2.
26. Enukidze O., Alania V., Bluashvili D. Potential structural play within frontal part of Eastern Achara-Trialeti fold-and-thrust belt, Georgia. 34th IAS Meeting of Sedimentology, Rome, Italy, 2019.
27. Enukidze O. Structural model of frontal part of the eastern Achara-Trialeti fold-and-thrust belt using seismic profile interpretation. 6<sup>th</sup> International Scientific-Practical Conference on Up-to-Date Problems of Mining and Geology. Book of abstracts, Tbilisi, Georgia, 2020.
28. Papava P. Some question of eastern part of the Trialeti Ridge and perspective of oil-bearing of Cretaceous and Paleogene deposits. Geology of the Georgian SSR, NEDRA, 1967, 188-204 (in Russian).
29. Adamia Sh., Alania V., Chagelishvili, R., Chabukiani A., Enukidze O., Jaoshvili G., Razmadze A., Sadradze N. Tectonic setting of Georgia (Caucasus). Supplement to GEO-ECO-MARINA, 17, 2011, 11-13.
30. Beridze T. Middle Eocene submarine mass-transport deposits of Tbilisi environs (eastern Achara-Trialeti fold and thrust belt, Georgia). Abstracts of the IAS 34-th meeting on Sedimentology, Rome, Italy, 10–13 September 2019.
31. Buleishvili D. Geology and oil-bearing of intermountain basin of the eastern Georgia. Leningrad, 1960, 239 p., (in Russian).
32. Gamkrelidze P. Geological structure of Adjara-Trialeti folded system. Metsniereba, Tbilisi, 1949, 508 p., (in Russian).
33. Gamkrelidze I. Mechanism of tectonic structure formation and some general problems of tectogenesis. Metsniereba, Tbilisi, 1976, 226 p., (in Russian with English summary).
34. Basheleishvili L. The northern periphery of the eastern segment of the Adzharian–Trialeti fold zone (between the towns of Gori and Kaspi): Peculiarities of geological structure. Bull. Georg. Acad. Sci., 119, 1985, 457–459.
35. Alania V. et al. Structural geometry of active Kura foreland fold-and-thrust belt revealed by seismic reflection profiles. EGU General Assembly 2018. Geophysical Research Abstracts, 20, 20018, EGU2018-9864.
36. Alania V., Enukidze O., Koiava K., Razmadze A., Sanishvili A. Thrust systems and time of deformation of the Gare Kakheti foothills, eastern Georgia (Georgia). Bollettino di Geofisica, teorica ed applicata, 49, 2008, 207-208.
37. Alania V., Enukidze O., Glonti N., Razmadze A., Chabukiani A., Giorgadze A., Glonti B. V., Koiava K., Beridze T., Khutsishvili S., Chagelishvili R. Structural architecture of the Kura foreland fold-and-thrust belt using seismic reflection profile, Georgia. Universal Journal of Geoscience, 6, 2018, 184-190.
38. Cavazza W, Albino I, Galoyan G et al (2019) Continental accretion and incremental deformation in the thermochronologic evolution of the Lesser Caucasus. Geoscience Frontiers, 10, 2019, 2189-2202.
39. Gusmeo T., Cavazza C., Alania V., Enukidze O., Zattin M., Corrado S. Structural inversion of back-arc basins--the Neogene Adjara-Trialeti fold-and-thrust belt (SW Georgia) as a far-field effect of the Arabia-Eurasia collision. Tectonophysics, 2020 (in press).
40. Jones P. B. Triangle zones: processes, problems, and petroleum prospects. AAPG Annual Convention Abstract, Salt Lake City, Utah, USA, May 17-28, 1998.
41. Robinson A.G., Griffith E. T., Gardiner A. R., Home A. K. Petroleum geology of the Georgian fold and thrust belts and foreland basins. Regional and petroleum geology of the Black Sea and surrounding region, A. G. Robinson (ed), AAPG Memoir, 1997, 68, 347-367.

**აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცხებითი სარტყლის ფრონტული ნაწილის  
სტრუქტურული არქიტექტურა: მიმოხილვა**

**ენუქიძე ო.**

**რ ე ზ ი უ მ ე**

სტატიაში წარმოდგენილია აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ფრონტული ნაწილის აგებულების შესახებ არსებული პუბლიკაციების მიმოხილვა. ბოლო წლებში ჩატარებული კვლევები, ძირითადად სეისმურ პროფილების ინტერპრეტაციის საფუძველზე აგებული სტრუქტურული მოდელები გვიჩვენებს, რომ აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ფრონტული ნაწილისთვის დამახასიათებელია რთული აგებულება. სეისმურ პროფილებზე კარგად დაიკვირვება ზედა და ქვედა სტრუქტურული კომპლექსების არსებობა. სტრუქტურები ძირითადად წარმოდგენილია ჩრდილო და სამხრეთ-ვერ-

გენტული შეცოცებებით, ჩრდილო-ვერგენტული დუპლექსებით და სტრუქტურული სოლით. ზედა სტრუქტურული კომპლექსი წარმოდგენილია ზედაპირული სამკუთხა ზონით და მისი დაბოლოება განლაგებულია მიოცენურ ნალექებში, ხოლო ქვედა სტრუქტურული კომპლექსი წარმოდგენილია სტრუქტურული სოლით და მისი დაბოლოება განლაგებულია ზედაცარცულ ნალექებში. გამოთქმულია მოსაზრება, რომ, როგორც ზედაპირული სამკუთხა ზონა, ასევე ქვედა სტრუქტურული სოლი (ან ფარული შეცოცებითი სოლი) უნდა წარმოადგენდეს ნახშირწყალბადებისათვის პერსპექტიულ სტრუქტურულ დამჭერს.

საკვანძო სიტყვები: მცირე კავკასიონი, აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელი, სამკუთხა ზონა, რღვევებთან-დაკავშირებული ნაოჭები, სტრუქტურული სოლი

## STRUCTURAL ARCHITECTURE OF FRONTAL PART OF THE EASTERN ACHARA-TRIALETI FOLD-AND-THRUST BELT: A REVIEW

**Enukidze O.**

### **A b s t r a c t**

The overview of the available publications on the structure of the frontal part of the eastern Achara-Trialeti fold-and-thrust belt is presented in this article. Investigations undertaken in recent years, structural models created mainly on the basis of seismic profiles interpretations have revealed, that the frontal part of the eastern Achara-Trialeti is characterized by the complex structure. Presence of upper and lower structural complexes is well observed on the seismic profiles. The structures are mostly introduced by north and south-vergent thrusts, north-vergent duplexes and structural wedge. The upper structural complex is represented by the triangle zone and the triangle tip is located in middle Miocene deposits, whereas the lower structural complex is represented by the structural wedge and the wedge tip is located in the Upper Cretaceous strata. It has been suggested, that the shallow triangle zone as well as the lower structural wedge (or blind thrust wedge) should represent a prospective for hydrocarbons structural play.

**Key words:** Lesser Caucasus, eastern Achara-Trialeti fold-and-thrust belt, triangle zone, structural wedge

## СТРУКТУРНАЯ АРХИТЕКТУРА ФРОНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО АДЖАРО-ТРИАЛЕТСКОГО СКЛАДЧАТО-НАДВИГОВОГО ПОЯСА: ОБЗОР

**Енукидзе О.**

### **Р е ф е р а т**

В статье представлен обзор имеющихся публикаций по строению фронтальной части восточного Аджаро-Триалетского складчато-надвигового пояса. Проведенные в последние годы исследования структурных моделей, созданных в основном на основе интерпретации сейсмических профилей, показали, что фронтальная часть восточного Аджаро-Триалети характеризуется сложной структурой. На сейсмических профилях хорошо прослеживается наличие верхних и нижних структурных комплексов. Структуры в основном представлены северно- и южно-вергентными надвигами, северно-вергентными дуплексами и структурным клином. Верхний структурный комплекс представлен зоной триангуляции, а его кончик расположена в отложениях среднего миоцена, тогда как нижний структурный комплекс представлен структурным клином, а кончик клина расположена в слое верхнего мела. Было высказано предположение, что зона триангуляции, а также нижний структурный клин (или слепой клин надвига) должны представлять собой перспективу для структурной ловушки углеводородов.

**Ключевые слова:** Малый Кавказ, Складчато-надвиговый пояс восточного Аджаро-Триалетий, Зона триангуляции, Взбросо-складки, структурный клин.

УДК 551.510.535.4; 533.951; 550.388

*Светлой памяти Арчила Хантадзе*

## **ВЕТРОВЫЕ И ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ИОНОСФЕРНЫХ УРОВНЯХ**

**Гвелесиани А. И.**

Институт геофизики им. Михаила Нодиа Тбилисского государственного университета им. Ивана Джавахишвили, 0160, Тбилиси, ул. М. Алексидзе, 1

### **1. Введение**

В последнее время проблема изучения динамики крупномасштабных ( $10^3 \div 10^4$  км) движений в ионосфере, на фоне которых протекают почти все физико-химические процессы, находится в центре внимания исследователей верхней атмосферы. Это обусловлено тем, что атмосфера на рассматриваемых высотах ( $80 \div 600$ ) км представляет собой слабоионизированную плазму, заряженная компонента которой мгновенно реагирует на всякое изменение динамического режима нейтральной компоненты ионосферы. При этом отклик ионосферной плазмы на динамическое воздействие, в виде собственных (фоновых) колебаний, носит электромагнитный характер, распространяется в среде со скоростью выше 1 км/сек и содержит ценную информацию о внешних источниках и электродинамических процессах, разыгрывающихся в это время в верхней атмосфере. Особенно чётко они проявляются на мировой сети ионосферных и магнитных обсерваторий во время магнитных бурь, суббурь [1], землетрясений [2-4], запуска космических аппаратов [7,8] и т.д. В последнем случае отклик выявляется как уединённая крупномасштабная вихревая структура циклонического и антициклонического характера. Расшифровка отклика ионосферной плазмы представляет собой центральную задачу исследователей верхней атмосферы и околоземного космического пространства.

В отличие от тропосферы, где погодообразующие низкочастотные ( $10^{-4} \div 10^{-6}$ ) сек<sup>-1</sup> процессы планетарного масштаба протекают очень медленно, со скоростью местных преобладающих ветров ( $5 \div 20$ ) м/сек [9-11] в ионосфере, крупномасштабные динамические процессы, как показывают наблюдения [9,12,13], имеют довольно широкие временные (от десятка секунд до нескольких часов для электромагнитных планетарных волн и от двух дней до двух недель и выше, для волн типа волн Россби) и скоростные (от  $10 \div 100$  м/сек до нескольких десятков км/сек) спектры [9] (то, что время глобальных воздействий на ионосферу вышеуказанных источников попадает во временной диапазон частот электромагнитных планетарных волн [8], приводит к сильному резонансному усилению амплитуд этих волновых колебаний и позволяет по запаздыванию возмущения чётко регистрировать их на мировой сети ионосферных и магнитных обсерваторий, удалённых друг от друга на тысячи километров).

Характерная особенность динамических процессов верхней атмосферы обусловлена существованием здесь электропроводящей компоненты у атмосферы и действием на эту компоненту геомагнитного поля. Наличие анизотропной электропроводности и неоднородного геомагнитного поля придаёт верхней атмосфере Земли дополнительную упругость электромагнитной природы. В результате динамические процессы в ионосфере, представляющей собой трёхкомпонентную жидкость, будут

определяться не только давлением нейтральных молекул (нейтрального газа)  $P_m$ , но и давлением электронов (электронного газа)  $P_e$ , ионов (ионного газа)  $P_i$  и давлением геомагнитного поля  $P_H = H_0^2 / 8\pi = Q^2 / 8\pi r^6$ , здесь  $H_0$  – величина напряжённости геомагнитного поля,  $Q = 8,1 \cdot 10^{25} \text{ Гс} / \text{см}^3$  – величина магнитного дипольного момента Земли,  $r$  – расстояние от центра Земли до рассматриваемой точки. Магнитное давление  $P_H$  в областях  $E$  и  $F$  ионосферы ( $80 \div 600$  км) почти не меняется с высотой и примерно равно  $4 \cdot 10^{-3} \text{ дн} / \text{см}^2$ . Давление же молекул  $P_m$ , наоборот, уменьшается с высотой очень быстро (экспоненциально) и уже на высоте 130 км  $P_m \approx P_H$  [15]. Давление ионосферной плазмы  $P_{пл} = P_e + P_i \approx 2NkT_e$  всегда намного меньше, чем  $P_m$  и  $P_H$ . Так, например, даже для максимальных значений концентраций ионосферной плазмы  $N \sim 10^7 \text{ см}^{-3}$  и температуры электронов  $T_e \approx 2000^0 \text{ К}$  плазменное давление  $P_{пл} = 10^{-5} \text{ дн} / \text{см}^2$ . Поэтому для интервала высот  $80 \div 600$  км, исключая диффузионные процессы [14], действием плазменного давления на ионосферную среду можно пренебречь.

Из вышеизложенного следует, что динамические процессы в ионосфере в зависимости от высоты, будут определяться либо давлением нейтрального газа  $P_m$ , (область высот  $80 \div 130$  км), либо давлением геомагнитного поля  $P_H$  (область высот выше 130 км). Интенсивность влияния того или иного фактора будет существенным образом зависеть как от степени ионизации среды  $\eta = N / N_m$ , так и от значений гирочастот электронов  $\omega_e = eH_0 / mc$ , ионов  $\omega_i = eH_0 / Mc$ , а также от частот столкновений заряженных частиц друг с другом  $\nu_{ei}$  и с нейтральными молекулами  $\nu_{em}$ ,  $\nu_{im}$ . Здесь  $e$  – элементарный заряд,  $m$  и  $M$  – соответственно массы электронов и ионов,  $c$  – скорость света,  $N_m$  – концентрация нейтральных молекул. В ионосфере в области высот  $80 \div 600$  км  $\omega_e \approx 10^7 \text{ сек}^{-1}$ ,  $\omega_i \approx (1.5 \div 3) \cdot 10^2 \text{ сек}^{-1}$ . Максимальные значения частот соударений в нижней части  $E$ - области ионосферы ( $80 \div 130$  км) равны соответственно  $\nu_{ei} \approx 10^4 \text{ сек}^{-1}$ ,  $\nu_{em} \approx 10^5 \text{ сек}^{-1}$ ,  $\omega_{im} \approx 10^3 \div 10^4 \text{ сек}^{-1}$  [18]. Поэтому здесь всегда выполняются неравенства:

$$\omega_e \gg \nu_e, \quad \omega_i \ll \nu_{im}, \quad (1.1)$$

где  $\nu_e = \nu_{ei} + \nu_{em}$

Следовательно, в этой области верхней атмосферы электроны замагничены (геомагнитные силовые линии вморожены в электронную компоненту), а ионы – нет. Ионы, как пассивная примесь, полностью увлекаются нейтральными частицами [9,15]. Так как частоты соударений очень быстро уменьшаются с высотой, начиная со 120 км и выше, второе неравенство (1.1) нарушается и принимает вид:

$$\omega_i > \nu_{im}. \quad (1.2)$$

Соответственно, в верхней  $E$  области ионосферы и в области  $F$  плазменная компонента атмосферы будет полностью замагничена. С учётом приведённых неравенств общие выражения для коэффициентов проводимостей Холла  $\sigma_H$  и Педерсена (поперечная проводимость)  $\sigma_{\perp}$  упрощаются и принимают вид [9]:

$$\sigma_H = \frac{eNc}{H_0}, \quad \sigma_{\perp} = \frac{e^2 N}{M\nu_{im}}, \quad \frac{\sigma_H}{\sigma_{\perp}} = \frac{\nu_{im}}{\omega_i} \gg 1, \quad (1.3)$$

для нижней  $E$ - области ионосферы ( $80 \div 130$  км), которую называют также областью Холла. Для низкочастотных, медленных, планетарных волн ( $L \sim 10^3 \div 10^4$  км) в этой области атмосферы всегда выполняется неравенство:  $\omega \ll \omega_i < \nu_{im}$ , т.е. частота столкновений  $\nu_{im}$  больше характерных частот волны  $\omega$  и циклотронной частоты ионов  $\omega_i$ ; тем не менее, волновое уравнение в этой области вер-



хней атмосферы не содержит частоты столкновений из-за эффекта Холла (см. (1.3)), и определяющая роль столкновений проявляется в форме волнового уравнения, учитывающего гироскопический эффект, обусловленный геомагнитным полем.

Для верхней части области  $E$  и  $F$  (130÷600 км) соответственно будем иметь

$$\sigma_H = e^2 N \left( \frac{1}{m\omega_e} - \frac{1}{M\omega_i} \right) = 0, \sigma_{\perp} = \frac{NMc^2 v_{im}}{H_0^2}. \quad (1.4)$$

Из (1.3) следует, что в нижней  $E$ -области ионосферы можно пренебречь поперечной проводимостью  $\sigma_{\perp}$  по сравнению с холловской  $\sigma_H$ . Из (1.3) также следует, что  $\sigma_H$  не зависит от частоты столкновений частиц и, следовательно, как было выше указано, не вносит вклада в диссипацию энергии движения. Электромагнитная сила Ампера, действующая на единицу массы,

$\vec{F}_A = \frac{1}{\rho c} [\vec{j} \vec{H}_0]$ , обусловленная током Холла, имеет гироскопический характер и действует на среду

подобно силе Кориолиса  $\mathbf{F}_A = \frac{N}{N_m} [\mathbf{V} \boldsymbol{\omega}_i]$ . В верхней части области  $E$  и  $F$  сила Ампера, обусловленная

проводимостью Педерсена, имеет диссипативный характер и принимает вид релеевского трения

$\mathbf{F}_{\perp} = -\frac{N}{N_m} v_{im} \mathbf{V}_{\perp} = -\lambda \mathbf{V}_{\perp}$ , где  $\mathbf{V}_{\perp} = \mathbf{V} - \frac{(\mathbf{V} \mathbf{H}_0) \mathbf{H}_0}{H_0^2}$ ,  $\mathbf{V}$  – скорость нейтралов. В области высот 80÷115

км существенным фактором диссипации движения является также турбулентное перемешивание [11,10].

С учётом вышесказанного уравнение движения среды в  $E$ -области ионосферы можно представить в виде:

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -grad P + \rho \mathbf{g} + \rho [\mathbf{V} \cdot 2\boldsymbol{\omega}_0] + \rho_i [\mathbf{V} \boldsymbol{\omega}_i] + \nu \frac{\partial^2 \mathbf{V}}{\partial z^2}. \quad (1.5)$$

Так как в выражение (1.5) не входит индуцированное движением магнитное поле  $\mathbf{h}$ , уравнение (1.5) вместе с уравнением неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div \rho \mathbf{V} = 0 \quad (1.6)$$

и притока тепла

$$\frac{dP}{dt} + \gamma P div \mathbf{V} = \varepsilon. \quad (1.7)$$

При заданной величине притока тепла  $\varepsilon$  система будет замкнутой. Здесь  $P$  и  $\rho = MN_m$  – давление и плотность нейтралов,  $\mathbf{g}$  – вектор ускорения силы тяжести,  $\boldsymbol{\omega}_0$  – вектор угловой скорости вращения Земли (всегда направлен с юга на север),  $\nu$  – коэффициент турбулентного перемешивания,  $\rho_i = M_i N_i$  – плотность ионов,  $z$  – вертикальная координата,  $\gamma$  – показатель политропы.

Система (1.5) - (1.7) представляет собой обычные уравнения гидродинамики атмосферы, в которых фигурирует дополнительная механическая сила магнитной природы типа силы Кориолиса, обусловленная наличием геомагнитного поля  $\mathbf{H}_0$  и электропроводностью Холла, силы релеевского трения, обусловленной проводимостью Педерсена[9].

В этом приближении в  $E$ -области ионосферы в нейтральной компоненте, как и ионной (вследствие полного увлечения  $V \approx V_i$ ), возникновение крупномасштабных волн электромагнитной природы невозможны. Скорость электронной компоненты в  $E$ -области ионосферы с учётом  $V_e \gg V \approx V_i$  [15] непосредственно определяется с помощью плотности тока  $\mathbf{j}$  в виде:

$$\mathbf{V}_e \approx -\frac{1}{eN} \mathbf{j} = -\frac{c}{4\pi eN} rot \mathbf{h}. \quad (1.8)$$

Индукционное магнитное поле  $\mathbf{h}$  в этом случае находится из замкнутого уравнения Максвелла:

$$\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} = \text{rot}[\mathbf{V}_e \cdot \mathbf{H}_0] = -\frac{c}{4\pi e N} \text{rot}[\text{rot} \mathbf{h} \cdot \mathbf{H}_0], \quad (1.9)$$

здесь  $\mathbf{H}_0$  – вектор напряжённости геомагнитного поля (всегда направлен с юга на север),  $\mathbf{h}$  – его возмущение (отклонение от  $\mathbf{H}_0$ ).

Уравнение (1.9) в  $E$ -области ионосферы для среднемасштабных процессов ( $L \leq 10^3$  км), как точное решение, содержит колебательную ветвь геликонов (“атмосферных свистов”), а для крупномасштабных процессов ( $L \sim 10^2 \div 10^4$  км), когда нельзя пренебречь эффектом неоднородности геомагнитного поля ( $\nabla \mathbf{H}_0 \neq 0$ ), как будет показано ниже, описывает электромагнитные планетарные волны (новая ветвь электромагнитных колебаний ионосферного резонатора) [18].

В  $F$ -области ионосферы, где плазменная компонента атмосферы полностью замагнитчена, сила Ампера принимает вид упругой электромагнитной силы

$$\mathbf{F}_A = \frac{1}{4\pi} [\text{rot} \mathbf{h} \cdot \mathbf{H}_0] \quad (1.10)$$

и замкнутая система уравнений однокомпонентной магнитной гидродинамики, при заданном притоке тепла  $\mathcal{E}$ , с учётом уравнений (1.6) и (1.7) можно представить в виде [9]:

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\text{grad} P + \rho \mathbf{g} + \rho [\mathbf{V} \cdot 2\boldsymbol{\omega}_0] + \frac{1}{4\pi} [\text{rot} \mathbf{h} \cdot \mathbf{H}_0], \quad (1.11)$$

$$\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} = \text{rot}[\mathbf{V} \cdot \mathbf{H}_0] + \text{rot} \left[ \mathbf{H}_0 \frac{1}{\rho_i \nu_{im}} \frac{1}{4\pi} [\text{rot} \mathbf{h} \cdot \mathbf{H}_0] \right]. \quad (1.12)$$

Для нижней  $E$ -области ионосферы, взяв  $\text{rot}$  от обеих частей уравнения (1.5), для несжимаемой атмосферы, при условии отсутствия диссипативных сил, найдём фундаментальное условие сохраняемости нового инварианта [16]:

$$\text{helm} \left( \text{rot} \mathbf{V} + 2\boldsymbol{\omega}_0 + \frac{N}{N_m} \frac{e}{M_e} \mathbf{H}_0 \right) = 0. \quad (1.13)$$

Здесь оператор  $\text{helm}$ , введённый Фридманом в честь Гельмгольца, для любого векторного поля  $\mathbf{a}$  имеет вид [17]:

$$\text{helm} \mathbf{a} = \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial t} - \text{rot}[\mathbf{V} \cdot \mathbf{a}] + \mathbf{V} \text{div} \mathbf{a}. \quad (1.14)$$

Равенство  $\text{helm} \mathbf{a} = 0$  означает сохраняемость (вмороженность) как силовых линий вектора  $\mathbf{a}$ , так и интенсивности векторных трубок [17].

В отсутствие магнитного поля ( $\mathbf{H}_0 = 0$ ) из (1.13) следует известное условие сохраняемости (вмороженности) абсолютного вихря  $\text{rot} \mathbf{V} + 2\boldsymbol{\omega}_0$  [24], которое как частный случай содержит медленные погодообразующие планетарные волны Россби, обусловленные неоднородностью угловой скорости вращения Земли  $\nabla \omega_0 \neq 0$ . В минимумах и максимумах планетарной волны всегда располагаются тропосферные циклоны и антициклоны, которые перемещаются вместе с волной со скоростью среднего зонального ветра ( $\sim 10$  м/сек) и фактически определяют региональную погоду в нижней атмосфере Земли.

Из выражения (1.13) следует фундаментальное заключение: в нижней части  $E$ -области ионосферы, наряду с волной Россби, должны существовать медленные и быстрые планетарные волны, обусловленные неоднородностью геомагнитного поля  $\nabla H_0$ .

Для  $F$ -области ионосферы из (1.11) и (1.12) получим:

$$\text{helm}(\text{rot} \mathbf{V} + 2\boldsymbol{\omega}_0) = \text{rot} \frac{1}{4\pi \rho} [\text{rot} \mathbf{h} \cdot \mathbf{H}_0], \quad (1.15)$$

$$\text{helm} \mathbf{H} = 0, \quad (1.16)$$

где  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{h}$ .

Уравнение (1.15) показывает частичную вмороженность абсолютного вихря, а (1.16) – полную вмороженность магнитного поля  $\mathbf{H}$  в  $F$ -области ионосферы. Уравнения (1.13) и (1.15) являются обобщёнными вихревыми уравнениями Фридмана-Гельмгольца для этой области верхней атмосферы и, как будет показано ниже, эти фундаментальные уравнения магнитной гидродинамики, наряду с волнами Альвена и Россби, естественным образом содержат новые ветви планетарных волн электромагнитной природы. При  $H_0 \rightarrow 0$  (1.15) переходит в уравнение Фридмана для абсолютного вихря  $rot \mathbf{V} + 2\boldsymbol{\omega}_0$ , а при  $H_0 \rightarrow 0$  и  $\nabla \omega_0 \rightarrow 0$  – в классическое уравнение Гельмгольца для вихря скорости  $rot \mathbf{V}$  [9]. Эти уравнения обладают той замечательной особенностью, что производная по времени от вихря скорости  $d rot \mathbf{V} / dt$  для крупномасштабных процессов является одним из главных членов. (Этим свойством не обладают уравнения движения (1.5) и (1.11), в которых инерционный член  $\rho d\mathbf{V}/dt$  пренебрежимо мал по сравнению с остальными). Это даёт возможность при отсутствии достаточно полных сведений о главных действующих силах (градиент давления, сила тяжести) составить прогностические уравнения и осуществить численное интегрирование. Другой важной особенностью уравнения Фридмана-Гельмгольца, по сравнению с уравнением движения Эйлера, является естественный учёт эффектов неоднородностей угловой скорости вращения Земли  $\boldsymbol{\omega}_0$  и геомагнитного поля  $\mathbf{H}_0$ . Наконец, уравнение Фридмана-Гельмгольца, как будет в дальнейшем показано, является основным условием динамической возможности движения, в котором  $rot \mathbf{V}$  всегда отличен от нуля. Уравнения (1.13), (1.15) и (1.16) содержат полную информацию об эволюции вихрей и планетарных волн, обусловленных действующими в жидкости неконсервативными силами ( $rot \mathbf{F} \neq 0$ ). В условиях ионосферы – это силы Кориолиса  $\mathbf{F}_K = \rho[\mathbf{V} \cdot 2\boldsymbol{\omega}_0]$  и Ампера  $\mathbf{F}_A = [rot \mathbf{h} \cdot \mathbf{H}_0] / 4\pi$ .

Резюмируя, можем заключить, что земная атмосфера в  $E$ -области (80 ÷ 150 км) ведёт себя, в основном, как нейтральная среда. Ионная компонента плазмы здесь присутствует как пассивная примесь и перемещается вместе с нейтральной компонентой ( $V_i \approx V$ ) [9,15]. Динамические процессы в этой области верхней атмосферы, в основном, будут контролироваться давлением нейтрального газа  $P$ . Электронная компонента, которая здесь полностью замагничена, контролируется геомагнитным полем ( $P_H / P_e \gg 1$ ) и, независимо от нейтралов, перемещается с дрейфовой скоростью  $\mathbf{V}_e = c [\mathbf{E} \cdot \mathbf{H}_0] / H_0^2 = \mathbf{V}_d$ , обусловленной вихревым электрическим полем, величина которого для крупномасштабных процессов, как было показано в [25], значительно превосходит динамо-поле, генерируемое в ионосфере ветровым механизмом  $\mathbf{E}_d = [\mathbf{V} \cdot \mathbf{H}_0] / c$ . Возникновение и развитие крупномасштабных вихревых и волновых движений в этой области верхней атмосферы необходимо исследовать на основе модели трёхжидкостной гидродинамики: для нейтралов и ионов ( $\mathbf{V} = \mathbf{V}_i$ ) уравнения (1.5) - (1.7), для электронов – уравнения (1.8) - (1.9). Динамические процессы в нейтральной компоненте будут иметь гидродинамический характер и для крупномасштабных низкочастотных процессов должны протекать сравнительно медленно, со скоростью преобладающих ионосферных ветров (10 ÷ 100 м/сек). Для электронов крупномасштабные процессы будут быстрыми (800 ÷ 900 м/сек – 1 ÷ 7 км/сек), а волновые движения должны иметь электромагнитную природу.

В  $F$ -области (150 ÷ 600 км) электроны и ионы полностью замагничены,  $\omega_e \gg \nu_e$ ,  $\omega_i \gg \nu_{im}$ . Они жёстко связаны с силовыми линиями геомагнитного поля и их движение, в основном, будет контролироваться давлением геомагнитного поля ( $(P_H / P) \gg 1$ ). Нейтралы, из-за равенства масс молекул и ионов, будут эффективно вовлекаться в движение, и возмущение в нейтральной компоненте будут распространяться с характерной скоростью  $\mathbf{U}_A = \mathbf{H}_0 / \sqrt{4\pi\rho}$ , которая в этой области верхней атмосферы изменяется от 100 ÷ 300 м/сек до 2 ÷ 10 км/сек [7,8]. Динамические процессы в  $F$ -области необходимо исследовать на основе одножидкостной модели магнитной гидродинамики ионосферы (уравнения (1.11), (1.12), (1.15), (1.16)). Здесь динамические процессы будут иметь магнитогидродинамический характер и протекать значительно быстрее, чем в  $E$ -области ионосферы.

При этом, как следует из уравнения (1.12), движение здесь будет кинематически возможным лишь при скоростях, удовлетворяющих уравнению индукции Максвелла (1.12). Этот факт, во-первых, существенно ограничивает кинематическую произвольность движения в F-области ионосферы и, во-вторых, показывает, что динамически возможные движения должны осуществляться лишь при скоростях, удовлетворяющих уравнению (1.12). Уравнение индукции, как и уравнение Фридмана-Гельмгольца (1.15), естественным образом содержит неоднородность геомагнитного поля.

## 2. Ветровые системы на ионосферных уровнях

Движения воздушных масс в ионосфере характеризуются сильной изменчивостью во времени пространстве. Из имеющихся в настоящее время экспериментальных данных [26.] следует, что в ионосфере существуют глобальные циркуляционные системы ветров (преобладающие ветры, обусловленные вращением Земли и неравномерностью нагрева полярных и экваториальных областей атмосферы), приливные течения, которые наиболее сильно выражены на ионосферных высотах, волновые движения гидродинамической и электромагнитной природы и, наконец, разного рода вихревые и неоднородные образования с той или иной продолжительностью “жизни”. Сложная кинематическая и динамическая структура движений в ионосфере объясняется большим многообразием сил, действующих на “атмосферную частицу”, вращением Земли и сравнительно большой электропроводностью воздушных масс в верхней атмосфере. Выше 80 км на движение атмосферы, как было показано выше, существенное оказывает также магнитное поле Земли.

Наблюдения над воздушными движениями в ионосфере, их интерпретация и обобщение составляет один из наиболее сложных разделов физики высоких слоёв атмосферы.

Ниже на основе упрощённых уравнений магнитной гидродинамики ионосферы даются простые теоретические модели ветровых движений в E и F-областях ионосферы. Ценность таких моделей должна заключаться в отражении ими главных особенностей динамических процессов в верхней атмосфере и возможности на их основе объяснить ряд закономерностей ионосферных ветров, подтверждающихся прямыми и наземными наблюдениями в верхней атмосфере Земли.

В дальнейшем нас будут интересовать, в основном, крупномасштабные ветровые течения в ионосфере, имеющие горизонтальный пространственный масштаб L порядка 100 км и выше, вертикальный масштаб  $H=RT/g$  порядка шкалы высот и временной масштаб  $\tau_0$  порядка полу-суток. Именно такие ветровые движения связаны с глобальными распределениями структуры ионосферы и её длиннопериодными временными вариациями, суточными, сезонными, 27-дневными, 11-летними и т.д.

Учитывая, что на расстояниях L и H макроскопические параметры среды меняются на порядок величины, а также, что  $H/L \sim 10^{-2} \ll 1$  и  $V_L = L/\tau_0 \approx 150$  м/с ( $V_L$  – характерная скорость горизонтального ветра), из уравнения неразрывности (1.6) получим оценку отношения вертикальной и горизонтальной компонент ветра:

$$\frac{V_z}{V_L} \approx \frac{H}{L} \sim 10^{-2}. \quad (2.1)$$

Отметим, что эта оценка хорошо согласуется с экспериментальными, по которым на высотах 100 и 200 км

$$V_L \approx 100 \div 200 \text{ м/с}, \quad V_z \approx 0,1 \div 1 \text{ м/с}.$$

Из соотношения (2.1) следует, что крупномасштабные движения в ионосфере, в основном, являются квазигоризонтальными и, следовательно, в этом приближении основной теоретической проблемой является определение компонентов горизонтального ветра.

В настоящее время по вопросу горизонтальных ветров типа общей циркуляции имеется ряд работ теоретического характера, в которых на основе соотношения (2.1) проводится упрощение системы уравнений гидродинамики так, как это было сделано для тропосферы Кочиным, Кибелем и др.

Однако во всех этих работах или совсем не формулируются граничные условия, от которых зависит единственность решения задачи, или же они взяты в такой же форме, как и для приземного слоя атмосферы, для которой поверхность Земли играет роль неподвижной, непроницаемой стенки, на которой, вследствие прилипания и непроницаемости все три компонента ветра обращаются в нуль. В ионосфере, ввиду отсутствия непроницаемых стенок, всегда происходит просачивание движения атмосферы в вертикальном направлении через некоторую выбранную плоскость, и можно считать, что  $V_z$  может быть отличной от нуля. Иначе говоря, в ионосфере должно соблюдаться граничное условие проницаемой стенки. Такое условие для ионосферы, очевидно, можно считать наиболее естественным, так как благодаря наличию вертикальных скоростей через проницаемую граничную плоскость, в атмосфере происходит перемешивание, и осуществляется динамическая связь между различными слоями атмосферы.

Для слабо ионизированного газа, каковой является ионосферная среда, можно считать, что скорость ветра совпадает со скоростью движения центра масс нейтральных молекул  $\vec{V} = \vec{V}_n$ , а скорость плазмы  $\vec{V}_p$  равна скорости движения центра масс ионов  $\vec{V}_i$ . Тогда, используя значения структурных параметров ионосферы и проводя упрощение основных уравнений динамики ионосферы, следуя Кочину, легко получим следующую систему уравнений для общей циркуляции ветров в ионосфере.

$$\rho \left\{ \frac{dV_\theta}{dt} - \frac{V_\lambda^2}{r} \operatorname{ctg} \theta - 2\omega_0 \cos \theta V_\lambda + v_i (V_\theta - V_{i\theta}) \right\} = \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial r} \mu \frac{\partial V_\theta}{\partial r}, \quad (2.2)$$

$$\rho \left\{ \frac{dV_\lambda}{dt} + \frac{V_r V_\lambda}{r} \operatorname{ctg} \theta + 2\omega_0 \cos \theta V_\theta + v_i (V_\lambda - V_{i\lambda}) \right\} = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial P}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial r} \mu \frac{\partial V_\lambda}{\partial r}, \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g, \quad P = \rho R T, \quad (2.4)$$

$$\rho V_r - \rho_0 V_0 = -\frac{1}{r^2 \sin \theta} \int_{r_0}^r \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} (r \sin \theta \rho V_\theta) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (r \rho V_\lambda) + r^2 \sin \theta \frac{\partial \rho}{\partial t} \right] dr, \quad (2.5)$$

$$V_{i\theta} = (1 - \beta) V_\theta + \alpha V_\lambda + U_D, \quad V_{i\lambda} = (1 - \beta) V_\lambda - \alpha V_\theta + V_D, \quad (2.6)$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{V_\lambda}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} + V_r \frac{\partial}{\partial r}.$$

Уравнения (2.2)-(2.6) справедливы для северного полушария,  $V_z = V_0$  – значение вертикальной скорости на граничной проницаемой плоскости при  $r = r_0$ ,  $r_0 \approx 80$  км – высота термпаузы, где температура минимальна,  $V_\theta$ ,  $V_\lambda$ ,  $V_{i\theta}$ ,  $V_{i\lambda}$  – меридиональные и зональные компоненты ветра и ионосферной плазмы,  $\theta = 90^\circ - \varphi$  – широта,  $\lambda$  – долгота,  $\mu$  – коэффициент турбулентного перемешивания,  $v_i = v_{in} N / N_n$  коэффициент ионного трения,  $\alpha = \beta v_{in} / \omega_i$ ,  $\beta = [1 - (v_{in} / \omega_i)^2]^{-1}$ ,  $\omega_i = e H_{0z} / M c$  – циклотронная частота ионов,  $U_D = \beta c E_\theta / H_{0z} - \alpha c E_\lambda / H_{0z}$ ,  $V_D = -\beta c E_\lambda / H_{0z} - \alpha c E_\theta / H_{0z}$ ,  $E_\theta$  и  $E_\lambda$  – меридиональная и зональная компоненты электрического поля (в дальнейшем они считаются заданными). В области E  $\alpha \approx 0$ ,  $\beta \approx 0$ , и дрейфовые скорости автоматически выпадают. В области F  $\alpha \approx 0$ ,  $\beta \approx 1$ , и дрейфовые скорости являются внешними по отношению к ветру факторами и хорошо описываются известными выражениями ионосферного ветра:

$$V_{i\theta} = U_D = c \frac{E_\lambda}{H_{0z}}, \quad V_{i\lambda} = V_D = -c E_\theta / H_{0z}.$$

Эти значения скорости ионизации хорошо регистрируются экспериментальными наблюдениями.

Так как система (2.2)-(2.6) замкнута, можно последовательно определить все элементы общей циркуляции, если известно распределение температуры  $T=T(r, \theta, \lambda, t)$  и значения  $P_0(r_0, \theta, \lambda, t)$  и  $V_0(r_0, \theta, \lambda, t)$  на граничной проницаемой плоскости.

Действительно, исключая (2.4) плотность из уравнения состояния и подставляя в уравнение статики, определим давление

$$P(r, \theta, \lambda, t) = P_0(r_0, \theta, \lambda, t) \exp \left[ - \int_{r_0}^r \frac{g dr}{RT(r, \theta, \lambda, t)} \right]. \quad (2.7)$$

После этого определим плотность

$$\rho = \frac{P(r, \theta, \lambda, t)}{RT(r, \theta, \lambda, t)}, \quad \rho_0 = \frac{P_0(r_0, \theta, \lambda, t)}{RT_0(r_0, \theta, \lambda, t)}. \quad (2.8)$$

По известным значениям  $P$ ,  $\rho$ ,  $\rho_0$  и  $V_0$ , исключая  $V_r$  из уравнений (2.2) и (2.3) с помощью уравнения неразрывности (2.5), получим два нелинейных уравнения второго порядка по  $t$  и  $r$  для определения горизонтальных ветров  $V_\theta$  и  $V_\lambda$ . Эти уравнения можно решить приближёнными методами или численным интегрированием, когда невозможно линеаризовать нелинейный член  $(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V}$  или точно, когда  $(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V}$  становится линейным. При интегрировании появляются 4 произвольных функций. две из которых определяются из условия прилипания  $V_\theta$  и  $V_\lambda$  на граничной плоскости, а две другие из условия конечности  $V_\theta$  и  $V_\lambda$  при  $r \rightarrow \infty$ . после определения  $V_\theta$  и  $V_\lambda$ , скорости перемещения ионизации  $V_{i\theta}$  и  $V_{i\lambda}$ , при заданных  $E_\theta$  и  $E_\lambda$ , определяются из уравнения (2.6) и, наконец, вертикальная компонента скорости ветра  $V_r$  определяется из уравнения (2.5).

Для наглядности исследуем подробно один частный случай, когда удаётся систему (2.2)-(2.6) проинтегрировать до конца.

Рассмотрим однородную ионосферу ( $\rho = \rho_0 = const$ ), в которой поле скоростей горизонтальных ветров является функцией высоты  $r = z$  и времени  $t$ , а  $\theta$  и  $\lambda$  рассматриваются как постоянные параметры.

### 3. Теоремы Фридмана для электропроводящей атмосферы

Для каждой задачи о реальном движении жидкости в заданных стационарных условиях, в принципе, должны существовать точные стационарные решения уравнений термогидродинамики атмосферы (квазистатичность, квазигеострофичность движения и т.д.

Кинематически эти стационарные решения могут существовать при любых скоростях [17], однако не всякое кинематически мыслимое решение, даже если оно является математически точным, может реально осуществиться в природе. Осуществляющиеся в природе движения для конкретно заданной среды должны удовлетворять как уравнениям гидродинамики, так и некоторым дополнительным кинематическим соотношениям, называемым условиями динамической возможности [17]. Они получаются применением операций  $rot$  к уравнениям движения. Так, например, для идеальной несжимаемой жидкости, находящейся в поле консервативных сил ( $rot \mathbf{F} = 0$ ) скорость среды  $\mathbf{V}$  должна удовлетворять следующим дополнительным условиям:

$$helm(rot \mathbf{V}) = rot \frac{d\mathbf{V}}{dt} = 0, \quad div \mathbf{V} = 0. \quad (2.1)$$

Эти кинематические соотношения известны под названием теоремы Гельмгольца. Фридман их называет условиями динамической возможности движения, так как если эти условия будут выполнены для заданного поля скоростей  $\mathbf{V}$ , то всегда можно определить единственный динамический элемент несжимаемой жидкости – давление  $P$ , как функцию времени и координат, таким

образом, чтобы были соблюдены уравнения гидродинамики. Иначе говоря, если указанные кинематические соотношения Гельмгольца будут удовлетворены при заданном поле скоростей, то должно существовать реальное движение несжимаемой жидкости.

Например, в несжимаемой жидкости в поле силы тяжести ( $\mathbf{F} = \rho \mathbf{g}$ ) кинематически возможно, но динамически невозможно, вращательное движение с составляющими скорости:

$$V_x = -\Omega(z)y, \quad V_y = \Omega(z)x, \quad V_z = 0. \quad (2.2)$$

Здесь  $\Omega(z)$  – угловая скорость вращения жидкости.

В самом деле, хотя в этом случае второе условие Гельмгольца выполнено, однако первое условие отлично от нуля:

$$rot_x \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -2\Omega(z) \frac{d\Omega(z)}{dz} y, \quad rot_y \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -2\Omega(z) \frac{d\Omega(z)}{dz} x, \quad rot_z \frac{d\mathbf{V}}{dt} = 0. \quad (2.3)$$

Другими словами, мы не сможем определить давление  $P$  из уравнений движения Эйлера,

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \rho \Omega^2(z)x, \quad \frac{\partial P}{\partial y} = \rho \Omega^2(z)y, \quad \frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g, \quad (2.4)$$

так как здесь левые части являются составляющими градиента, тогда как правые части этим свойством не обладают. Поэтому давление  $P$  не может быть определено из выражения (2.4) как функция координат. Выполнение условий динамической возможности движения Гельмгольца (2.1) означает, что в случае несжимаемой жидкости движение, определяемое уравнением (2.2), будет динамически возможным лишь при скоростях с  $\Omega(z) = const$ , так как только в этом случае удовлетворяются все условия Гельмгольца (2.1), и правые части выражений (2.4) в этом случае становятся составляющими градиента. Условий динамической возможности Гельмгольца (2.1) наглядно показывают, что в несжимаемой жидкости, находящейся в поле силы тяжести, неоднородное вращение жидкости невозможно. Для сжимаемой жидкости, как будет ниже показано, поле скоростей (2.2) может существовать.

Условия динамической возможности Гельмгольца (2.1), выражающие необходимые и достаточные условия для определения единственного динамического элемента, давления  $P$  по полю скоростей  $\mathbf{V}$  в несжимаемой жидкости, являются основой классической гидродинамики. Значение их двойное: с одной стороны, они устанавливают ряд основных кинематических свойств движения несжимаемой жидкости (например, сохраняемость (вмороженность) вихревых линий при движении, сохраняемость интенсивности вихревых трубок, а также изгиб, кручение, растяжение вихревых линий и т.д.), с другой стороны, они служат мощным средством для выбора из бесчисленного множества кинематически мыслимых точных решений для скорости  $\mathbf{V}$  тех реальных решений, которые динамически возможны в несжимаемой жидкости. Наконец, теорема Гельмгольца (2.1) позволяет изучить такие движения несжимаемой жидкости, в которой завихрённость  $rot \mathbf{V}$  отлична от нуля, и, тем самым, приближает математическое описание жидкости к более реальной картине движения.

Условия динамической возможности движения для сжимаемой неоднородной бароклиной жидкости, находящейся, в общем случае, в поле неконсервативных массовых сил ( $rot \mathbf{F} \neq 0$ ), были получены Фридманом [17]. Они как частный случай включают в себя теорему Гельмгольца (2.1). Фридман исключил из уравнения движения и неразрывности динамические элементы, давление  $P$  и плотность  $\rho$ , и объединил полученные дополнительные кинематические условия, налагаемые на вектор скорости  $\mathbf{V}$  в виде пяти теорем. Эти кинематические условия связывают компоненты скоростей, заданные силы и их производные по координатам и по времени. С динамической точки зрения теоремы Фридмана являются необходимыми и достаточными условиями для определения в сжимаемой жидкости давления  $P$  и плотности  $\rho$ . При  $\rho = const$  и  $rot \mathbf{F} = 0$  число теорем Фридмана уменьшается до одной теоремы Гельмгольца (2.1). Стремясь к наибольшей общности результатов, Фридман не принимал во внимание уравнение притока тепла (1.7) и таким образом выведенные условия динамической возможности движения рассматривались как общие условия, которые должны были быть выполнены при любом притоке тепла. Естественно, что при этом

давление  $P$  определялось по полю скоростей с точностью до произвольной функции времени, плотность  $\rho$  – с точностью до постоянной.

Так как жидкость, рассматриваемая Фридманом, фактически была реальной моделью атмосферы Земли, Фридману и его последователям на основе теорем Фридмана, удалось построить многие теоретические модели важнейших тропосферных движений, являющихся редкими случаями точного интегрирования нелинейных уравнений гидродинамики тропосферы [17-20]. Обобщение теорем Фридмана для идеальной сжимаемой электропроводящей жидкости в поле неконсервативных массовых сил и внешнего магнитного поля  $\mathbf{H}_0$  в индукционном приближении проведено в [16,9]. Было показано, что в случае электропроводящей среды поле скоростей  $\mathbf{V}$  и магнитное поле  $\mathbf{H}$  должны удовлетворять тринадцати теоремам условий динамической возможности движения. В отсутствие магнитного поля ( $\mathbf{H} = 0$ ) число теорем уменьшается до пяти теорем Фридмана. Такое обобщение естественным образом показало существование в магнитной гидродинамике двух классов точных решений. Первый класс решений отыскивается с помощью двенадцати теорем, которые при  $\mathbf{H} \rightarrow 0$  переходят в известный класс точных решений для обычной гидродинамики. Например: теоретическая модель перемещающегося магнитогидродинамического циклона (антициклона), найденная для условий  $(\mathbf{G} \cdot \mathbf{B}) = 0$ ,  $(\mathbf{G} \cdot \mathbf{\Gamma}) = 0$ , при  $\mathbf{H} \rightarrow 0$  переходит в известную гидродинамическую модель циклона (антициклона), построенную Кочиным для тропосферы [18]; теоретическая модель вращения с высотой преобладающего ветра в нижней E-области ионосферы при  $\mathbf{H} \rightarrow 0$  переходит в известную гидродинамическую модель Экмана-Окерблома для планетарного пограничного слоя тропосферы; магнитогидродинамическая модель Гартмана при  $\mathbf{H} \rightarrow 0$  переходит в классическую модель течения Пуазейля и т.д. Второй класс точных решений, которые отыскиваются с помощью теоремы 13 ( $(\mathbf{G} \cdot \mathbf{B}) \neq 0, (\mathbf{G} \cdot \mathbf{\Gamma}) \neq 0$ ), не имеет аналога в обычной гидродинамике, и при  $H_0 \rightarrow 0$  решения теряют физический смысл. Именно такие решения устанавливают новые фундаментальные свойства движения электропроводящей жидкости и, тем самым, представляют большой теоретический и практический интерес для исследований в области физики, магнитной гидродинамики, ионосферы, магнитосферы и атмосферы Солнца. В частности, известные стационарные решения Альвена-Чандрасекхара о магнито-вихревых кольцах [21,22], найденные путём формального рассмотрения уравнений магнитной гидродинамики для консервативных сил, элементарно могут быть получены, как частные решения, из теоремы 13 в виде:

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{H}}{\sqrt{4\pi\rho}}, \quad P' \approx P_0 + \frac{H_0^2}{8\pi} - \rho g z, \quad \rho = const, \quad \frac{\rho V^2}{2} = \frac{H^2}{8\pi}. \quad (2.5)$$

С учётом неконсервативных массовых сил получено точное решение [9]:

$$\mathbf{V} = \frac{\beta}{\sqrt{4\pi\rho}} \mathbf{H}, \quad \text{где: } \beta = \sqrt{1 + \frac{(\mathbf{G} \cdot rot \mathbf{F})}{(\mathbf{G} \cdot \mathbf{B})}}, \quad \mathbf{G} = \mathbf{F} - (\mathbf{V} \nabla) \mathbf{V}, \quad \mathbf{B} = -rot \mathbf{G}, \quad (2.6)$$

которое при  $rot \mathbf{F} = 0$  переходит в (2.5).

Понимая чрезвычайную важность условий динамической возможности для движений электропроводящей среды, в качестве примера продемонстрируем метод его получения применительно к F-области ионосферы. В отсутствие диссипативных сил основные уравнения динамики ионосферы можно представить в виде:

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -grad P' + \frac{(\mathbf{H} \nabla) \mathbf{H}}{4\pi} + \rho \mathbf{F}, \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div \rho \mathbf{V} = 0, \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - (\mathbf{H} \nabla) \mathbf{V} + (\mathbf{V} \nabla) \mathbf{H} + \mathbf{H} div \mathbf{V} = 0, \quad (2.9)$$



где  $P' = P + H^2 / 8\pi$  – полное давление среды  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{h}$ ,  $\mathbf{F} = [\mathbf{V} \cdot 2\boldsymbol{\omega}_0] + \mathbf{g}$ . Как было отмечено выше, вывод условий динамической возможности сводится к последовательному исключению динамических элементов  $P'$  и  $\rho$  из уравнений (2.7) и (2.8).

Вводя векторы Фридмана  $\mathbf{G} = \mathbf{F} - (\mathbf{V}\nabla)\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{B} = -\text{rot } \mathbf{G} = \text{helm}(\text{rot } \mathbf{V} + 2\boldsymbol{\omega}_0)$ , которые играют большую роль в образовании и разрушении вихрей, и обозначения  $\mathbf{T} = (\mathbf{H}\nabla)\mathbf{H} / 4\pi$ ,  $\mathbf{\Gamma} = \text{rot } \mathbf{T}$ ,  $\rho = \exp(-\varphi)$ ,  $\varphi = \ell n \omega$ ,  $\omega = 1/\rho$  – удельный объём,  $\theta = \text{div } \mathbf{V}$  перепишем систему уравнений (2.7) - (2.9) в виде:

$$\text{grad } P' = e^{-\varphi} \mathbf{G} + \mathbf{T}, \quad (2.10)$$

$$(\mathbf{V} \cdot \text{grad } \varphi) = \theta - \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad (2.11)$$

$$\text{helm } \mathbf{H} + \theta \mathbf{H} = 0. \quad (2.12)$$

Уравнение (2.12) можно назвать кинематическим уравнением возможности движения в магнитной гидродинамике, так как оно связывает между собой компоненты скорости и магнитного поля. Однако это условие недостаточно для описания движения жидкости. Действительно, можно привести много примеров, когда поле скоростей и магнитное поле удовлетворяют уравнению (2.12), но при этих значениях  $\mathbf{V}$  и  $\mathbf{H}$  нельзя определить давление и плотность среды, и, следовательно, такие решения являются физически нереальными. Как было показано в [16,9], для физической возможности движения в магнитной гидродинамике поле скоростей и магнитное поле должны удовлетворять также и другим кинематическим соотношениям, которые можно назвать условиями динамической возможности движения [16]. Они совместно с (2.12) однозначно определяют динамические элементы движения: давление и плотность.

Уравнение (2.10) показывает, что если удельный объём найден как функция от  $x, y, z, t$ , то давление может быть определено простыми квадратурами с точностью до произвольной функции времени:

$$P' = P'_0(t) + \int \left[ \left( \frac{1}{\omega} G_x + T_x \right) dx + \left( \frac{1}{\omega} G_y + T_y \right) dy + \left( \frac{1}{\omega} G_z + T_z \right) dz \right]. \quad (2.13)$$

Процедура получения условий динамической возможности сводится к доказательству следующей теоремы:

В магнитной гидродинамике необходимым и достаточным условием для определения полного давления  $P'$ , как функции времени и координат, является равенство:

$$\mathbf{B} + [\text{grad } \varphi \cdot \mathbf{G}] = e^{\varphi} \mathbf{\Gamma}. \quad (2.14)$$

Необходимость доказывается при применении к уравнению (2.10) операции  $\text{rot}$ . Достаточность следует, если равенство (2.14) написать в форме  $\text{rot}(e^{-\varphi} \mathbf{G} + \mathbf{T}) = 0$ , но это соотношение показывает, что можно найти такую скалярную функцию  $P'$  от времени и координат, градиент которой будет удовлетворять уравнению:  $\text{grad } P' = \exp(-\varphi) \mathbf{G} + \mathbf{T}$ . Теорема доказана. Итак, если уравнения магнитной гидродинамики имеют решения, тогда для определения плотности  $\rho = \exp(-\varphi)$  должны выполняться следующие соотношения:

$$[\text{grad } \varphi \cdot \mathbf{G}] = e^{\varphi} \mathbf{\Gamma} - \mathbf{B}, \quad (2.15)$$

$$(\text{grad } \varphi \cdot \mathbf{V}) = \theta - \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad (2.16)$$

$$\text{helm } \mathbf{H} + \theta \mathbf{H} = 0. \quad (2.17)$$

Доказательство обобщённых для магнитной гидродинамики теорем Фридмана-Гельмгольца, позволяющих определить плотность среды  $\rho$  из (2.15) и (2.16), могут быть получены из исследования простой алгебраической системы уравнений вида:

$$[\mathbf{X} \cdot \mathbf{B}] = \mathbf{M} (\mathbf{X} \cdot \mathbf{A}) = m, \quad (2.18)$$

где  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{M}$  и  $m$  – заданные векторы и скаляр,  $\mathbf{X}$  – вектор, подлежащий определению. Полагая в системе (2.18)  $\mathbf{B} = \mathbf{G}$ ,  $\mathbf{A} = \mathbf{V}$ ,  $\mathbf{M} = \exp(\varphi)\mathbf{\Gamma} - \mathbf{B}$ ,  $m = \theta - \partial\varphi/\partial t$  и  $\mathbf{X} = \text{grad}\varphi$ , придём к системе (2.15) – (2.16). Как видно из системы (2.18), необходимым условием решения этой системы относительно  $\mathbf{X} = \text{grad}\varphi$  является равенство  $(\mathbf{B} \cdot \mathbf{M}) = 0$  или

$$(\mathbf{G} \cdot \mathbf{B}) = e^\varphi (\mathbf{G} \cdot \mathbf{\Gamma}). \quad (2.19)$$

Ясно, что условие (исключая из рассмотрения случай  $e^\varphi = 0$ , не отвечающий конечному значению плотности) будут иметь место в одном из следующих случаев:

1) или  $(\mathbf{G} \cdot \mathbf{\Gamma}) \neq 0$ , тогда и скалярное произведение  $(\mathbf{G} \cdot \mathbf{B})$  также должно быть отличным от нуля;

2) или  $(\mathbf{G} \cdot \mathbf{\Gamma}) = 0$ , тогда должно быть и  $(\mathbf{G} \cdot \mathbf{B}) = 0$ .

В [16] показано, что случай  $(\mathbf{G} \cdot \mathbf{\Gamma}) = 0$  и  $(\mathbf{G} \cdot \mathbf{B}) = 0$  даёт 12 теорем об условиях динамической возможности движения, а в случае  $(\mathbf{G} \cdot \mathbf{\Gamma}) \neq 0$  и  $(\mathbf{G} \cdot \mathbf{B}) \neq 0$  – лишь одну теорему.

На основе установленных теорем было найдено точное решение перемещающегося нестационарного МГД-циклона в виде [9]:

$$V_x = \frac{\partial a(z, t)}{\partial t} - \Omega(z)(y - b(z, t)), \quad V_y = \frac{\partial b(z, t)}{\partial t} + \Omega(z)(x - a(z, t)), \quad V_z = 0, \quad (2.20)$$

$$H_x = -n(z)y + \xi(z, t), \quad H_y = n(z)x + \eta(z, t), \quad H_z = 0, \quad (2.21)$$

$$\omega(z) = \frac{1}{\rho(z)} = C_0 \frac{\Omega(z)[\Omega(z) + 2\omega_{0z}]}{1 + C_0\psi_1(z)}, \quad (2.22)$$

$$P' = \frac{1}{2C_0} \left[ (x - q_1(t))^2 + (y - q_2(t))^2 - 2 \int \frac{g}{\psi} dz \right] - \int \frac{\psi_1}{\psi} g dz + P'_0(t). \quad (2.23)$$

где  $\xi(z, t) = \alpha(z)\sin\Omega t + \beta(z)\cos\Omega t + n(z)b(z, t)$ ,  $\eta(z, t) = -\alpha(z)\cos\Omega t + \beta(z)\sin\Omega t - n(z)a(z, t)$ ,  $n(z)$ ,  $\alpha(z)$ ,  $\beta(z)$  – произвольные функции  $z$ ;  $\psi = \Omega(\Omega + 2\omega_{0z})$ ,  $\psi_1 = n^2/4\pi$ ;  $a(z, t)$ ,  $b(z, t)$ ,  $z_1 = z$  – координаты перемещающегося центра вращения циклона;  $\Omega(z)$  – угловая скорость вращения циклона;  $C_0 = \text{const}$ ,  $2\omega_{0z}$  – вертикальная компонента угловой скорости вращения Земли;  $q_1(t)$ ,  $q_2(t)$  – произвольные функции времени;  $P'_0(t)$  – произвольная функция времени. Как видим, плотность определяется с точностью до постоянной  $C_0$ , а давление с точностью до произвольной функции времени  $P'_0(t)$ . Остальные шесть произвольных функций  $a(z, t)$ ,  $b(z, t)$ ,  $\xi(z, t)$ ,  $\eta(z, t)$ ,  $\Omega(z)$  и  $n(z)$  определяются из шести дифференциальных уравнений, которые при заданных  $q_1(t)$  и  $q_2(t)$  полностью решают поставленную задачу.

Проанализируем полученное точное решение (2.20)-(2.23), обладающее всеми основными свойствами нестационарного циклона или антициклона. Как видно, кинематическая картина движения повторяет все закономерности реально наблюдаемых циклонов (антициклонов). Действительно, из формулы (2.20) следует, что в каждый данный момент рассматриваемое движение можно представить как вращение частиц около мгновенного центра с координатами:

$$x_c = a - \frac{1}{\Omega} \frac{\partial b}{\partial t}, \quad y_c = b + \frac{1}{\Omega} \frac{\partial a}{\partial t}, \quad z_c = z.$$

Геометрическое место мгновенных центров для разных высот даёт мгновенную ось движения, которая, как и ось вращения, меняет своё положение и форму во времени. Определяя линии тока по уравнениям

$$\frac{dx}{-\Omega(y - y_c)} = \frac{dy}{\Omega(x - x_c)} = \frac{dz}{0},$$

найдем, что они будут концентрическими окружностями в горизонтальных плоскостях. Для траекторий частиц проводящей жидкости из (2.20) найдем:

$$x = a + A \cos(\Omega t + \alpha), \quad y = b + A \sin(\Omega t + \alpha), \quad z = B,$$

где  $A$ ,  $B$  и  $\alpha$  не зависят от  $t$  и определяются из начальных положений частиц. Таким образом, траектории частиц будут обладать петлями и точками возврата. Наконец, из (2.20) следует, что вертикальная составляющая вихрей зависит только от высоты  $z$  и равна удвоенной угловой скорости вращения  $\Omega(z)$ , а величина горизонтальных вихрей зависит как от высоты, так и от времени. Магнитные силовые линии, как видно из (2.21), представляют собой концентрические окружности в горизонтальных плоскостях с центрами в точках:  $x_m = -\eta/n$ ,  $y_m = \xi/n$ . Как видим, центр вращения  $(a, b)$  и мгновенный центр магнитных силовых линий  $(-\eta/n, \xi/n)$  взаимно связаны. Таким образом, всякое изменение магнитного поля вызывает изменение движения и наоборот. Следовательно, магнитные силовые линии, вмороженные в “тело” циклона, должны влиять на характер перемещения циклона. Формула (2.22) показывает, что плотность  $\rho = 1/\omega$  меняется с высотой, т.е. имеем модель неоднородной атмосферы, причём её изменение зависит от функции  $\Omega(z)$  и  $n(z)$ . Подбором этих функций всегда можно изменить плотность  $\rho$  в соответствии с действительными условиями в проводящей атмосфере. Изобарические поверхности определяются уравнением (2.23), если в нём положить  $P' = \text{const}$ . Эти поверхности представляют собой параболоиды, которые изменяются со временем. Пересечение последних с горизонтальными плоскостями даёт семейство изобар, представляющих собой концентрические окружности с центром в точке  $x_{01} = q_1(t)$ ,  $y_{01} = q_2(t)$ . Знак второй производной от  $P'$  по  $x$ ,  $y$  зависит от произвольной постоянной  $C_0$ . Отсюда при  $C_0 > 0$  в центре изобар будет минимум давления, и в этом случае найденное движение определяет циклон; при  $C_0 < 0$  – в центре имеется максимум давления, и движение будет представлять собой антициклон. Формулы (2.22) и (2.23) показывают, что изобарические и изотерические поверхности пересекаются так, что рассматриваемое движение есть движение бароклинное. Это видно и непосредственно, т.к. изотерические поверхности  $\omega = \text{const}$  представляют собой горизонтальные плоскости (поскольку  $\omega$  зависит только от  $z$ ), а изобарические поверхности не являются горизонтальными (параболоиды). Кроме того, учитывая, что действующие силы неконсервативны ( $\text{rot } \mathbf{F} \neq 0$ ) и градиентом магнитного поля вдоль силовых линий нельзя пренебречь  $\mathbf{T} = (\mathbf{H} \nabla) \mathbf{H} / 4\pi$ , заключаем, что в рассматриваемом вращательном движении за счёт бароклинности и неконсервативности действующих сил будет постоянно происходить образование и разрушение вихрей.

Из вышеполученных формул также следует, что вся масса циклона заключена в цилиндре, представляющем собой единичную вихревую трубку – с сечением  $S = (x - \xi_1)(y - \eta_1)$  – в которой частицы вращаются с угловой скоростью  $\Omega$ . Обозначая радиус циклона через  $r = \sqrt{(x - \xi_1)^2 + (y - \eta_1)^2} = r_0$ , для переносной скорости и циркуляции соответственно будем иметь:  $V_0 = \Omega r_0$  и  $2\Omega S = 2\Omega \pi r_0^2$ . Если  $r$  – расстояние от оси циклона в нормальном сечении до некоторой точки вне циклона, то, из условия сохранения циркуляции получим:  $\Gamma = \oint V dr = 2\Omega \pi r_0^2$ . Ввиду симметрии вихревой трубки, скорость  $V$  будет одинаковой в каждой точке контура, и поэтому её можно вынести за знак интеграла; получим:  $V \cdot 2\pi r = 2\Omega \pi r_0^2$ , отсюда  $V = \Omega r_0^2 / r$ , т.е. течение вне циклона будет потенциальным. Следовательно, течения воздуха внутри и вне циклона будут существенно различными.

Внутри циклона воздух будет вращаться как твёрдое тело с угловой скоростью  $\Omega$ , а вне циклона характер движения будет потенциальным, обладающим циркуляцией. При этом сам циклон будет перемещаться с поступательной скоростью в атмосфере. Кочин называет этот атмосферный феномен явлением распространения циклона.

При  $\mathbf{H} \rightarrow 0$  найденная модель магнитогидродинамического циклона переходит в известную гидродинамическую модель циклона, построенную Кочиним [18]. Из найденного решения элементарно получается модель стационарного МГД-циклона [9]. Тем самым доказывается возможность неоднородного вращения в сжимаемой жидкости. Исследуем случай  $(\mathbf{G} \cdot \mathbf{\Gamma}) \neq 0$  и  $(\mathbf{G} \cdot \mathbf{B}) \neq 0$ , не имеющий аналога в обычной гидродинамике. В этом случае

$$\omega = e^\varphi = \frac{(\mathbf{G} \cdot \mathbf{B})}{(\mathbf{G} \cdot \mathbf{\Gamma})} = m. \quad (2.24)$$

Исключая  $\varphi$  с помощью этого соотношения из уравнений (2.15) и (2.16) с учётом (2.20) и (2.21), получим:  $\partial m / \partial x = \partial m / \partial z = 0$ . Тогда из уравнения  $\partial m / \partial t + (\mathbf{V} \cdot \text{grad} m) = 0$  будем иметь  $\partial m / \partial t = 0$ . Следовательно,  $m$  есть функция только от  $z$ . Вычисляя составляющие по осям  $x$  и  $y$ , получим:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} - m \frac{\partial \psi_1}{\partial z} - \frac{\psi}{m} \frac{\partial m}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial A}{\partial z} - m \frac{\partial A_1}{\partial z} - \frac{A}{m} \frac{\partial m}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial B}{\partial z} - m \frac{\partial B_1}{\partial z} - \frac{B}{m} \frac{\partial m}{\partial z} = 0, \quad (2.25)$$

где  $\psi$ ,  $\psi_1$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $A_1$ ,  $B_1$  – известные функции. Интегрируя первое уравнение (2.25), определим удельный объём:

$$\omega = \frac{4\pi \Omega(z) [\Omega(z) + 2\omega_{0z}]}{n^2(z)}. \quad (2.26)$$

Интегрируя два остальных уравнения (2.25), найдём связь между функциями  $A$ ,  $A_1$ ,  $B$  и  $B_1$ :

$$\frac{\psi_1}{\psi} A = A_1 + c_1(t), \quad \frac{\psi_1}{\psi} B = B_1 + c_2(z), \quad (2.27)$$

где  $c_1(t)$  и  $c_2(z)$  – произвольные функции  $t$ , которые без ограничения общности можно положить равными нулю.

Определяя полное давление по формуле (2.13), получим:

$$P' = P'_0 - \int \frac{\psi_1(z)}{\psi(z)} g dz. \quad (2.28)$$

Легко показать, что найденное решение обобщает известное решение Альвена-Чандрасекхара о магнитно-вихревых кольцах. Действительно, если  $\partial / \partial t = 0$ ,  $\mathbf{F} = [\mathbf{V} \cdot 2\boldsymbol{\omega}_0] + \mathbf{g} = 0$ ,  $a = \text{const}$ ,  $b = \text{const}$ ,  $\xi = \text{const}$ ,  $\eta = \text{const}$ ,  $\Omega(z) = \text{const}$  и  $n(z) = \text{const}$ , найденные выше формулы принимают вид:

$$V_x = -\Omega(y-b), \quad V_y = \Omega(x-a); \quad H_x = -n(y-b), \quad H_y = n(x-a);$$

$$\rho = \frac{n^2}{4\pi \Omega^2}, \quad P' = P'_0 = \text{const}$$

Отсюда получим стационарное движение Альвена, связывающее скорость течения  $\mathbf{V}$  с магнитным полем  $\mathbf{H}$  и которое лишь по форме совпадает с альвеновской волной, ничего общего с ней не имея:

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{H}}{\sqrt{4\pi\rho}}, \quad P' = P_0 + \frac{H_0^2}{8\pi} = \text{const}.$$

С учётом массовых сил  $\mathbf{F} = [\mathbf{V} \cdot 2\boldsymbol{\omega}_0] + \mathbf{g} \neq 0$  будем иметь решение [9]:

$$\vec{V} = \frac{\Omega \vec{H}_0}{\sqrt{4\pi\rho(\Omega + 2\omega_{0z})\Omega}}, \quad P' = P_0 + \frac{H_0^2}{8\pi} - \rho g z, \quad (2.29)$$

переходящее в решение Альвена при  $2\omega_{0z} = 0$  и  $g = 0$ .

Таким образом, условия динамической возможности движения позволяют отыскать некоторые точные решения сжимаемой, бароклинной, электропроводящей вращающейся жидкости типа (2.20) и (2.21) при наличии неконсервативных сил. Эти решения представляют собой редкий случай точного интегрирования нелинейных уравнений магнитной гидродинамики для случая неоднородного вращения жидкости ( $\Omega(z) \neq 0$ ).

В F-области ионосферы уравнение индукции (2.12) сильно ограничивает произвольность вращательного движения, и для умеренных и высоких широт даёт точное решение в виде:

$$V_x(y, z, t), \quad V_y(x, z, t), \quad V_z = V_{0z}; \quad H_x(y, z, t), \quad H_y(x, z, t), \quad H_z = H_{0z}, \quad (2.30)$$

где  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $H_x$  и  $H_y$  определяются формулами (2.20) и (2.21)  $V_{0z} = const$ ,  $H_{0z} = const$  – вертикальная компонента геомагнитного поля. Подставляя (2.30) в уравнение (2.17) и приравнявая нулю произвольные постоянные, получим:  $n = k\Omega$ ,  $\xi = k\xi_1$  и  $\eta = k\eta_1$ , где  $k = H_{0z}/V_{0z} = const$ . Тогда (2.30) принимает вид:  $\mathbf{H} = k\mathbf{V}$ , где  $\mathbf{H} = H_x\mathbf{e}_x + H_y\mathbf{e}_y + H_{0z}\mathbf{e}_z$ ,  $\mathbf{V} = V_x\mathbf{e}_x + V_y\mathbf{e}_y + V_z\mathbf{e}_z$ . Используя параллельность векторов  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{V}$ , методом условий динамической возможности можно рассмотреть стационарную задачу. Основные уравнения магнитной гидродинамики в стационарном случае сводятся к уравнениям обычной гидродинамики:

$$\begin{aligned} grad P' &= e^\varphi \mathbf{F} - \left( e^{-\varphi} - \frac{k^2}{4\pi} \right) (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V}, \\ (\mathbf{V} \cdot grad \varphi) &= 0. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Используя теоремы Фридмана, аналогично вышерассмотренному, можно отыскать точное решение, определяющее стационарный циклон (антициклон) для  $F$ - области ионосферы. Система (2.31) при  $F = 0$  и  $\exp(-\varphi) = \rho = k^2/4\pi$  даёт точное стационарное решение Альвена-Чандрасекхара  $\mathbf{V}_{cm} = \mathbf{H}_0/\sqrt{4\pi\rho}$ , которое в области  $F$  ионосферы связывает стационарное движение ионосферной среды с геомагнитным полем  $\mathbf{H}_0$  и является новой характеристической скоростью для этой области верхней атмосферы. Естественно, что всякое малое отклонение от него должно порождать волновые возмущения, имеющие магнитогидродинамическую природу. В нижней  $E$ - области ионосферы, в нейтральной и ионной ( $\mathbf{V} \approx \mathbf{V}_i$ ) компонентах не существует стационарное решение типа Альвена-Чандрасекхара, и магнитогидродинамические волны здесь не должны возникать. В электронной компоненте условие вмороженности  $\partial\mathbf{H}/\partial t = rot[\mathbf{V}_e \cdot \mathbf{H}_0]$  естественным образом содержит стационарное решение  $\mathbf{V}_{e,cm} = \mathbf{H}_0/\sqrt{4\pi\rho_e}$ , и малое отклонение от него должно порождать в этой компоненте ионосферной плазмы волновые возмущения магнитогидродинамической природы. Более детально рассматриваемые выше проблемы и многие примеры точных решений нелинейных уравнений магнитной гидродинамики обсуждаются в [9]. Обобщение теорем Хантадзе для вязкой конечной проводимостью среды, дающие новые дополнительные теоремы и ряд категорий движений, рассмотрено в работах [21, 22].

Резюмируя, можем заключить, что при исследовании вопроса о движении сжимаемой, бароклинной, электропроводящей жидкости условия динамической возможности (в виде тринадцати теорем [9], с учётом же диссипативных процессов – пятнадцати [21, 22]) должны всегда учитываться. Эти условия часто накладывают такие физически возможные ограничения на поле скоростей  $\mathbf{V}$  и магнитное поле  $\mathbf{H}$  (которые при постановке задачи могут иметь довольно общие формы), что во многих случаях удаётся отыскивать некоторые точные решения нелинейных уравнений магнитной гидродинамики, и, таким образом, становится возможным построение теоретических моделей тех или иных движений в ионосфере и в других областях магнитной гидродинамики.

Считая теоремы об условиях динамической возможности движения принципиально важными, в качестве иллюстрации приведём две из них: 1) для случая  $(\mathbf{G}\Gamma) \neq 0$ ,  $(\mathbf{G}\mathbf{B}) \neq 0$  и 2) для случая  $(\mathbf{G}\Gamma) = 0$ ,  $(\mathbf{G}\mathbf{B}) = 0$ .

В первом случае условия динамической возможности будут иметь вид:

$$\vec{B} = m\Gamma + \frac{1}{m}[\vec{G} grad m], \quad \frac{dm}{dt} = \theta m, \quad \frac{d\vec{H}}{dt} - (\vec{H}\nabla)\vec{V} + \theta\vec{H} = 0,$$

где  $m = (\mathbf{G}\mathbf{B})/(\mathbf{G}\Gamma)$ ,  $\theta = \text{div}\mathbf{V}$ .

Система не содержит удельный объём и связывает, при заданных массовых силах, кинематические элементы движения: компоненты скорости  $\mathbf{V}$ , магнитного поля  $\mathbf{H}$  и их пространственные и временные производные. Нетрудно подсчитать сколько скалярных уравнений влечёт за собой рассматриваемая система. Первое уравнение системы даёт два скалярных уравнения, что легко показать, если его составляющую вдоль оси  $X$  умножить на  $G_x$ , а вдоль оси  $Y$  – на  $G_y$ . Складывая и вычитая полученные выражения из тождественного равенства  $m(\mathbf{G}\Gamma) = (\mathbf{G}\mathbf{B})$ , получим

составляющую вдоль  $Z$ . Остальные уравнения дают четыре скалярных уравнения. Таким образом, получаются шесть скалярных уравнений для определения шести неизвестных: трёх составляющих скорости  $\mathbf{V}$ , трёх составляющих магнитного поля  $\mathbf{H}$ , и поэтому система замкнута.

Если в различных частных случаях, из рассматриваемой системы, при заданных массовых силах, будут найдены выражения для скорости и магнитного поля, то с помощью формулы (2.24) непосредственно будет определена плотность среды  $\rho = e^{-\varphi}$ , а из соотношения (2.13) – полное давление среды  $P' = P + H^2 / 8\pi$  с точностью до произвольной функции времени. Примеры точных решений для случая  $(\mathbf{G}\Gamma) \neq 0$ ,  $(\mathbf{G}\mathbf{B}) \neq 0$  приведены в [9, 21, 22].

Для второго случая, когда  $(\mathbf{G}\Gamma) = 0$ ,  $(\mathbf{G}\mathbf{B}) = 0$ , рассмотрим теорему, когда скаляр  $\mu = (\mathbf{V}\mathbf{G})$  отличен от нуля.

Умножая уравнение (2.15) векторно на  $\mathbf{V}$  и используя (2.16), получим векторное уравнение для определения плотности среды  $\rho = e^{-\varphi}$ :

$$\text{grad } \varphi = \bar{A} + \frac{\partial \varphi}{\partial t} \bar{B} + e^{\varphi} \bar{C}, \quad (2.32)$$

$$\text{где } \bar{A} = \frac{[\bar{B}\bar{V}] + \theta \bar{G}}{\mu}, \quad \bar{B} = -\frac{\bar{G}}{\mu}, \quad \bar{C} = \frac{[\bar{V}\bar{G}]}{\mu}.$$

Для исключения  $\text{grad } \varphi$  из (2.32) применим операцию rot к уравнению (2.32) будем иметь:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} \bar{P} + e^{\varphi} \bar{Q} + \bar{R} = 0, \quad (2.33)$$

$$\text{где } \bar{P} = \text{rot } \bar{B} + \left[ \frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \bar{B} \right], \quad \bar{Q} = \text{rot } \bar{C} + \left[ \frac{\partial \bar{C}}{\partial t}, \bar{B} \right] + [\bar{A}\bar{C}], \quad \bar{R} = \text{rot } \bar{A} + \left[ \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}, \bar{B} \right].$$

Ограничимся случаем  $\mathbf{P} \neq 0$ . Тогда, умножая (2.33) векторно на  $\mathbf{P}$ , получим:

$$e^{\varphi} [\bar{P}\bar{Q}] = [\bar{R}\bar{P}] \quad (2.34)$$

Для  $[\mathbf{P}\mathbf{Q}] \neq 0$  найдём условие динамической возможности движения:

$$[[\bar{P}\bar{Q}] \cdot [\bar{R}\bar{P}]] = ([\bar{P}\bar{Q}]\bar{R}) = 0. \quad (2.35)$$

Условие (2.35) означает, что векторы  $[\mathbf{P}\mathbf{Q}]$  и  $[\mathbf{R}\mathbf{P}]$  параллельны, т.е. существует скаляр  $\xi = \xi(x, y, z, t)$ , для которого имеет место равенство:

$$\xi [\bar{P}\bar{Q}] = [\bar{R}\bar{P}].$$

Сравнивая это выражение с (2.34), заключаем, что плотность определяется непосредственно с помощью этого скаляра:

$$\xi = e^{\varphi} = \frac{1}{\rho}. \quad (2.36)$$

Следовательно, можно считать доказанной следующую теорему:

*Необходимым и достаточным условием динамической возможности движения в магнитной гидродинамике в случае  $\mu \neq 0$ ,  $\mathbf{P} \neq 0$  и  $[\mathbf{P}\mathbf{Q}] \neq 0$  является:*

$$\frac{d\bar{H}}{dt} - (\bar{H}\bar{V})\bar{V} + \theta \bar{H} = 0, \quad (\mathbf{G}\Gamma) = 0, \quad (\mathbf{G}\mathbf{B}) = 0, \quad ([\mathbf{P}\mathbf{Q}]\mathbf{R}) = 0, \quad \text{grad } (\ln \xi) = \bar{A} + \frac{\partial \ln \xi}{\partial t} \bar{B} + \bar{C},$$

где  $\xi$  определяется из уравнения  $[\mathbf{RP}] = \xi[\mathbf{PQ}]$ .

Здесь условия динамической возможности, как в вышеприведённой теореме, при заданных массовых силах содержат лишь компоненты  $\mathbf{V}$  и  $\mathbf{H}$  и их пространственные и временные производные. Необходимость условий теоремы только что была доказана; докажем их достаточность. Так как, согласно теореме, всегда существует скаляр  $\xi$ , определяемый равенством  $\xi[\vec{P}\vec{Q}] = [\vec{R}\vec{P}]$ , то вычитая это равенство из (2.34) и учитывая, что по условию теоремы  $[\mathbf{PQ}] \neq 0$ , определим  $\xi$  по (2.36). Подставляя найденное значение  $\xi$  в последнее условие динамической возможности, получим:

$$\mu \text{grad } \varphi = [\vec{B}\vec{V}] + \theta \vec{G} - \frac{\partial \varphi}{\partial t} \vec{G} + e^\varphi [\vec{V}\vec{T}]. \quad (2.37)$$

Умножая (2.37) векторно на  $\mathbf{G}$ , найдём:

$$\mu[\vec{G} \text{grad } \varphi] = (\vec{V}\vec{G})\vec{B} - (\vec{G}\vec{B})\vec{V} - e^\varphi (\vec{G}\vec{T})\vec{V} + e^\varphi (\vec{V}\vec{G})\vec{T}.$$

Так как согласно условиям теоремы  $(\mathbf{G}\mathbf{T}) = 0$ ,  $(\mathbf{G}\mathbf{B}) = 0$ ,  $\mu = (\mathbf{V}\mathbf{G}) \neq 0$ , будем иметь:  $\vec{B} + [\text{grad } \varphi \cdot \vec{G}] = e^\varphi \vec{T}$ . Но это выражение, как было показано выше, представляет собой необходимое и достаточное условие для определения градиента полного давления  $\text{grad } P' = e^{-\varphi} \vec{G} + \vec{T}$ , т.е. получили уравнение Эйлера (2.10).

Для получения уравнения неразрывности, умножим уравнение (2.37) скалярно на  $\mathbf{V}$ :

$$\mu(\vec{V} \text{grad } \varphi) = \theta(\vec{V}\vec{G}) - \frac{\partial \varphi}{\partial t} (\vec{V}\vec{G});$$

после сокращения на  $\mu = (\mathbf{V}\mathbf{G}) \neq 0$ , получим уравнение неразрывности (2.11).

Таким образом, достаточность условий теоремы также доказана.

Как было выше отмечено, случай  $(\mathbf{G}\mathbf{T}) = 0$ ,  $(\mathbf{G}\mathbf{B}) = 0$  содержит 12 теорем, а случай  $(\mathbf{G}\mathbf{T}) \neq 0$ ,  $(\mathbf{G}\mathbf{B}) \neq 0$  лишь одну. В отсутствие магнитного поля число теорем уменьшается до пяти теорем Фридмана.

Отметим, что приведённое выше точное решение (2.20)-(2.23), моделирующее магнито-гидродинамический циклон, найдено с помощью только что доказанной теоремы, а решение (2.26)-(2.28) – с помощью теоремы  $(\mathbf{G}\mathbf{T}) \neq 0$ ,  $(\mathbf{G}\mathbf{B}) \neq 0$ .

Эти теоремы, как и теоремы Фридмана и вытекающие из них широкоизвестные инварианты о вихрях (которые, как частные случаи, включают в себя нелинейные уравнения Чарни-Обухова для коротких волн Россби и уравнения Хасегавы и Мимадзю для дрейфовых волн), к сожалению, неизвестны широкому кругу исследователей физики атмосферы, океана, магнитной гидродинамики и физики плазмы [25-29].

## REFERENCES- ЛИТЕРАТУРА

1. Hajkowicz L.A. Global onset and propagation of large-scale travelling ionospheric disturbance as a result of the Great Storm of 13 March 1989. Planet. Space Sci., 1991, v. 39, pp. 583-593.
1. Шарадзе З.С., Мосашвили Н.В., Пушкова Г.Н., Юдович Л. А. Долгопериодные волновые возмущения в верхней мезосфере и нижней термосфере // Геомагнетизм и аэрономия. – 1989. – Т. 29. – С. 1032-1034.
2. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.А.. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука. – 1992.
3. Hayakawa M. (Ed.). Atmospheric and ionospheric phenomena associated with earthquakes. – Tokyo, Terra Sci. Publ. Comp., 1999.
4. Дробжев В.И., Молостов Г.Ф., Рудина М.П. и др. Отклик ионосферы на возмущения, инициированные промышленным взрывом. Ионосферные исследования. 1986, т.33, сс. 61-71.
5. Shaefer L. D., Rock D. R., Lewis J. P., et al. Detection of Explosive Events by Monitoring Acoustically Induced Geomagnetic Perturbations., N 94550, Lawrence Livermore Laboratory. – CA, USA, Livermore, 1999.
6. Бурмака В.П., Костров Л.С., Черногор Л.Ф. Радиофизика и радиоастрономия. 2003, т. 8, N 2, сс. 143-162.
7. Черногор Л.Ф. Радиофизика и радиоастрономия. 2003, т. 8, N1, сс. 59-106.

8. Хантадзе А.Г. Некоторые вопросы динамики проводящей атмосферы. Тбилиси: Мецниереба. 1973, 280 с.
9. Холтон Дж.Р. Динамическая метеорология стратосферы и мезосферы. Ленинград: Гидрометеиздат. 1979, 224 с.
10. Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978, 532 с.
11. Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д. Движения в ионосфере. Новосибирск: Наука. 1979, 344 с.
12. Шарадзе З. С. Атмосферные волны в среднеширотной ионосфере: Диссертация докт. физ.-мат. наук. Москва, 1991, 255 с.
13. Хантадзе А.Г., Гвелесиани А.И. К теории диффузии ионосферной плазмы в области F. М: Наука, 1979, 116 с.
14. Гершман Б.Н. Динамика ионосферной плазмы. М.:Наука, 1974, сс. 163-195.
15. Хантадзе А. Г. Об условиях динамической возможности движения в магнитной гидродинамике. Сообщ. АН ГССР, 1963, т. 30, N 4, с. 409.
16. Фридман А.А. Опыт гидромеханики сжимаемой жидкости. М-Л., 1934.
17. Хантадзе А. Г. Гидромагнитные градиентные волны в динамо-области ионосферы.
18. Сообщ. АН ГССР, 1986, т. 123, N 1, сс. 69-71.
19. Альвен Х. Космическая электродинамика. М.: ИЛ, 1952.
20. Chandrasekhar S. On the stability of the simplest solution of the equations of hydrodynamics. Proc. Nat. Acad. Sci., USA, 1956, v. 42, N. 5.
21. Гвелесиани А.И. Условия динамической возможности движения вязкой сжимаемой жидкости в магнитной гидродинамике. Труды ИГ АН ГССР, 1973. т. 30, сс. 99- 117.
22. Гвелесиани А.И. Исследование движений проводящей атмосферы и проблемы динамики ионосферы: Диссертация докт. физ.-мат. наук. Тбилиси, 1979, 266 с.
23. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. Т. 1 и 2. М.: Мир, 1986.
24. Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика. Т. 1 и 2. М.: Мир, 1984.
25. Charney J. G. On the scale of atmospheric motions. Geophys. Publ., 1947, v. 17, N 2, pp. 17-20.
26. Hasegawa A., Mima K. Exact solitary Alfvén wave. Phys. Rev. Letters, 1976, v. 37, N 11, pp. 690-693.
27. Petviashvili V., Pokhotelov O. Solitary waves in plasmas and in the atmosphere. Gordon and Breach Science Publishers, Philadelphia-Reading-Paris-Montreux-Tokyo-Melbourne, 1992, 248 p.
28. Абурджания Г. Д. Самоорганизация нелинейных вихревых структур и вихревая турбулентность в дисперсной среде. М.: КомКнига, 2006, 320 с.
29. Kaladze T. D., Horton W., Kahlon I. Z., Pokhotelov O., Onischenko O. Generation of zonal flow and magnetic field by coupled Rossby- Alfvén-Rhantadze waves in the Earth's ionospheric E-layer. J. Geogr. Geophys. Soc. 2013, v. 16B, pp. 53-76.

## ქართა და ტალღური პროცესები იონოსფეროს დონეებზე

გველესიანი ა.

რ ე ზ ი უ მ ე

წინამდებარე, ძირითადად მიმოხილვითი სახის სტატიაში განიხილება ზედა ატმოსფეროს დინამიკის აქტუალური საკითხები: (ა) იონოსფერული ნეიტრალური ქარების დინამიკა, (ბ) პლანეტარული მასშტაბის მქონე დიდმასშტაბიანი ტურბულენტური სტრუქტურები, (გ) მაგნიტურ ჰიდროდინამიკაში ცნობილი დინამიკური შესაძლებლობის პირობები, (დ) კარგად ცნობილი და ზედა იონოსფეროს მცირე რხევების ახალი შტოები და (ე) ტურბულენტურ არეში ელექტრომაგნიტური ტალღების გავრცელების თავისებურებანი.



## WIND AND WAVE PROCESSES AT THE IONOSPHERE LEVELS

Gvelesiani A. I.

### Abstract

The article focuses: (a) on the main problems of the dynamics of ionosphere neutral winds, (b) the largescale vortex structure of planetary scale, (c) conditions of dynamically possibility of motion in magneto-hydrodynamics. Particular attention is given both to (d) well-known, and knew branches of oscillations of the upper atmosphere and also (e) to the peculiarities of the electromagnetics spreading in turbulent medium.

## ВЕТРОВЫЕ И ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ИОНОСФЕРНЫХ УРОВНЯХ

Гвелесиани А. И.

### Р е ф е р а т

В предлагаемой работе, носящей, в основном, обзорный характер, рассматриваются: (а) вопросы динамики ионосферных нейтральных ветров, (б) крупномасштабные вихревые структуры планетарного масштаба, (в) условия динамической возможности движения в магнитной гидродинамике, (г) известные и новые ветви малых колебаний верхней атмосферы и (д) особенности распространения электромагнитных волн в турбулентной среде.

## ქ. თბილისის ატმოსფეროში მტვრის გავრცელების რიცხვითი მოდელირება.

### I. დასავლეთის ფონური სუსტი ქარის შემთხვევა

<sup>1,2</sup>სურმავა ა., <sup>2</sup>ინსკირველი ლ., <sup>3</sup>გვერდნითელი ლ.

1ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მ. ნოდია გეოფიზიკის  
ინსტიტუტი

2საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი.

3საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

*aasurmava@yahoo.com; intskirvebi2@yahoo.com*

1. შესავალი. თბილისი, სამხრეთ კავკასიის ერთ-ერთი უდიდესი ქალაქი, საქართველოს ადმინისტრაციული და ტურისტული ცენტრია. დაბინძურებისაგან მისი ატმოსფერული ჰაერის დაცვა მეტად მნიშვნელოვანი ეკოლოგიური და სოციალური ამოცანაა. ქ.თბილისის ატმოსფერული ჰაერის სისუფთავის პრობლემისადმი მიძღვნილია მრავალი სამეცნიერო ნაშრომი. მათში ასახულია ქალაქის ატმოსფეროს დაბინძურების ექსპერიმენტული [1-6] და თეორიული კვლევის შედეგები [7-10].

ქ.თბილისის რელიეფი მეტად რთულია. ის დასავლეთიდან და აღმოსავლეთიდან შემოსაზღვრულია მაღალმთიანი მასივებით, ჩრდილოეთიდან უკავშირდება გარე სივრცეს მტკვრის ვიწრო ხეობით, ხოლო სამხრეთიდან დაბლობი ტერიტორიით. თეორიულ მოსაზრებებზე დაყრდნობით, უნდა ვივარაუდოთ, რომ ქალაქის რელიეფის გავლენით ფორმირებული ჰაერის ლოკალური ცირკულაციები არ უწყობს ხელს ქალაქის ატმოსფეროს თვითდასუფთავების პროცესს, განსაკუთრებით ფონური აღმოსავლეთისა და დასავლეთის ქარების შემთხვევებში.

ამიტომ, ატმოსფერული ჰაერის სისუფთავის გაუმჯობესების დასაბუთებული რეკომენდაციების დამუშავებისა და პრაქტიკული ღონისძიებების გატარებისათვის საჭიროა თეორიულად იქნეს შესწავლილი ქალაქის ატმოსფეროში დამაბინძურებელ ნივთიერებათა დროში და სივრცეში განაწილების თავისებურებანი, განსაკუთრებით არახელსაყრელი მეტეოროლოგიური პირობების დროს. ნაშრომებში [7-10] რიცხვობრივად მოდელირებული და გაანალიზირებულია ქ.თბილისის დამტვერიანება ფონური აღმოსავლეთის ქარების დროს.

წარმოდგენილ სტატიაში, კვლევის შემდგომი გაფართოების მიზნით, რიცხვობრივად შეისწავლება ქალაქის ატმოსფეროს დამტვერიანება ფონური დასავლეთის სუსტი ქარის პირობებში. ამ მიზნით გამოიყენება კავკასიაში ატმოსფერული პროცესების განვითარების და დამაბინძურებელ ინგრედიენტთა გავრცელების რიცხვითი მოდელი [8].

### 2. ამოცანის დასმის მოკლე აღწერა

განხილულია ქ. თბილისისა და მიმდებარე ტერიტორიის არე ფართობით 30.6×24 კმ<sup>2</sup>. ქალაქის რთული რელიეფის პირობებში ატმოსფეროს დინამიკური ველების და მეტეოროლოგიური პარამეტრების მათემატიკურად კორექტული აღწერისათვის გამოყენებულია რელიეფის

მიმყოლი კოორდინატთა სისტემა  $(t, x, y, \zeta = (z - \delta)/h)$ . აქ  $t$  დროა,  $x$  და  $y$  პარალელისა და მერიდიანის გასწვრივ მიმართული კოორდინატებია,  $\zeta$  რელიეფის ზედაპირისადმი მართობულად მიმართული განუზომადი ვერტიკალური კოორდინატაა,  $\delta(x, y)$  რელიეფის სიმაღლეა ზღვის დონიდან,  $h = H - \delta$  ტროპოსფერის სისქეა,  $H(t, x, y)$  -ტროპოპაუზის სიმაღლეა.

არჩეულ კოორდინატთა სისტემაში მტვრის კონცენტრაციის ცვლილების განტოლება ჩაიწერება შემდეგი სახით

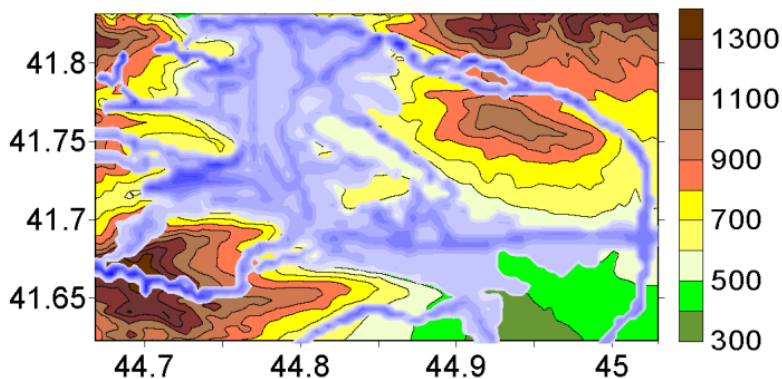
$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (\tilde{w} - \frac{w_0}{h}) \frac{\partial C}{\partial \zeta} = \mu \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \zeta} v \frac{\partial C}{\partial \zeta} + F, \quad (1)$$

სადაც,  $C$  ინგრედიენტის კონცენტრაციაა:  $u, v, w$  და  $\tilde{w}$  ქარის სიჩქარის მდგენელებია  $x, y, z$  და  $\zeta$  ღერძების გასწვრივ,  $w_0$  მტვრის დალექვის სიჩქარეა.  $F(t, x, y, \zeta)$  წყაროს მიერ ატმოსფეროში მტვრის გაფრქვევის სიჩქარეა.  $\mu$  და  $v$  - ჰორიზონტალური და ვერტიკალური ტურბულენტობის კოეფიციენტებია. ქარის სიჩქარის მდგენელები და ტურბულენტობის კოეფიციენტები გამოითვლება [8] მოცემული განტოლებების რიცხვითი ინტეგრირების საშუალებით.

მტვრის გავრცელება მოდელირდება თავისუფალ ატმოსფეროში და ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში (1) განტოლების რიცხვითი ინტეგრირებით, შესაბამისი საწყისი და სასაზღვრო პირობების გამოყენებით. რიცხვითი ბადის ბიჯები  $x$  და  $y$  ღერძების გასწვრივ შესაბამისად ტოლია 300 და 400 მ-ის. ვერტიკალური ბიჯი თავისუფალ ატმოსფეროში ტოლია 1/31. ატმოსფეროს მიწისპირა 100 მ სისქის ფენაში ვერტიკალური ბიჯი იცვლება 0.5 -დან 15 მ-მდე. დროითი ბიჯი 1 წმდია. გამოთვლები ჩატარებულია 3 დღე-ღამის პერიოდისათვის.

განხილულია ივნისის თვეში მშრალი ამინდის პირობებში დასავლეთის სუსტი ფონური ქარის შემთხვევა. ქარის სიჩქარე იცვლება 1 მ/წმ-დან (მიწის ზედაპირიდან 100 მ სიმაღლეზე) 20 მ/წმ - მდე (ტროპოპაუზაზე, 9კმ) ატმოსფეროს ფარდობითი ტენიანობა 50%-ია.

დაშვებულია, რომ ატმოსფეროს აბინძურებს მტვერი, რომელიც წარმოიშვება ქლაქის მაგისტრალზე და ქუჩებში ავტოტრანსპორტის მოძრაობის შედეგად. მისი ოდენობა იცვლება დროში და განსაზღვრულია სტაციონალური დაკვირვების მასალების მონაცემების და ტრანსპორტის მოძრაობის ინტენსივობის შეფასებით. ნახ.1-ზე ნაჩვენებია ქ. თბილისის რელიეფი. დაბინძურების წყაროების განაწილება აღნიშნულია ლურჯი ფერით. წყაროები მდებარეობენ ქლაქის ცენტრალურ მაგისტრალზე და ურბანიზირებულ ტერიტორიებზე.

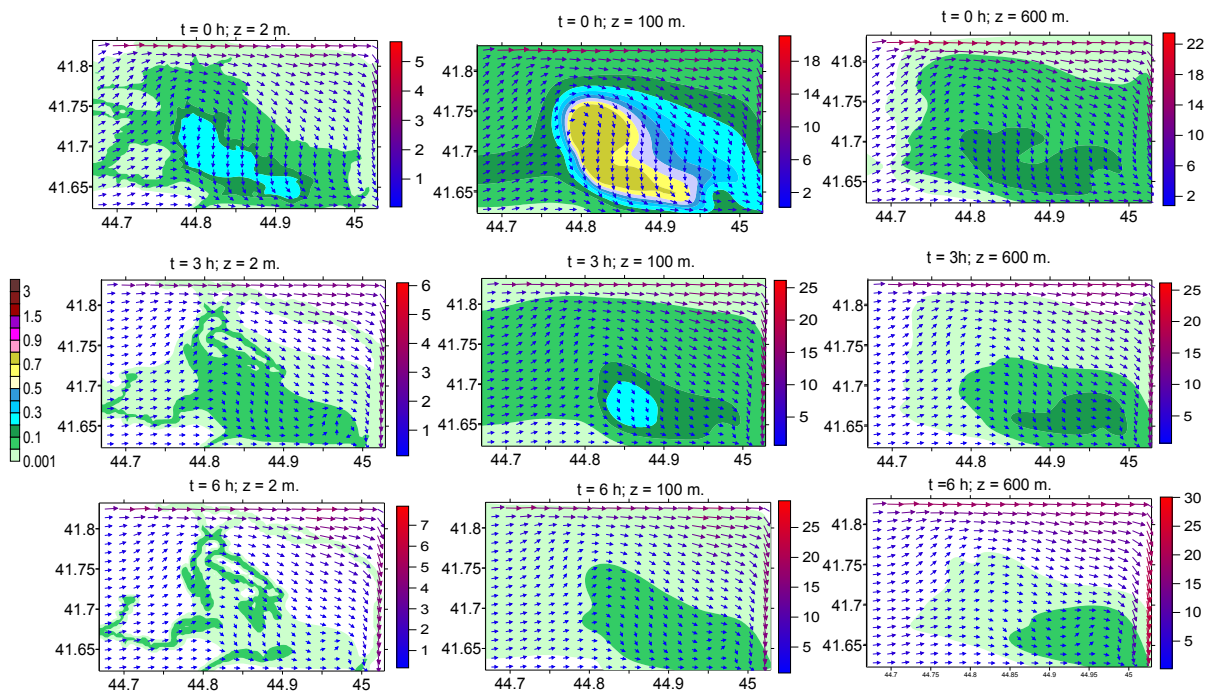


ნახ.1. ქ. თბილისის რელიეფის სიმაღლეები (მ) და დაბინძურების წყაროების განაწილება. ღერძებზე გადაზომილია რეალური გეოგრაფიული კოორდინატები

### 3. რიცხვითი მოდელირების შედეგები

ნახ. 2-ზე ნაჩვენებია გამოთვლებით მიღებული მტვრის კონცენტრაციის და ქარის სიჩქარის სივრცული განაწილება მიწის ზედაპირიდან 2, 100 და 600 მ სიმაღლეებზე  $t = 0, 3$  და 6 საათზე. კონცენტრაცია მოცემულია ერთჯერადი ზღვრულად დასაშვები კონცენტრაციის ერთეულებში (ზდკ=0.5 მგ/მ<sup>3</sup>). ნახ.2-დან ჩანს, რომ დროის 0–6 სთ ინტერვალში ადგილი აქვს მტვრის კონცენტრაციის შემცირებას. მტვრის კონცენტრაცია, როცა  $t=0$  სთ, შედარებით მაღალია  $z=2$  მ სიმაღლეზე ქალაქის ცენტრალურ და სამხრეთ-აღმოსავლეთ ნაწილებში მტვრის ხეობის გასწვრივ მდებარე ტერიტორიებზე. ამ ადგილებში კონცენტრაციის სიდიდე აღწევს 0.4 ზდკ-ს. მაღალი დამტვერიანების არედან დაშორებისას კონცენტრაცია თანდათანობით მცირდება და მისი მნიშვნელობა ქალაქის პერიფერიულ ნაწილებში ხდება 0.001 ზდკ-ს ტოლი. ქალაქის ატმოსფეროს თვითდასუფთავების პროცესი გრძელდება  $t = 6$  სთ–მდე. როცა  $t = 6$  სთ კონცენტრაციის მაქსიმალური მნიშვნელობა მცირდება 0.1 ზდკ-მდე. ამ მომენტში შედარებით მაღალი დამტვერიანების ადგილებია საავტომობილო მაგისტრალების ცალკეული მონაკვეთები - ოროგრაფული წინაღობებით შემოსაზღვრულ ადგილებში.

დღის 0–6 სთ ინტერვალში მტვრის ვერტიკალური განაწილება ხასიათდება თავისებურებით – კონცენტრაციის მაქსიმალური მნიშვნელობები 100 მ სიმაღლეზე მეტია, ვიდრე მაქსიმალური მნიშვნელობები 2 და 600 მ სიმაღლეებზე. ეფექტი, სავარაუდოდ, დაკავშირებულია დღის მეორე ნახევარში გამთბარი ჰაერის კონვექციურ მოძრაობასთან. გამთბარი ჰაერის მასა თან წარიტაცებს მტვრის მასას და იწვევს მის დაგროვებას მიწისპირა ფენის ზედა საზღვრის მიდამოებში. შედეგად, როცა  $t = 0$  სთ, ქალაქის ცენტრალური ნაწილის თავზე 100 მ სიმაღლეზე, კონცენტრაციის მნიშვნელობა აღწევს 0.7 ზდკ-ს. დროის სვლასთან ერთად სუსტდება კონვექციური მოძრაობა, დიფუზიური და ადვექციური გადატანის შედეგად თანდათანობით მცირდება დამტვერიანების დონე და როცა  $t = 6$  სთ მტვრის მაქსიმალური კონცენტრაციის სიდიდე მცირდება 0.1 ზდკ-მდე

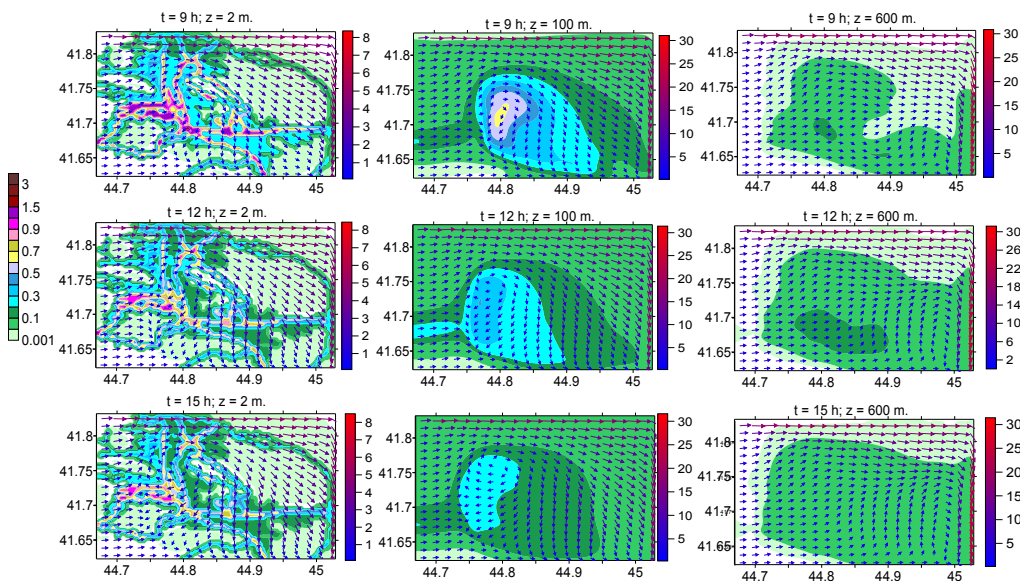


ნახ. 2. ქარის სიჩქარისა (მ/წმ) და მტვრის კონცენტრაციის (ზდკ) განაწილება, როცა  $t = 0, 3$  და 6 სთ მიწის ზედაპირიდან 2, 100 და 600 მ სიმაღლეებზე

$t = 6$  სთ-ის შემდეგ, ავტოტრანსპორტის მოძრაობის ინტენსივობის სწრაფ ზრდასთან ერთად იზრდება ატმოსფეროში მოხვედრილი მტვრის რაოდენობა. ადგილი აქვს ქალაქის ატმოსფეროს სწრაფ დაბინძურებას. როცა  $t = 9$  სთ მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეზე მტვრის კონცენტრაციები იზრდება უშუალოდ დამაბინძურებელი წყაროს მიდამოებში და მათ სიახლოვეს – ავტომაგისტრალების გასწვრივ (ნახ.3). კონცენტრაციის მიღებული განაწილება, ანალოგიურია სუსტი აღმოსავლეთის ქარის დროს მიღებული განაწილების [8]. ამასთან არსებობს განსხვავებაც, კერძოდ, [8]-ში 2 მ სიმაღლეზე დილის 9 სთ-ზე, მაღალი დამტვერიანების არეები (0.9–1.5 ზდკ), სხვა უბნებთან ერთად, მდებარეობენ ქალაქის ცენტრში, გლდანის, დიდუბის თემების და დიდი დიდმის რაიონების მაგისტრალების მიდამოებში. დასავლეთის ფონური ქარის დროს კი ამ უბნებში მტვრის კონცენტრაციის მნიშვნელობები საგრძნობლად ნაკლებია და იცვლება 0.5–0.9 ზდკ ფარგლებში. მაღალი დამტვერიანების არეებად რჩება: ქალაქის ცენტრი, ვაკის, საბურთალოს და ორთაჭალის რაიონები. აღნიშნული განსხვავება სივრცულ განაწილებებს შორის დასავლეთის და აღმოსავლეთის სუსტი ფონური ქარების დროს გამოწვეულია ჰაერის ნაკადისა და რელიეფის ურთიერთქმედების ურთიერთსაწინააღმდეგო ეფექტთან ოროგრაფიული წინააღმდეგობის ქარპირა და ქარზურგა ნაწილებში.

9–დან 15 სთ-მდე პერიოდში მტვრის კონცენტრაცია მაქსიმალურია 9 სთ-ზე და ოდნავ მცირდება 12 – 15 სთ ინტერვალში. მაქსიმალური დამტვერიანების ზონებია საბურთალო, ვაკე, ორთაჭალა, გლდანის მასივისა და ვახტანგ გორგასლის გამზირის ცალკეული უბნები. მიწისპირა კონცენტრაციის ზრდას თან სდევს მისი ვერტიკალური დიფუზია ფორმირებული ლოკალური ჰორიზონტალური გრიგალის და კონვექციური მოძრაობის შედეგად. მიწის ზედაპირიდან 100 მ სიმაღლეზე კონცენტრაცია მაქსიმალურია დილის 9 სთ-ზე (0.6 ზდკ) და თანდათანობით მცირდება დროში.

დღის 15 სთ-ის შემდეგ,  $z = 2$  მ სიმაღლეზე, ფონური აღმოსავლეთის სუსტი ქარის შემთხვევისაგან განსხვავებით, იწყება დამტვერიანების ზრდის მეორე ეტაპი, რომელიც გრძელდება 21 სთ-მდე (ნახ. 4). დამტვერიანება იზრდება ატმოსფეროს სასაზღვრო ფენის 1 კმ სისქის არეში. ზრდა განსაკუთრებით ინტენსიურია მიწისპირა ფენის ქვედა ნაწილში ქალაქის ცენტრსა და პერიფერიებში მდებარე მაგისტრალების მიდამოებში. გამონაკლისს წარმოადგენს საქართველოს სამხედრო გზისა და თბილისის გარშემოვლის მაგისტრალები. თბილისის ცენტრალურ ნაწილში 2 მ სიმაღლეზე მტვრის კონცენტრაციის მაქსიმალური მნიშვნელობა აღწევს და აჭარბებს კიდევ 2 ზდკ-ს.



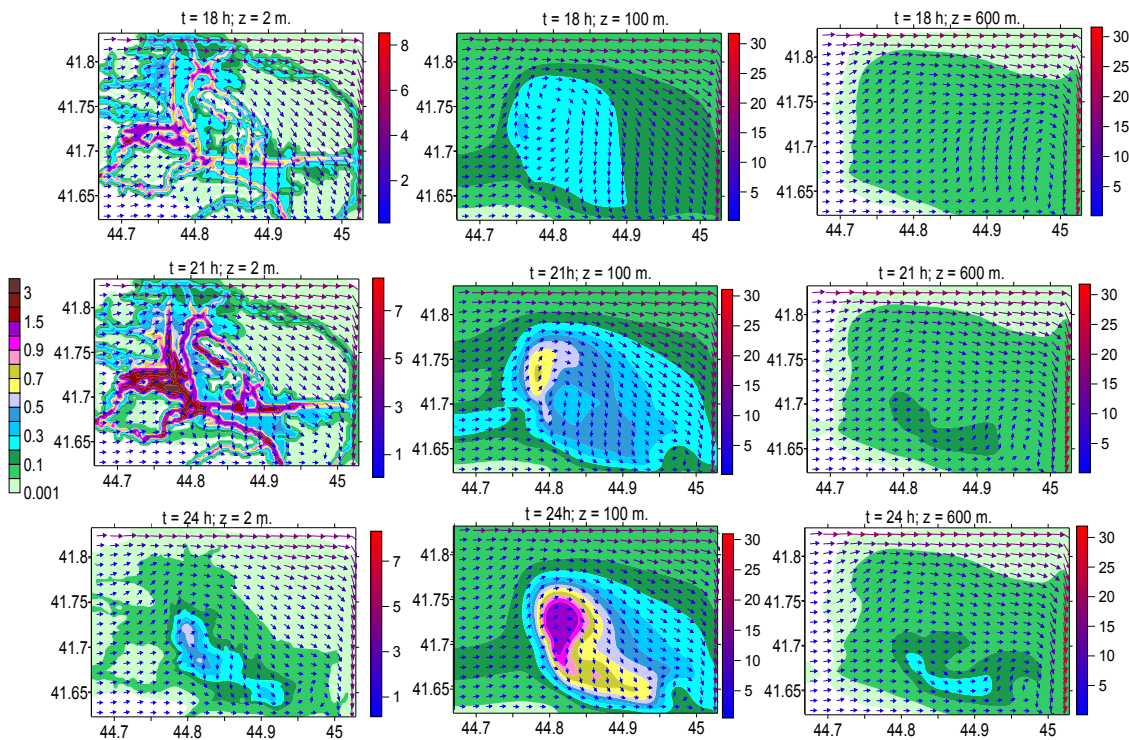
ნახ. 3. ქარის სიჩქარისა (მ/წმ) და მტვრის კონცენტრაციის (ზდკ) განაწილება, როცა  $t = 9, 12$  და 15 სთ მიწის ზედაპირიდან 2, 100 და 600 მ სიმაღლეებზე

$t = 21$  სთ შემდეგ იწყება და გრძელდება დილის 6 სთ-მდე მიწისპირა კონცენტრაციის შემცირების ეტაპი. მიწისპირა კონცენტრაციის მაქსიმალური მნიშვნელობა (0.7 ზდკ) ემთხვევა  $t = 24$  სთ-ს, დროის შემდგომ მომენტებში კი იგი მცირდება 0.1 ზდკ-მდე.

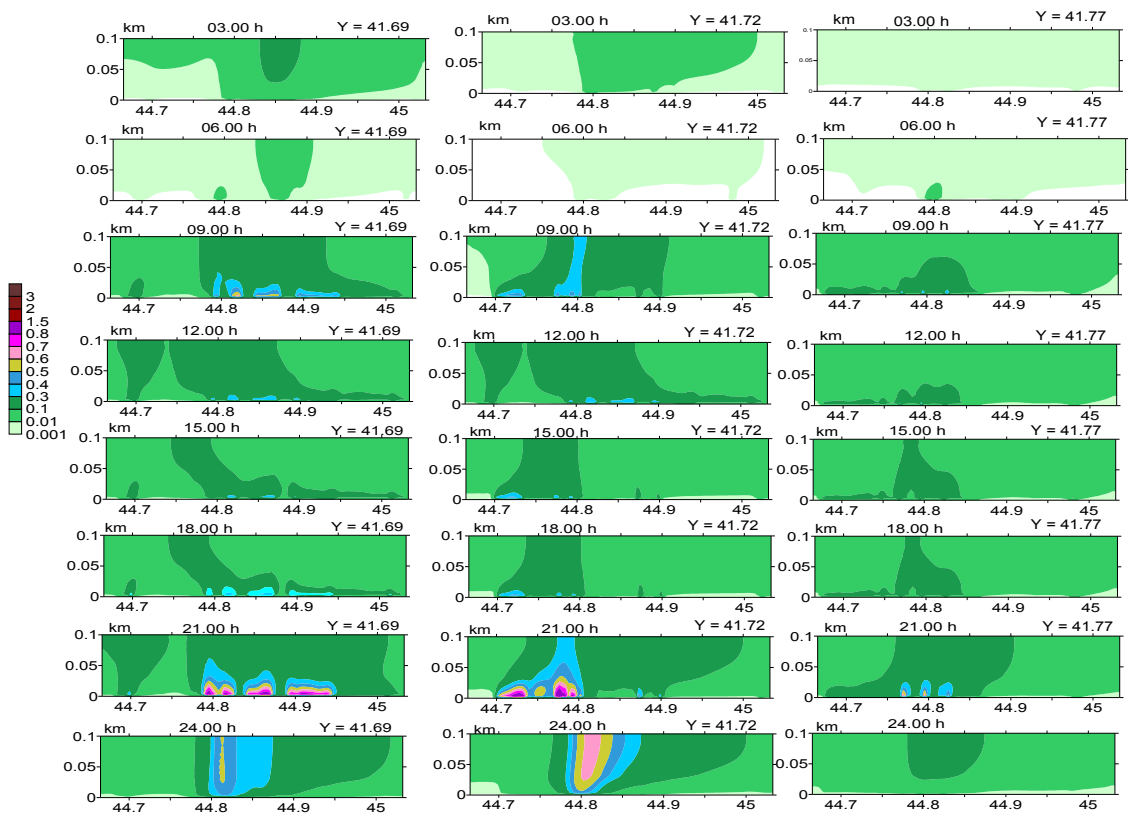
მიწის ზედაპირიდან 100 მ სიმაღლეზე კონცენტრაციის ზრდის პროცესი უფრო ხანგრძლივია და გრძელდება  $t=24$  სთ-მდე. ამ დროს ინტენსიური ვერტიკალური კონვექციური გადატანის პროცესი იწვევს დამტვერიანების სწრაფ ზრდას 1.5 ზდკ-მდე 100 მ სიმაღლეზე.

ნახ. 5 - ზე მოცემულია მტვრის კონცენტრაციის ვერტიკალური განაწილება დროის სხვადასხვა მომენტებში. ნახ.5 - დან ჩანს მტვრის გავრცელების უპირატესი მიმართულებები და შესაბამისად, შეიძლება განვსაზღვროთ გადატანის გამომწვევი შესაბამისი დინამიკური პროცესები. შეიძლება დავასკვნათ, რომ ლოკალურ ცირკულაციურ პროცესებს ერთსა და იმავე ტერიტორიაზე დროის სხვადასხვა მომენტში შეიძლება ქონდეს სხვადასხვა ხასიათი - ადვექციური, კონვექციური ან ტურბულენტურ-დიფუზიური. შესაბამისად იცვლება მტვრის გავრცელების სახეც. გავრცელება არის: მიწისპირა სუსტი კონვექციური ( $t=9$ სთ,  $Y = 41.69^\circ$ ), განვითარებული კონვექციური ( $t = 24$  სთ,  $Y = 41.69^\circ$  და  $Y = 41.72^\circ$ ) და ადვექციურ-დიფუზიური ( $t=21$  სთ,  $Y = 41.77^\circ$ ). 0-50 მ ფენაში უპირატესია მტვრის კონვექციური გადატანის პროცესი, ხოლო 50 მ-ს ზევით კი ადვექციურ-დიფუზიური გადატანა.

დასკვნა. გამოკვლეულია ქ. თბილისის ტერიტორიაზე ავტოტრანსპორტის მიერ წარმოშობილი მტვრის ცვლილების კინემატიკა ფონური დასავლეთის სუსტი ქარის დროს. შესწავლილია მტვრის



ნახ. 4. ქარის სიჩქარისა (მ/წმ) და მტვრის კონცენტრაციის (ზდკ) განაწილება, როცა  $t = 18, 21$  და  $24$  სთ მიწის ზედაპირიდან 2, 100 და 600 მ სიმაღლეებზე



ნახ. 5. ერთი დღე-ღამის განმავლობაში მტვრის კონცენტრაციების (ზდკ) განაწილება ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში პარარელის გასწვრივ მდებარე სამ ვერტიკალურ სიბრტყეში (  $Y = 41.69^\circ$ ,  $Y = 41.72^\circ$  და  $Y = 41.77^\circ$  )

სივრცული განაწილების დღე-ღამური სურათი და გავრცელების თვისებურებები. მიღებულია, რომ ატმოსფეროში მტვრის კონცენტრაციის ცვლილების პროცესში, ძლიერად დამტვერიაანებულ უბნებში, შეიძლება გამოიყოს ოთხი ეტაპი: 21–6 სთ – ატმოსფეროს თვითდასუფთავების; 6–9 სთ – კონცენტრაციის სწრაფი ზრდის; 9–15 სთ – კონცენტრაციის სუსტი შემცირების ან მუდმივობის; 18–21 სთ - კონცენტრაციის ზრდის ეტაპები.

ქარის სიჩქარისა და კონცენტრაციის ველების ანალიზით მიღებულია, რომ ძლიერად დამტვერიაანებული არეების სივრცული განაწილება დამოკიდებულია, ერთის მხრივ ავტომაგისტრალების მდებარეობაზე და მეორეს მხრივ, რელიეფის დინამიკური ზემოქმედების და ქვეფენილ ზედაპირზე თერმიული რეჟიმის დღეღამური ცვლილებით ფორმირებულ ლოკალურ ცირკულაციურ სისტემებზე. აღმოჩენილია განსხვავებები, რომელთაც შეიძლება ადგილი ჰქონდეთ მტვრის სივრცულ განაწილებაში სუსტი აღმოსავლეთისა და დასავლეთის ფონური ქარების დროს.

მადლიერება. სამეცნიერო კვლევა დაფინანსებული და შესრულებულია შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის FR-18 -3667 გრანტის ფარგლებში.

## ლიტერატურა - REFERENCES- ЛИТЕРАТУРА

1. Kharchilava D.F., Lomaia O.V., Bukia G.N. The Conditions of Aerosols Formation and Accumulation in Cities. Proc. 3th Int. Aerosol Conf., Kyoto, Japan, Pergamon, vol. 2, 24-27 September, 1990, p. 986-989.
2. Amiranashvili A.G., Gzirishvili T.G. Aerosols and Ice Crystals in the Atmosphere. Tbilisi, Metsniereba, 1991, 113 p. (რუსულად).
3. Amiranashvili A.G., Chikhladze V.A., Kharchilava J.F., Buachidze N.S., Intskirveli L.N. Variations of the Concentrations of Dust, Nitrogen Oxides, Sulphur Dioxide and Ozone in the Surface Air in Tbilisi in 1981-2003, Proc. 16<sup>th</sup> International Conference on Nucleation&Atmospheric Aerosols, Kyoto, Japan, 26-30 July 2004, pp. 678-681.
4. ამირანაშვილი ა., ზღიაძე თ., ცხლაძე ვ. ფოტოქიმიური სმოგი თბილისში. მონოგრაფია. მიხ. ნოდია გეოფიზიკის ინსტიტუტის შრომები. ნაწ.63, 2012, 160 გვ. ISSN 1512-1135.
5. Kirkitadze D., Nikiforov G., Chankvetadze A., Chkhaidze G. Some Results of Studies of Atmospheric Aerosols in M. Nodia Institute of Geophysics in the Recent Three Decades. Trans. of Mikheil Nodia Institute of Geophysics, ISSN 1512-1135, vol. 66, Tbilisi, 2016, pp. 178-185, (რუსულად).
6. ინჭკირველი ლ., გიგაური ნ., სურმავა ა., კუხალაშვილი ვ., მდივანი ს. PM-ნაწილაკებით და მტვრით ქ. თბილისის ატმოსფერული ჰაერის დაბინძურების გამოკვლევა. სამეცნიერო კონფერენცია „ეკოლოგიის თანამედროვე პრობლემები“, შრომები, ტ. 7, თბილისი-თელავი, საქართველო, 26-28 სექტემბერი, 2020. გვ. 252-255. ISSN 1512-1976.
7. Surmava A., Intskirveli L., Kukhalashvili V., Gigauri G. Numerical Investigation of Meso- and Microscale Diffusion of Tbilisi Dust. Annals of Agrarian Science. 2020, pp. (იბეჭდება)
8. Surmava A., Kukhalashvili V., Gigauri N., Intskirveli L., Kordzakhia G. Numerical Modeling of Dust Propagation in the Atmosphere of a City with Complex Terrain. The Case of Background Eastern Light Air. Journal of Applied Mathematics and Physics. Vol. 8 No.7, 2020, pp. 1222-1228. <https://doi.org/10.4236/jamp.2020.87092>.
9. Kukhalashvili V., Kordzakhia G., Gigauri N., Surmava A., Intskirveli L. Numerical Modelling of Dust Propagation in the Atmosphere of Tbilisi City: I. The Case of Background Eastern Gentle Breeze. Journal of the Georgian Geophysical Society, v. 23(1), 2020, pp 46-50.
10. Kukhalashvili V., Gigauri N, Surmava A., Demetrashvili D., Intskirveli L. Numerical Modelling of Dust Propagation in the Atmosphere of Tbilisi City: II. The Case of Background Eastern Fresh Breeze. Journal of the Georgian Geophysical Society, v. 23(1), 2020, pp. 51 -56

### ქ. თბილისის ატმოსფეროში მტვრის გავრცელების რიცხვითი მოდელირება. I. დასავლეთის ფონური სუსტი ქარის შემთხვევა

#### სურმავა ა., ინჭკირველი ლ., გვერდნითელი ლ.

#### რ ე ზ ი უ მ ე

ატმოსფერული პროცესების ევოლუციის 3D რეგიონალური მოდელისა და მინარევების გადატანა - დიფუზიის განტოლების ერთობლივი ინტეგრირებით რიცხვობრივად მოდელირებული და გაანალიზირებულია მტვრის გავრცელება ქ.თბილისის ტერიტორიაზე დასავლეთის ფონური სუსტი ქარის დროს. ატმოსფეროს დაბინძურების ძირითად წყაროს წარმოადგენს ქალაქის ქუჩებსა და მაგისტრალეებზე მოძრავი ავტოტრანსპორტი. გამოთვლებით მიღებულია, რომ მტვრის გავრცელების პროცესი პირობითად მიმდინარეობს ოთხ ეტაპად და დამოკიდებულია ავტოტრანსპორტის მოძრაობის ინტენსივობაზე, მაგისტრალეების მდებარეობაზე და ქალაქის მიკრო-რელიეფზე. კონკრეტულად, დილის 6-დან 9 სთ-მდე ინტერვალში ადგილი აქვს კონცენტრაციის სწრაფ ზრდას, 9-დან 18 სთ -მდე – კონცენტრაციის სუსტ შემცირებას ან მუდმივობას, 18 –21 სთ-ის ინტერვალში კონცენტრაციის ზრდას, ხოლო 21-დან დილის 6 სთ-მდე - ქალაქის ჰაერის თვითდასუფთავებას, რომლის



დროსაც კონცენტრაციის მაქსიმალური მნიშვნელობა მცირდება 0.1 ზდკ - მდე. მაღალი დამტვერია-  
ნების ზონები მდებარეობენ ცენტრალურ, ზოგიერთ პერიფერიულ ტერიტორიებზე და ქალაქის სამ-  
ხრეთ ნაწილში, სადაც კონცენტრაციის მაქსიმალური მნიშვნელობები 21.00 სთ-ისთვის აღწევს 2  
ზდკ-ს.

საკვანძო სიტყვები: რიცხვითი მოდელირება, დაბინძურების წყარო, მტვრის გავრცელება,  
დასავლეთის ფონური ქარი

## **NUMERICAL SIMULATION OF THE TBILISI CITY AIR POLLUTION BY DUST :**

### **I. THE CASE OF WESTERN BACKGROUND LIGHT AIR**

**Surmava A., Intskirveli L., Gverdtsiteli L.**

#### **A b s t r a c t**

Dust propagation at Tbilisi city territory in case of light background western wind is studied using the 3D regional model of atmospheric processes evolution and integration of the equation of admixtures transfer-diffusion. In the model, motor transport is considered as a main nonstationary source of pollution from which dust is emitted into the atmosphere. By numerical modeling are shown that the process of air pollution by dust proceeds in four stages and is depend on the intensity of motor traffic, the micro-relief of the city and the location of motorways. Heavily contaminated areas are located around the center and in some peripheral areas of the city, where dust concentration values reach 2 MPC.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЫЛИ В АТМОСФЕРЕ Г. ТБИЛИСИ:**

### **I. СЛУЧАЙ ЗАПАДНОГО ФОНОВОГО СЛАБОГО ВЕТРА**

**Сурмава А., Инцкирвели Л., Гвердцители Л.**

#### **Реферат**

Исследовано распространение пыли на территории города Тбилиси при слабом фоновом западном ветре с использованием региональной трехмерной модели эволюции атмосферных процессов 3D и интегрирования уравнения переноса-диффузии примесей. В модели автомобильный транспорт рассматривается как основной нестационарный источник загрязнения, от которого в атмосферу выбрасывается пыль. Путем численного моделирования показано, что процесс загрязнения атмосферного воздуха пылью протекает в четыре этапа и зависит от интенсивности автомобильного движения, микрорельефа города и расположения автомобильных магистралей. В интервале времени 06.00 - 09.00 часов - интенсивный рост, 09.00 - 18.00 - постоянство или слабое снижение, 18.00 - 21.00 - рост, а с 21.00 до 06.00 - уменьшение концентрации пыли. Сильно загрязненные зоны расположены вокруг центра города и на некоторой периферийной территории. Сильно загрязненные зоны расположены вокруг центра и на некоторых периферийных территориях города, где максимум концентрации пыли в 21.00 равен 2 ПДК.

## ქ. თბილისის ატმოსფეროში მტვრის გავრცელების რიცხვითი მოდელირება.

### II. დასვლეთის ფონური საშუალო სიძლიერის ქარის შემთხვევა

<sup>1,2</sup>სურმავა ა., <sup>2</sup>ინსკირველი ლ., <sup>3</sup>გვერდნითელი ლ.

<sup>1</sup>ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მ. ნოდია გეოფიზიკის  
ინსტიტუტი

<sup>2</sup>საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი.

<sup>3</sup>საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
*aasurmava@yahoo.com; intskirvelebi2@yahoo.com*

1. შესავალი. თბილისი, სამხრეთ კავკასიის ერთ-ერთი უდიდესი ქალაქი, საქართველოს ადმინისტრაციული და ტურისტული ცენტრია. შესაბამისად, მისი ატმოსფერული ჰაერის დაბინძურებისაგან დაცვა მეტად მნიშვნელოვანი ეკოლოგიური და სოციალური ამოცანაა. ქ.თბილისის ატმოსფერული ჰაერის სისუფთავის პრობლემისადმი მიძინილია მრავალი სამეცნიერო ნაშრომი. მათში ასახულია ქალაქის ატმოსფეროს დაბინძურების ექსპერიმენტული [1-6] და თეორიული კვლევების შედეგები [7-11].

სტატიაში გრძელდება კვლევების ციკლი, რომლის მიზანია თეორიულად შეისწავლოს ქ.თბილისის ატმოსფერული ჰაერის დამტვერიანების მექანიზმი და თავისებურებანი სხვადასხვა მეტეოროლოგიურ სიტუაციებში, იმისათვის, რომ დამუშავდეს დაბინძურების დიაგნოსტიკური პროგნოზი და ატმოსფერული ჰაერის დაცვის პრაქტიკული ღონისძიებანი.

#### 2. ამოცანის დასმის მოკლე აღწერა

ქ. თბილისის ატმოსფეროს დამტვერიანების თეორიული შესწავლისათვის გამოიყენება კავკასიაში ატმოსფერული პროცესების განვითარების და დამაბინძურებელი ინგრედიენტების გავრცელების მეზომასტაბის რიცხვითი მოდელი [7, 8]. მოდელის რეალიზაციის არეს წარმოადგენს ქ. თბილისის და მიმდებარე ტერიტორიების ატმოსფერო. ტერიტორიის ფართობი  $30.6 \times 24$  კმ<sup>2</sup> -ია. ქალაქის რთული რელიეფის პირობებში ატმოსფეროს დინამიკური ველების და მეტეოროლოგიური პარამეტრების მათემტიკურად კორექტული აღწერისათვის გამოყენებულია რელიეფის მიმყოლი კოორდინატთა სისტემა  $(t, x, y, \zeta = (z - \delta)/h)$ . აქ  $t$  დროა,  $x$  და  $y$  პარალელისა და მერიდიანის გასწვრივ მიმართული კოორდინატებია,  $\zeta$  რელიეფის ზედაპირისადმი მართობულად მიმართული განუზომადი ვერტიკალური კოორდინატაა,  $\delta(x, y)$  რელიეფის სიმაღლეა ზღვის დონიდან,  $h = H - \delta$  ტროპოსფეროს სისქეა,  $H(t, x, y)$  -ტროპოპაუზის სიმაღლეა ზღვის დონიდან.

არჩეულ კოორდინატთა სისტემაში მტვრის კონცენტრაციის ცვლილების განტოლება ჩაიწერება შემდეგი სახით [8, 9]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (\tilde{w} - \frac{w_0}{h}) \frac{\partial C}{\partial z} = \mu \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial z} v \frac{\partial C}{\partial z} + F, \quad (1)$$

სადაც,  $C$  ინგრედიენტის კონცენტრაციაა:  $u$ ,  $v$ ,  $w$  და  $\tilde{w}$  ქარის სიჩქარის მდგენელებია  $x$ ,  $y$ ,  $z$  და  $z$  ღერძების გასწვრივ;  $w_0$  მტვრის დალექვის სიჩქარეა. ის გამოითვლება სტოკსის ფორმულით.  $F(t, x, y, z)$  ცნობილი ფუნქციაა და ასახავს მტვრის წყაროების მიერ მტვრის გაფრქვევის სიჩქარეს.  $\mu$  და  $\nu$  - ჰორიზონტალური და ვერტიკალური ტურბულენტობის კოეფიციენტებია. ქარის სიჩქარის მდგენელები და ტურბულენტობის კოეფიციენტები თავისუფალ ატმოსფეროსა და ატმოსფეროს 100 მ სისქის მიწისპირა ფენაში გამოითვლება [9] -ში მოცემული განტოლებების რიცხვითი ინტეგრირებით.

(1) განტოლება ინტეგრირდება როგორც თავისუფალ ატმოსფეროში, ასევე ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში შესაბამისი საწყისი და სასაზღვრო პირობებით. გამოთვლები ჩატარებულია მართკუთხა რიცხვით ბადეზე 300 და 400 მ ჰორიზონტალური ბიჯით პარალელისა და მერიდიანის გასწვრივ. ვერტიკალური ბიჯი თავისუფალ ატმოსფეროში ტოლია 1/31, ატმოსფეროს მიწისპირა 100 მ სისქის არეში ვერტიკალური ბიჯი იცვლება 0.5 -დან 15 მ-მდე. დროითი ბიჯი 1 წმ-ია. გამოთვლები ჩატარებულია 3 დღე-ღამის პერიოდისათვის.

განხილულია იენისის თვეში მშრალი ამინდის პირობებში დასავლეთის ფონური სტაციონალური საშუალო სიმძლავრის ქარის შემთხვევა. ფონური ქარის სიჩქარე იცვლება 5 მ/წმ-დან 2 მ სიმძლავრეზე 25 მ/წმ-მდე ტროპოპაუზის დონეზე. ატმოსფეროს ფარდობითი ტენიანობა 50%-ია.

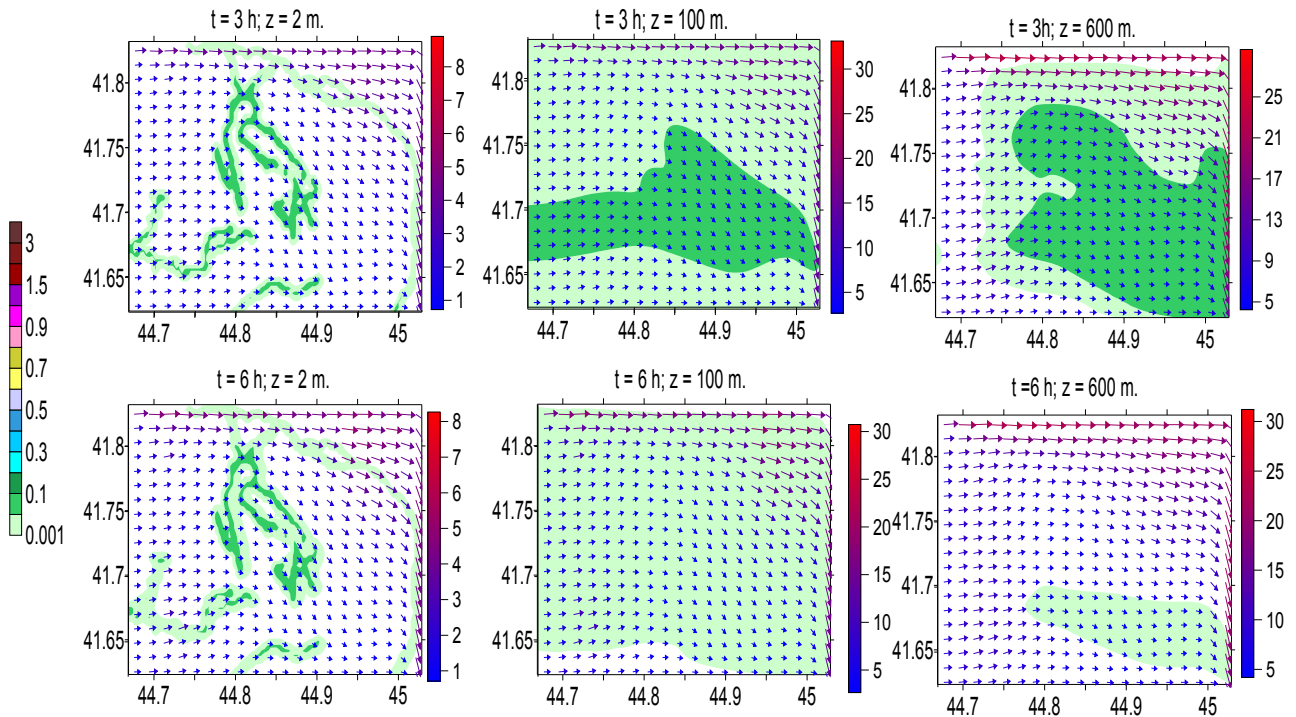
დაშვებულია, რომ ატმოსფეროს აბინძურებს მტვერი, რომელიც წარმოიშვება ქალაქის მაგისტრალზე და ქუჩებში ავტოტრანსპორტის მოძრაობის შედეგად. მისი ოდენობა იცვლება დროში და განსაზღვრულია სტაციონალური დაკვირვების მასალების მონაცემების და ტრანსპორტის მოძრაობის ინტენსივობის შეფასების საშუალებით. დაბინძურების წყაროები მდებარეობენ ქალაქის ცენტრალურ მაგისტრალზე და ურბანიზირებულ ტერიტორიებზე [9].

### 3. რიცხვითი მოდელირების შედეგები

ნახ. 1- ზე ნაჩვენებია გამოთვლებით მიღებული მტვრის კონცენტრაციის და ქარის სიჩქარის სივრცული განაწილება მიწის ზედაპირიდან 2, 100 და 600 მ სიმაღლეებზე დღის  $t = 3$  და 6 საათებზე. კონცენტრაცია მოცემულია ერთჯერადი ზღვრულად დასაშვები კონცენტრაციის ერთეულებში ( $\text{ზდკ}=0.5 \text{ მგ/მ}^3$ ), ქარის სიჩქარე - მ/წმ-ში. ნახ. 1-დან ჩანს, რომ ქვეფენილი ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეზე დამტვერიანება ღამის 3 სთ-დან თანდათანობით მცვირდება და ხდება მინიმალური დღის 6 სთ-ისთვის. ამ დროს ქალაქისა და მის მიმდებარე ტერიტორიებზე კონცენტრაციის მნიშვნელობა იცვლება 0.001 -დან 0.1 ზდკ-ინტერვალში. კონცენტრაცია 0.1 ზდკ მიღებულია ქალაქის ზოგიერთ მაგისტრალზე დიდუბის და ორთაჭალის რაიონებში, თბილისის ზღვის და გარს შემომვლელი გზების ცალკეულ მონაკვეთებზე და სხვ. 100 და 600 მ სიმაღლეებზე კონცენტრაცია ნაკლებად ცვალებადია. მისი მნიშვნელობა ატმოსფეროს 600 მ სისქის ფენაში იცვლება 0.001-0.2 მგ/მ<sup>3</sup> ფარგლებში.

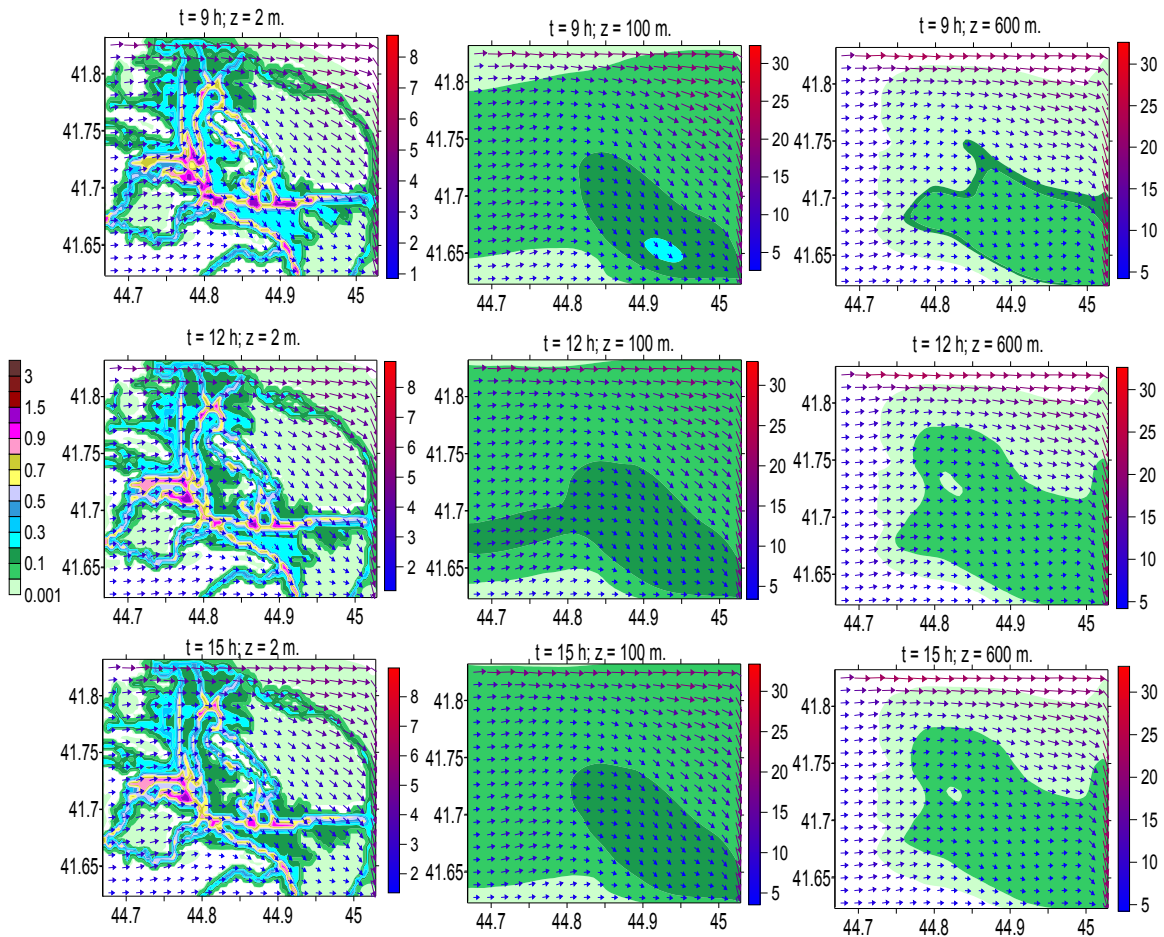
დღის 3-6 სთ ინტერვალში მტვრის ვერტიკალური განაწილება ხასიათდება თავისებურებით - კონცენტრაციის მაქსიმალური მნიშვნელობები 100 მ სიმაღლეზე მეტია, ვიდრე მაქსიმალური მნიშვნელობები 2 და 600 მ სიმაღლეებზე. ეფექტი, სავარაუდოდ დაკავშირებულია დღის მეორე ნახევარში გამთბარი ჰაერის კონვექციურ მოძრაობასთან. გამთბარი ჰაერის მასა თან წარიტაცებს მტვრის მასას და იწვევს მის დაგროვებას მიწისპირა ფენის ზედა საზღვრის

მიდამოებში. შედეგად, დროის სვლასთან ერთად სუსტდება კონვექციური მოძრაობა, დიფუზიური და ადვექციური გადატანის შედეგად თანდათანობით მცირდება დამტვერიანების დონე და როცა  $t = 6$  სთ, მტვრის მაქსიმალური კონცენტრაციის სიდიდე მცირდება 0.1 ზდკ-მდე მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეზე.



ნახ. 1. ქარის სიჩქარისა (მ/წმ) და მტვრის კონცენტრაციის (ზდკ) განაწილება, როცა  $t = 9, 12$  და  $15$  სთ მიწის ზედაპირიდან  $2, 100$  და  $600$  მ სიმაღლეებზე

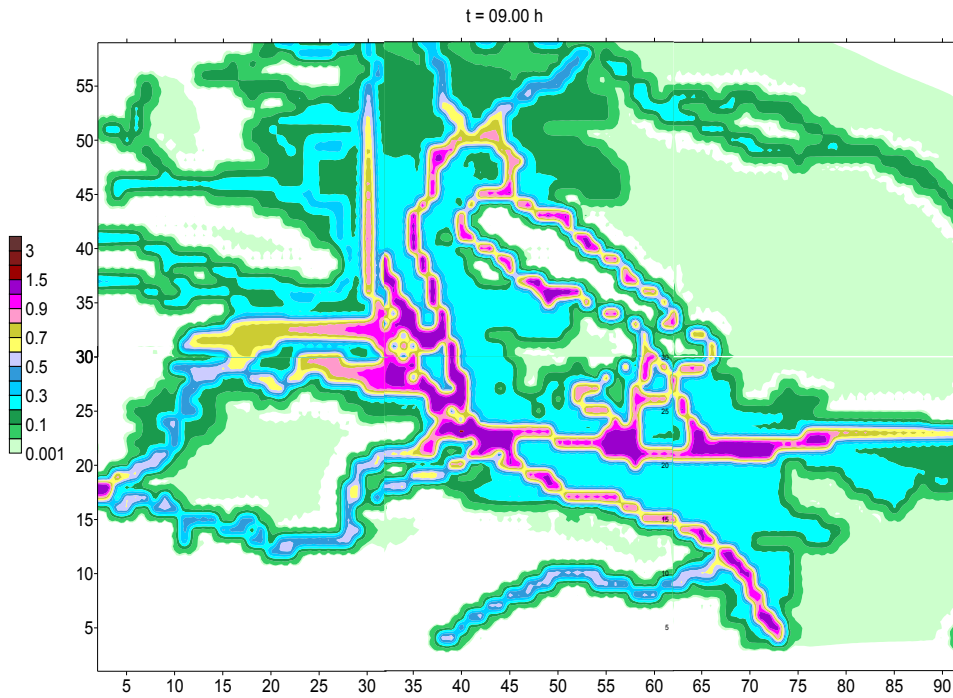
ნახ. 2-ზე ნაჩვენებია გამოთვლებით მიღებული მტრის კონცენტრაციის სივრცული განაწილება დილის 9-დან 15 სთ-მდე პერიოდში. ნახ. 2-დან ჩანს, რომ კონცენტრაციის ველის დროში ცვლილება ანალოგიურია სუსტი დასავლეთის ფონური სუსტი ქარის დროს მიღებული ცვლილების [11]. განსხვავება მდგომარეობს გაზრდილი კონცენტრაციების არეების სხვადასხვა მდებარეობაში და მტვრის კონცენტრაციის მნიშვნელობებში. დამტვერიანების დონე, ატმოსფეროს მიწისპირა და სასაზღვრო ფენებში, როცა  $t = 9$  სთ, მეტია 12 და 15 სთ-ისთვის მიღებულ დამტვერიანების დონეზე. როცა  $t = 9$  სთ მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეზე მტვრის კონცენტრაციები მაქსიმალურია ზოგიერთი ავტომაგისტრალისა და მოედნის მიდამოებში (ნახ. 2), ნახ. 3-ზე ნაჩვენებია მტვრის სივრცული განაწილება გაზრდილი დეტალიზაციით მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეზე როცა,  $t = 9$  სთ. ნახ. 2 და 3-დან ჩანს, რომ კონცენტრაციის გაზრდილი მნიშვნელობები მიღებულია საბურთლოს (პეკინის და კოსტავას ქუჩები), ვაკის (მელიქიშვილის გამზირი) ნაძალადევის (დ. გურამიშვილის გამზირი) რაიონის მიდამოებში, ორთაჭალაში (ვ. გორგასლის და მოსკოვის გამზირების ცალკეულ უბნებში), ნაძალადევაში (ქ. დედოფლის გამზირი), თბილისის ზღვის ირგვლივ მდებარე ქუჩებზე, ასევე მაგისტრალების გადაკვეთის მიდამოებში არსებულ მოედნებზე და სხვა წერტილებში. აღნიშნულ ტერიტორიებზე კონცენტრაციის მაქსიმალური მნიშვნელობები 1 ზდკ-ის ფარგლებშია.



ნახ. 2. ქარის სიჩქარისა (მ/წმ) და მტვრის კონცენტრაციის (ზდკ) განაწილება, როცა  $t = 9, 12$  და  $15$  სთ მიწის ზედაპირიდან  $2, 100$  და  $600$  მ სიმაღლეებზე

9 სთ-ის შემდეგ ხდება მოძრაობის ინტენსივობის შემცირება, რასაც თან ახლავს მტვრის მიწისპირა კონცენტრაციის კლება მაღალი დამტვერიანების უბნებში და გაზრდა შედარებით ნაკლებად დამტვერიანებულ საბურთალოსა და ვაკის რაიონებში (ვ. ფშაველას და ი. ჭავჭავაძის გამზირები). ფონური საშუალო სიმძლავრის ქარის დროს მტვრის კონცენტრაციის მნიშვნელობები მიწის ზედაპირიდან  $100$  და  $600$  მ სიმაღლეებზე ნაკლებია, ფონური სუსტი ქარის დროს მიღებულ კონცენტრაციებზე [11]. აღნიშნული დაკავშირებულია საშუალო სიმძლავრის ქარის დროს მტვრის ადვექციური გავრცელების პროცესის წვლილის ზრდასთან და მის გატანასთან ქალაქის ფარგლების გარეთ.

დღის  $15$  სთ-ის შემდეგ,  $z = 2$  მ სიმაღლეზე, ფონური აღმოსავლეთის სუსტი ქარის შემთხვევისაგან განსხვავებით, იწყება დამტვერიანების ზრდის მეორე ეტაპი, რომელიც გრძელდება  $21$  სთ-მდე, როდესაც დგება ქალაქის ატმოსფეროს მაქსიმალური დამტვერიანების მდგომარეობა (ნახ. 4 და 5). დამტვერიანება იზრდება ატმოსფეროს სასაზღვრო ფენის  $1$  კმ სისქის ფენაში. ზრდა განსაკუთრებით ინტენსიურია მიწისპირა ფენის ქვედა ნაწილში ქალაქის ცენტრსა და პერიფერიებში მდებარე მაგისტრალების მიდამოებში. გამონაკლისს წარმოადგენს თბილისის გარშემოვლის მაგისტრალი. თბილისის ცენტრალურ ნაწილში და მაგისტრალზე კონცენტრაციის მნიშვნელობები  $2$  მ სიმაღლეზე  $1-1.5$  ზდკ-ს ფარგლებშია, ხოლო  $100$  მ სიმაღლეზე მოედნებზე და მაგისტრალების ზოგიერთ მონაკვეთებში აჭარბებს კიდევ  $2$  ზდკ-ს (ნახ. 5).

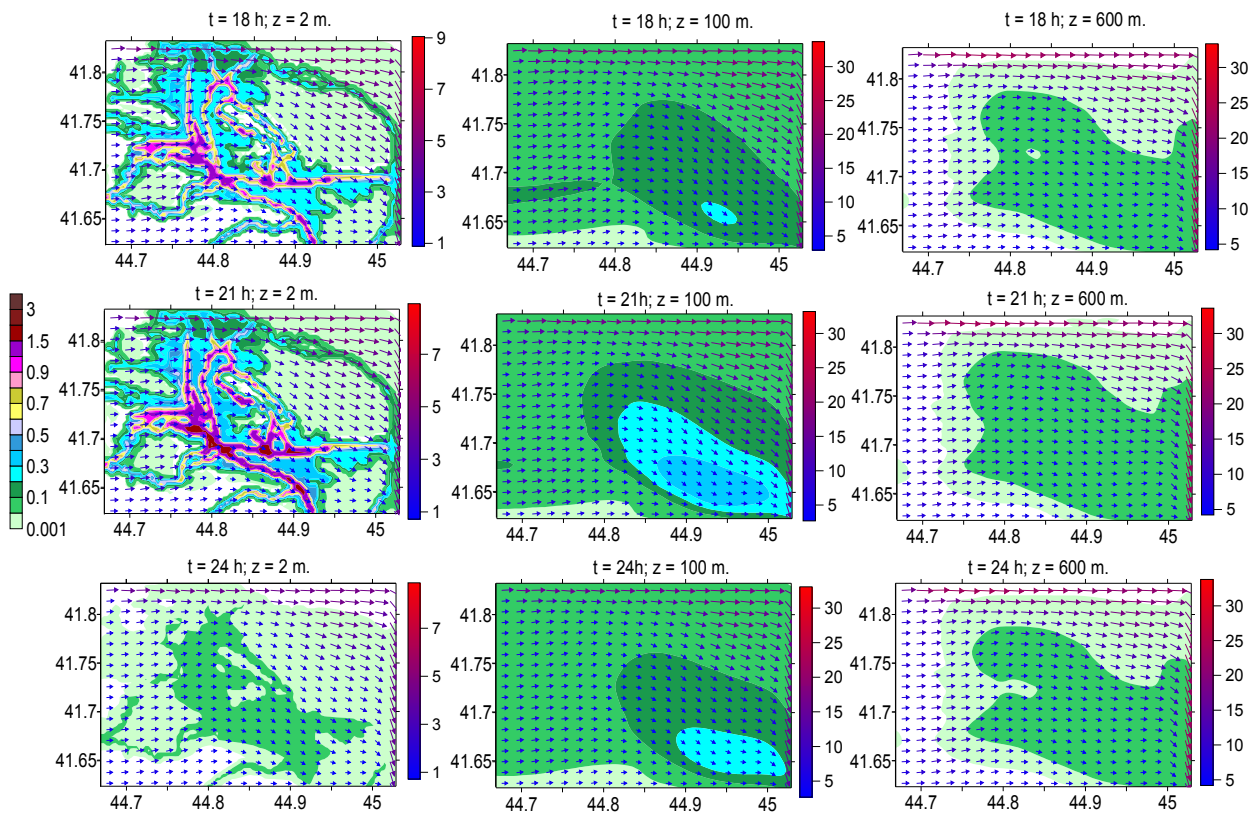


ნახ. 3. მტვრის კონცენტრაციის (ზდკ) განაწილება, როცა  $t = 9$  სთ მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეებზე (ღერძებზე ნაჩვენებია რიცხვითი ბადის წერტილების მნიშვნელობები)

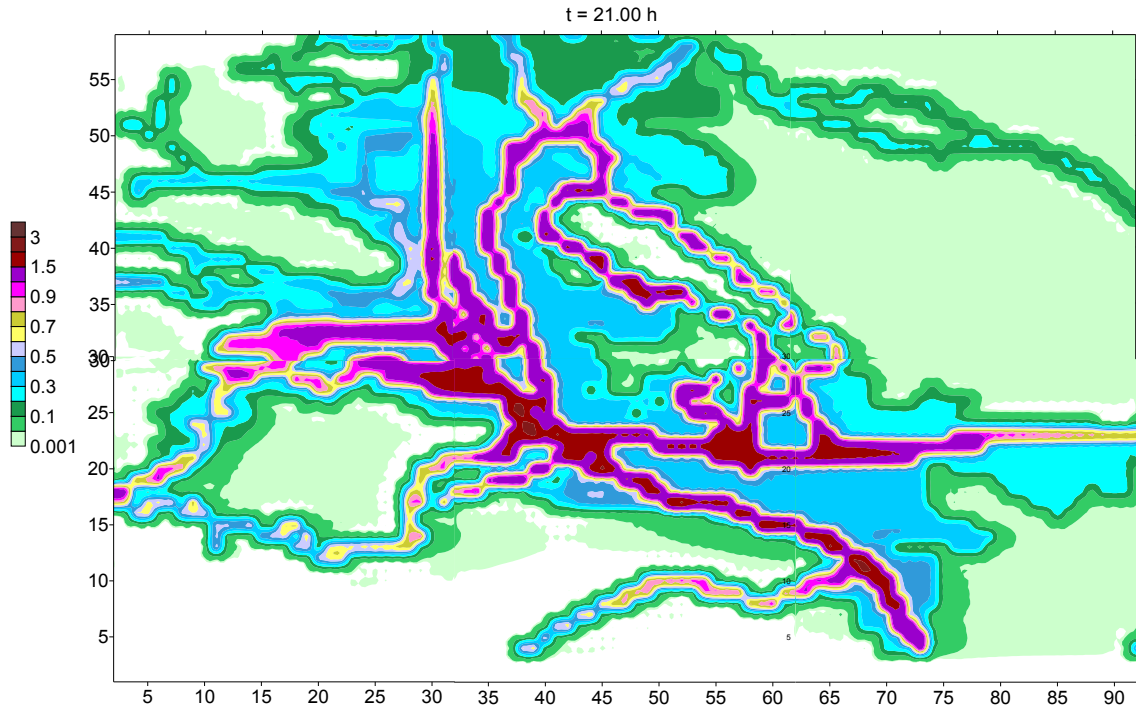
$t = 21$  სთ შემდეგ იწყება მტვრის კონცენტრაციის შემცირების ეტაპი და გრძელდება მომდევნო დღის დილის 6 სთ-მდე. დასავლეთის სუსტი ფონური ქარისაგან განსხვავებით, შემცირება მიმდინარეობს ერთდროულად, როგორც უშუალოდ ქვეყნილი ზედაპირის სიახლოვეს, ასევე მთელი ატმოსფეროს სასაზღვრო ფენაში. ამ დროს, ქარის სიჩქარის მომატებული სიდიდის გამო, უფრო ინტენსიური ხდება მტვრის ადვექციური გადატანის, დიფუზიური გავრცელების და ქალაქის განიავების პროცესი. შედეგად, დამტვერიანების დონე სწრაფად მცირდება და კონცენტრაციის მნიშვნელობა როცა  $t = 24$  სთ, არ აღემატება 0.3 ზდკ-ს.

ნახ. 6-ზე მოცემულია მტვრის კონცენტრაციის ვერტიკალური განაწილება დროის სხვადასხვა მომენტში. ნახ. 6-დან ჩანს, რომ ვერტიკალურ განაწილებაში, [11]-საგან განსხვავებით, ნაკლებადა გამოხატული „მტვრის კონვექციური ღრულის“ მსგავსი წარმონაქმნი. აღნიშნული შეიძლება აიხსნას ტურბულენტური დიფუზიის გაზრდილი წვლილით მტვრის გავრცელების პროცესში.

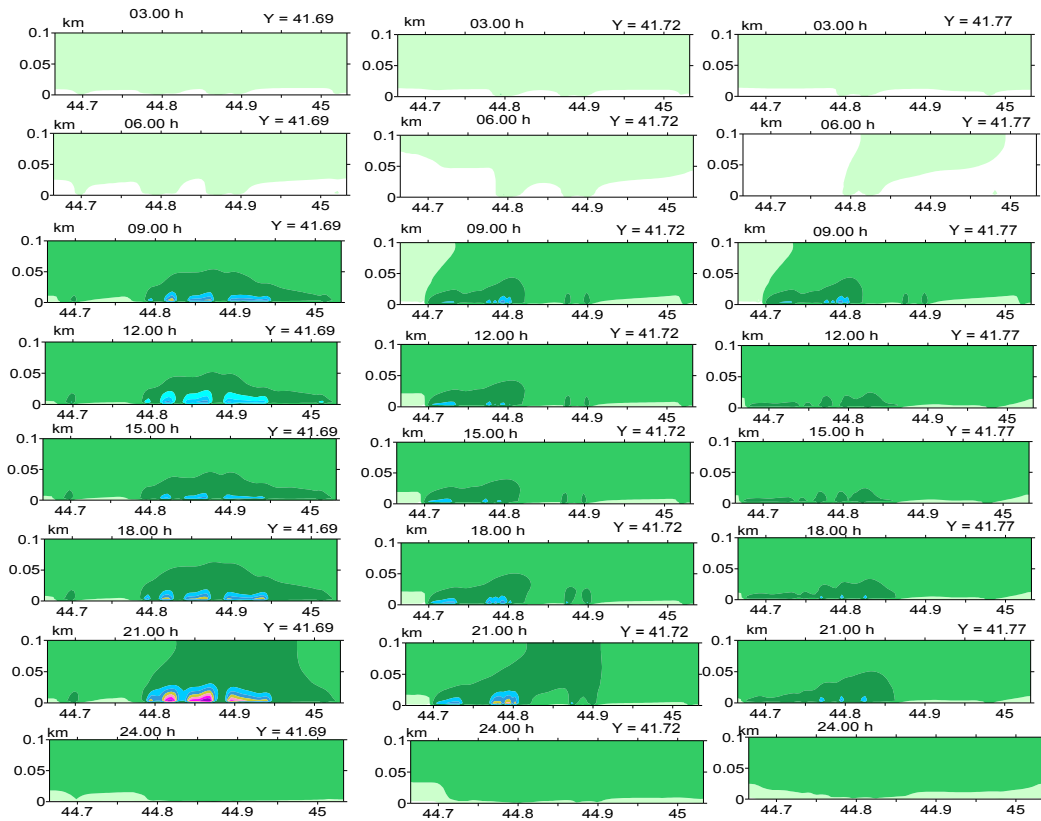
დასკვნა. გამოკვლეულია ქ. თბილისის ტერიტორიაზე ავტოტრანსპორტის მიერ წარმოშობილი მტვრის ცვლილების კინემატიკა ფონური დასავლეთის სუსტი ქარის დროს. შესწავლილია მტვრის სივრცული განაწილების დღე-ღამური სურათი და გავრცელების თვისებურებები. მიღებულია, რომ ძლიერად დამტვერიანებულ უბნებში, მტვრის გავრცელების პროცესში შეიძლება გამოიყოს ოთხი ეტაპი: 21–6 სთ – ატმოსფეროს თვითდასუფთავების ეტაპი; 6–9 სთ – კონცენტრაციის სწრაფი ზრდის ეტაპი; 9–15 სთ – კონცენტრაციის სუსტი შემცირების ან მუდმივობის ეტაპი; 18–21 სთ – კონცენტრაციის ზრდის ეტაპი. ნაჩვენებია, რომ მტვრის მოდელირებით მიღებული კონცენტრაციების მნიშვნელობები დაკვირვებული მნიშვნელობების ფარგლებშია [6].



ნახ. 4. ქარის სიჩქარისა (მ/წმ) და მტვრის კონცენტრაციის (ზდკ) განაწილება, როცა  $t = 18, 21$  და  $24$  სთ მიწის ზედაპირიდან  $2, 100$  და  $600$  მ სიმაღლეებზე



ნახ. 5. მტვრის კონცენტრაციის (ზდკ) განაწილება, როცა  $t = 96$  სთ მიწის ზედაპირიდან  $2$  მ სიმაღლეზე (ღერძებზე ნაჩვენებების რიცხვითი ბადის წერტილების მნიშვნელობები)



ნახ. 6. მტვრის კონცენტრაციის (ზდკ) განაწილება ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში პარარელის გასწვრივ მდებარე სამ ვერტიკალურ სიბრტყეში ( $Y = 41.69^\circ$ ,  $Y = 41.72^\circ$  და  $Y = 41.77^\circ$ ) ერთი დღეღამის განმავლობაში

ქარის სიჩქარისა და კონცენტრაციის ველების ანალიზით მიღებულია, რომ ძლიერად დამტვერიანებული არეების სივრცული განაწილება დამოკიდებულია, ერთის მხრივ ავტომაგისტრალების მდებარეობაზე და მეორეს მხრივ, რელიეფის დინამიკური ზემოქმედების და ქვეფენილ ზედაპირზე თერმიული რეჟიმის დღეღამური ცვლილებით ფორმირებულ ლოკალურ ცირკულაციურ სისტემებზე. აღმოჩენილია განსხვავებები, რომელთაც შეიძლება ადგილი ჰქონდეთ მტვრის სივრცულ განაწილებაში სუსტი აღმოსავლეთისა და დასავლეთის ფონური ქარების დროს.

*მადლიერება. სამეცნიერო კვლევა დაფინანსებული და შესრულებულია შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის FR-18 -3667 გრანტის ფარგლებში.*

### ლიტერატურა - REFERENCES - ЛИТЕРАТУРА

1. Kharchilava D.F., Lomaia O.V., Bukia G.N. The Conditions of Aerosols Formation and Accumulation in Cities. Proc. 3th Int. Aerosol Conf., Kyoto, Japan, Pergamon, vol. 2, 24-27 September, 1990, p. 986-989.
2. Amiranashvili A.G., Gzirishvili T.G. Aerosols and Ice Crystals in the Atmosphere. Tbilisi, Metsniereba, 1991, 113 p. (რუსულად).
3. Amiranashvili A.G., Chikhladze V.A., Kharchilava J.F., Buachidze N.S., Intskirveli L.N. Variations of the Concentrations of Dust, Nitrogen Oxides, Sulphur Dioxide and Ozone in the Surface Air in Tbilisi in 1981-2003, Proc. 16<sup>th</sup> International Conference on Nucleation&Atmospheric Aerosols, Kyoto, Japan, 26-30 July 2004, pp. 678-681.



4. ამიარანაშვილი ა., ბლიაძე თ., ჩიხლაძე ვ. ფოტოქიმიური სმოგი თბილისში. მონოგრაფია. მიხ. ნოდია გეოფიზიკის ინსტიტუტის შრომები. ნაწ.63, 2012, 160 გვ. ISSN 1512-1135.
5. Kirkitadze D., Nikiforov G., Chankvetadze A., Chkhaidze G. Some Results of Studies of Atmospheric Aerosols in M. Nodia Institute of Geophysics in the Recent Three Decades. Trans. of Mikheil Nodia Institute of Geophysics, ISSN 1512-1135, vol. 66, Tbilisi, 2016, pp. 178-185, (რუსულად).
6. ინწკირველი ლ., გიგაური ნ., სურმავა ა., კუხალაშვილი ვ., მდივანი ს. PM-ნაწილაკებით და მტვრით ქ. თბილისის ატმოსფერული ჰაერის დაბინძურების გამოკვლევა. სამეცნიერო კონფერენცია „ეკოლოგიის თანამედროვე პრობლემები“, შრომები, ტ. 7, თბილისი-თელავი, საქართველო, 26-28 სექტემბერი, 2020. გვ. 252-255. ISSN 1512-1976.
7. Surmava A., Intskirveli L., Kukhalashvili V., Gigauri G. Numerical Investigation of Meso- and Microscale Diffusion of Tbilisi Dust. Annals of Agrarian Science. 2020, pp. (იბეჭდება)
8. Surmava A., Kukhalashvili V., Gigauri N., Intskirveli L., Kordzakhia G. Numerical Modeling of Dust Propagation in the Atmosphere of a City with Complex Terrain. The Case of Background Eastern Light Air. Journal of Applied Mathematics and Physics. Vol. 8 No.7, 2020, pp. 1222-1228. <https://doi.org/10.4-236/jamp.2020.87092>.
9. Kukhalashvili V., Kordzakhia G., Gigauri N., Surmava A., Intskirveli L. Numerical Modelling of Dust Propagation in the Atmosphere of Tbilisi City: I. The Case of Background Eastern Gentle Breeze. Journal of the Georgian Geophysical Society. 23, 2020. pp. 46-50.
10. Kukhalashvili V., Gigauri N., Surmava A., Demetrashvili D., Intskirveli L. Numerical Modelling of Dust Propagation in the Atmosphere of Tbilisi City: II. The Case of Background Eastern Fresh Breeze. Journal of the Georgian Geophysical Society. 23, 2020. pp.51-56.
11. ა. სურმავა, ლ. ინწკირველი, მ. გვერდნითელი. ქ. თბილისის ატმოსფეროში მტვრის გავრცელების რიცხვითი მოდელირება. I. დასავლეთის ფონური სუსტი ქარის შემთხვევა. (იბეჭდება მოცემულ შრომათა კრებულში).

**ქ. თბილისის ატმოსფეროში მტვრის გავრცელების რიცხვითი მოდელირება.**

**II. დასავლეთის ფონური საშუალო სიძლიერის ქარის შემთხვევა**

**სურმავა ა., ინწკირველი ლ., გვერდნითელი ლ.**

**რ ე ზ ი უ მ ე**

ატმოსფერული პროცესების ევოლუციის 3D რეგიონალური მოდელისა და მინარევების გადანა - დიფუზიის განტოლების ერთობლივი ინტეგრირებით რიცხვობრივად მოდელირებული და გაანალიზირებულია მტვრის გავრცელება ქ. თბილისის ტერიტორიაზე დასავლეთის ფონური საშუალო სიძლიერის ქარის დროს. დაშვებულია, რომ ატმოსფეროს დაბინძურების ძირითად წყაროს წარმოადგენს ქალაქის ქუჩებსა და მაგისტრალებზე მოძრავი ავტოტრანსპორტი. მოდელირებით მიღებულია მტვრის სივრცითი განაწილების სურათები დროის სხვადასხვა მომენტისათვის. ნაჩვენებია, რომ მტვრის განაწილება სივრცეში მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული დამაბინძურებელი წყაროების მდებარეობაზე და ქალაქის რელიეფზე. შესწავლილია დამტვერიანების ცვლილების თავისებურებანი და მისი დამოკიდებულება ფონური ქარის სიჩქარეზე. განსაზღვრულია მაქსიმალური დაბინძურების დამყარების დრო და ზონების განაწილება ქალაქის ტერიტორიაზე.

საკვანძო სიტყვები: რიცხვითი მოდელირება, დაბინძურების წყარო, მტვრის გავრცელება, დასავლეთის ფონური ქარი

**NUMERICAL MODELLING OF DUST PROPAGATION IN THE ATMOSPHERE OF TBILISI CITY:  
II. THE CASE OF WEASTERN BACKGROUND GENTLE BREEZE**

**Surmava A., Intskirveli L., Gverdtsiteli L.**

**A b s t r a c t**

Dust propagation at Tbilisi city territory in case of gentle background weastern wind is studied using the 3D regional model of atmospheric processes evolution and integration of the equation of admixtures transfer-diffusion. In the model, motor transport is considered as a main nonstationary source of pollution from which dust is emitted into the atmosphere. The patterns of spatial distribution of dust at different time moments were obtained by means of modeling. It is shown that the spatial distribution of dust significantly depends on the location of the pollution source and the relief of the city. The features of changes in dust content and its dependence on the background wind speed have been studied. The time of maximum pollution and distribution zones on the territory of the city have been established.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЫЛИ  
В АТМОСФЕРЕ Г. ТБИЛИСИ:  
II. СЛУЧАЙ ЗАПАДНОГО ФОНОВОГО СРЕДНЕГО ВЕТРА**

**Сурмава А., Инцкирвели Л., Гвердцители Л.**

**Р е ф е р а т**

Исследовано распространение пыли на территории города Тбилиси при среднем фоновом западном ветре с использованием региональной трехмерной модели развития атмосферных процессов 3D и интегрирования уравнения переноса-диффузии примесей. В модели автомобильный транспорт рассматривается как основной нестационарный источник загрязнения, от которого в атмосферу выбрасывается пыль. Путем моделирования получены картины пространственного распространения пыли в разные временные моменты. Показано, что пространственное распространение пыли значительно зависит от местонахождения источника загрязнения и рельефа города. Изучены особенности изменения запыленности и ее зависимость от скорости фонового ветра. Установлены время максимального загрязнения и зоны распределения на территории города.

**ქ. თბილისის ატმოსფეროში მტვრის გავრცელების  
რიცხვითი მოდელირება.  
III. დასვლეთის ფონური ძლიერი ქარის შემთხვევა**

**<sup>1,2</sup>სურმავა ა., <sup>2</sup>ინსკირველი ლ., <sup>3</sup>გვერდნითელი ლ.**

<sup>1</sup>ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მ. ნოდია გეოფიზიკის ინსტიტუტი

<sup>2</sup>საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი.

<sup>3</sup>საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
aasurmava@yahoo.com; intskirvelebi2@yahoo.com

1. შესავალი. სტატიაში გრძელდება [1-4]-ში ჩატარებული კვლევების ციკლი, რომლის მიზანია თეორიულად შეისწავლოს ქ.თბილისის ატმოსფეროში საავტომობილო ტრანსპორტის მიერ წარმოშობილი მტვრის გავრცელების თავისებურებანი სხვადასხვა მეტეოროლოგიური სიტუაციებში.

**2. ამოცანის დასმის მოკლე აღწერა**

ქ. თბილისის ატმოსფეროს დამტვერიანების თეორიული შესწავლისათვის გამოიყენება კავკასიაში ატმოსფერული პროცესების განვითარებისა და დამაბინძურებელ ინგრედიენტთა გავრცელების მეზომასშტაბის რიცხვითი მოდელი [5, 6]. მოდელის რეალიზაციის არეს წარმოადგენს ქ. თბილისის და მიმდებარე ტერიტორიების ატმოსფერო. ტერიტორიის ფართობი 30.6×24 კმ<sup>2</sup> -ია. ქალაქის რთული რელიეფის პირობებში ატმოსფეროს დინამიკური ველების და მეტეოროლოგიური პარამეტრების მათემატიკურად კორექტული აღწერისათვის გამოიყენებულია რელიეფის მიმყოლი კოორდინატთა სისტემა (t, x, y, ζ = (z - δ)/h). აქ t დროა, x და y პარალელისა და მერიდიანის გასწვრივ მიმართული კოორდინატებია, ζ რელიეფის ზედაპირისადმი მართობულად მიმართულია დმი განუზომადი ვერტიკალური კოორდინატაა, δ(x, y) რელიეფის სიმაღლეა ზღვის დონიდან, h = H - δ ტროპოსფერს სისქეა, H(t, x, y) - ტროპოპაუზის სიმაღლეა ზღვის დონიდან.

არჩეულ კოორდინატთა სისტემაში მტვრის კონცენტრაციის ცვლილების განტოლება ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (\tilde{w} - \frac{w_0}{h}) \frac{\partial C}{\partial \zeta} = \mu \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \zeta} v \frac{\partial C}{\partial \zeta} + F, \quad (1)$$

სადაც, C ინგრედიენტის კონცენტრაციაა: u, v, w და  $\tilde{w}$  ქარის სიჩქარის მდგენელებია x, y, z და ζ ღერძების გასწვრივ;  $w_0 = 1$  სმ/წმ მტვრის დალექვის სიჩქარეა. F(t, x, y, ζ) ცნობილი ფუნქციაა და ასხავს წყაროების მიერ მტვრის გაფრქვევის სიჩქარეს.  $\mu$  და  $v$  - ჰორიზონტალური და ვერტიკალური ტურბულენტობის კოეფიციენტებია. ქარის სიჩქარის მდგენელები და ტურბულენტობის კოეფიციენტები თავისუფალ ატმოსფეროსა და ატმოსფეროს 100 მ სისქის მიწისპირა ფენაში გამოითვლება [7, 8]-ში მოცემული განტოლებების რიცხვითი ინტეგრირებით.

(1) განტოლება ინტეგრირდება თავისუფალ ატმოსფეროში და ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში შესაბამისი საწყისი და სასაზღვრო პირობებით. გამოთვლები ჩატარებულია მართკუთხა რიხვით ბადეზე 300 და 400 მ ჰორიზონტალური ბიჯებით პარალელისა და მერიდიანის გასწვრივ. ვერტიკალური ბიჯი თავისუფალ ატმოსფეროში ტოლია 1/31, ატმოსფეროს მიწისპირა 100 მ სისქის არეში ვერტიკალური ბიჯი იცვლება 0.5 მ-დან 15 მ-მდე. დროითი ბიჯი 1 წმ-ია. გამოთვლები ჩატარებულია 3 დღე-ღამის პერიოდისათვის.

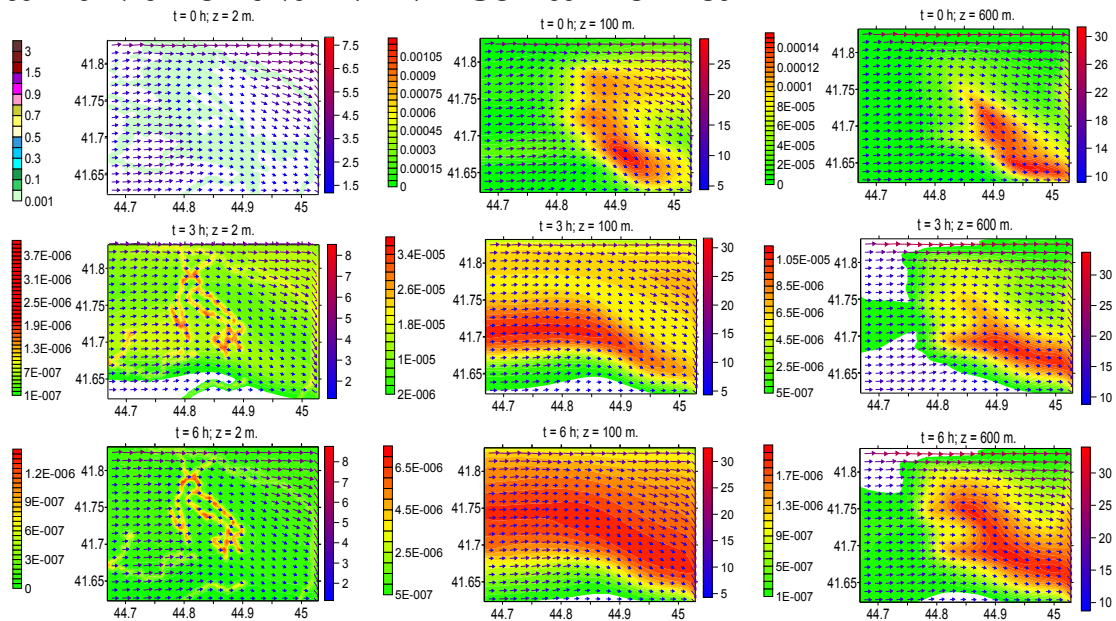
განხილულია ივნისის თვეში მშრალი ამინდის პირობებში დასავლეთის ფონური სტაციონალური საშუალო სიმძლავრის ქარის შემთხვევა. ფონური ქარის სიჩქარე იცვლება 10 მ/წმ-დან 100 მ სიმძლავრეზე 30 მ/წმ-მდე ტროპოპაუზის დონეზე. ატმოსფეროს ფარდობითი ტენიანობა 50%-ია.

დაშვებულია, რომ ატმოსფეროს აბინძურებს მტვერი, რომელიც წარმოიშვება ქალაქის მაგისტრალზე და ქუჩებში ავტოტრანსპორტის მოძრაობის შედეგად. მისი ოდენობა იცვლება დროში და განსაზღვრულია სტაციონალური დაკვირვების მასალების მონაცემების და ტრანსპორტის მოძრაობის ინტენსივობის შეფასებით.

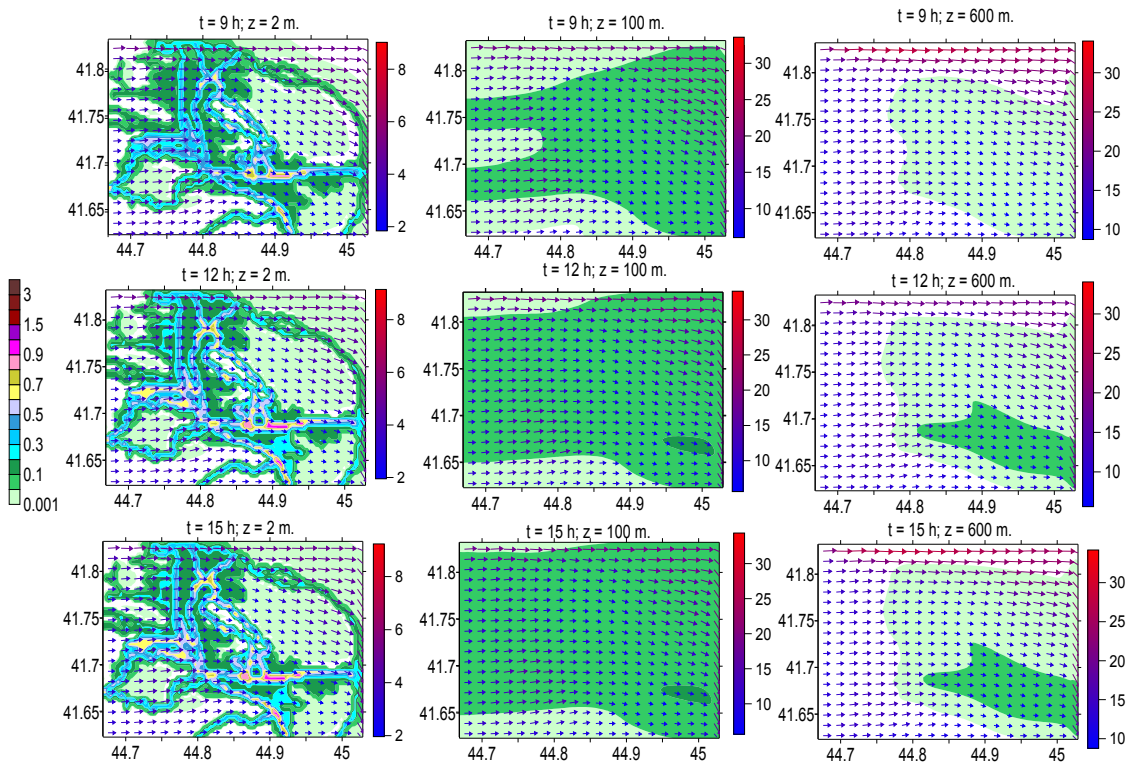
დაბინძურების წყაროები მდებარეობენ ქალაქის ცენტრალურ მაგისტრალზე და ურბანიზირებულ ტერიტორიებზე [9].

### 3. რიხვითი მოდელირების შედეგები

ნახ. 1- ზე ნაჩვენებია გამოთვლებით მიღებული მტვრის კონცენტრაციის და ქარის სიჩქარის სივრცული განაწილება მიწის ზედაპირიდან 2, 100 და 600 მ სიმაღლეებზე დღის  $t = 0, 3$  და 6 სთ. კონცენტრაცია მოცემულია ერთჯერად ზღვრულად დასაშვები კონცენტრაციის ერთეულებში (ზდკ=0.5 მგ/მ<sup>3</sup>), ქარის სიჩქარე - მ/წმ-ში. ნახ. 1-დან ჩანს, რომ ქვეფენილი ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეზე დამტვერიანების დონე ძალიან დაბალია და კონცენტრაციის სიდიდე ზოგიერთი მაგისტრალის და მოედნების მიდამოებში იცვლება 0.001-0.1 ზდკ-ს ფარგლებში. უფრო მაღალ დონეებზე მტვრის კონცენტრაცია მიღებულია მხოლოდ მტვრის კვალის სახით, რომელშიც კონცენტრაციის სიდიდეები 0.0001 ზდკ-ს ჯერადია. დროის განხილულ ინტერვალში ავტომობილების მოძრაობის ინტენსივობა მინიმალურია ხოლო ძლიერ ქარს გააქვს ამოფრქვეული მტვერი ქალაქის ფარგლებიდან და ასუფთავებს ატმოსფეროს.

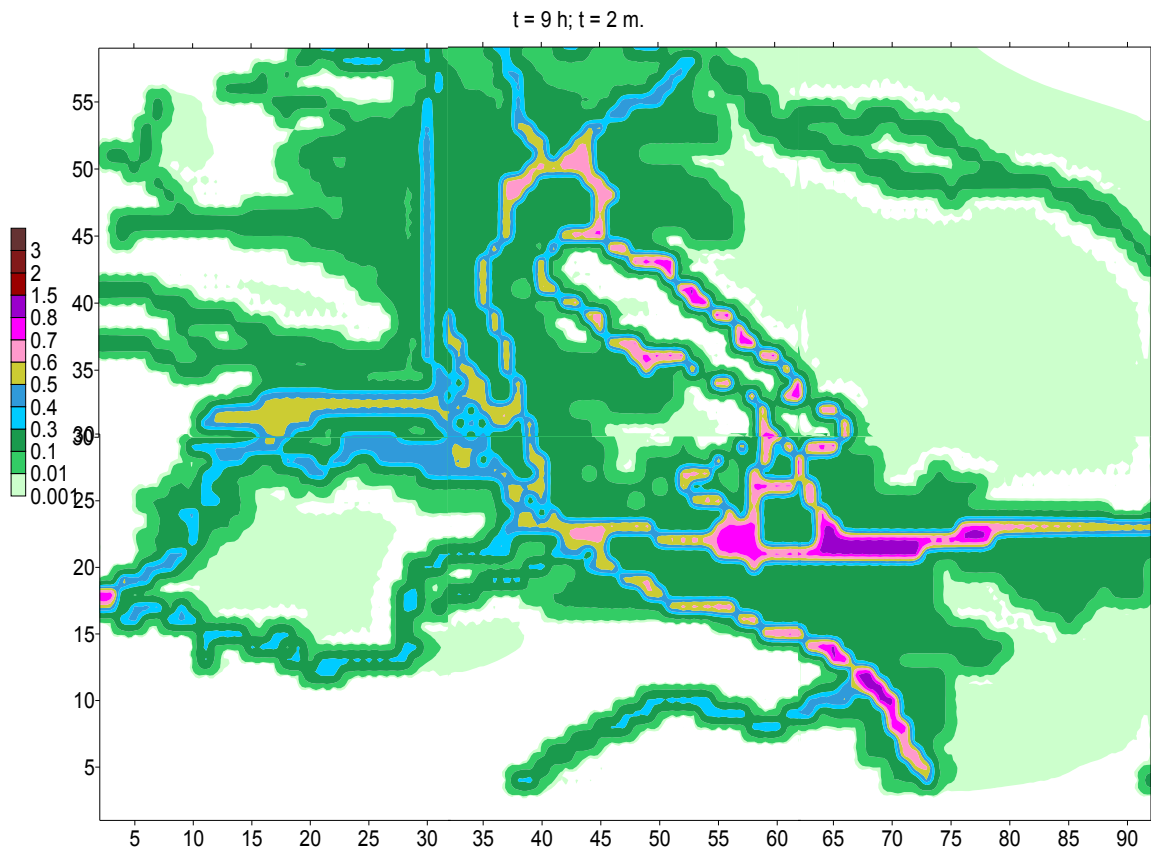


ნახ. 1. ქარის სიჩქარისა (მ/წმ) და მტვრის კონცენტრაციის (ზდკ) განაწილება, როცა  $t = 0, 3$  და 6 სთ მიწის ზედაპირიდან 2, 100 და 600 მ სიმაღლეებზე



ნახ. 2. ქარის სიჩქარისა (მ/წმ) და მტვერის კონცენტრაციის (ზდკ) განაწილება, როცა  $t = 9, 12$  და  $15$  სთ მიწის ზედაპირიდან  $2, 100$  და  $600$  მ სიმაღლეებზე

ნახ. 2-ზე ნაჩვენებია გამოთვლებით მიღებული მტრის კონცენტრაციის სივრცული განაწილება დილის 9-დან 15 სთ-მდე პერიოდში. ნახ. 2-დან ჩანს, რომ კონცენტრაციის ველის დროში ცვლილებისა და სივრცული განაწილების სურათები თვისობრივად მსგავსია სუსტი და საშუალო სიდიდის ქარების შემთხვევაში მიღებული სურათების: დამტვერიანებას ადგილი აქვს მთავარი ავტომაგისტრალებისა და მათ მიმდებარე ტერიტორიების მიდამოებში [3, 4]. ძირითადი განსხვავება რაოდენობრივია – კონცენტრაციის მნიშვნელობები დაახლოებით 2 ჯერ ნაკლებია [3, 4]-ში მიღებულ კონცენტრაციებზე. კონცენტრაციის მაქსიმალური მნიშვნელობები არ აჭარბებს 1 ზდკ-ს და ისინი მიღებულია არა ქალაქის ცენტრალურ ნაწილში და ძირითად ანტროპოგენულად დატვირთულ ტერიტორიებზე, არამედ მხოლოდ ქალაქის აღმოსავლეთ და სამხრეთ ნაწილებში – თბილისის ზღვის ირგვლივ, კახეთის გზატკეცილისა და ფონიჭალის მიდამოებში (ნახ. 3). ნახ.3-ზე ნაჩვენები განაწილება ფორმირებულია ქარის ადვექციური გადატანის უპირატესობით დიფუზიურთან შედარებით. ამ დროს ქარის მომატებული სიჩქარე ძლევს ოროგრაფიულ დაბრკოლებას და მტვერი ქალაქის ჩაღრმავებული ცენტრალური და დასავლეთი ტერიტორიებიდან გადააქვს აღმოსავლეთით შემადლებულ ტერიტორიაზე. რაც შეეხება დამტვერიანებას ატმოსფეროს სასაზღვრო ფენის ქვედა ნაწილში, მტვერი 100 მ სიმაღლეზე გავრცელებულია მოდელირების თითქმის მთელ არეში ქარის სიჩქარის მიმართულებით და კონცენტრაციის მაქსიმალური მნიშვნელობები არ აჭარბებენ 0.3 ზდკ-ს. მიწის ზედაპირიდან 600 მ სიმაღლეზე მტვერი გავრცელებულია დინების მიმართულებით ქალაქის სამხრეთ-აღმოსავლეთ ნაწილის თავზე.

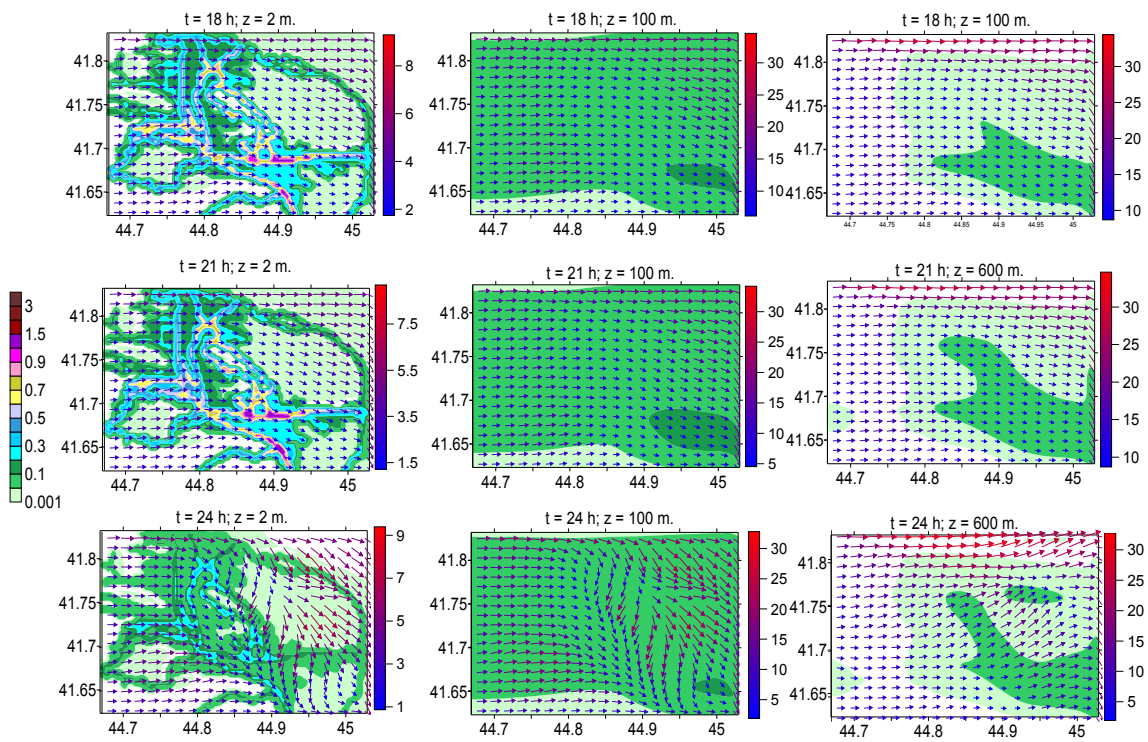


ნახ. 3. მტვრის კონცენტრაციის (ზდკ) დეტალიზირებული განაწილება, როცა  $t = 9$  სთ მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეებზე (ღერძებზე ნაჩვენებია რიცხვითი ბადის წერტილები)

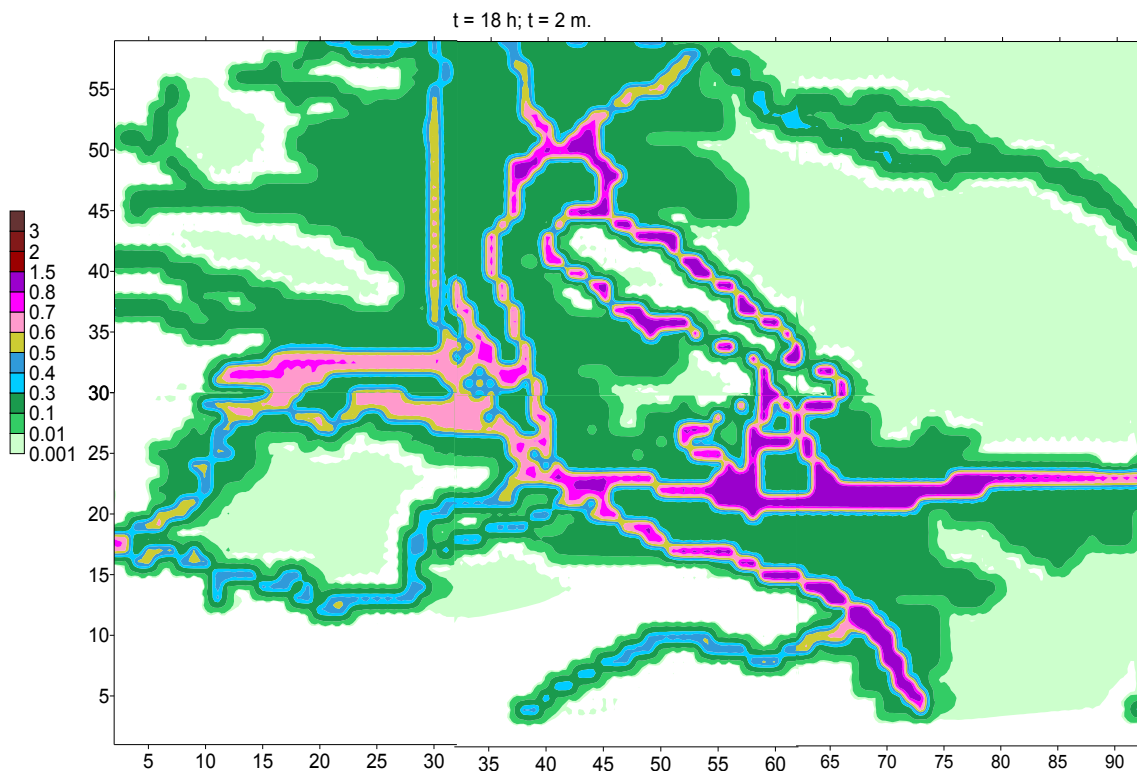
$t = 9$  სთ ის შემდეგ  $t = 18$  სთ-მდე, ადგილი აქვს მტვრის კონცენტრაციების მცირე ზრდას ვაკე-საბურთალოს რაიონის მიდამოებში (ნახ. 2 და 3). მტვრის კონცენტრაციის ზრდა უფრო შესამჩნევია გლდანის – თემქის, ორთაჭალის რაიონების ტერიტორიების და თბილისის ზღვის მიდამოებში. ამ რაიონებში კონცენტრაციების მნიშვნელობები აღწევენ 1 ზდკ-ს. მდ. მტკვრის გასწვრივ, ქალაქის ჩრდილო - აღმოსავლეთ ნაწილში (ფონური სუსტი და საშუალო სიმძლავრის ქარების შემთხვევებისაგან განსხვავებით) მტვრის კონცენტრაცია დაბალია და მისი მაქსიმალური მნიშვნელობა 0.5 ზდკ-ს ფარგლებშია.

$t = 18-21$  სთ ინტერვალში მყარდება მტვრის კონცენტრაციის დაახლოებით კვაზისტატისკური განაწილება, რომელსაც თან ახლავს კონცენტრაციის მცირე შემცირება ვაკე-საბურთალოს და ქალაქის ცენტრალურ რაიონებში (ნახ. 4-6).  $t = 24$  სთ კონცენტრაციის შემცირება უფრო ინტენსიურია ქალაქის ცენტრში, სამხრეთ და აღმოსავლეთ ნაწილებში. ნაკლებად ინტენსიურად მცირდება მტვერი გლდანის, თბილისის ზღვის მიდამოებში და ზოგიერთ მცირე ზომის ტერიტორიებზე (ნახ. 7). გამოთვლებით მიღებული მტვრის მაქსიმალური კონცენტრაციების მნიშვნელობები ამ ადგილებში 0.1–0.2 ზდკ-ს ფარგლებშია.

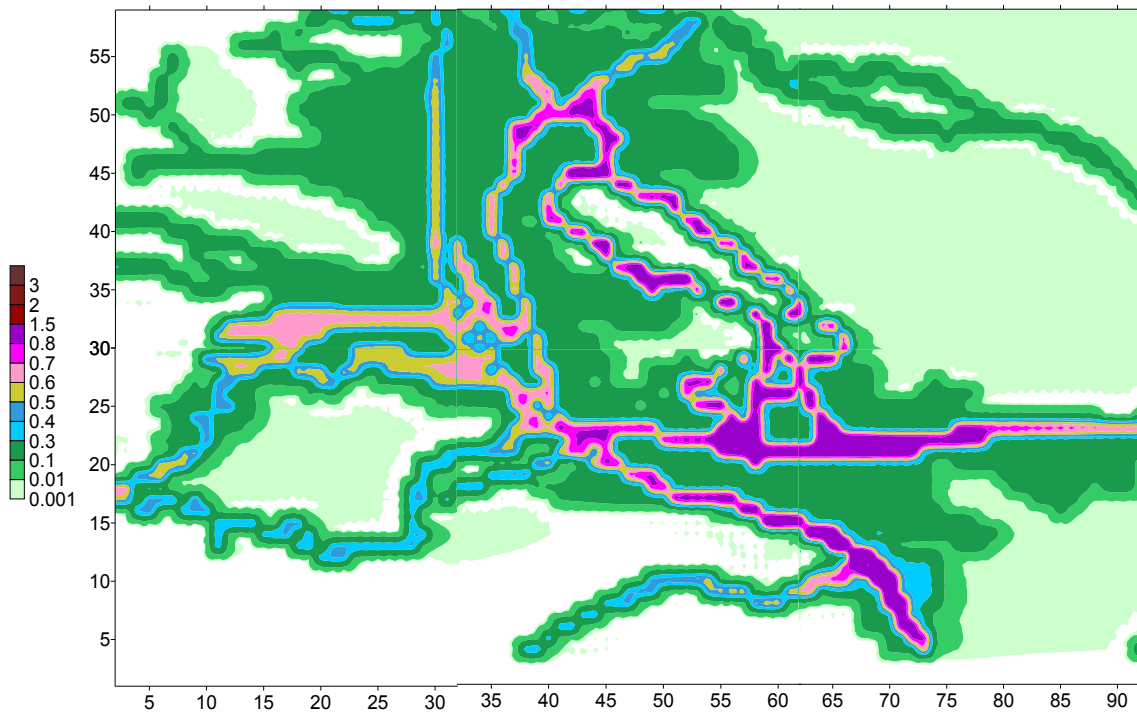
რაც შეეხება მტვრის ვერტიკალურ განაწილებას მთელი დღის განმავლობაში (9-დან 24 სთ-მდე) ატმოსფეროს 600 მ სისქის ფენაში მტვრის კონცენტრაციის მნიშვნელობები არ აღემატება 0.1 – 0.3 ზდკ-ს (ნახ. 2 და 4).



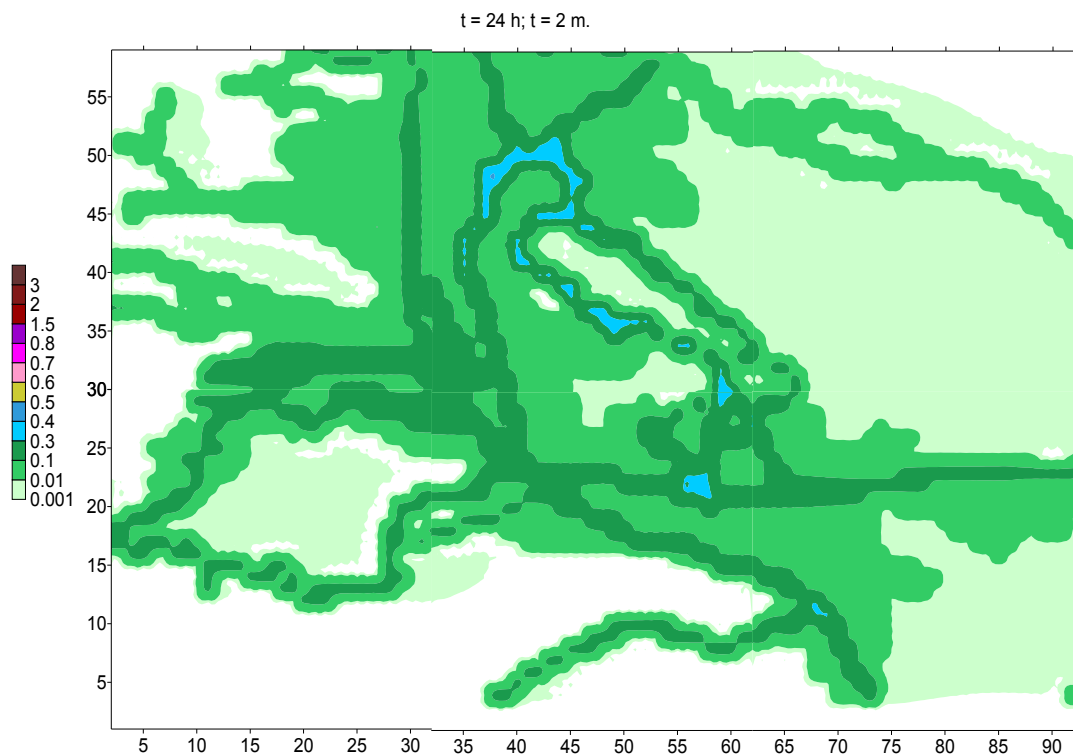
ნახ. 4. ქარის სიჩქარისა (მ/წმ) და მტვრის კონცენტრაციის (ზდკ) განაწილება, როცა  $t = 18, 21$  და  $24$  სთ მიწის ზედაპირიდან  $2, 100$  და  $600$  მ სიმაღლეებზე



ნახ. 5. მტვრის კონცენტრაციის (ზდკ) განაწილება, როცა  $t = 18$  სთ მიწის ზედაპირიდან  $2$  მ სიმაღლეებზე (ღერძებზე ნაჩვენებია რიცხვითი ბადის წერტილების მნიშვნელობები)



ნახ. 6. მტვრის კონცენტრაციის (ზდკ) განაწილება, როცა  $t = 21$  სთ მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეებზე (ღერძებზე ნაჩვენებია რიცხვითი ბადის წერტილების მნიშვნელობები)



ნახ. 7. მტვრის კონცენტრაციის (ზდკ) განაწილება, როცა  $t = 21$  სთ მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეებზე (ღერძებზე ნაჩვენებია რიცხვითი ბადის წერტილების მნიშვნელობები)

ნახ. 8-ზე მოცემულია მტვრის კონცენტრაციის ვერტიკალური განაწილება დროის სხვადასხვა მომენტებში. ნახ. 6-დან ჩანს, რომ ვერტიკალურ განაწილებაში, [3, 4]-საგან განსხვავე-

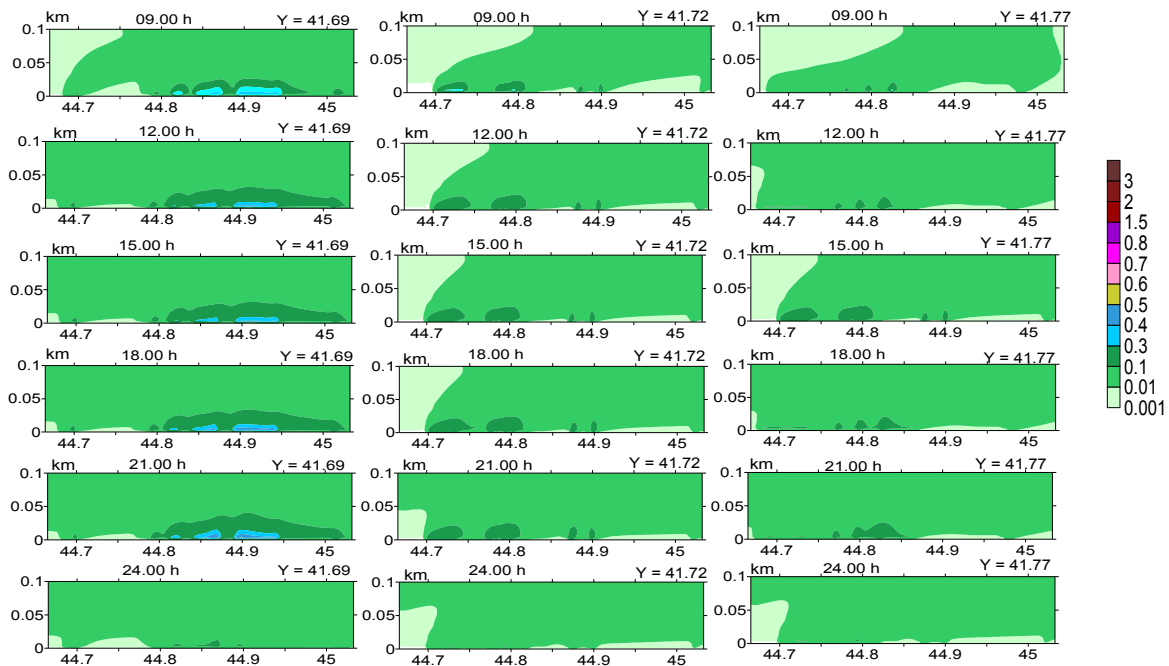


ბით, ნაკლებადაა გამოხატული „მტვრის კონვექციური ღრუბლის მსგავსი წარმონაქმნი. აღნიშნული შეიძლება აიხსნას ადვექციური გადატანის უპირატესობით ტურბულენტურ- დიფუზიური და კონვექციური გარდაქმნის პროცესებთან შედარებით.

4. დასკვნა. გამოკვლეულია ქ. თბილისის ტერიტორიაზე ავტოტრანსპორტის მიერ წარმოშობილი მტვრის კონცენტრაციის ცვლილების კინემატიკა ფონური დასავლეთის ძლიერი ქარის დროს. შესწავლილია მტვრის სივრცული განაწილების დღეღამური სურათი და გავრცელების თვისებურებები. მიღებულია, რომ მტვრის ცვლილების პროცესში, ძლიერად დამტვერიანებულ უბნებში, შეიძლება გამოიყოს სამი ეტაპი: 21 სთ-დან მომდევნო დღის 6 სთ – ატმოსფეროს თვითდასუფთავების ეტაპი; 6–9 სთ – კონცენტრაციის სწრაფი ზრდის ეტაპი; 9–დან 21 სთ-მდე კვაზისტატიკური განაწილების ეტაპი.

ქარის სიჩქარისა და კონცენტრაციის ველების ანალიზით მიღებულია, რომ ქარის სიჩქარის გაზრდამ გამოიწვია მტვრის დიფუზიის სიჩქარის გაზრდა და მტვრის ინტენსიური გატანა ქალაქის ტერიტორიებიდან.

მოდელში გათვალისწინებულია დამტვერიანების მხოლოდ ერთი წყარო – ავტოტრანსპორტი, და არ არის გათვალისწინებული დამტვერიანების სხვა წყაროები,



ნახ. 8. მტვრის კონცენტრაციების (ზდგ) განაწილება ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში პარალელის გასწვრივ მდებარე სამ ვერტიკალურ სიბრტყეში (  $Y= 41.69^{\circ}$ ,  $Y=41. 72^{\circ}$  და  $Y=41. 77^{\circ}$ ) ერთი დღე-ღამის განმავლობაში

ისეთების როგორცაა, ნიადაგზე, შენობების სახურავებზე და სხვა ქვეფენილ ზედაპირზე დაფენილი მტვერი. თუ ამ წყაროებიდან ატმოსფეროში ატაცებული მტვრის ოდენობა სუსტი და საშუალო სიძლიერის ქარების შემთხვევაში შეიძლება იყოს უგულველყოფილი, როგორც მცირე, ძლიერი ქარის შემთხვევაში მათი გავლენა სავარაუდოდ იქნება მნიშვნელოვანი და შეცვლის მტვრის სივრცული განაწილების სურათს. აღნიშნული პრობლემა უნდა იქნეს გათვალისწინებული შემდგომ კვლევებში.

მადელიერება. სამეცნიერო კვლევა დაფინანსებული და შესრულებულია შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის FR-18 -3667 გრანტის ფარგლებში.

## ლიტერატურა - REFERENCES - ЛИТЕРАТУРА

1. Kukhalashvili V., Kordzakhia G., Gigauri N., Surmava A., Intskirveli L. Numerical Modelling of Dust Propagation in the Atmosphere of Tbilisi City: I. The Case of Background Eastern Gentle Breeze. Journal of the Georgian Geophysical Society. 23, 2020. pp. 46-50.
2. Kukhalashvili V., Gigauri N., Surmava A., Demetrashvili D., Intskirveli L. Numerical Modelling of Dust Propagation in the Atmosphere of Tbilisi City: II. The Case of Background Eastern Fresh Breeze. Journal of the Georgian Geophysical Society. 23, 2020. pp.51-56.
3. ა. სურმავა, ლ. ინწკირველი, მ. გვერდნითელი. ქ. თბილისის ატმოსფეროში მტვრის გავრცელების რიცხვითი მოდელირება. I. დასავლეთის ფონური სუსტი ქარის შემთხვევა. (იბეჭდება მოემულ შრომათა კრებულში).
4. ა. სურმავა, ლ. ინწკირველი, მ. გვერდნითელი. ქ. თბილისის ატმოსფეროში მტვრის გავრცელების რიცხვითი მოდელირება. II. დასავლეთის ფონური სუსტალი სიმლაგრის ქარის შემთხვევა. (იბეჭდება მოემულ შრომათა კრებულში).
5. Surmava A., Intskirveli L., Kukhalashvili V., Gigauri G. Numerical Investigation of Meso- and Microscale Diffusion of Tbilisi Dust. Annals of Agrarian Science. 2020, pp. (იბეჭდება)
6. Surmava A., Kukhalashvili V., Gigauri N., Intskirveli L., Kordzakhia G. Numerical Modeling of Dust Propagation in the Atmosphere of a City with Complex Terrain. The Case of Background Eastern Light Air. Journal of Applied Mathematics and Physics. Vol. 8 No.7, 2020, pp. 1222-1228. <https://doi.org/10.4236/jamp.2020.87092>.
7. Зилитинкевич С. С., Монин А. С. Турбулентность в динамических моделях атмосферы. Ленинград. Наука, 1971, 44 с.
8. Марчук Г. И., Кочергин В. П., Саркисян А. С., Бубнов М. А., Залесный В. Б., Климок В. И., Кордзадзе А. А., Кузнецов В. И., Протасов А. В., Сухоруков В. А., Цветова Е. А., Щербаков А. В. Математические модели циркуляции океана. Новосибирск, Наука, 1980, 288 с.

### ქ. თბილისის ატმოსფეროში მტვრის გავრცელების რიცხვითი მოდელირება.

### III. დასავლეთის ფონური ძლიერი ქარის შემთხვევა

### სურმავა ა., ინწკირველი ლ., გვერდნითელი ლ.

#### რეზიუმე

ატმოსფერული პროცესების ევოლუციის 3D რეგიონალური მოდელისა და მინარევების გადანა - დიფუზიის განტოლების ერთობლივი ინტეგრირებით რიცხვობრივად მოდელირებული და გაანალიზირებულია მტვრის გავრცელება ქ. თბილისის ტერიტორიაზე დასავლეთის ფონური ძლიერი ქარის დროს. დაშვებულია, რომ ატმოსფეროს დაბინძურების ძირითად წყაროს წარმოადგენს ქალაქის ქუჩებსა და მაგისტრალზე მოძრავი ავტოტრანსპორტი. მოდელირებით მიღებულია მტვრის სივრცითი განაწილების სურათები დროის სხვადასხვა მომენტისათვის. დადგენილია, რომ მტვრის გავრცელების პროცესი ძლიერი ფონური ქარის შემთხვევაში ხასიათდება დროში ცვლილების და სივრცული განაწილების თავისებურებებით. განსაზღვრულია მაღალი დამტვრიანების ზონები, მტვრის დაგროვების და დროში მათი ცვლილების მიზეზები. დადგენილია, რომ მაღალი დამტვრიანება (1.2 –2.0 ზდგ) მიიღება დროის 15.00-დან 21.00 სთ-მდე ინტერვალში მიწისპირა ფენის ქვედა 50 მეტრამდე ფენაში.

საკვანძო სიტყვები: რიცხვითი მოდელირება, დაბინძურების წყარო, მტვრის გავრცელება, დასავლეთის ფონური ქარი

**NUMERICAL MODELLING OF DUST PROPAGATION IN THE ATMOSPHERE OF TBILISI CITY:  
III. THE CASE OF EASTERN BACKGROUND FRESH BREEZE**

**Surmava A., Intskirveli L., Gverdtsiteli L.**

**A b s t r a c t**

The distribution of dust on the territory of the city of Tbilisi with an average background westerly wind was studied using a regional three-dimensional model of the development of atmospheric processes 3D and integration of the transport-diffusion equation of impurities. In the model, road transport is considered as the main non-stationary source of pollution, from which dust is emitted into the atmosphere. The patterns of spatial distribution of dust at different time moments were obtained by means of modeling. It has been established that with a fresh background wind, the process of dust spreading is characterized by the peculiarities of change in time and dispersion in space. Areas of high dust content, dust accumulation and the reasons for their change over time have been determined. It is shown that a high level of dustiness (1.2 - 2.0 MPC) is observed in the time interval from 15.00 to 21.00 hours in the lower 50 m zone of the surface layer.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЫЛИ В АТМОСФЕРЕ  
Г.ТБИЛИСИ:  
III. СЛУЧАЙ ЗАПАДНОГО ФОНОВОГО СИЛЬНОГО ВЕТРА**

**Сурмава А., Инцкирвели Л., Гвердцители Л.**

**Р е ф е р а т**

Исследовано распространение пыли на территории города Тбилиси при сильном фоновом западном ветре с использованием региональной трехмерной модели развития атмосферных процессов 3D и интегрирования уравнения переноса-диффузии примесей. В модели движущийся на улицах и магистралях города автомобильный транспорт рассматривается как основной нестационарный источник загрязнения атмосферы. Путем моделирования получены картины пространственного распространения пыли в разные временные моменты. Установлено, что при сильном фоновом ветре процесс распространения пыли характеризуется особенностями изменения во времени и рассеивания в пространстве. Определены зоны высокой запыленности, накопления пыли и причины их изменения во времени. Показано, что высокий уровень запыленности (1.2 – 2.0 ПДК) наблюдается во временном интервале от 15.00 до 21.00 часа в нижней 50 метровой зоне приземного слоя.

## სეტყვიანობა საქართველოში 2014-2018 წწ.

**<sup>1</sup>ბეგლარაშვილი ნ., <sup>2</sup>ვარამაშვილი ნ., <sup>1</sup>ფიფია მ., <sup>2</sup>ჩიხლაძე ვ., <sup>2,3</sup>ჯანელიძე ი.**

<sup>1</sup>საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი

<sup>2</sup>ივ. ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის

მ. ნოდია სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი

<sup>3</sup>საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

*m.pipia@gtu.ge*

### შესავალი

საქართველო არის პატარა მთაგორიანი ქვეყანა, 15 კლიმატური ზონით, რომლის ტერიტორიაზეც დროდადრო ხდება სხვადასხვა სახის გეოფიზიკური კატასტროფები (მიწისძვრა, მეწყერი, ღვარცოფი, ზვავი, ძლიერი ქარი, წვიმა, თოვლი, ქარბუქი, სეტყვა, ნისლი, ჭექა-ქუხილი, ჰაერის ექსტრემალური ტემპერატურა, გვალვა, წყალდიდობა, ზღვის შტორმი და სხვ.) [1-12]. ამასთან საშიში ჰიდრომეტეოროლოგიური მოვლენების უმეტესი სახეობების განმეორადობისა და ინტენსივობის ცვალებადობაზე (მათ შორის სეტყვის პროცესებზე) მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ურბანიზაცია [13,14], კლიმატის ცვლილება [15-19], ატმოსფეროს ანთროპოგენული დაბინძურება [20-23].

რაც შეეხება სეტყვისგან მიყენებულ ზარალს, საქართველო ითვლება ერთ-ერთ სეტყვასა-შიშ ქვეყნად [24-28]. ამიტომ სეტყვიანობის პრობლემისადმი ჩვენს ქვეყანაში მრავალი ნაშრომი მიძღვნილი, რომლებიც კვლევის ფართო სპექტრს მოიცავს, დაწყებული სეტყვიანობის კლიმატოლოგიიდან [29-49] და სეტყვის პროცესების მრავალწლიური ვარიაციებიდან [50,51], დამთავრებული სეტყვის პროცესებზე ზემოქმედების მეთოდებითა და შედეგებით [27, 28, 52-54].

სეტყვიანობის ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი მახასიათებელია სეტყვიან დღეთა რაოდენობა. სეტყვიან დღეთა რაოდენობის განაწილება დიდწილად დამოკიდებულია რეგიონის ფიზიკურ და გეოგრაფიულ პირობებზე, განსაკუთრებით მის ოროგრაფიაზე. მთები, პლატოები და გორაკები დიდ გავლენას ახდენენ რთული მეტეოროლოგიური და კონვექციური პროცესების განვითარებაზე. მთიან და ალპურ ზონებში ჰაერის მიწისპირა ფენებში ტურბულენტობა იზრდება და ხელს უწყობს კონვექციური ღრუბლიანობის ზრდას, რაც გავლენას ახდენს სეტყვიან დღეთა რაოდენობის განაწილებაზე.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, სეტყვის კლიმატოლოგიის შესახებ საქართველოში მრავალი ნაშრომი გამოქვეყნებული. ახალი მონაცემების დაგროვებასთან ერთად, ხდება საქართველოში სეტყვიანობის შესახებ ინფორმაციის მუდმივად განახლება.

ეს ნამუშევარი წინა კვლევების გაგრძელებაა [26, 48]. ქვემოთ, საქართველოს გარემოს დაცვის სააგენტოს მონაცემებზე დაყრდნობით, წარმოდგენილია 2014 წლიდან 2018 წლამდე პერიოდის განმავლობაში სეტყვიან დღეთა რაოდენობისა და მის მიერ მიყენებული ზარალის კვლევების შედეგები.

### შედეგები

ცხრილი 1 გვიჩვენებს მონაცემებს სეტყვიან დღეთა რიცხვის, სეტყვისგან დაზიანებული ადგილების რაოდენობისა და სეტყვისგან მიყენებული ზარალის შესახებ 2014-2018 წლებში საქართველოს 11 რეგიონში. აქვე მოცემულია მონაცემები სეტყვის მარცვლის ზომებზე, სეტყვის ხანგრძლივობაზე და სინოპტიკური პროცესების ტიპზე სეტყვიან დღეებში.

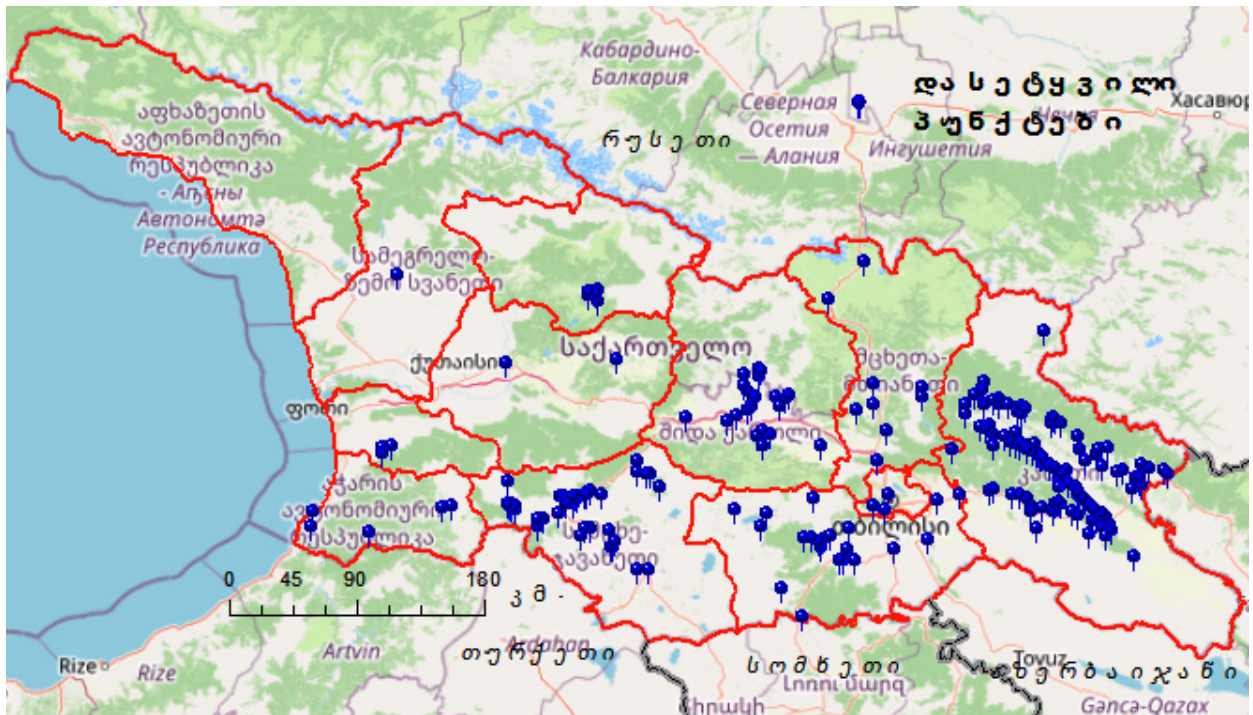
სიცხადისთვის, ნახ. 1-ში მოცემულია დასეტყვილი ადგილების განაწილების რუკა საქართველოს ტერიტორიაზე საკვლევი პერიოდისთვის.

როგორც ცხრილი 1-დან, მოცემული ხუთწლიანი პერიოდის განმავლობაში სეტყვიან დღეთა რიცხვი საქართველოს ტერიტორიაზე მერყეობს 1-დან (გურია, სამეგრელო-ზემო სვანეთი) 52-მდე (კახეთი). ამავე დროს, დასეტყვილი ადგილების რაოდენობა 1-დან (სამეგრელო-ზემო სვანეთი) 168-მდე (კახეთი) მერყეობს. უნდა აღინიშნოს, რომ სეტყვის პროცესების ასეთი განაწილება საქართველოს ტერიტორიაზე არც ისე მოულოდნელია და ხშირად ეს ნახსენებია ჩვენს ადრეულ კვლევებში [1, 3, 26, 37, 41, 42, 44, 45, 50, 51]. კახეთში სეტყვის ძალიან მაღალი აქტივობისა და სოფლის მეურნეობის კულტურებისათვის სეტყვიანობის შედეგად მიყენებული მნიშვნელოვანი ზიანის გათვალისწინებით, საქართველოს ამ რეგიონში, 2015 წლიდან განახლებულია სეტყვის საწინააღმდეგო სამუშაოები [52, 53]. ამ სამუშაოებმა შესაძლებელი გახადა სეტყვისგან მიყენებული ზარალის მნიშვნელოვნად შემცირება [54].

ცხრილი 1. მონაცემები სეტყვიანობისა და მისგან მიყენებული ზარალის შესახებ საქართველოს სხვადასხვა რეგიონში (2014-2018)

რეგიონი	მუნიციპალიტეტი	სეტყვიან დღეთა რიცხვი (დასეტყვილი პუნქტები)	ზიანი	ხანგრძლივობა (წთ.)	პროცესის ტიპი
აჭარა	ბათუმი ხელვაჩაური ხულო ქედა	3 (5)	სეტყვამ დააზიანა სოფლის მეურნეობის კულტურები		
გურია	ოზურგეთი	1 (3)	სეტყვამ შეაფერხა საავტომობილო მოძრაობა	15	
სამეგრელო-ზემო სვანეთი	წალენჯიხა	1 (1)	სეტყვამ გაანადგურა ნათესები		
რაჭა-ლეჩხუმი	ამბროლაური	3 (7)	დააზიანდა სოფლის მეურნეობის კულტურები	12	
იმერეთი	ქუთაისი ჭიათური	2 (2)	დააზიანდა სოფლის მეურნეობის კულტურები, სახლის სახურავები		დასავლეთის პროცესი
სამცხე-ჯავახეთი	ყველა მუნიციპალიტეტი	32 (61)	სეტყვამ გაანადგურა ნათესები, დააზიანა ბაღები და სავარგულები, სეტყვის მარცვლის დიამეტრმა ბაკურიანში შეადგინა 18 მმ. სტიქიური უბედურების შედეგად დაზიანებულ იქნა ნაციონალური პარკის დიდი	10-20	დასავლეთის პროცესი

			ნაწილი ბორჯომის მუნიციპალიტეტში, დაიმტვრა ხეები, დაიმსხვრა ფანარები.		
ქვემო ქართლი	რუსთავი, ბოლნისი, დმანისი, წალკა თეთრი წყარო გარდაბნი მარნეული	23 (38)	დაზიანდა სასოფლო-სამეურნეო კულტურები. წალკის მუნიციპალიტეტში სეტყვის მარცვლის დიამეტრი შეადგენდა 24 მმ.		
მცხეთა-მთიანეთი	მცხეთა, დუშეთი თიანეთი ყაზბეგი სტეფანწმინდა	12 (16)	დაზიანებულ იქნა ვენახები, ბოსტნეული კულტურები, ხეხილი.		შიდამასური პროცესი, დასავლეთის პროცესი
თბილისი	თბილისი	10 (11)	სეტყვამ დააზიანა ავტოტრანსპორტი		
შიდა ქართლი	გორი, კასპი, ქარელი ხაშური	16 (28)	კატასტროფულმა სტიქიამ შიდა ქართლში გაანადგურა ხეხილის უდიდესი ნაწილი, ვენახები, სასოფლო-სამეურნეო კულტურები. ქ. გორში დაიტბორა ეზოები და ქუჩები, შეფერხდა სატრანსპორტო მოძრაობა.	20	დასავლეთის პროცესი, აღმოსავლეთის პროცესი, შიდამასური პროცესი
კახეთი	ყველა მუნიციპალიტეტები	52 (168)	განადგურდა სასოფლო-სამეურნეო მიწები, დაიხოცა შინაური ფრინველი, დაზიანდა ვენახები და ბაღები, სატყვის მარცვლის დიამეტრი ზოგიერთ შემთხვევაში აღწევდა 23 მმ.	5-30	დასავლეთის პროცესი, აღმოსავლეთის პროცესი, შიდამასური პროცესი



ნახ. 1. 2014-2018 წლებში დასეტყვილი ადგილების განაწილების რუკა საქართველოში.

კახეთში სეტყვიანობის შესახებ დეტალური მონაცემები 2014-2018 წლებში მოცემულია ადრეულ ნაშრომში [48]. აქვე აღვნიშნავთ, რომ სეტყვის ყველაზე მაღალი აქტივობა დაფიქსირდა თელავის მუნიციპალიტეტებში (17 დღე სეტყვით, 38 დასეტყვილი ადგილი) და გურჯაანის (16 დღე სეტყვით, 43 დასეტყვილი ადგილი), ყველაზე მცირე - დედოფლისწყაროს მუნიციპალიტეტში (2 დღე სეტყვით, 2 დასეტყვილი ადგილი). სეტყვის ხანგრძლივობა კახეთის რეგიონში 5-დან 30 წუთამდეა, ხოლო სეტყვის მარცვლის დიამეტრი 6-23 მმ-ია.

ქვემოთ განვიხილავთ ძლიერი სეტყვის და მისგან მიყენებული დაზიანების ცალკეულ შემთხვევებს საქართველოში:

21/05/16. თბილისი. დაზიანა ხეხილი, დააგლიჯა ხეებს ფოთლები, ნიადაგი სეტყვით დაიფარა.

10/1/2016. აჭარა. ბათუმის შემოგარენსა და ხელვაჩაურში სეტყვამ ციტრუსი დაზიანა.

3/15/2018. გურია. ოზურგეთის მუნიციპალიტეტის სოფლები: მაკვანათი, ლიხაური და შემოქმედი დაისეტყვა, ძლიერი სეტყვა დაახლოებით 19:00 დაიწყო და 15 წთ. გაგრძელდა. სეტყვის გამო შეფერხებული იყო ტრანსპორტით მოძრაობა.

24/07/15. კახეთი. სეტყვა დაახლოებით 23 საათზე დაიწყო და 5-10 წთ. გაგრძელდა. დაზიანდა საცხოვრებელი სახლები, დაისეტყვა ვენახები, დაიხოცა ფრინველი. 1500 - 2000 ჰა ვენახის 100% განადგურდა. სეტყვამ ვენახის გარდა სიმინდის, მზესუმზირის და საზამთროს ნარგავებიც გაანადგურა.

01/06/14. მცხეთა-მთიანეთი. დაზიანა ელ.გადამცემი ხაზები. დაზიანა ხეხილის ბაღები. დაზიანა სოფლის მეურნეობის კულტურები.

07/06/14. რაჭა-ლეჩხუმი. დაზიანა სოფლის მეურნეობის კულტურები.

20/05/17. სამეგრელო ზემო სვანეთი. სეტყვამ ნათესები გაანადგურა.

03/10/15. სამცხე-ჯავახეთი. სეტყვის შედეგად განადგურებულია საშემოდგომო მოსავალი. სტიქია დაახლოებით 15 წუთი გრძელდებოდა. ადგილობრივების ცნობით მოსავლის გარდა დაზიანებულია საცხოვრებელი სახლების სახურავები.

18/06/14. ქვემო ქართლი. განადგურდა ხეხილის, ვენახის 50%, დაზიანდა ბოსტნეული.

06/05/16. შიდა ქართლი. დაზიანდა სასოფლო-სამეურნეო კულტურები, დაზიანდა 6500 ჰა ხეხილი გორის რაიონის სოფლებში, ქარელის სოფლებში დაზიანდა 1200 ჰა.

### დასკვნა

ბოლო ხუთი წლის განმავლობაში საქართველოში სეტყვა ხშირია (განსაკუთრებით მის აღმოსავლეთ ნაწილში). აღმოსავლეთ საქართველოში სეტყვის უდიდესი ხანგრძლივობა ხასიათდება 10-30 წუთით და სეტყვის მარცვლების უდიდესი ზომა 20-25 მმ, რაც ძირითადად დაკავშირებულია დასავლეთის პროცესებთან.

სეტყვიანობის ყველაზე მაღალი აქტივობა, ისევე როგორც ადრე, აღინიშნება კახეთში.

კვლევის შედეგები, კერძოდ, შეიძლება სასარგებლო იყოს საქართველოში ამინდის მოდიფიკაციის ირგვლივ მომავალი სამუშაოების დაგეგმვისთვის.

### მადლობა

ავტორები მადლობას უხდებიან მ. ნოდის სახელობის გეოფიზიკის ინსტიტუტის ატმოსფეროს ფიზიკის სექტორის ხელმძღვანელს ა. ამირანაშვილს სამუშაოს შესრულებაში გაწეული დახმარებისთვის.

### ლიტერატურა - REFERENCES - ЛИТЕРАТУРА

1. Опасные гидрометеорологические явления на Кавказе. Под ред. Сванидзе Г.Г. и Цуцкиридзе Я.А., Л., Гидрометеоиздат, 1980, 288 с.
2. Elizbarashvili E.Sh., Elizbarashvili M. E. Extreme Weather Events over the Territory of Georgia. 2012, Tbilisi (in Russian).
3. Varazanashvili O., Tsereteli N., Amiranashvili A., Tsereteli E., Elizbarashvili E., Dolidze J., Qaldani L., Saluqvadze M., Adamia Sh., Arevadze N., Gventadze A. Vulnerability, hazards and multiple risk assessment for Georgia. Natural Hazards, Vol. 64, Number 3 (2012), 2021-2056, DOI: 10.1007/s11069-012-0374-3, <http://www.springerlink.com/content/9311p18582143662/fulltext.pdf>
4. Tatishvili M., Elizbarashvili E., Elizbarashvili Sh., Meskhia R., Elizbarashvili M. Natural Hydrometeorological Disasters, their Causes and Prevention Measures. The Macrotheme Review. A multidisciplinary journal of global macro trends. A Macro theme Capital Management, LLC Academic Publication, vol. 2, iss. 1, ISSN 1848-4735, France, Winter (January) 2013, pp. 148-154.
5. Amiranashvili A.G. Increasing Public Awareness of Different Types of Geophysical Catastrophes, Possibilities of Their Initiation as a Result of Terrorist Activity, Methods of Protection and Fight with Their Negative Consequences. Engaging the Public to Fight Consequences of Terrorism and Disasters. NATO Science for Peace and Security Series E: Human and Societal Dynamics, vol. 120. IOS Press, Amsterdam•Berlin•Tokyo•Washington, DC, ISSN 1874-6276, 2015, pp.155-164. <http://www.nato.int/science>; <http://www.springer.com>; <http://www.iospress.nl>
6. Pipia M., Elizbarashvili E., Amiranashvili A., Beglarashvili N. Dangerous Regions of Blizzard in Georgia. Annals of Agrarian Science, ISSN 1512-1887, vol. 17, No 4, 2019, pp. 403 – 408.
7. Amiranashvili A., Dolidze J., Tsereteli N., Varazanashvili O. Statistical Characteristics of Flash Flood in Georgia. Papers of Int. Simp. On Floods and Modern Methods of Control Measures, ISSN 1512-2344, 23-28 September 2009, Tbilisi, pp. 28-36.
8. Amiranashvili A.G. Special Features of Changeability of Daily Sum of Precipitation in Tbilisi in 1957-2006. Journal of the Georgian Geophysical Society, Issue B. Physics of Atmosphere, Ocean and Space Plasma, v.18B, Tbilisi, 2015, pp.81-91.
9. Beglarashvili N., Janelidze I., Pipia M., Varamashvili N. Heavy Rainfall, Floods and Floodings in Kakheti (Georgia) in 2014-2018. . Int. Sc. Conf. „Modern Problems of Ecology“, Proceedings, ISSN 1512-1976, v. 7, Tbilisi-Telavi, Georgia, 26-28 September, 2020, pp. 180-184.
10. Amiranashvili A., Kereselidze Z., Mitin M., Khvedelidze I., Chikhladze V. Alarming Factors of the Microclimate of the Vere River Valley and their Influence on the Floods Intensity. Trans. of Mikheil Nodia institute of Geophysics, ISSN 1512-1135, vol. 69, Tb., 2018, pp. 204 – 218, (in Georgian).
11. ბერიტაშვილი ბ., ცინცაძე თ., კაპანაძე ნ. ნალექთა ხელოვნური გაზრდის სამუშაოები საქართველოში. მომოგრაფია, ISBN 978-9941-8-2658-0, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტე, თბილისი, 2020, 120 გვ.
12. Amiranashvili A., Chelidze T., Dalakishvili L., Svanadze D., Tsamalashvili T., Tvauri G. -Preliminary Results of a Study of the Relationship Between the Variability of the Mean Annual Sum of Atmospheric Precipitation



- and Landslide Processes in Georgia. Int. Sc. Conf. „Modern Problems of Ecology“, Proceedings, ISSN 1512-1976, v. 7, Tbilisi-Telavi, Georgia, 26-28 September, 2020, pp. 202-206.
13. Amiranashvili A., Bliadze T., Chikhladze V. Photochemical smog in Tbilisi. Monograph, Trans. of Mikheil Nodia institute of Geophysics, ISSN 1512-1135, vol. 63, Tb., 2012, 160 p., (in Georgian).
  14. Amiranashvili A.G., Amiranashvili V.A., Gzirishvili T.G., Kharchilava J.F., Tavartkiladze K.A. Modern Climate Change in Georgia. Radiatively Active Small Atmospheric Admixtures, Institute of Geophysics, Monograph, Trans. of M. Nodia Institute of Geophysics of Georgian Acad. of Sc., ISSN 1512-1135, v. LIX, 2005, 128 p.
  15. Amiranashvili A. Changeability of Air Temperature and Atmospheric Precipitations in Tbilisi for 175 Years. International Scientific Conference “Natural Disasters in Georgia: Monitoring, Prevention, Mitigation”. Proceedings, ISBN 978-9941-13-899-7, Publish House of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, December 12-14, Tbilisi, 2019, pp. 86-90.
  16. Bliadze T., Gvasalia G., Kirkitadze D., Mekoshkishvili N. Changeability of the Atmospheric Precipitations Regime in Kakheti in 1956-2015. Int. Sc. Conf. “Natural Disasters in Georgia: Monitoring, Prevention, Mitigation”. Proc., ISBN 978-9941-13-899-7, Publish House of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, December 12-14, Tbilisi, 2019, pp. 74-77.
  17. Miqautadze D., Kvabziridze M. Assessing the Repeatability of Extreme Rainfalls in the Background of Revealed Climate Change Of Kutaisi. Int. Sc. Conf. “Natural Disasters in Georgia: Monitoring, Prevention, Mitigation”. Proc., ISBN 978-9941-13-899-7, Publish House of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, December 12-14, Tbilisi, 2019, pp. 101-104.
  18. Tatishvili M.R., Kartvelishvili L.G., Mkurnalidze I.P. Thunderstorm and Hail Processes over Georgian Territory. Against Global Climate Change Background. Journal of the Georgian Geophysical Society, ISSN: 1512-1127, Iss. B, Physics of Atmosphere, Ocean and Space Plasma, vol. 19B, Tb., 2016, pp. 111-119.
  19. Amiranashvili A., Bliadze T., Kartvelishvili L. Statistical Characteristics of Monthly Sums of Atmospheric Precipitations in Tianeti (Georgia) in 1956-2015. Trans. of Mikheil Nodia Institute of Geophysics, ISSN 1512-1135, vol. 70, Tb., 2019, pp. 112-118, (in Russian).
  20. Amiranashvili A.G., Gzirishvili T.G., Chumburidze Z.A. On the Role of Artificial Ice Forming Reagents and Radioactive Intermixtures in the Variation of Convective Clouds Thunderstorm and Hail Activity. Proc. 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Clouds and Precipitation, Zurich, Switzerland, August 19-23, vol. 1, 1996, 267-270.
  21. Amiranashvili A., Nodia A., Khurodze T., Kartvelishvili L., Chumburidze Z., Mkurnalidze I., Chikhradze N. Variability of Number of Hail and Thunderstorm Days in the Regions of Georgia with Active Influence on Atmospheric Processes. Bull. of the Georgian Acad. of Sc., 172, N3, 2005, pp. 484-486.
  22. Аджиев А.Х., Амиранашвили А.Г., Чаргазия Х.З. Влияние аэрозольного загрязнения атмосферы на эффективность противорадовых работ в Кахетии и на Северном Кавказе. Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР, 7-9 октября 2014 г., часть 2, ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Нальчик, 2015, с. 387-395.
  23. Amiranashvili A. Influence of the Anthropogenic Pollution of Atmosphere on the Changeability of Hail Processes Intensity. Trans. of Mikheil Nodia Institute of Geophysics, ISSN 1512-1135, vol. 64, Tb., 2013, pp. 160 – 177, (in Russian).
  24. Amiranashvili A., Bakgsoliani B., Begalishvili N., Beritashvili B., Rekhviashvili R., Tsintsadze T., Chitanava R. On the Necessity of Resumption of Atmospheric Processes Modification Activities in Georgia. Trans. of the Institute of Hydrometeorology, Georgian Technical University, ISSN 1512-0902, 2013, vol. 119, pp.144-152, (in Russian).
  25. Amiranashvili A., Dzodzuashvili U., Lomtadze J., Sauri I., Chikhladze V. Some Characteristics of Hail Processes in Kakheti. Trans. of Mikheil Nodia Institute of Geophysics, ISSN 1512-1135, vol. 65, Tb., 2015, pp. 77 – 100, (in Russian).
  26. Janelidze I., Pipia M. Hail Storms in Georgia in 2016-2018. Int. Sc. Conf. “Natural Disasters in Georgia: Monitoring, Prevention, Mitigation”. Proc., ISBN 978-9941-13-899-7, Publish House of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, December 12-14, Tbilisi, 2019, pp. 144 -146.
  27. Amiranashvili A.G. History of Active Effects on Atmospheric Processes in Georgia. In the book: Essays of the History of Weather Modification in the USSR and the Post-Soviet Territory, ISBN 978-5-86813-450-0, St. Petersburg, RSHMU, 2017, 352 pp., ill., pp. 234-254, (in Russian), <http://mig-journal.ru/toauthor?id=4644>.
  28. ამირანაშვილი ა., კვესელავა ნ., ლლონტი ნ., ჩიხლაძე ვ., ცინცაძე თ. ბუნებრივ მოვლენებზე აქტიური ზემოქმედების ჩატარების ისტორია საქართველოში. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „ეკოლოგიის თანამედროვე პრობლემები“, შრომები, ISSN 1512-1976, ტ. 7, თბილისი-თელავი, საქართველო, 26-28 სექტემბერი, 2020, გვ. 147-152.
  29. Курдиани И.Г. О грозах и градобитиях в Кахетии. Тбилиси, Груз. геогр. общ., 1935.
  30. Шацкий А.Л. Град в Грузии. Бюллетень НИИ виноградарства и виноделия Грузинской ССР, Тбилиси, 1938, 56 с.
  31. Гигинеишвили В.М. Градобития в восточной Грузии. Ленинград, Гидрометеиздат, 1960, 123 с.
  32. Бартишвили И.Т. Географическое распределение градобитий по Восточной Грузии. Тр. ЗакиНИГМИ, вып. 16 (22), Л., Гидрометеиздат, 1964, с. 71-79.

33. Бартишвили И.Т., Бартишвили Г.С. Характеристики градобитий и градин., Тр. ЗакНИГМИ, вып. 16 (22), Л., Гидрометеоздат, 1964, с. 80-83.
34. Балабуев А.Г. Анализ данных о градовых явлениях в районе долин рек Иори и Алазани, Тр. Ин-та геофизики АН ГССР, т. 25, вып. 1, «Мецниереба», 1967, с. 56-64.
35. Ахвледиани Я.Р., Ломая О.В., Саркисова Л.С. Градовые явления в Алазанской долине по данным метеорологических станций, Тр. Ин-та геофизики АН ГССР, т. 25, вып. 1, «Мецниереба», 1967, с. 65-74.
36. Воронов Г.С., Махарашвили П.И. Градовые явления в Алазанской долине по данным экспедиционных наблюдений, Тр. Ин-та геофизики АН ГССР, т. 25, вып. 1, «Мецниереба», 1967, с. 75-80.
37. Сулаквелидзе Г.К., Сулаквелидзе Я.Г. Распределение градобитий на территории Закавказья, Тр. ВГИ, вып. 76, М., Гидрометеоздат, 1989, с. 110-115.
38. Климат Тбилиси. Под ред. Сванидзе Г.Г. и Папинашвили Л.К. Санкт-Петербург, Гидрометеоздат, 1992, 230 с.
39. Amiranashvili A., Amiranashvili V., Doreuli R., Khurodze T., Kolesnikov Yu. Some Characteristics of Hail Processes in the Kakheti Region of Georgia. Proc.13th Int. Conf. on Clouds and Precipitation, Reno, Nevada, USA, August 14-18, vol.2, 2000, pp. 1085-1087.
40. ამირანაშვილი ა., ამირანაშვილი ვ., ღლიაძე თ., ნოდია ა., ჩიხლაძე ვ., ბახსოლიანი მ., ხუროძე თ. კახეთში სეტყვიანობის მრავალწლიური ცვალებადობის თავისებურებანი, საქ. მეცნ. აკად. ვახუშტი ზაგრატიონის სახ. გეოგრაფიის ინსტიტუტის შრომები, ტომი № 21, USSN 1512-1224, თბილისი, 2003, გვ. 58-79.
41. Amiranashvili A.G., Nodia A.G., Toronjadze A.F., Khurodze T.V. Some Statistical Characteristics of the Number of Days with Hail into the Warm Half-Year in Georgia in 1974-1990. Trans. of Institute of Geophysics of Acad. of Sc. of Georgia, ISSN 1512-1135, v. 58, 2004, pp. 133-141, (in Russian).
42. Amiranashvili A., Varazanashvili O., Nodia A., Tsereteli N., Khurodze T. Statistical Characteristics of the Number of Days with Hail Per Annum in Georgia. Trans. of the Institute of Hydrometeorology, ISSN 1512-0902, vol. 115, Tb., 2008, pp. 427 – 433, (in Russian).
43. Амиранашвили А.Г., Блиадзе Т.Г., Нодия А.Г., Хуродзе Т.В. Оценка репрезентативности данных радиолокационных наблюдений за градовыми облаками в Кахетии для картирования территории Грузии по уровню градоопасности. Тр. Ин-та геофизики им. М.З. Нодиа, ISSN 1512-1135, том. 60, Тбилиси, 2008, с. 202–205.
44. Elizbarashvili E., Amiranashvili A., Varazanashvili O., Tsereteli N., Elizbarashvili M., Elizbarashvili Sh., Pipia M. Hailstorms in the Territory of Georgia. European Geographical Studies, Vol. 2, No. 2, 2014. Tbilisi, pp. 55-69, (in Russian).
45. Amiranashvili A., Varazanashvili O., Pipia M., Tsereteli N., Elizbarashvili M., Elizbarashvili E. Some Data About Hail Damages in Eastern Georgia and Economic Losses From Them. Reports, presented on the Scientific Conference “80 Years of the M. Nodia Institute of Geophysics”, 2014, Tbilisi, pp. 145-150. (in Russian).
46. Pipia M. G., Beglarashvili N. G. Hail Hits in Eastern Georgia. Journal of International Scientific Publications: Ecology and Safety, Volume 8, 2014, Burgas, pp. 567-573.
47. Amiranashvili A.G., Bliadze T.G., Jamrshvili N.K., Khurodze T.V., Pipia M.G., Tavidashvili Kh. Z. Comparative Analysis of the Distribution of Number of Days with Hail Per Annum on the Territory of Kakheti According to the Data of the Meteorological Stations and State Insurance Service of Georgia. Journal of the Georgian Geophysical Society, Issue A. Physics of Solid Earth, v.20A, 2017, Tbilisi, pp.44 -56.
48. Beglarashvili N., Janelidze I., Pipia M., Varamashvili N. Hail Storms In Kakheti (Georgia) in 2014-2018. Int. Sc. Conf. „Modern Problems of Ecology“, Proceedings, ISSN 1512-1976, v. 7, Tbilisi-Telavi, Georgia, 26-28 September, 2020, pp. 176-179.
49. Pipia M. Prospects for the Development of Anti-hail Works in Kakheti Region (Georgia) Taking Into Account Some Climatic Indices. Transactions of Mikheil Nodia Institute of Geophysics, vol. LXVI, 2016, Tbilisi, pp. 96-107. (in Georgia).
50. Amiranashvili A.G., Nodia A.G., Toronjadze A.F., Khurodze T.V. The Changeability of the Number of Days with the Hail in Georgia in 1941-1990. Trans. of Institute of Geophysics of Acad. of Sc. of Georgia, ISSN 1512-1135, v. 58, 2004, pp. 127-132, (in Russian).
51. Amiranashvili A.G., Amiranashvili V.A., Nodia A.G., Khurodze T.V., Toronjadze A.F., Bibilashvili T.N. Spatial-Temporary Characteristics of Number of Days with a Hails in the Warm Period of Year in Georgia. Proc. 14th International Conference on Clouds and Precipitation, Bologna, Italy, 18-July 2004, pp. 2\_2\_215. 1-2\_2\_215.2.
52. Amiranashvili A., Burnadze A., Dvalishvili K., Gelovani G., Ghlonti N., Dzodzuashvili U., Kaishauri M., Kveselava N., Lomtadze J., Osepashvili A., Sauri I., Telia Sh., Chargazia Kh., Chikhladze V. Renewal Works of Anti-Hail Service in Kakheti. Trans. of Mikheil Nodia institute of Geophysics, ISSN 1512-1135, vol. 66, Tb., 2016, pp. 14 – 27, (in Russian).
53. Amiranashvili A., Chikhladze V., Dzodzuashvili U., Ghlonti N., Sauri I., Telia Sh., Tsintsadze T. Weather Modification in Georgia: Past, Present, Prospects for Development. International Scientific Conference “Natural Disasters in Georgia: Monitoring, Prevention, Mitigation”. Proceedings, ISBN 978-9941-13-899-7, Publish House of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, December 12-14, Tbilisi, 2019, pp. 216-222.

54. Amiranashvili A., Chikhladze V., Kveselava N., Sauri I. Some Results of Anti-Hail Works in Kakheti into 2016-2019. Int. Sc. Conf. „Modern Problems of Ecology“, Proceedings, ISSN 1512-1976, v. 7, Tbilisi-Telavi, Georgia, 26-28 September, 2020, pp. 153-156.

### **სატყვიანობა საქართველოში 2014–2018 წწ.**

**ბეგლარაშვილი ნ., ვარამაშვილი ნ., ფიფია მ., ჩიხლაძე ვ., ჯანელიძე ი.**

#### **რ ე ზ ი უ მ ე**

წარმოდგენილია საქართველოს გარემოს დაცვის სააგენტოს მონაცემების ანალიზი სეტყვიან დღეთა რიცხვსა და მისგან მიყენებული ზარალის შესახებ საქართველოს სხვადასხვა რეგიონში 2014-2018 წლებში. მოცემულ ხუთწლიან პერიოდში სეტყვიან დღეთა რიცხვი საქართველოს ტერიტორიაზე მერყეობს 1 – დან (გურია, სამეგრელო – ზემო სვანეთი) 52 – მდე (კახეთი). დასეტყვილი ადგილების რაოდენობა იცვლება 1 – დან (სამეგრელო – ზემო სვანეთი) 168 – მდე (კახეთი). შედგენილ იქნა 2014-2018 წლებში დასეტყვილი ადგილების განაწილების რუკა. განხილულია ცალკეული შემთხვევები ძლიერი სეტყვისა და მისგან მიყენებული ზარალის შესახებ საქართველოში.

საკვანძო სიტყვები: სეტყვიანობა, საშიში მეტეოროლოგიური მოვლენები, გეოსინფორმაციული რუკები.

### **HAIL STORMS IN GEORGIA IN 2014-2018**

**Beglarashvili N., Varamashvili N., Pipia M., Chikhladze V., Janelidze I.**

#### **A b s t r a c t**

An analysis of the data of the Environment Agency of Georgia on the number of days with hail and the damage caused by it in various regions of Georgia in the period from 2014 to 2018 is presented. The number of days with hail on the territory of Georgia during the specified five-year period of time varies from 1 (Guria, Samegrelo-Zemo Svaneti) to 52 (Kakheti). The number of places affected by hail attacks varies from 1 to Samegrelo-Zemo Svaneti) to 168 (Kakheti). A map of the distribution of places subjected to hail damage on the territory of Georgia in 2014-2018 was built. Individual cases with severe hail storms and damage from them in Georgia are considered.

**Key Words:** Hail storm, dangerous meteorological phenomena, geoinformation map.

### **ГРАДОБИТИЯ В ГРУЗИИ В 2014-2018 ГГ.**

**Бегларашвили Н., Варамашвили Н., Пипия М., Чихладзе В., Джanelidze И.**

#### **Р е ф е р ა ტ**

Представлен анализ данных Агентства по окружающей среде Грузии о числе дней с градом и нанесенному ущербу от него в различных регионах Грузии в период с 2014 по 2018 гг. Число дней с градом на территории Грузии в указанный пятилетний период времени меняется от 1 (Гурия, Самегрело-Земо Сванети) до 52 (Кახეთия). Количестве мест, подвергшихся градобитиям, меняется от 1 до Самегрело-Земо Сванети) до 168 (Кახეთия). Построена арта распределения мест, подвергшихся градобитиям на территории Грузии в 2014-2018 гг. Рассмотрены отдельные случаи с сильными градобитиями и ущерба от них в Грузии.

**Ключевые слова:** град, опасные метеорологические явления, геоинформационная карта.

## კახეთში 2016-2020 წწ. სეტყვასაწინააღმდეგო სამუშაოების ზოგიერთი შედეგები

<sup>2</sup>ამირანაშვილი ა., <sup>1</sup>კვესელავა ნ., <sup>1</sup>ქვილითაია ნ., <sup>1</sup>საური ი., <sup>1</sup>შავლაყაძე შ.,  
<sup>2</sup>ჩიხლაძე ვ.

<sup>1</sup>სსიპ სახელმწიფო სამხედრო სამეცნიერო-ტექნიკური ცენტრი "დელტა", თბილისი, საქართველო  
<sup>2</sup>ივანე ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის  
მიხეილ ნოდია სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი, თბილისი, საქართველო  
[nkveselava@delta.gov.ge](mailto:nkveselava@delta.gov.ge)

### შესავალი

კახეთი ითვლება ერთ-ერთ სეტყვასაშიშ რეგიონად საქართველოსა და მსოფლიოში [1-7]. 1967-1989 წლებში აქ ტარდებოდა სეტყვისგან დაცვის საწარმოო სამუშაოები [8-10], რომლებიც განახლდა 2015 წელს და გრძელდება დღემდე [11-13].

სეტყვის საწინააღმდეგო სამსახური აღჭურვილია თანამედროვე რადიოლოკატორით [12,13], ღრუბლებზე ზემოქმედების საშუალებებით (რაკეტები) [14-18] და ზემოქმედების ავტომატიზირებული დისტანციური მართვის სისტემით [13,19].

რეგულარულად ტარდება სეტყვასაწინააღმდეგო სამსახურის მუშაობის შედეგების შემოწმება და ანალიზი ამ სამსახურის ეფექტიანობის გაუმჯობესების და საქართველოში ამინდის მოდიფიცირების არეალის გაფართოების მიზნით [8,13].

განსაკუთრებული ყურადღება ექცევა სეტყვის საწინააღმდეგო სამუშაოების ფიზიკური და ეკონომიური ეფექტურობის შეფასებას [20-23]. კერძოდ, 2015-2019 წწ. სამსახურის ეკონომიური ეფექტურობა საშუალოდ შეადგინა არა ნაკლებ 28 მლნ ლარი [22,23].

ეს ნაშრომი წინა კვლევების გაგრძელებაა [22, 23]. ქვემოთ მოცემულია სეტყვასაწინააღმდეგო სამსახურის 2016-2020 წლების მუშაობის ზოგიერთი შედეგი, მათ შორის მონაცემები ფიზიკური ეფექტურობის შესახებ.

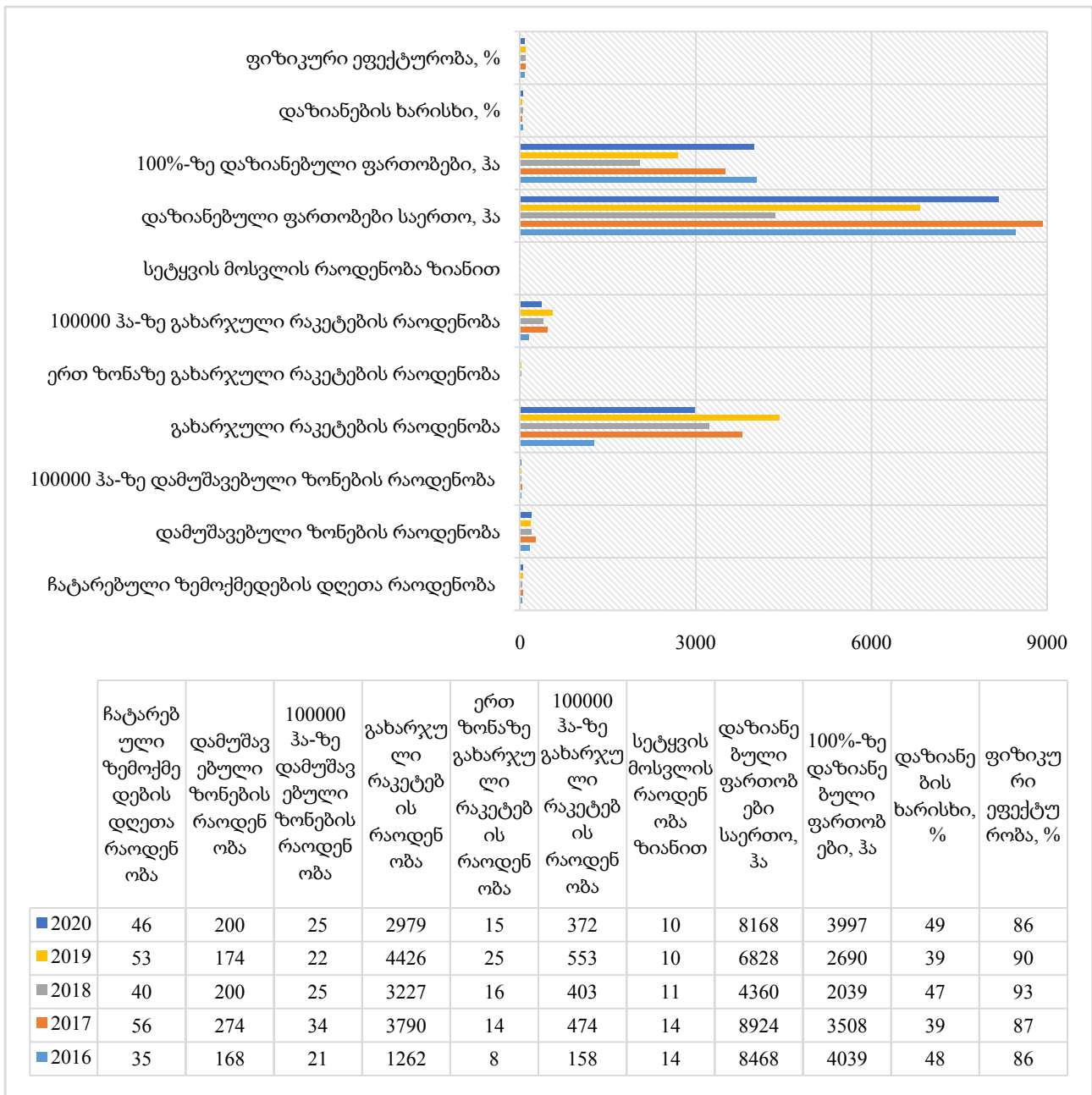
### დამუშავების მეთოდიკა

მონაცემების დამუშავებისთვის გამოყენებულია სტანდარტული სტატისტიკური მეთოდები. ქვემოთ მოყვანილია შემდეგი აღნიშვნები: Mean - საშუალო; Min - მინიმუმი; Max - მაქსიმუმი; St Dev - სტანდარტული გადახრა; Cv, % - ვარიაციის კოეფიციენტი; St Err - სტანდარტული ცდომილება; 99%\_Low - საშუალოს 99%-ის ქვედა დონე ; 99%\_Upp - საშუალოს 99%-ის ზედა დონე.

სეტყვასაწინააღმდეგო სამუშაოების ფიზიკური ეფექტურობა შეფასებულია დაზიანებული ფართობების მონაცემების საფუძველზე სეტყვისგან ზარალის ისტორიული რიგების გამოყენების ცნობილი მეთოდის საშუალებით [1, 20-22]

### შედეგები

შედეგები წარმოდგენილია ნახ. 1- ში და ცხრილი 1 - ში.



ნახ. 1. სეტყვის პროცესების ზოგიერთი მახასიათებლის და მათზე აქტიური ზემოქმედების პარამეტრების მნიშვნელობები 2016-2020 წწ.

როგორც ნახ. 1- დან ჩანს, სეტყვის პროცესების ზოგიერთი მახასიათებლის და მათზე აქტიური ზემოქმედების პარამეტრების ცვალებადობა 2016-2022 წწ. შემდეგია:

- ჩატარებული ზემოქმედების დღეთა რაოდენობა: 35-56;
- დამუშავებული ზონების რაოდენობა: 168-274;
- 100000 ჰა-ზე დამუშავებული ზონების რაოდენობა: 21-34;
- გახარჯული რაკეტების რაოდენობა: 1262-4426;
- ერთ ზონაზე გახარჯული რაკეტების რაოდენობა: 8-25;
- 100000 ჰა-ზე გახარჯული რაკეტების რაოდენობა: 158-553;
- სეტყვის მოსვლის რაოდენობა ზიანით: 10-14;
- დაზიანებული ფართობები საერთო: (4360-8924) ჰა

- 100%-ზე დაზიანებული ფართობები: (2039-4039) ჰა;
- დაზიანების ხარისხი: (39-49) %
- სეტყვის საწინააღმდეგო სამუშაოების ფიზიკური ეფექტურობა დაზიანებული ფართობების მიხედვით - (86-93)%.

ცხრილი 1. სეტყვის პროცესების ზოგიერთი მახასიათებლის და მათზე აქტიური ზემოქმედების პარამეტრების სტატისტიკური მონაცემები 2016-2020 წწ.

მახასიათებელი	Mean	Min	Max	St Dev	Cv, %	St Err	99%_Low	99%_Upp
ჩატარებული ზემოქმედების დღეთა რაოდენობა	46	35	56	8.7	19.0	4.4	35	57
დამუშავებული ზონების რაოდენობა	203	168	274	42.2	20.8	21.1	149	258
100000 ჰა-ზე დამუშავებული ზონების რაოდენობა	25	21	34	5.3	20.8	2.6	19	32
გახარჯული რაკეტების რაოდენობა	3137	1262	4426	1187	37.8	594	1608	4666
ერთ ზონაზე გახარჯული რაკეტების რაოდენობა	16	8	25	6.4	41.4	3.2	7	24
100000 ჰა-ზე გახარჯული რაკეტების რაოდენობა	392	158	553	148	37.8	74.2	201	583
სეტყვის მოსვლის რაოდენობა ზიანით	12	10	14	2.0	17.4	1.0	9	14
დაზიანებული ფართობები საერთო, ჰა	7350	4360	8924	1845	25.1	922	4974	9725
100%-ზე დაყვანილი დაზიანებული ფართობები, ჰა	3255	2039	4039	870	26.7	435	2134	4375
დაზიანების ხარისხი, %	44	39	49	4.7	10.6	2.3	38	50
ფიზიკური ეფექტურობა დაზიანებული ფართობების მიხედვით, %	88	86	93	3.1	3.5	1.6	84	92

კერძოდ, ცხრილი 1-დან ჩანს, რომ სეტყვის პროცესების ზოგიერთი მახასიათებლის საშუალო წლიური მნიშვნელობები და მათზე აქტიური ზემოქმედების პარამეტრები შემდეგია:

- ჩატარებული ზემოქმედების დღეთა რაოდენობა -  $46 \pm 4$ ;
- დამუშავებული ზონების რაოდენობა -  $203 \pm 54$ ;
- 100000 ჰა-ზე დამუშავებული ზონების რაოდენობა -  $25 \pm 7$ ;
- გახარჯული რაკეტების რაოდენობა -  $3137 \pm 1529$ ;
- ერთ ზონაზე გახარჯული რაკეტების რაოდენობა -  $16 \pm 8$ ;
- 100000 ჰა-ზე გახარჯული რაკეტების რაოდენობა -  $392 \pm 191$ ;
- სეტყვის მოსვლის რაოდენობა ზიანით -  $12 \pm 3$ ;

- დაზიანებული ფართობები საერთო - (7350±2326) ჰა
- 100%-ზე დაზიანებული ფართობები - (3255±1120) ჰა;
- დაზიანების ხარისხი - (44±6) %
- სეტყვის საწინააღმდეგო სამუშაოების ფიზიკური ეფექტურობა დაზიანებული ფართობების მიხედვით - (88±4)%, მათ შორის, 2020 წ. - 86%.

## დასკვნა

ჩატარებულია კახეთში 2016-2020 წწ. სეტყვის პროცესების ზოგიერთი მახასიათებლის მნიშვნელობების და მათზე აქტიური ზემოქმედების პარამეტრების სტატისტიკური ანალიზი, მათ შორის სეტყვის საწინააღმდეგო სამუშაოების ფიზიკური ეფექტურობის შეფასება. ასეთი კვლევები მომავალშიც პერმანენტულად გაგრძელდება. 2020 წლის სეტყვის საწინააღმდეგო სამსახურის ეკონომიკური ეფექტურობა შეფასდება უახლოეს პერიოდში.

## ლიტერატურა - REFERENCES - ЛИТЕРАТУРА

1. Abshaev A.M., Abshaev M.T., Berekova M.V., Malkarova A.M. Rukovodstvo po organizacii i provedeniu protivogradovih rabot. ISBN 978-5-905770-54-8, Nalchik, Pechatni dvor, 2014, 500 s, (in Russian).
2. Varazanashvili O., Tsereteli N., Amiranashvili A., Tsereteli E., Elizbarashvili E., Dolidze J., Qaldani L., Saluqvadze M., Adamia Sh., Arevadze N., Gventcadze A. Vulnerability, Hazards and Multiple Risk Assessment for Georgia. Natural Hazards, Vol. 64, Number 3 (2012), 2021-2056, DOI: 10.1007/s11069-012-0374-3, <http://www.springerlink.com/content/9311p18582143662/fulltext.pdf>.
3. Amiranashvili A., Varazanashvili O., Pipia M., Tsereteli N., Elizbarashvili M., Elizbarashvili E. Some Data About Hail Damages in Eastern Georgia and Economic Losses from Them. Reports, presented on the Scientific Conference “80 years of M. Nodia Institute of Geophysics”. Tbilisi, 2014, pp. 145-150, (in Russian).
4. Elizbarashvili E. Sh., Amiranashvili A. G., Varazanashvili O. Sh., Tsereteli N. S., Elizbarashvili M. E., Elizbarashvili Sh. E., Pipia M. G. Hailstorms in the Territory of Georgia. European Geographical Studies, ISSN: 2312-0029, vol.2, № 2, 2014, pp. 55-69, DOI: 10.13187/egs.2014.2.55, www.ejournal9.com, (in Russian).
5. Amiranashvili A., Dzodzuashvili U., Lomtadze J., Sauri I., Chikhladze V. Some Characteristics of Hail Processes in Kakheti. Trans. of Mikheil Nodia Institute of Geophysics, ISSN 1512-1135, vol. 65, Tb., 2015, pp. 77 – 100, (in Russian).
6. Janelidze I., Pipia M. Hail Storms in Georgia in 2016-2018. Int. Sc. Conf. “Natural Disasters in Georgia: Monitoring, Prevention, Mitigation”. Proc., ISBN 978-9941-13-899-7, Publish House of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, December 12-14, Tbilisi, 2019, pp. 144 -146.
7. Beglarashvili N., Janelidze I., Pipia M., Varamashvili N. Hail Storms in Kakheti (Georgia) in 2014-2018. Int. Sc. Conf. „Modern Problems of Ecology“, Proc., ISSN 1512-1976, v. 7, Tbilisi-Telavi, Georgia, 26-28 September, 2020, pp. 176-179.
8. Amiranashvili A., Bakhsoliani B., Begalishvili N., Beritashvili B., Rekhviashvili R., Tsintsadze T., Chitanava R. On the Necessity of Resumption of Atmospheric Processes Modification Activities in Georgia. Trans. of the Institute of Hydrometeorology, Georgian Technical University, ISSN 1512-0902, 2013, vol. 119, pp.144-152, (in Russian).
9. Amiranashvili A.G. History of Active Effects on Atmospheric Processes in Georgia. In the book: Essays of the History of Weather Modification in the USSR and the Post-Soviet Territory, ISBN 978-5-86813-450-0, St. Petersburg, RSHMU, 2017, 352 pp., ill., pp. 234-254, (in Russian), <http://mig-journal.ru/toauthor?id=4644>.
10. ამირანაშვილი ა., კვესელავა ნ., ღლონტი ნ., ჩიხლაძე ვ., ცინცაძე თ. ბუნებრივ მოვლენებზე აქტიური ზემოქმედების ჩატარების ისტორია საქართველოში. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „ეკოლოგიის თანამედროვე პრობლემები“, შრომები, ISSN 1512-1976, ტ. 7, თბილისი-თელავი, საქართველო, 26-28 სექტემბერი, 2020, გვ. 147-152.
11. Amiranashvili A.G., Chikhladze V.A., Dzodzuashvili U.V., Ghlonti N. Ya., Sauri I.P. Reconstruction of Anti-Hail System in Kakheti (Georgia). Journal of the Georgian Geophysical Society, Issue B. Physics of Atmosphere, Ocean and Space Plasma, Tbilisi, 2015, vol.18B, pp. 92-106.
12. Amiranashvili A., Burnadze A., Dvalishvili K., Gelovani G., Ghlonti N., Dzodzuashvili U., Kaishauri M., Kveselava N., Lomtadze J., Osepashvili A., Sauri I., Telia Sh., Chargazia Kh., Chikhladze V. Renewal Works of Anti-Hail Service in Kakheti. Trans. of Mikheil Nodia institute of Geophysics, ISSN 1512-1135, vol.66, Tb., 2016, pp.14–27, (in Russian).

13. Amiranashvili A., Chikhladze V., Dzodzuashvili U., Ghlonti N., Sauri I., Telia Sh., Tsintsadze T. Weather Modification in Georgia: Past, Present, Prospects for Development. International Scientific Conference "Natural Disasters in Georgia: Monitoring, Prevention, Mitigation". Proceedings, ISBN 978-9941-13-899-7, Publish House of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, December 12-14, Tbilisi, 2019, pp. 216-222.
14. Amiranashvili A., Dzodzuashvili U., Chikhladze V. Anti-Hail Rockets of the Surface-to Air Type. Trans. of Mikheil Nodia institute of Geophysics, ISSN 1512-1135, vol. 64, Tb., 2013, pp. 151 – 159, (in Russian).
15. Amiranashvili A., Dzodzuashvili U., Lomtadze J., Sauri I., Chikhladze V. Means of Action on Atmospheric Processes in Kakheti. Trans. of Mikheil Nodia institute of Geophysics, ISSN 1512-1135, vol. 65, Tb., 2015, pp. 113 – 120, (in Russian).
16. Amiranashvili A.G., Chikhladze V. A., Dzodzuashvili U. V., Jincharadze G. A., Pipia M. G., Sauri I. P., Telia Sh. O. On the Use of Anti-Hail Rockets "Trayal D 6- B" in the Work of Anti Hail System in Kakheti (Georgia). Journal of the Georgian Geophysical Society, Issue B. Physics of Atmosphere, Ocean and Space Plasma, v.19B, Tbilisi, 2016, pp. 73-78.
17. Amiranashvili A., Chikhladze V., Dzodzuashvili U., Sauri I., Telia Sh. About the Use of Anti-Hail Rockets "Loza-2" in the Work of Anti-Hail System in Kakheti (Georgia). Journal of the Georgian Geophysical Society, ISSN: 1512-1127, Physics of Solid Earth, Atmosphere, Ocean and Space Plasma, v. 22(1), 2019, pp. 30 - 37.
18. საური ი., შავლაყაძე შ., ჩიხლაძე ვ. თანამედროვე სეტყვასაწინააღმდეგო რაკეტები. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „ეკოლოგიის თანამედროვე პრობლემები“, შრომები, ISSN 1512-1976, ტ. 7, თბილისი-თელავი, საქართველო, 26-28 სექტემბერი, 2020, გვ. 157-161.
19. კერესელიძე რ., საური ი., შავლაყაძე შ., ჩალაბაშვილი უ., ჩიხლაძე ვ. სეტყვასთან ბრძოლის ავტომატიზირებული სისტემები. სამეცნიერო კონფერენცია „ეკოლოგიის თანამედროვე პრობლემები“, შრომები, ISSN 1512-1976, ტ. 7, თბილისი-თელავი, საქართველო, 26-28 სექტემბერი, 2020, გვ. 162-166.
20. Burnadze A., Varamashvili N., Jamrlishvili N., Kveselava N. On the Estimations of the Physical Effectiveness of Anti-Hail Protection. Trans. of Mikheil Nodia institute of Geophysics, vol.66, Tb.,2016, pp.108-115, (in Russian).
21. Burnadze A., Varamashvili N., Kveselava N. Basic Methods of the Estimation of Economic Effectiveness in the Anti-Hail Works. Trans. of Mikheil Nodia institute of Geophysics, ISSN 1512-1135, vol. 66, Tb., 2016, pp. 116 – 122, (in Russian).
22. თელია შ., კვესელავა ნ., საური ი., ჩიხლაძე ვ., ძოძუაშვილი უ., წერეთელი ა. სეტყვასაწინააღმდეგო სამუშაოების ფიზიკური და ეკონომიკური ეფექტიანობა კახეთში 2015-2019 წწ. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „ბუნებრივი კატასტროფები საქართველოში: მონიტორინგი, პრევენცია, შედეგების შერბილება“, შრომები, ISSN 1512-1976, თბილისი, საქართველო, 12–14 დეკემბერი, 2019 წ., გვ. 206-208.
23. Amiranashvili A., Chikhladze V., Kveselava N., Sauri I. Some Results of Anti-Hail Works in Kakheti into 2016-2019. Int. Sc. Conf. „Modern Problems of Ecology“, Proc., ISSN 1512-1976, v. 7, Tbilisi-Telavi, Georgia, 26-28 September, 2020, pp. 153-156.

**კახეთში 2016–2020 წწ. სეტყვასაწინააღმდეგო სამუშაოების ზოგიერთი შედეგები**

**ამირანაშვილი ა., კვესელავა ნ., ქვილითაია ნ., საური ი., შავლაყაძე შ., ჩიხლაძე ვ.**

**რ ე ზ ი უ მ ე**

წარმოდგენილია 2016-2020 წწ. კახეთში სეტყვის საწინააღმდეგო სამუშაოების ზოგიერთი შედეგი. სეტყვისგან დაცული ტერიტორიის ფართობია ~ 800000 ჰა, მათ შორის სასოფლო-სამეურნეო დანიშნულების მიწის საერთო ფართობის 560000 ჰა. კერძოდ, სეტყვის პროცესების ზოგიერთი მახასიათებლის საშუალო წლიური მნიშვნელობები და მათზე აქტიური ზემოქმედების პარამეტრები შემდეგია: ჩატარებული ზემოქმედების დღეთა რაოდენობა - 46; დამუშავებული ზონების რაოდენობა - 203; სეტყვის მოსვლის რაოდენობა ზიანით - 12; გახარჯული რაკეტების რაოდენობა - 3137; 100%-ზე დაზიანებული ფართობები - 3255 ჰა; სეტყვის საწინააღმდეგო სამუშაოების ფიზიკური ეფექტურობა დაზიანებული ფართობების მიხედვით - 88%, მათ შორის, 2020 წ. - 86%.

საკვანძო სიტყვები: სეტვა, ამინდის მოდიფიცირება, ფიზიკური ეფექტიანობა.



## **SOME RESULTS OF ANTI-HAIL WORKS IN KAKHETI INTO 2016-2020**

**Amiranashvili A., Kveselava N., Kvilitaia N., Sauri I., Shavlakadze Sh., Chikhladze V.**

### **A b s t r a c t**

Some results of anti-hail works in Kakheti into 2016-2020 are presented. The area of shielded from the hail territory ~ 800000 hectares, including total area of agricultural land ~ 560000 hectares. In particular, the mean annual values of some characteristics of hail processes and parameters of active action on them are following: number of days with the action on the hail processes – 46; number of clouds, subjected to action – 203; number of clouds, which gave hail damage – 12; quantity of the used rockets – 3137; area of the territories, damaged to 100% - 3255 hectares; physical efficiency of anti-hail work (on damaged areas) - 88%, including 86% in 2020.

**Key words:** hail, weather modification, physical efficiency.

## **НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОТИВОГРАДОВЫХ РАБОТ В КАХЕТИИ В 2016-2020 ГГ.**

**Амиранашвили А., Квеселава Н., Квилитая Н., Саури И., Шавлакадзе Ш., Чихладзе В.**

### **Р е ф е р а т**

Представлены некоторые результаты противоградовых работ в Кахетии за 2016-2020 годы. Площадь защищаемой от града территории ~ 800000 га, в том числе общая площадь сельскохозяйственных угодий ~ 560000 га. В частности, среднегодовые значения некоторых характеристик градовых процессов и параметров активного воздействия на них следующие: количество дней воздействия на градовые процессы - 46; количество облаков, подвергнутых воздействию - 203; количество случаев града с ущербом - 12; количество использованных ракет - 3137; площадь территорий, поврежденных на 100% - 3255 га; физическая эффективность противоградовых работ (по поврежденным территориям) - 88%, в том числе в 2020 г. - 86%.

**Ключевые слова:** град, модификация погоды, физическая эффективность.

## CHANGEABILITY OF THE HOLIDAY CLIMATE INDEX (HCI) IN TBILISI

<sup>1</sup>Amiranashvili A., <sup>2</sup>Kartvelishvili L., <sup>3</sup>Matzarakis A.

<sup>1</sup>Mikheil Nodia Institute of Geophysics of Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, Tbilisi, Georgia

<sup>2</sup>National Environmental Agency of Georgia, Tbilisi, Georgia

<sup>3</sup>University of Freiburg, Meteorological Institute, Germany

[avtandilamiranashvili@gmail.com](mailto:avtandilamiranashvili@gmail.com)

### Introduction

Weather and climate are two factors that in many respects influence on tourism development. Many climate indices for tourism have been applied in past research [1]. The most widely known and applied index is the Tourism Climate Index (TCI) proposed by Mieczkowski [2]. In south Caucasus countries, monthly value of TCI be calculated in Georgia, first for Tbilisi [3], then for many other locations of Caucasus (Armenia, Azerbaijan, North Caucasus etc.) [4-11].

Despite the TCI's wide application, it has been subject to substantial critiques [12]. The four key deficiencies of the TCI include: (1) the subjective rating and weighting system of climatic variables; (2) it neglects the possibility of an overriding influence of physical climatic parameters (e.g., rain, wind); (3) the low temporal resolution of climate data (i.e., monthly data) has limited relevance for tourist decision-making; and (4) it neglects the varying climatic requirements of major tourism segments and destination types (i.e., beach, urban, winter sports tourism).

To overcome the above noted limitations of the TCI, a Holiday Climate Index (HCI) was developed to more accurately assess the climatic suitability of destinations for tourism. The word 'holiday' was chosen to better reflect what the index was designed for (i.e., leisure tourism), since tourism is much broader by definition ("Tourism is a social, cultural and economic phenomenon which entails the movement of people to countries or places outside their usual environment for personal or business/professional purposes" [12-16]).

Results of comparison of the holiday climate index and the tourism climate index in Tbilisi are presented in [17]. Comparison of the values and categories of the Tourism Climate Index and Holiday Climate Index in Tbilisi shows that the intra-annual variation of both indices is similar and has a bimodal form. However, given that the TCI is calculated for the so-called "average tourist" (regardless of gender, age, physical condition), the value and category of this index is lower than the HCI values and categories. In general, HCI more adequately determines the bioclimatic state of the environment for the development of various types of tourism than TCI [17].

This paper provides more detailed information on the variability of the monthly values of the HCI in Tbilisi in 1956-2015 than in the previous study [17]. It also presents data on the interval forecast of variability of HCI in Tbilisi for the next few decades.

## Material and methods

The HCI uses five climatic variables related to the three facets essential to tourism (table 1): thermal comfort (TC), aesthetic (A), and physical (P) facet. The five climatic variables used for the HCI input are maximum air temperature and relative humidity (TC), cloud cover (A), precipitation and wind (P) [12]. The HCI score is calculated according to the following formula:  $HCI = 4 \cdot T + 2 \cdot A + 3 \cdot R_d + 1 \cdot W$ . In tables 1-3 components of Holiday Climate Index, HCI's rating scheme and HCI's category are presented.

Table 1. Components of Holiday Climate Index (HCI)

Facet	Climatic Variable	Index Weighting (%)
Thermal Comfort (TC)	Dry-bulb Temperature (°C): Maximum Temperature (°C)	40%
	Relative Humidity (%): Mean RH	
Aesthetic (A)	Cloud Cover (%)	20%
Physical (P)	Amount of Rain (mm)	30%
	Wind Speed (km/h)	10%

Table 2. HCI's Rating Scheme

Rating	T - Effective Temperature (°C) [2]	A - Daily Cloud Cover (%)	R <sub>d</sub> - Daily Precipitation (mm)	W - Wind Speed (km/h)
10	23÷25	11÷20	0	1÷9
9	20÷22; 26	1÷10; 21÷30	<3	10÷19
8	27÷28	0; 31÷40	3÷5.99	0; 20÷29
7	18÷19; 29÷30	41÷50		
6	15÷17; 31÷32	51÷60		30÷39
5	11÷14; 33÷34	61÷70	6÷8.99	
4	7÷10; 35÷36	71÷80		
3	0÷6	81÷90		40÷49
2	-5÷-1; 37÷39	90÷99	9÷12	
1	<-5	100		
0	>39		>12	50÷70
-1			>25	
-10				>70

Table 3. HCI's Category

HCI Score	Category	HCI Score	Category
90÷100	Ideal	40÷49	Marginal
80÷89	Excellent	30÷39	Unfavorable
70÷79	Very Good	20÷29	Very Unfavorable
60÷69	Good	10÷19	Extremely Unfavorable
50÷59	Acceptable	9÷-9; -10÷-20	Impossible

For the monthly mean values of HCI calculation data of National Environmental Agency of Georgia from 1956 to 2015 were used.

In the work analysis of data is carried out with the use of the standard statistical analysis methods. The following designations will be used below: Mean – average values; Min – minimal values; Max - maximal values; Range - variational scope; St Dev - standard deviation;  $\sigma_m$  – standard error; Cv, % – coefficient of variation ( $Cv = 100 \cdot St\ Dev / Average$ ); 95%(+/-) - 95% confidence interval of mean; I)1956÷1985 – mean value of HCI in 1956-1985, first period; II)1986÷2015 - second period; t - Student criterion; Diff.(II-I) – difference between mean values of HCI in second and first periods were determined with use of Student criterion; R - coefficient of linear correlation;  $\alpha$  - the level of significance;  $\Delta \square = 100 \cdot Diff.(II-I) / Mean(1956-2015)$  - relative variability of the difference between the mean values of the HCI in two periods of time relative to the mean value for the entire observation period, %;  $\Delta \square = 100 \cdot [HCI(2015) - HCI(1956)] /$

Mean(1956-2015) - relative variability of the difference between the HCI values in 2015 and 1956, determined by linear regression equations, in relation to the mean value for the entire observation period, %; a and b - coefficients of the linear equation of the trend of HCI values ( $HCI = a \cdot \text{year/month} + b$ ).

Interval prediction of the variability of the HCI values for the coming decades was carried out using the "MULTIPLE SEASONAL MODEL" (program "MESOSAUR" [18]); 95%\_Low\_Pred and 95%\_Upp\_Pred - 95% of the lower and upper levels of the confidence interval of the prediction values of HCI, respectively.

## Results and discussion

The results in fig. 1-6 and tables 4-6 are presented. Fig. 1,2 and tables 4 and 5 present data on the statistical characteristics and changeability of monthly and seasonal values of HCI in Tbilisi in 1956-2015.

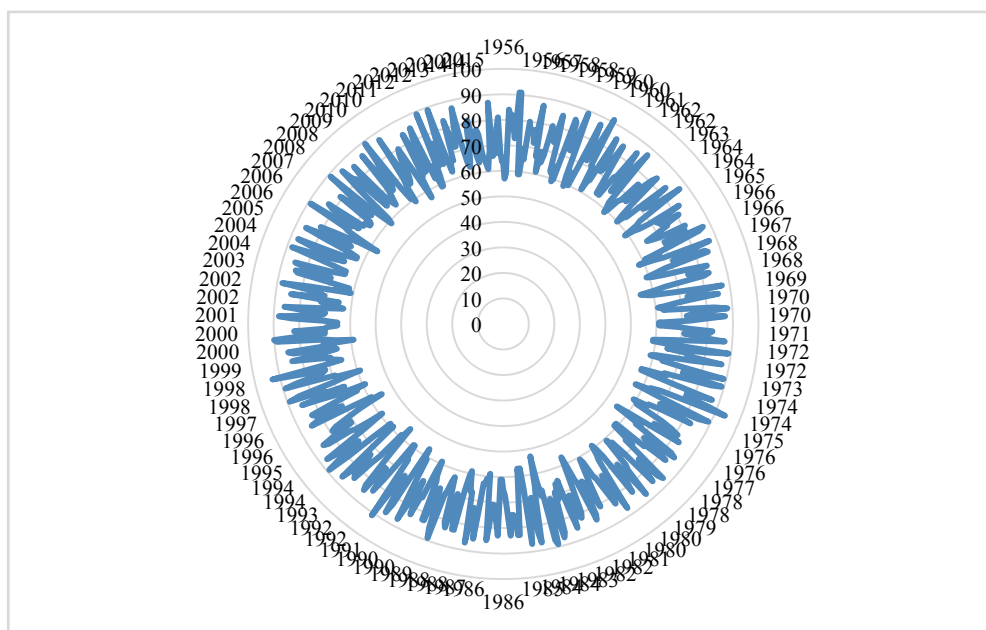


Fig. 1. Monthly values of HCI in Tbilisi in 1956-2015.

Table 4. Statistical characteristics of HCI in Tbilisi during the cold season (1956-2015)

Parameter	Jan	Feb	Mar	Oct	Nov	Dec	Cold	Year
Mean	62.0	62.5	66.7	82.8	68.6	64.0	67.8	72.5
Min	55.0	53.0	59.0	67.0	59.0	55.0	63.0	69.8
Max	67.0	72.0	77.0	94.0	80.0	71.0	72.3	75.8
Range	12.0	19.0	18.0	27.0	21.0	16.0	9.3	6.1
St Dev	3.4	4.3	4.0	6.1	4.0	3.5	2.2	1.3
$\sigma_m$	0.44	0.56	0.52	0.79	0.52	0.45	0.28	0.17
Cv (%)	5.5	6.8	6.0	7.3	5.8	5.4	3.2	1.8
95%(+/-)	0.9	1.1	1.0	1.6	1.0	0.9	0.5	0.3
II)1986÷2015	62.6	63.3	68.0	83.5	68.8	64.2	68.4	72.6
I)1956÷1985	61.3	61.7	65.3	82.0	68.4	63.8	67.1	72.4
Diff.(II-I)	1.2	1.6	2.6	1.5	0.4	0.4	1.3	0.1
t	1.41	1.43	2.70	0.95	0.39	0.44	2.41	0.36
$\alpha(t)$	0.15	0.15	0.01	no	no	no	0.02	no
R	0.19	0.10	0.37	0.09	0.11	0.15	0.31	0.02
$\Delta\alpha, \%$	1.9	2.6	3.9	1.8	0.6	0.6	1.9	0.1
$\alpha(R)$	0.15	no	<0.01	no	no	no	0.01	no
a	0.0364	0.0241	0.0851	0.0297	0.0253	0.0302	0.0385	-0.0017
b	-10.38	14.58	-102.22	23.81	18.32	4.09	-8.63	75.93
$\Delta\alpha, \%$	3.5	2.3	7.5	2.1	2.2	2.8	3.4	-0.1

Table 5. Statistical characteristics of HCI in Tbilisi during the warm season (1956-2015).

Parameter	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Warm	Year
Mean	76.8	83.8	76.5	71.8	72.6	82.0	77.2	72.5
Min	65.0	67.0	65.0	67.0	64.0	74.0	72.2	69.8
Max	89.0	90.0	85.0	77.0	79.0	91.0	81.5	75.8
Range	24.0	23.0	20.0	10.0	15.0	17.0	9.3	6.1
St Dev	7.31	3.97	4.49	2.83	3.41	3.64	2.03	1.31
$\sigma_m$	0.95	0.52	0.58	0.37	0.44	0.47	0.26	0.17
Cv (%)	9.5	4.7	5.9	3.9	4.7	4.4	2.6	1.8
95%(+/-)	1.9	1.0	1.1	0.7	0.9	0.9	0.5	0.3
II)1986÷2015	77.5	84.0	75.8	70.8	71.2	80.9	76.7	72.6
I)1956÷1985	76.0	83.6	77.1	72.8	74.0	83.1	77.8	72.4
Diff.(II-I)	1.4	0.5	-1.3	-1.9	-2.8	-2.2	-1.0	0.1
t	0.76	0.45	1.13	2.79	3.42	2.39	2.04	0.36
$\alpha(t)$	no	no	no	<0.01	<0.01	0.02	0.05	no
$\Delta\Box, \%$	1.8	0.6	-1.7	-2.6	-3.9	-2.7	-1.3	0.1
R	0.030	0.09	0.17	0.42	0.47	0.38	0.36	0.02
$\alpha(R)$	no	no	no	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	no
a	51.32	3.09	165.25	207.95	256.02	239.3	160.49	75.93
b	1.0	1.4	-3.4	-5.6	-7.5	-5.7	-3.2	-0.1
$\Delta\Box, \%$	1.8	0.6	-1.7	-2.6	-3.9	-2.7	-1.3	0.1

In the period from 1956 to 2015 (fig. 1, tables 4, 5) monthly HCI values varied from 53.0 (“Acceptable”, February) to 94 (“Ideal”, October). The mean monthly HCI values for the entire observation period varied from 62.0 (“Good”, January) to 83.8 (“Excellent”, May). Maximal value of Range for monthly values of HCI is 27.0 (October), Minimal - 10.0 (July).

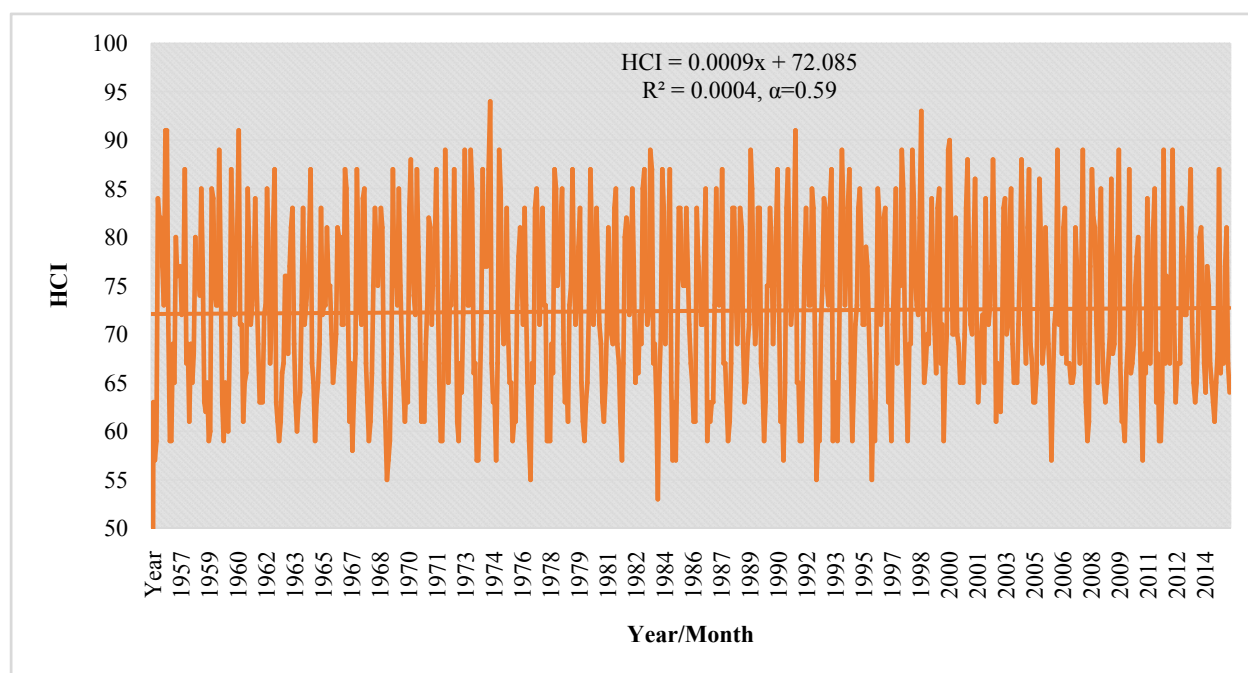


Fig. 2. Trend of monthly values of HCI in Tbilisi in 1956-2015.

The trend of monthly HCI values for all observational data is generally insignificant positive (fig. 2). A significant linear positive trend in HCI values in certain months of the year was observed in January, March, the cold half of the year; negative - from July to September and in the warm half of the year. A significant increase in average monthly and seasonal HCI values in the second period of time compared to the first was observed from January to March and in the cold half of the year, a decrease - from July to September and in the warm half of the year. The maximum absolute value  $\Delta\bar{x} = 3.9\%$  (March, August) and  $\Delta\bar{x} = 7.5\%$  (March). The values of the coefficient of variation vary from 3.9% (July) to 9.5% (March). Thus, the variability of the HCI values in Tbilisi during the study period is generally insignificant (tables 4, 5).

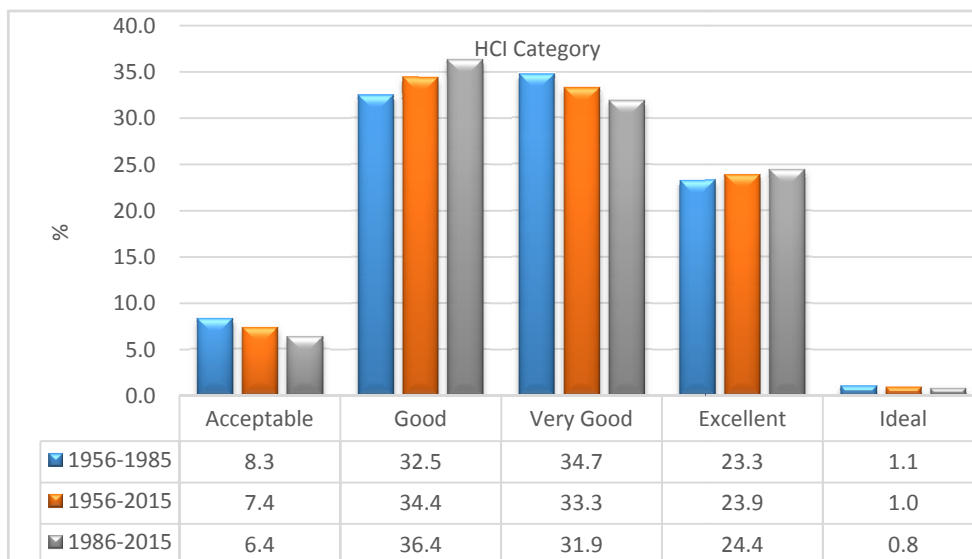


Fig. 3. Repetition of category of monthly values of HCI in Tbilisi in three periods of time.

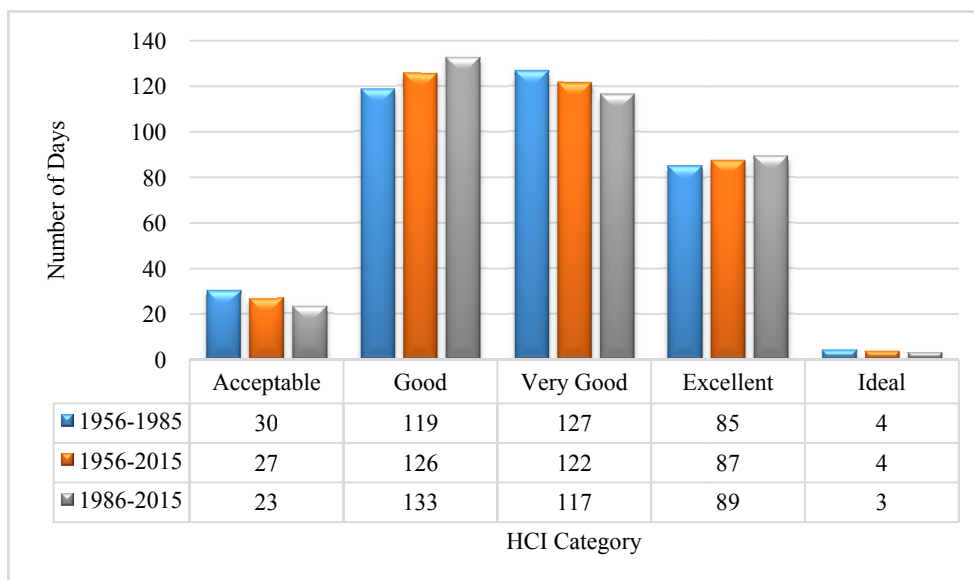


Fig. 4. Number of days with different category of HCI in Tbilisi in three periods of time.

In the period from 1956 to 2015 the highest repeatability of HCI values (fig. 3.4) was in the “Good” category (34.4% of cases, 126 days per year), the lowest - in the “Ideal” category (1.0% of cases, 4 days per year). In the second period compared to the first in Tbilisi, climate change did not lead to a change in HCI categories. At the same time, the frequency of occurrence of the HCI “Acceptable” category decreased from

8.3% to 6.4% (respectively, 30 and 23 days a year), the “Good” category increased - from 32.5% to 36.4% (respectively, 119 and 133 days a year), the “Very Good” category decreased from 34.7% to 31.9% (127 and 117 days a year, respectively), the “Excellent” category increased from 23.3% to 24.4% of cases (respectively 85 and 89 days a year), the “Ideal” category decreased from 1.0% to 0.8% (4 and 3 days a year, respectively). In general, in Tbilisi practically all year round there are favorable bioclimatic conditions for recreation and tourism.

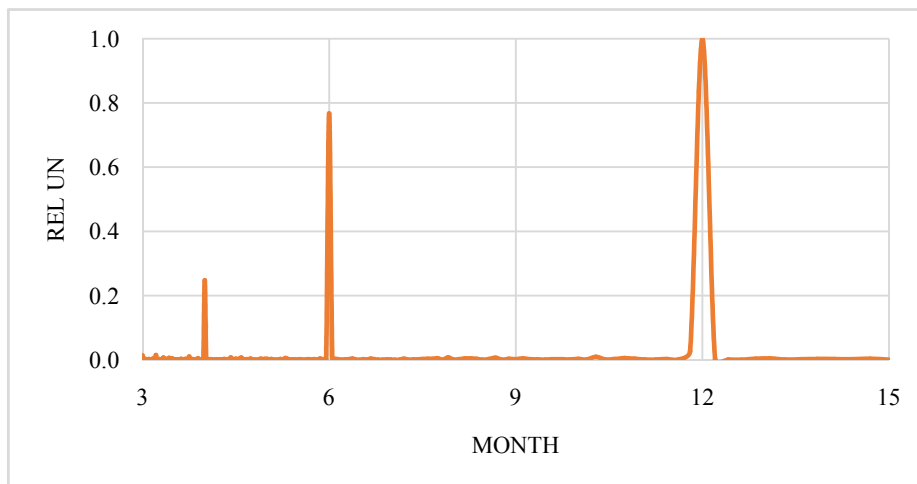


Fig. 5. Periodicity of values of HCI in Tbilisi.

The intra-annual distribution of mean monthly HCI values has a bimodal form ([17], tables 4, 5). Analysis with use [18] of the entire series of monthly HCI values from 1956 to 2015 confirmed that the first and second extremes of HCI periodicity occur at 12 and 6 months, respectively (fig. 5). Note that in the time series of observations there is also a third small extremum of the periodicity - 4 months.

Considering that the variability of the values of the Holiday Climate Index in Tbilisi is not very significant, the interval prediction of the variability of the HCI values for the coming decades was carried out using the “MULTIPLE SEASONAL MODEL” (program “MESOSAUR” [18]) taking into account two values of periodicity (12 and 6 months). The calculation results are shown in fig. 6 and table 6.

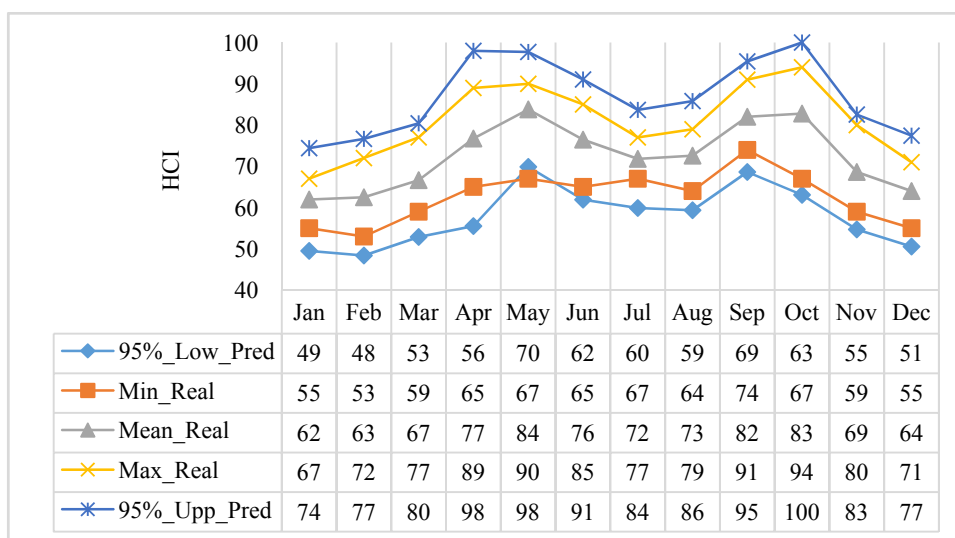


Fig. 6. Interval forecast of HCI values for the next few decades compared with Min\_Real, Mean\_Real and Max\_Real HCI values in 1956-2015.

As follows from fig. 6 the predicted maximum monthly HCI values (95%\_Upp\_Pred) are higher than the maximum monthly real HCI values (95%\_Max\_Real). The predicted minimum monthly values of

HCI (95%\_Low\_Pred) excluding May are lower than the real minimum monthly values of HCI (95%\_Min\_Real).

Thus, in the forecast period, the range of variability of mean monthly HCI values is expected to expand as compared to 1956-2015.

Finally, information on the expansion of the range of variability of the categories of mean monthly HCI values in the prognostic period compared to 1956-2015 in table 6 is presented.

Table 6. Interval forecast of HCI categories for the next few decades compared with Min\_Real, Mean\_Real and Max\_Real HCI categories in 1956-2015.

Parameter	95%_Low_Pred	Min_Real	Mean_Real	Max_Real	95%_Upp_Pred
Jan	<i>Marginal</i>	<i>Acceptable</i>	Good	<i>Good</i>	<i>Very Good</i>
Feb	<i>Marginal</i>	<i>Acceptable</i>	Good	Very Good	Very Good
Mar	Acceptable	Acceptable	Good	<i>Very Good</i>	<i>Excellent</i>
Apr	<i>Acceptable</i>	<i>Good</i>	Very Good	<i>Excellent</i>	<i>Ideal</i>
May	<i>Very Good</i>	<i>Good</i>	Excellent	Ideal	Ideal
Jun	Good	Good	Very Good	<i>Excellent</i>	<i>Ideal</i>
Jul	Good	Good	Very Good	<i>Very Good</i>	<i>Excellent</i>
Aug	<i>Acceptable</i>	<i>Good</i>	Very Good	<i>Very Good</i>	<i>Excellent</i>
Sep	<i>Good</i>	<i>Very Good</i>	Excellent	Ideal	Ideal
Oct	Good	Good	Excellent	Ideal	Ideal
Nov	Acceptable	Acceptable	Good	Excellent	Excellent
Dec	Acceptable	Acceptable	Good	Very Good	Very Good

As follows from Table 6, in the next few decades, the maximum categories of real HCI values may increase by one gradation in the following months: January: Good → Very Good; March, July and August: Very Good → Excellent; April and June: Excellent → Ideal. The minimum real HCI categories may decline by one gradation in the following months: January and February: Acceptable → Marginal; April and August: Good → Acceptable; September: Very Good → Good. Minimum HCI value category is expected to increase by one gradation in May: Good → Very Good.

Thus, favorable bioclimatic conditions for recreation and tourism will remain practically all year round in Tbilisi and in the next few decades.

## Conclusion

In the future, we plan to continue similar studies for other regions of Georgia (mapping the territory of Georgia by HCI values, studying their long-term trends, statistical forecasting of HCI variability due to climate change). Research will also continue on the impact of various simple and complex bioclimatic indices, including HCI, on the health of the peoples.

## ლიტერატურა - REFERENCES - ЛИТЕРАТУРА

1. Matzarakis A. Weather - and Climate-Related Information for Tourism. Tourism and Hospitality Planning & Development, August, 2006, vol. 3, No. 2, pp. 99–115.
2. Mieczkowski Z. The Tourism Climate Index: A Method for Evaluating World Climates for Tourism. The Canadian Geographer 1985, N 29, pp. 220-233.
3. Amiranashvili A., Matzarakis A., Kartvelishvili L. Tourism Climate Index in Tbilisi. Trans. of the Institute of Hydrometeorology, ISSN 1512-0902, Tbilisi, 18 – 19 November, 2008, vol. 115, pp. 27 - 30.
4. Amiranashvili, A., Chargazia, Kh., Matzarakis, A. Comparative Characteristics of the Tourism Climate Index in the South Caucasus Countries Capitals (Baku, Tbilisi, Yerevan). Journal of the Georgian Geophysical Society, ISSN: 1512-1127, Issue (B). Physics of Atmosphere, Ocean, and Space Plasma, 2014, vol.17B, pp. 14-25.



5. Amiranashvili A., Chargazia Kh., Matzarakis A., Kartvelishvili L. Tourism Climate Index in the Coastal and Mountain Locality of Adjara, Georgia. International Scientific Conference “Sustainable Mountain Regions: Make Them Work”. Proceedings, Borovets, Bulgaria, ISBN 978-954-411-220-2, 14-16 May, 2015, pp.238-244, [http://geography.bg/MountainRegions\\_Sofia2015](http://geography.bg/MountainRegions_Sofia2015)
6. Rybak O. O., Rybak E. A. Application of Climatic Indices for Evaluation of Regional Differences in Tourist Attractiveness. Nauchnyy zhurnal KubGAU, №121(07), 2016, 24 p., <http://ej.kubagro.ru/2016/07/pdf/16.pdf>
7. Amiranashvili A.G., Japaridze N.D., Kartvelishvili L.G., Khazaradze K.R., Matzarakis A., Povolotskaya N.P., Senik I.A. Tourism Climate Index of in the Some Regions of Georgia and North Caucasus. Journal of the Georgian Geophysical Society, ISSN: 1512-1127, Issue (B). Physics of Atmosphere, Ocean, and Space Plasma, 2017, vol.20B, pp. 43-64.
8. Amiranashvili A.G., Japaridze N.D., Kartvelishvili L.G., Khazaradze K.R., Kurdashvili L.R. Tourism Climate Index in Kutaisi (Georgia). International Scientific Conference „Modern Problems of Ecology“, Proceedings, ISSN 1512-1976, v. 6, Kutaisi, Georgia, 21-22 September, 2018, pp. 227-230.
9. Amiranashvili A.G., Kartvelishvili L.G., Matzarakis A., Megrelidze L.D. The Statistical Characteristics of Tourism Climate Index in Kakheti (Georgia). Journal of the Georgian Geophysical Society, ISSN: 1512-1127, Physics of Solid Earth, Atmosphere, Ocean and Space Plasma, v. 21(2), Tbilisi, 2018, pp. 95-112.
10. Amiranashvili A., Kartvelishvili L. Statistical Characteristics of the Monthly Mean Values of Tourism Climate Index in Mestia (Georgia) in 1961-2010. Journal of the Georgian Geophysical Society, ISSN: 1512-1127, Physics of Solid Earth, Atmosphere, Ocean and Space Plasma, v. 22(2), 2019, pp. 68–79.
11. Kartvelishvili L., Amiranashvili A., Megrelidze L., Kurdashvili L. Turistul Rekreatიული Resursebis Shefaseba Klimatis Cvlilebebis Fonze. Publish Hous "Mtsignobari", ISBN 978-9941-485-01-5, Tbilisi, 2019, 161 p., (in Georgian). [http://217.147.235.82/bitstream/1234/293074/1/turistulRekreaciuli\\_ResursebisShefasebaKlimatis-CvlilebebisFonze.pdf](http://217.147.235.82/bitstream/1234/293074/1/turistulRekreaciuli_ResursebisShefasebaKlimatis-CvlilebebisFonze.pdf).
12. Scott D., Ruttly M., Amelung B., Tang M. An Inter-Comparison of the Holiday Climate Index (HCI) and the Tourism Climate Index (TCI) in Europe. Atmosphere 7, 80, 2016, 17 p., doi:10.3390/atmos7060080www.
13. Öztürk A., Göral R. Climatic Suitability in Destination Marketing and Holiday Climate Index. Global Journal of Emerging Trends in e-Business, Marketing and Consumer Psychology (GJETeMCP). An Online International Research Journal (ISSN: 2311-3170), Vol: 4 Issue: 1, 2018, pp. 619-629.
14. Yu D. D., Ruttly M., Scott D., Li S. A Comparison of the Holiday Climate Index: Beach and the Tourism Climate Index Across Coastal Destinations in China International Journal of Biometeorology, 2020, <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01979-w>, 8 p.
15. O. Cenk Demiroglu, F. Sibel Saygili-Araci, Aytac Pacal, C. Michael Hall, M. Levent Kurnaz. Future Holiday Climate Index (HCI) Performance of Urban and Beach Destinations in the Mediterranean. Atmosphere 11, 911; 2020, doi:10.3390/atmos11090911, 30 p.
16. Ruttly M., Scott D., Matthews L., Burrows R., Trotman A., Mahon R., Charles A. An Inter-Comparison of the Holiday Climate Index (HCI: Beach) and the Tourism Climate Index (TCI) to Explain Canadian Tourism Arrivals to the Caribbean. Atmosphere 2020, 11, 412.
17. Amiranashvili A., Kartvelishvili L., Matzarakis A. Comparison of the Holiday Climate Index (HCI) and the Tourism Climate Index (TCI) in Tbilisi. Int. Sc. Conf. „Modern Problems of Ecology“, Proc., ISSN 1512-1976, v. 7, Tbilisi-Telavi, Georgia, 26-28 September, 2020, pp. 424-427.
18. Мезозавр. Статистическая система по анализу временных рядов. Руководство пользователя. Стат-Диалог, РАН, М., 1995, 141 с.

## **თბილისში დასვენების კლიმატის ინდექსის (HCI) ცვალებადობა**

**ამირანაშვილი ა., ქართველიშვილი ლ., მატზარაკისი ა.**

**რ ე ზ ი უ მ ე**

წარმოდგენილია დეტალური ინფორმაცია თბილისში 1956-2015 წლებში დასვენების კლიმატური ინდექსის (HCI) ყოველთვიური მნიშვნელობების ცვალებადობის შესახებ. ასევე მოცემულია მონაცემები HCI-ს მნიშვნელობების ცვალებადობის შესახებ მომდევნო რამდენიმე ათწლეულის განმავლობაში ინტერვალური პროგნოზის საფუძველზე.

საკვანძო სიტყვები: დასვენების კლიმატის ინდექსი.

## CHANGEABILITY OF THE HOLIDAY CLIMATE INDEX (HCI) IN TBILISI

Amiranashvili A., Kartvelishvili L., Matzarakis A.

### Abstract

The detailed information on the variability of the monthly values of the Holiday Climate Index (HCI) in Tbilisi in 1956-2015 are presented. It also presents data on the interval forecast of variability of HCI values in Tbilisi for the next few decades.

**Key words:** Holiday Climate Index.

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ КЛИМАТИЧЕСКОГО ИНДЕКСА ОТДЫХА (НСИ) В ТБИЛИСИ

Амиранашвили А., Картвелишвили Л., Матзаракис А.

### Р е ф е р а т

Приведена подробная информация об изменчивости месячных значений климатического индекса отдыха (НСИ) в Тбилиси в 1956-2015 гг. Также представлены данные по интервальному прогнозу изменчивости значений НСИ в Тбилиси на ближайшие несколько десятилетий.

**Ключевые слова:** Климатический индекс отдыха.

## Cr-Si-O-C სისტემაში კომპონენტების ურთიერთქმედების თერმოდინამიკური ანალიზი და მისი ეკოლოგიური ასპექტები

ჯანელიძე ი.

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ქრომი და მისი შენადნობები ფართოდ გამოიყენება თანამედროვე ტექნიკაში, რაც განპირობებულია მისი ისეთი მნიშვნელოვანი კომპლექსური თვისობრივი უპირატესობებით, როგორცაა ფიზიკო-მექანიკური მდგრადობა (მაღალი სიმტკიცე, სისალე, ცვეთამდედეობა), ცეცხლგამძლეობა, კოროზიამდედეობა, მაღალი ტრიბოლოგიური მაჩვენებლები და სხვა [1,2]. ქრომი ხასიათდება განსაკუთრებული ანტიკოროზიული თვისებებით [3]. ის მალეგირებელი ელემენტის სახით შედის უმეტესად ძვირადღირებული ლეგირებული და მაღალლეგირებული უჟანგავი ფოლადების შემადგენლობაში, მათ შორის რკინის ფუძეზე არსებულ ისეთ ფეროშენადნობებშიც, როგორცაა თხევდი ფოლადის ლუმელსგარე (შუალედურ ციცხვში) დამუშავებისთვის აუცილებელი კომპლექსური (პოლიკომპონენტური) განმჟანგველები, მალეგირებელი ლიგატურები და სხმულების მიკრო და მაკროსტრუქტურული აგებულების მაკორექტირებელი მოდიფიკატორები [4, 5].

ქრომის შენადნობების წარმოების არსებული ტექნოლოგიური სქემები [6-8] ბევრ შემთხვევაში არ შეესაბამება სამეცნიერო-ტექნიკური პროგრესის თანამედროვე დონეს და საჭიროებს გაუმჯობესება-ოპტიმიზირებას, ამიტომ მადანთერმულ ელექტროლუმელებში ნახშირბადადღენითი მეთოდით მათი მიღების ტექნოლოგიის ფიზიკო-ქიმიური საფუძვლების სრულყოფა წარმოადგენს აქტუალურ ამოცანას.

ამ საკითხების გადასაწყვეტად აუცილებელია ქრომის, სილიციუმის და სხვა ლითონების შემცველი მარტივი და რთული სისტემების შემდგომი თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევა. ამასთან, უპირატესობა უნდა მიეძღვოს იმ სისტემებს, რომელთა შედგენილობა უახლოვდება რეალურ, სტანდარტულ ფეროშენადნობებს. ამ თვალსაზრისით, განსაკუთრებულ აქტუალობას იძენს ქრომიანი ფეროშენადნობის კარბოთერმული და ლითონთერმული წარმოების თავისებურებების შესწავლა ქრომშემცველი მინერალური ნედლეულიდან (მადნიდან) ქრომის აღდგენა-ქიმიური რეაქციების თერმოდინამიკური ანალიზის საშუალებით.

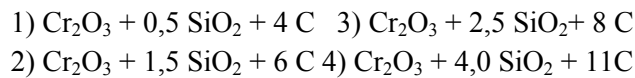
აღნიშნული მიდგომა ასევე მნიშვნელოვანია ეკოლოგიური თვალსაზრისითაც. კერძოდ, ქრომი და მისი მადნები, როგორც ყველა სხვა დანარჩენი ლითონშემცველი მინერალური ნედლეული განეკუთვნება არაგანახლებად (ამოწურვად) ბუნებრივ რესურსთა ჯგუფს. ქრომი, რკინის, ალუმინის, სპილენძისა და მანგანუმის შემდეგ, მსოფლიოში, ერთ-ერთი ყველაზე მაღალმოთხოვნი და ლითონია. მისი ათვისებისა და სასარგებლო გამოყენების მაჩვენებელი ნედლეულის მეტალურგიული გადამუშავების პირობებში, საუკეთესო შემთხვევაშიც კი 80%-ს არ აღემატება [9]. ერთის მხრივ, სწორედ აღნიშნული პრობლემის გადაწყვეტისა და წარმოების ტექნიკო-ეკონომიკური მაჩვენებლების გაუმჯობესების მიზნით, ხოლო მეორეს მხრივ, გარემოზე მავნე ზემოქმედების შემცირების აუცილებლობიდან გამომდინარე, კვლევებში [10,11] დასმულია საკითხი ლითონშემცველი ნედლეულის ნარჩენების მეორადი გამოყენების (რეციკლირების) აუცილებლობის შესახებ და შემოთავაზებულია ნარჩენების რეციკლირების ტექნოლოგიური და

ორგანიზაციულ-ეკონომიკური სისტემის სრულყოფის ახალი მოდელი. მაგრამ, ქრომშემცველი ბუნებრივი და ტექნოგენური (მეორადი) ნედლეულის მაქსიმალური ათვისების პრობლემის წარმატებით გადაჭრისათვის, როგორც ზემოთ უკვე აღინიშნა, ასევე აუცილებელია ქრომისა და მისი თანხმლები კომპონენტების ურთიერთქმედების თავისებურებებისა და კანონზომიერებების გამოვლენა თერმოდინამიკური მოდელირებისა და ანალიზის გზით [12-14].

აქედან გამომდინარე, წინამდებარე ნაშრომი მიზნად ისახავს Cr-Si-O-C სისტემის ყველა სავარაუდო შედგენილობის სრულ თერმოდინამიკურ ანალიზს, სადაც კვლევის მთავარ ამოცანას წარმოადგენს აღდგენითი რეაქციებისას სინთეზირებული ლითონური ნაერთების, საწყისი, ოქსიდური კომპონენტების რაოდენობასა და ურთიერთრეაგირების ტემპერატურაზე დამოკიდებულების გამოვლენა. ეს მოგვცემს საშუალებას დავადგინოთ ქრომისა და მისი შენადნობების პირომეტალურგიული კარბოთერმული წარმოების ოპტიმიზაციისა და ენერგორესურსის დაზოგვის რაციონალური პირობები.

კვლევითი ნაწილი.

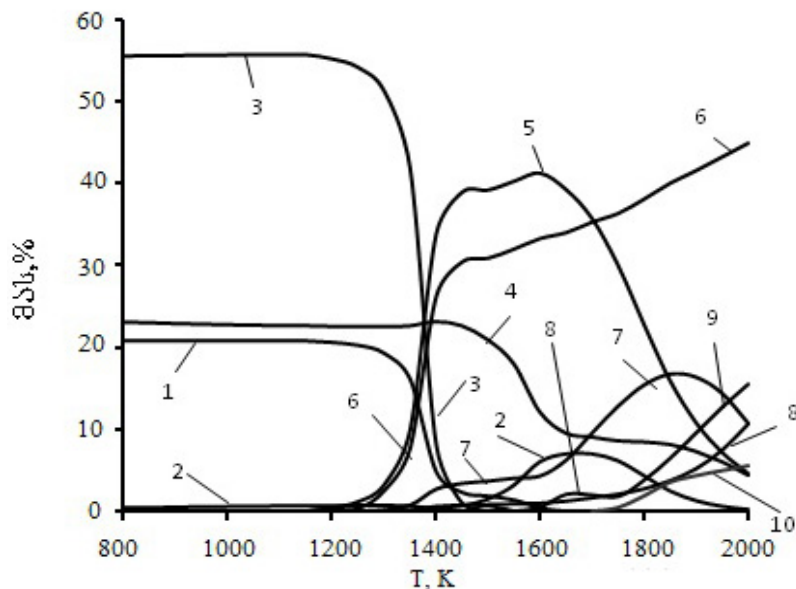
თერმოდინამიკური ანალიზისათვის საკვლევო სისტემის Cr-Si-O-C საწყისი შემადგენლობებია:



კომპონენტების შედგენილობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება კი მოცემულია 800-2000 K ინტერვალში.

აღნიშნული რეაქციების შესაძლო კონდენსირებულ კომპონენტებად გათვალისწინებულია შემდეგი ელემენტები და ნერტები: C, Cr, Si, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, SiC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, CrSi, CrSi<sub>2</sub>, Cr<sub>3</sub>Si, Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>9</sub>; ხოლო აირად კომპონენტებად : Ar, O, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, C, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, C<sub>5</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>O, C<sub>3</sub>O<sub>2</sub>, Cr, Cr<sub>2</sub>, CrO, CrO<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O, Cr<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CrC<sub>2</sub>, Si, Si<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>, SiO, SiO<sub>2</sub>.

შესრულებულია ოთხივე რეაქციის სრული თერმოდინამიკური ანალიზი ერთ ატმოსფერულ წნევაზე არგონის არეში 300-2000 K, ტემპერატურულ შუალედში 50<sup>0</sup>-ანი ბიჯით.



ნახ. 1. პირველი რეაქციის კომპონენტების რაოდენობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე; 1-C; 2-SiO<sub>2</sub>; 3-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4-Cr<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>9</sub>; 5-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>; 6-CO; 7-Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>; 8-Cr; 9-Cr<sub>3</sub>Si; 10-Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>.

თერმოდინამიკური ანალიზის საბოლოო შედეგები მოყვანილია გრაფიკული დიაგრამების სახით, ნახ. 1-4-ზე. ნახ. 1-ზე წარმოდგენილია პირველი რეაქციის (აღდგენითი პროცესის) თერმოდინამიკური მოდელი 800-2000 K ტემპერატურულ შუალედში, საიდანაც ჩანს, რომ

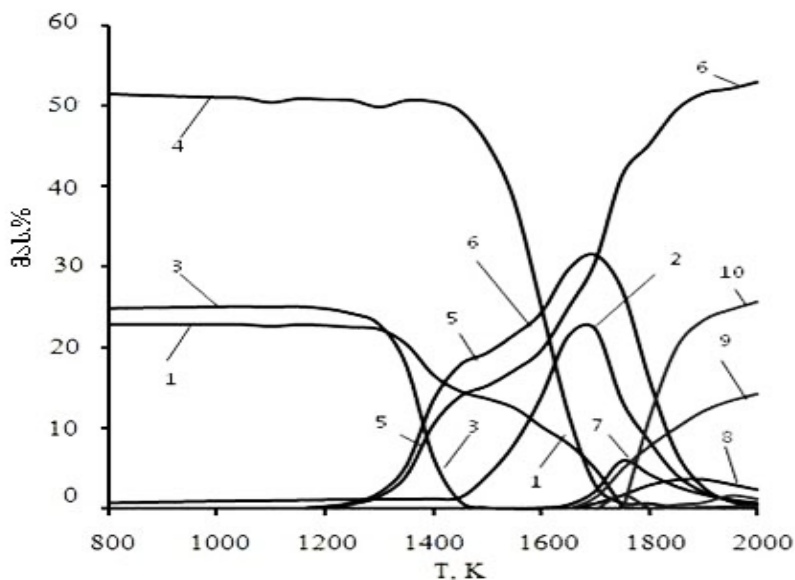
ქრომის აღდგენა იწყება ~1200 K-დან  $Cr_3C_2$  -ის და აირად ფაზაში CO-ს, ხოლო ~1350÷1400 K-დან ლითონური ქრომისა და  $Cr_7C_3$ -ის გამოყოფით. სისტემაში  $Cr_2O_3$ -ის რაოდენობა მკვეთრად ეცემა ~1200 K-დან და ~1500 K-ზე მთლიანად ქრება. პარალელურად კონდენსირებული ნახშირბადის რაოდენობის ცვლილება იგივე ხასიათს ატარებს და სისტემაში ~1650 K-ზე მთლიანად ქრება. 800 K-ის ქვემოთ სისტემაში წარმოიქმნება  $Cr_2Si_3O_9$  და ~1300 K-მდე მისი რაოდენობა უცვლელია, ხოლო ამ ტემპერატურის ზევით იგი მატულობს და ~1400 K-ზე აღწევს მაქსიმუმს; ტემპერატურის შემდგომი ზრდით  $Cr_2Si_3O_9$  -ის რაოდენობა მკვეთრად მცირდება ~1650 K-მდე, ხოლო შემდგომ მდოვრედ ეცემა და 2000 K-ზე აღწევს ~4 მას.%-ს; დაბალ ტემპერატურებზე (~1400 K-მდე) სისტემაში  $SiO_2$  ძალიან მცირე რაოდენობით შეიმჩნევა (1 მას. %-ზე ნაკლები); ამ ტემპერატურის ზევით ~1700 K-მდე  $SiO_2$ -ს რაოდენობა იზრდება, ხოლო შემდგომ მდოვრედ მცირდება 2000 K-მდე (1 მას. %-ზე ნაკლები). სისტემაში  $Cr_3C_2$  -ის რაოდენობა მაქსიმუმს ~1600 K-ზე აღწევს (41 მას.%), შემდგომ მცირდება და 2000 K-ზე ~5 მას. %-ია.

$Cr_7C_3$  და Cr-ის რაოდენობა ~1300 K-დან იწყებს ზრდას და შესაბამისად მაქსიმუმს ~1850 K და 2000 K-ზე აღწევს. სისტემაში ქრომის სილიციდები ( $Cr_3Si$ ,  $CrSi$ ,  $Cr_5Si_3$ ) ~1600 K-ის ზევით იწყებს გამოყოფას და მათი რაოდენობა 2000 K-მდე იზრდება; განსაკუთრებით დიდი რაოდენობით  $Cr_3Si$  და  $Cr_5Si_3$  გამოიყოფა; 2000 K-ზე ლითონურ ნაწილში გამოიყოფა Cr,  $Cr_3Si$ ,  $CrSi$ ,  $Cr_5Si_3$ ,  $Cr_7C_3$ ,  $Cr_3C_2$  და ლითონური ხსნარის შედგენილობაა: Cr – 87,33 მას.%, Si – 9,51 მას.%, C – 3,16 მას.%.

ნახ. 2-ზე წარმოდგენილია მეორე რეჟიმის თერმოდინამიკური ანალიზის შედეგები 800-2000 K ტემპერატურულ შუალედში. დიაგრამიდან ჩანს, რომ ქრომის აღდგენა იწყება ~1200 K-დან კონდენსირებული  $Cr_3C_2$ -ის და აირად ფაზაში CO-ს გამოყოფით, ხოლო ~1350 K-დან ძალიან მცირე რაოდენობის  $Cr_7C_3$ -ის და ლითონური ქრომის გამოყოფით. სისტემაში  $Cr_2O_3$  და  $Cr_2Si_3O_9$ -ის რაოდენობის მკვეთრი შემცირება შესაბამისად ~1250 K და ~1400 K-დან იწყება, ხოლო ~1500 K და ~1900 K-ზე მთლიანად ქრება. პარალელურად კონდენსირებული ნახშირბადის რაოდენობის ცვლილება იგივე ხასიათს ატარებს და სისტემაში ~1750 K-ზე მთლიანად ქრება. დაბალ ტემპერატურაზე  $SiO_2$  სისტემაში მცირე რაოდენობით შეიმჩნევა და მისი რაოდენობის მკვეთრი ზრდა ~1400 K-დან იწყება და მაქსიმუმს ~1700 K-ზე აღწევს (22 მას.%); ხოლო ტემპერატურის შემდგომი ზრდით რაოდენობა მცირდება და 2000 K-ზე 1 მას. %-ზე ნაკლებია. ~1200 K-დან ტემპერატურის მომატებით  $Cr_3C_2$ -ის რაოდენობა იზრდება და მაქსიმუმს ~1700 K-ზე აღწევს (~31 მას.%); პარალელურად მიახლოებით იგივე ტემპერატურულ შუალედში  $Cr_7C_3$  და ლითონური Cr გაცილებით მცირე რაოდენობით გამოიყოფა (შესაბამისად ~3 და ~2 მას.%).

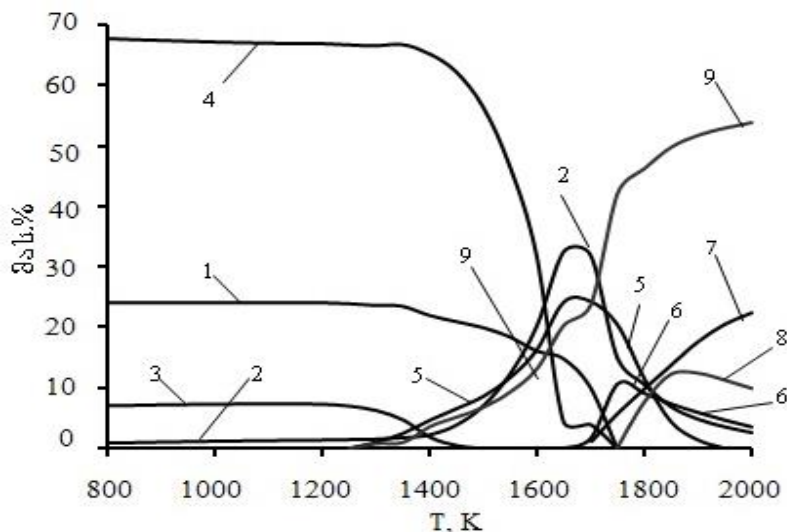
პირველი შედგენილობისაგან განსხვავებით, მეორე სისტემაში ~1650 K-დან გამოიყოფა  $SiC$ , რომლის რაოდენობა იზრდება ~1750 K-მდე (6 მას.%), ხოლო შემდგომ მცირდება და 2000 K-ზე 1 მას. %-ზე ნაკლებია. სისტემაში ქრომის სილიციდები ( $Cr_3Si$ ,  $CrSi$ ,  $CrSi_2$ ,  $Cr_5Si_3$ ) ~1600÷1800 K ტემპერატურულ შუალედში იწყებს გამოყოფას და მათი რაოდენობა იმატებს 2000 K-მდე. განსაკუთრებით დიდი რაოდენობით სისტემაში  $CrSi$  და  $Cr_5Si_3$  გამოიყოფა და შესაბამისად 2000 K-ზე ~14 და ~25 მას.% აღწევს. 2000 K-ზე ლითონურ ნაწილში ძირითადად გამოიყოფა Cr,  $Cr_3Si$ ,  $CrSi$ ,  $CrSi_2$ ,  $Cr_5Si_3$  და ლითონური ხსნარის შემადგენლობაა: Cr – 72,9 მას.%, Si – 27,1 მას.%.

ნახ. 3-ზე წარმოდგენილია მესამე რეჟიმის თერმოდინამიკური ანალიზის შედეგები 800 – 2000 K ტემპერატურულ შუალედში. დიაგრამიდან ჩანს, რომ ქრომის აღდგენა იწყება ~1250 K-დან კონდენსირებული  $Cr_3C_2$  -ის და აირად ფაზაში CO-ს გამოყოფით. წინა შედგენილობებისაგან განსხვავებით ამ შემთხვევაში სისტემაში  $Cr_7C_3$  და ლითონური ქრომი ძალიან მცირე რაოდენობით გამოიყოფა (~1÷2 მას.%).  $Cr_2O_3$ -ის და  $Cr_2Si_3O_9$ -ს რაოდენობის მკვეთრი შემცირება ~1250 K-ის ზევით იწყება და შესაბამისად ეს ნაერთები ~1500 და ~1900 K-ზე ქრება. კონდენსირებული ნახშირბადის რაოდენობის ცვლილება იგივე ხასიათს ატარებს და სისტემაში ~1750 K-ზე მთლიანად ქრება. დაბალ ტემპერატურებზე, სისტემაში  $SiO_2$  მცირე რაოდენობითაა და მისი მკვეთრი ზრდა ~1350 K-დან იწყება და მაქსიმუმს ~1650 K-ზე აღწევს (32,5 მას.%).



ნახ. 2. მეორე რეაქციის კომპონენტების რაოდენობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე: 1-C; 2-SiO<sub>2</sub>; 3-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4-Cr<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>9</sub>; 5-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>; 6-CO; 7-Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>; 8-Cr; 9-Cr<sub>3</sub>Si; 10-Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>

ხოლო შემდგომ მისი რაოდენობა მცირდება და 2000 K-ზე (2,7 მას.%-ია). ტემპერატურის ზრდით ~1250 K-დან Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-ის რაოდენობა იმატებს და მაქსიმუმს ~1650 K-ზე აღწევს (~24 მას.%); ხოლო შემდგომ იგი მცირდება და 2000 K-ზე მთლიანად ქრება.

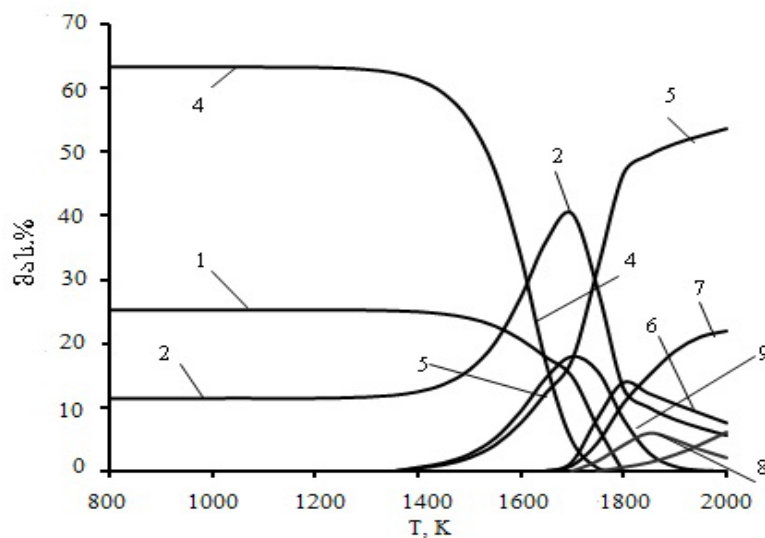


ნახ. 3. მესამე რეაქციის კომპონენტების რაოდენობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე: 1-C; 2-SiO<sub>2</sub>; 3-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4-Cr<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>9</sub>; 5-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>; 6-SiC; 7-CrSi; 8-Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>; 9-CO.

მეორე შედეგნილობის მსგავსად, სისტემაში SiC ~1650 K-დან გამოიყოფა და მისი რაოდენობა იზრდება და მაქსიმუმს ~1750 K-ზე აღწევს (~11 მას.%), ხოლო ტემპერატურის მომატებით იგი მცირდება და 2000 K-ზე 3,5 მას.%-ია. აქედან შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ შედარებით დიდი რაოდენობის სილიციუმის კარბიდის გამოყოფით ქრომის კარბიდის რაოდენობა მცირდება და შესაბამისად მთლიანად ქრება.

როგორც დიაგრამიდან ნახ.3 ჩანს, სისტემაში ქრომის სილიციდები -  $\text{CrSi}$ ,  $\text{Cr}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{CrSi}_2$ , ხოლო -  $\text{Cr}_3\text{Si}$  მცირე რაოდენობით 1700 K-ის ზემოთ იწყებენ გამოყოფას დამათი რაოდენობა იზრდება 2000 K-მდე და შესაბამისად მათი კონცენტრაცია აღწევს  $\text{CrSi}$  – 22,  $\text{Cr}_5\text{Si}_3$  -10,  $\text{CrSi}_2$  - 4 მას.%-ს. 2000 K-ზელითონურ ნაწილში ძირითადად გამოიყოფა: Cr,  $\text{Cr}_3\text{Si}$ , Si,  $\text{CrSi}$ ,  $\text{CrSi}_2$ ,  $\text{Cr}_5\text{Si}_3$  და მიღებული ლითონური ხსნარის (ნა დოზის) შედგენილობაა: Cr – 65,3 მას.%, Si – 34,7 მას.%.

ნახ. 4-ზე წარმოდგენილია მეოთხე რეაქციის თერმოდინამიკური ანალიზის შედეგები 800 – 2000 K ტემპერატურულ შუალედში. დიაგრამიდან ჩანს, რომ ქრომის აღდგენა იწყება ~1300 K-დან კონდენსირებული  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  -ის და აირადფაზაში CO-ს გამოყოფით. პირველი და მეორე კაზმისაგან განსხვავებით, სისტემაში  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , Cr და  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  უმნიშვნელო რაოდენობით გამოიყოფა. კონდენსირებული ნახშირბადის რაოდენობა ~1400 K-მდე არ იცვლება, ხოლო ამ ტემპერატურის ზემოთ იგი მკვეთრად კლებულობს და ~1800 K-მდე მთლიანად ქრება. პარალელურად  $\text{Cr}_2\text{Si}_3\text{O}_9$  ~1350 K-დან იწყებს კლებას და ასევე ~1800 K-მდე მთლიანად ქრება.  $\text{SiO}_2$ -ის რაოდენობა სისტემაში ~1350 K-მდე უცვლელია, ხოლო ტემპერატურის ზრდით იგი იმატებს და ~1700 K-ზე აღწევს მაქსიმუმს (40 მას.%), ხოლო შემდგომ მისი რაოდენობა მკვეთრად კლებულობს და 2000 K-ზე ~5 მას.%-ია.  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  გამოიყოფას ~1350 K-დან იწყებს და მაქსიმუმს ~1700 K-ზე აღწევს (~18 მას.%), ხოლო ტემპერატურის შემდგომი ზრდით იგი კლებულობს და 2000 K-ზე მთლიანად ქრება.



ნახ. 4. მეოთხე რეაქციის კომპონენტების რაოდენობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე: 1-C; 2-SiO<sub>2</sub>; 3-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>; 4-Cr<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>9</sub>; 5-CO; 6-SiC; 7-CrSi; 8-CrSi<sub>2</sub>; 9-Cr<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>

დიაგრამიდან 4 ჩანს, რომ სისტემაში SiC გამოიყოფას იწყებს ~1650 K-დან, რომლის რაოდენობა იმატებს და მაქსიმუმს აღწევს ~1800 K-ზე (14 მას.%), ხოლო შემდგომ მისი რაოდენობა მცირდება და 2000 K-ზე 7,5 მას. %-ია. სისტემაში ~1700 K-ის ზემოთ იწყებს გამოყოფას ქრომის სილიციდები –  $\text{CrSi}$ ,  $\text{CrSi}_2$ ,  $\text{Cr}_5\text{Si}_3$  და მათი რაოდენობა იზრდება 2000 K-მდე და შესაბამისად 22,6 და 2 მას.%-ს აღწევს. სისტემაში ~1750 K-ის ზემოთ უმნიშვნელო რაოდენობის თავისუფალი სილიციუმი გამოიყოფა (~2 მას. %). 2000 K-ზე ლითონურ ნაწილში ძირითადად გამოიყოფა: Cr,  $\text{CrSi}$ , Si,  $\text{CrSi}_2$ ,  $\text{Cr}_5\text{Si}_3$  და ლითონური ხსნარის შედგენილობაა: Cr - 59,35 მას.%; Si - 40,65 მას.%.

ზემოთმოყვანილი კვლევის შედეგების პრაქტიკული რეალიზაციით შესაძლებელია ქრომის ნედლეულის სასარგებლო ათვისების მაჩვენებლის მნიშვნელოვანი გაუმჯობესება. კერძოდ, მიიღწევა ძვირადღირებული დეფიციტური ლითონშემცველი მადნებიდან ქრომის მაქსი-

მალური ალდგენა-მეტალიზაციის და ლითონური ნადნობის (ხსნარის) თანმხლები ოქსიდური, წიდური ნადნობის რაოდენობრივი მინიმიზაცია. შემცირდება ელექტროენერჯის ხვედრითი ხარჯი წარმოებულ პროდუქციაზე. შემცირდება აღმდგენელი ნახშირბადის ფუჭი ხარჯი (ამოწვა), შესაბამისად დაიკლებს მხუთავი და სათბური აირების (CO, CO<sub>2</sub>) გამოყოფა. ყოველივე ეს კი, ბუნებრივი რესურსების კარიერულ მოპოვებასა და გადამუშავებასთან დაკავშირებული ემისიების მინიმიზაციისა და გარემოზე მავნე ანთროპოგენური ზემოქმედების შემცირების წინაპირობაა.

#### დასკვნა.

Cr-Si-O-C სისტემის თერმოდინამიკურმა ანალიზმა აჩვენა, რომ:

- ქრომის ალდგენა სხვადასხვა შედგენილობის კაზმებისათვის იწყება 1200–1300 K ტემპერატურულ ინტერვალში Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-ის გამოყოფით.
- ალდგენილი ლითონური ნაწილი 1700–2000 K ტემპერატურულ დიაპაზონში ძირითადად ქრომის სილიციდების სახითაა წარმოდგენილი, სადაც ქრომის ალდგენის მაჩვენებელმა შესაძლოა თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას - 90-95%-ს მიაღწიოს.
- საწყის შედგენილობაში SiO<sub>2</sub>-ის რაოდენობის მატებით იზრდება SiC-ს კონცენტრაცია და მცირდება ქრომის კარბიდების გამოყოფა.
- კომპონენტების ურთიერთრეაგირების რაციონალური პროპორცია: Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:SiO<sub>2</sub>:C → 1:1.5:6.

#### რეკომენდაცია.

კვლევის შედეგები შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას ქრომისა და ქრომის შემცველი შენადნობებისა და ფეროშენადნების, განსაკუთრებით კი სილიკოქრომისწარმოების ტექნოლოგიური პროცესის ენერგო-რესურსების დაზოგვის ამალგებისათვის, რაც ფრიად მნიშვნელოვანი საკითხია გარემოზე მავნე ზემოქმედების მინიმიზაციის გლობალური ტრენდისა და საწარმოს ეკოლოგიურ-ეკონომიკური უსაფრთხოების პირობების დაკმაყოფილების თვალსაზრისით.

#### ლიტერატურა - REFERENCES - ЛИТЕРАТУРА

1. Furqan Mukhtar, Faisal Qayyum, Zeeshan Anjum, Masood Shah. Effect of chrome plating and varying hardness on the fretting fatigue life of AISI D2 components. *Wear*, vol. 418-419, 2019, pp. 215-225, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.001>
2. Mekicha M.A., Rooij M.B., Matthews D.T.A., Pelletier C., Jacobsa L., Schipper D.J. The effect of hard chrome plating on iron fines formation. *Tribology International*, vol. 142, February 2020, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106003>
3. Bomi Kim, Soojin Kim, Heesan Kim. Effects of Alloying Elements (Cr, Mn) on Corrosion Properties of the High-Strength Steel in 3.5% NaCl Solution. *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2018, 2018. 13 pages, <https://doi.org/10.1155/2018/7638274>
4. Gasik M.I. Chapter 8 - Technology of Chromium and Its Ferroalloys, Editor(s): Michael Gasik, Handbook of Ferroalloys, Butterworth-Heinemann, 2013, pp. 267-316. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097753-9.00008-3>.
5. Jandieri G.V., Sakhvadze D.V., Zakharov G.V., Kharati R.G. Research and development of the self-propagating high-temperature synthesis for production of special polycomponent ligatures from wastes of ferroalloy production. *Metallurgy Engineering*, vol. 3, 2019, pp. 40-43. Accessed - <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37651398>
6. Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.И. Теория и технология производства ферросплавов. М.: Металлургия, 1988, 784 с.
7. Хром Казахстана : монография / В.И. Гриненко, О.И. Поляков, М.И. Гасик и др.; Под общ. ред. М.И. Гасика и др. - Москва : Металлургия, 2001. - 416 с.



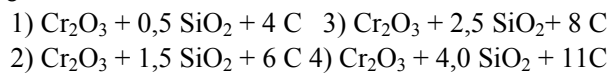
8. Гришин О.М., Надточій А.А.. Вплив добавок заліза на кінетику відновлення оксиду хрому вуглецем і карбідами. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. Том 30 (69) Ч. 2, № 6, 2019. – С. 24-29. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.6-2/05>
9. Ахметов К.Т., Рошин В.Е. Жидкофазное разделение металлизированной мелочи хромовой руды. Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». Том. 15, № 4. 2015. – С. 57-62 <https://doi.org/10.14529/met150407>
10. Jishkariani G., Jandieri G., Sakhvadze D., Tavadze G., Oniashvili G. and Aslamazishvili Z. Ecological Problems Related to Mining-Metallurgical Industries and Innovatory, Energy-Efficient Ways of Solving Them. Engineering, Vol. 4, No. 2, 2012, pp. 83-89. <https://doi.org/10.4236/eng.2012.42011>
11. Dzhandieri, G.V. Diagnostics of efficiency and optimization of the organizational and economic system of ferrous metals recycling. Chernye Metally, vol. 2020, Issue 1, January 2020, pp. 56-62. Accessed - <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85081219521&origin=inward&txGid=935176f416bd0aa4191389558dcc6aeb>
12. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. М.: Metallurgia, 1994, 352 с.
13. Чагдуров А.Н., Халтанова В.М., Смирнягина Н.Н. Термодинамическое моделирование фазовых равновесий в системе Cr-C-O, синтез и строение слоев карбидов хрома. Химическая физика и мезоскопия. Том 14, №1, 2012. – С. 57-62
14. Заякин О.В., Уполовникова А.Г., Жучков В.И. Термодинамическое моделирование карботермического восстановления хрома из бедного сырья. Бултеровские сообщения. Том.54. №5, 2018. – С. 145-151. <https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/18-54-5-145>

## Cr-Si-O-C სისტემაში კომპონენტების ურთიერთქმედების თერმოდინამიკური ანალიზი და მისი ეკოლოგიური ასპექტები

### ჯანელიძე ი.

#### რეზიუმე

კვლევის მიზანია ქრომიანი შენადნობების პირომეტალურგიული წარმოების ტექნოლოგიური რეჟიმების ოპტიმიზაცია. შესრულებულია Cr-Si-O-C სისტემის სრული თერმოდინამიკური ანალიზი შემდეგი შედგენილობებისათვის:



თერმოდინამიკური ანალიზის ძირითადი შედეგები წარმოდგენილია დიაგრამების სახით, ტემპერატურული ინტერვალისათვის 800-2000 K. დადგენილია, რომ საკვლევი ოქსიდური კომპონენტების ურთიერთრეაგირების ოპტიმალური ტემპერატურული ინტერვალი მდებარეობს 1700-2000 K ზღვრებში, ხოლო კომპონენტების Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-C ოპტიმალური თანაფარდობაა 1:1.5:6. აღნიშნულია, რომ კვლევის შედეგების პრაქტიკული რეალიზაციით შესაძლებელია ქრომშემცველი ნედლეულის სასარგებლო ათვისების მაჩვენებლის მნიშვნელოვანი გაუმჯობესება და გარემოზე მავნე ზემოქმედების შემცირება.

## THERMODYNAMIC ANALYSIS OF INTERACTION BETWEEN THE COMPONENTS IN THE Cr-Si-O-C SYSTEM AND ITS ECOLOGICAL ASPECTS

Janelidze I.

### Abstract

The objective of the research is to optimize the technological modes of pyrometallurgical production of chromium alloys.

Complete thermodynamic analysis of Cr-Si-O-C system was carried out for the following compounds:



The basic results for all compounds are presented in the form of diagrams (dependence of components content at temperature range (800-2000K). It is determined that the optimal temperature range for the interaction of the researched oxide components is in the range of 1700-2000 K, and the optimal ratio of  $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{C}$  components is 1:1.5:6. It is emphasized that the practical implementation of research results can significantly improve the rate of utilization of chromium-containing raw materials and reduce the impact on the environment.

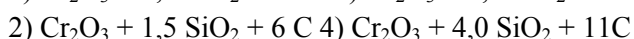
## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТ СИСТЕМЫ Cr-Si-O-C И ЕГО ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Джанелидзе И.

### Р е ф е р а т

Цель исследования - оптимизация технологических режимов пирометаллургического производства хромовых сплавов.

Полный термодинамический анализ системы Cr-Si-O-C был проведен для следующих соединений:



Основные результаты для всех соединений представлены в виде диаграмм (зависимость содержания компонент в диапазоне температур (800-2000K). Определено, что оптимальный температурный диапазон взаимодействия исследуемых оксидных компонент находится в диапазоне 1700- 2000 K, а оптимальное соотношение компонент  $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{C}$  составляет 1:1.5:6. Отмечается, что практическая реализация результатов исследований позволяет значительно повысить коэффициент использования хромсодержащего сырья и снизить его влияние на окружающую среду.

## ი უ ბ ი ლ ე ე ბ ი

### ვულოცავთ დაბადების დღეს გეოფიზიკის ინსტიტუტის იუბილარებს

მიმდინარე წელს 80 წელი შეუსრულდა გამოყენებითი და ექსპერიმენტალური გეოფიზიკის სექტორის უფროს მეცნიერ თანამშრომელს, ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა აკადემიურ დოქტორს თამაზ გვანცელაძეს, 75 წელი შეუსრულდათ: ზღვის დინამიკისა და ატმოსფეროს მოდელირების სექტორის მთავარ მეცნიერ თანამშრომელს, ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორს ალექსანდრე სურმავას და ატმოსფეროს ფიზიკის სექტორის უფროს მეცნიერ თანამ-შრომელს, ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა აკადემიურ დოქტორს დარეჯან კირკიტაძეს; 70 წელი შეუსრულდა სეისმოლოგიის, სეისმური საშიშროებისა და კატასტროფების რისკის სექტორის მთავარ მეცნიერ თანამშრომელს, ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა აკადემიურ დოქტორს ოთარ ვარაზანაშვილს. იუბილარებს ვუსურვებთ დიდხანს სიცოცხლეს, ჯანმრთელობას, დიდ წარმატებებს პირად ცხოვრებასა და სამეცნიერო საქმიანობაში.

**თამაზ გვანცელაძე** - ფიზ.-მათ. მეცნ. აკადემიური დოქტორი. დაიბადა 1940 წელს. 1965 წელს დაამთავრა ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მექანიკა-მათემატიკის ფაკულტეტი. მუშაობდა ნ. მუსხელიშვილის სახელობის გამოთვლითი ცენტრის გამოყენებითი გეოფიზიკის განყოფილებაში. 1977 წლიდან გადმოყვანილია გეოფიზიკის ინსტიტუტის ახლადშექმნილ გამოთვლითი გეოფიზიკის განყოფილებაში ინჟინერ-პროგრამისტის თანამდებობაზე. 1984 წლიდან გრავიმეტრიის განყოფილების თანამშრომელია, სადაც ამუშავეს მეთოდიკას და ალგორითმს ლითოსფეროს გრავიტაციული მოდელის შესაქმნელად. კავკასიაში ლითოსფეროს შესწავლის მიზნით თ. გვანცელაძეს დამუშავებული აქვს გრავი-სეისმური მოდელირების მეთოდოლოგია. 1990 წელს მან წარმატებით დაიცვა საკანდიდატო დისერტაცია თემაზე „გრავი-სეისმური მოდელირების მეთოდოლოგია და კავკასიის ლითოსფეროს აგებულება მეცხრე გეოტრავერსის გასწვრივ“. გამოყენებითი და ექსპერიმენტალური გეოფიზიკის სექტორში მის სამეცნიერო ინტერესთა სფეროს წარმოადგენს გრავიმეტრიის პირდაპირი და შებრუნებული ამოცანების ამოხსნა.

**ალექსანდრე სურმავა** - ფიზ.-მათ. მეცნ, დოქტორი, ცნობილი სპეციალისტია ატმოსფეროს ფიზიკის, გეოფიზიკური ეკოლოგიისა და გარემოს გაჭუჭყიანების მონიტორინგის საკითხებში. დაიბადა 1945 წელს. 1963 წელს დაამთავრა თბილისის 22-ე საშუალო სკოლა ვერცხლის მედალზე, ხოლო 1969 წელს - თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ფიზიკის ფაკულტეტი სპეციალობით „თეორიული ფიზიკა“. 1972-1975 წლებში ის ყოფილი სსრკ მეცნიერებათა აკადემიის ციმბირის განყოფილების გამოთვლითი ცენტრის (ქ. ნოვოსიბირსკი) ასპირანტია. 1978 წელს იქვე დაიცვა საკანდიდატო დისერტაცია. ა. სურმავა მუშაობდა ჰიდრომეტეოროლოგიის

ინსტიტუტში ლაბორატორიის გამგის, წამყვანი მეცნიერ თანამშრომლის თანამდებობებზე. იყო გარემოს გაჭუჭყიანების კონტროლის ცენტრის ხელმძღვანელი. ა. სურმავა 1989 წლიდან გეოფიზიკის ინსტიტუტის თანამშრომელია. ამჟამად ის ზღვის დინამიკისა და ატმოსფეროს მოდელირების სექტორის მთავარი მეცნიერი თანამშრომელია. 2005 წელს წარმატებით დაიცვა სადოქტორო დისერტაცია თემაზე: „საშუალო მასშტაბის ატმოსფერული პროცესების განვითარების თეორიული გამოკვლევა და ზოგიერთი ეკოლოგიური ამოცანის ამოხსნა“. ა. სურმავას მიერ დამუშავებულია შემდეგი რიცხვითი მოდელები: ატმოსფერული ფრონტის და ატმოსფერული ფრონტალური ტალღების ბაროტროპული და ბაროკლინური რიცხვითი მოდელები; კავკასიის რთული რელიეფისა და საქართველოს რეგიონების მეზომასშტაბურ ატმოსფერულ პროცესებზე გავლენის მოდელები; კავკასიასა, საქართველოში და ქ. თბილისში მტვრის რეგიონალური და ლოკალური გადატანის მოდელები; საქართველოს მდინარეებში და ნიადაგში გამაჭუჭყიანებელი ნივთიერებების გავრცელების მოდელები. ა. სურმავას მიერ დამუშავებულია ქალაქების თბილისისა და რუსთავის ჰაერის გაჭუჭყიანების პროგნოზის სტატისტიკური მეთოდი, რომელიც დაინერგა და მისი საშუალებით 1987-1990 წლებში ხორციელდებოდა ამ ქალაქების ჰაერის გაჭუჭყიანების ოპერატიული პროგნოზი. ა. სურმავა ეწეოდა პედაგოგიურ მოღვაწეობას ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტში და თბილისის ტექნიკურ უნივერსიტეტში. ის არის ბუნების დაცვის და სოფლის მეურნეობის სამინისტროს. საზოგადოებრივი ექსპერტი. მას გამოქვეყნებული აქვს 120-ზე მეტი სამეცნიერო ნაშრომი.

**დარეჯან კირკიტაძე** - ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა აკადემიური დოქტორი, ატმოსფეროს ფიზიკის სექტორის უფროსი მეცნიერ თანამშრომელი. 1968 წელს დაამთავრა თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ფიზიკის ფაკულტეტი სპეციალობით „ბირთვული ფიზიკა“. იმავე წლიდან მუშაობს გეოფიზიკის ინსტიტუტის ატმოსფეროს ფიზიკის განყოფილებაში. 2005 წელს დაიცვა საკანდიდატო დისერტაცია თემაზე „ატმოსფეროს აეროზოლური გაჭუჭყიანების მახასიათებლების გამოკვლევა ქ. თბილისში“. 2005-2007 წლებში ეკავა ინსტიტუტის სწავლული მდივნის თანამდებობა. ამჟამად არის ინსტიტუტის სამეცნიერო საბჭოს მდივანი.

დ. კირკიტაძის სამეცნიერო კვლევების სფეროა: ბუნებრივი და ანტროპოგენული ატმოსფერული მახასიათებლების და მოვლენების შესწავლა, ატმოსფერული პროცესების ექსპერიმენტული მოდელირება, ეკოლოგია, ის მონაწილეობას ღებულობდა და ღებულობს რამდენიმე ეროვნული და საერთაშორისო სამეცნიერო-კვლევითი პროექტების დამუშავებაში ატმოსფეროსა და ღრუბლების ფიზიკის დარგში.

**ოთარ ვარაზანაშვილი** - ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა აკადემიური დოქტორი. დაიბადა 1950 წელს ქ. თბილისში. 1971 წელს დაამთავრა თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ფიზიკის ფაკულტეტი და ამავე წლიდან გეოფიზიკის ინსტიტუტის რეგიონული სეისმოლოგიის განყოფილების თანამშრომელია. 1979 წელს გამოჩენილი რუსი მეცნიერის და საზოგადო მოღვაწის პროფესორ ნ. შებალინის ხელმძღვანელობით წარმატებით დაიცვა საკანდიდატო დისერტაცია თემაზე: „ძლიერი მიწისძვრების კერის ზონები კავკასიის სეისმური დარაიონების ამოცანებში“. წლების განმავლობაში ის ხელმძღვანელობდა სეისმური საშიშროების ლაბორატორიას. ო. ვარაზანაშვილს შესრულებული აქვს სამუშაოები, რომლებიც პრაქტიკულ ღირებულებას წარმოადგენენ ჩვენი ქვეყნის სახალხო მეურნეობისათვის. ასეთებია: საქართველოს უმნიშვნე-

ლოვანესი ობიექტების მშენებლობის ტერიტორიების დეტალური სეისმური შეფასება; 1981-2018 წლებში მისი ხელმძღვანელობით და მონაწილეობით ჩატარებული სამუშაოები საქართველოს დიდი ქალაქების და ჰესების მშენებლობის მოედნების, წყალსაცავების, რკინიგზის მაგისტრალების, ატომური ელექტროსადგურების მშენებლობის ტერიტორიების და მრავალი სხვა ობიექტების სეისმური საშიშროების დასადგენად. ო. ვარაზანაშვილი რეგიონული სეისმოლოგიის განყოფილებაში ჩატარებული შემდეგი გამოკვლევების მონაწილეა: ძლიერი მიწისძვრების პროგნოზის პრობლემები, სეისმური დარაიონების რუკების შედგენა, ისტორიული მიწისძვრების შესწავლა და სხვა. ამჟამად ო. ვარაზანაშვილი სეისმოლოგიის, სეისმური საშიშროებისა და კატასტროფების რისკის სექტორის მთავარი მეცნიერ თანამშრომელია. სექტორში ემსახურება კვლევის ახალ მიმართულებას - ბუნებრივი კატასტროფების საშიშროების და რისკის შეფასება. ო. ვარაზანაშვილის მიერ პირველად არის დამუშავებული საქართველოს ტერიტორიაზე მომხდარი სხვადასხვა ტიპის ბუნებრივი კატასტროფების მსგავსობისა და პარამეტრული უნიფიცირების თეორიული საკითხები, რასაც საბოლოო ჯამში მოჰყვა საქართველოში ყველაზე უფრო გავრცელებული 12 ტიპის ბუნებრივი კატასტროფების პარამეტრული კატალოგების შექმნა და მათ ბაზაზე მრავლობითი რისკებს გათვლა ნაციონალურ დონეზე.

## Ю Б И Л Е И

### ПОЗДРАВЛЯЕМ ЮБИЛЯРОВ ИНСТИТУТА ГЕОФИЗИКИ С ДНЕМ РОЖДЕНИЯ

Поздравляем сотрудников Института геофизики им. М.З. Нодиа академического доктора физ.-мат. наук Т.А. Гванцеладзе, доктора физ.-мат. наук А.А. Сурмава, академических докторов физ.-мат. наук Д.Д. Киркитадзе и О.Ш. Варазанашвили с днем рождения. Желаем им крепкого здоровья, благополучия, много радостей, мира и больших успехов в научной деятельности и в личной жизни.

**Тамаз Акакиевич Гванцеладзе**- академический доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник сектора прикладной и экспериментальной геофизики. М.А. Гванцеладзе родился в 1940 году. В 1965 году окончил механико-математический факультет Тбилисского государственного университета. Начал работать в отделе прикладной геофизики Вычислительного центра им. Н.И. Мухелишвили. В 1977 году вместе с отделом переведен в отдел вычислительной геофизики Института геофизики на должность инженера-программиста. С 1984 года он в отделе гравиметрии, где разрабатывает методику и алгоритмы для создания гравитационной модели литосферы. В 1990 году Т.А. Гванцеладзе защищает кандидатскую диссертацию на тему: «Методика грависейсмического моделирования и строение литосферы Кавказа вдоль IX траверса». В секторе Т.А. Гванцеладзе занимается решением прямых и обратных задач гравиметрии.

**Александр Александрович Сурмава** - доктор физико-математических наук, известный специалист по вопросам физики атмосферы, геофизической экологии и мониторинга загрязнения природной среды. Родился в 1945 году. В 1963 году закончил Тбилисскую 22-ую среднюю школу с серебряной медалью, а в 1969 году – физический факультет Тбилисского государственного университета по специальности «Теоретическая физика». В 1972- 1975 годах А.А. Сурмава – аспирант Вычислительного центра Сибирского отделения АН СССР (г. Новосибирск), где и защитил кандидатскую диссертацию: «Теоретическое исследование развития атмосферных фронтальных волн». Работал в Институте гидрометеорологии АН Грузии на должностях ведущего научного

сотрудника, заведующего лабораторией. Был начальником Центра контроля загрязнения природной среды. С 1989 года А.А. Сурмава - сотрудник Института геофизики. Он занимает должность главного научного сотрудника в секторе динамики моря и моделирования атмосферы. В 2005 году защитил докторскую диссертацию на тему: «Теоретическое исследование развития среднесаибных атмосферных процессов и решение некоторых экологических задач». А.А. Сурмава разработал следующий ряд численных моделей: баротропнаяи бароклинная численные модели атмосферного фронта и атмосферных фронтальных волн; модели влияния сложного рельефа Кавказа и регионов Грузии на масштабные атмосферные процессы; модели регионального и локального переноса пыли в атмосфере Кавказа, Грузии и г. Тбилиси; модели распространения загрязняющих веществ в реках Грузии и в почве; модели рассоления почвы путем введения сорбента. А.А. Сурмава разработал статистический метод прогноза загрязнения воздуха городов Тбилиси и Рустави, который был внедрен в ГрузУГКС и с помощью которого в 1987-90 годах осуществлялся оперативный прогноз загрязнения воздуха этих городов. А.А. Сурмава автор более 120 научных работ. Он читает лекции в Тбилиском государственном университете им. Ив.Джавахишвили и в Тбилиском техническом университете.

**Дареджан Давидовна Киркитадзе** - академический доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник сектора физики атмосферы. В 1968 году закончила физический факультет Тбилиского государственного университета по специальности «Ядерная физика». С 1968 года работает в Институте геофизики в отделе физики атмосферы. В 2005 году защитила кандидатскую диссертацию на тему; «Исследование характеристик аэрозольного загрязнения атмосферы в г. Тбилиси». В 2005-2007 гг. занимала должность ученого секретаря института. Ныне – она секретарь ученого совета Института геофизики. Сфера научной деятельности Д.Д. Киркитадзе: изучение естественных и антропогенных атмосферных характеристик и явлений в Грузии.

**Отар Шалвович Варазанаშვილი** – академический доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник сектора сейсмологии, сейсмической опасности и риска катастроф. О.Ш. Варазанаშვილი родился в 1950 году в г. Тбилиси. В 1971 году окончил физический факультет Тбилиского государственного университета. С 1971 года - сотрудник отдела региональной сейсмологии Института геофизики. В течение нескольких лет руководил сейсмической станцией «Мтацминდა», принимал участие в разработке проблем прогноза землетрясений и в составлении карт сейсмического районирования. В 1973-1977 гг. прошел курс аспирантуры. В 1979 году под научным руководством известного сейсмолога и общественного деятеля Н.В. Шебалина защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Очаговые зоны сильных землетрясений в задаче сейсмического районирования Кавказа». Затем в отделе региональной сейсмологии О.Ш. Варазанаშვილი занимал должность заведующего лабораторией сейсмической опасности. Работы, проведенные О.Ш. Варазанаშვილი, имели большое практическое значение для сельского хозяйства Грузии. Первым долгом, это детальная сейсмическая оценка некоторых городов страны; территорий, предусмотренных для строительства атомных электростанций, ГЭС-ов, водохранилищ, железнодорожных магистралей и т.д. В данное время О.Ш. Варазанаშვილი занимает должность главного научного сотрудника в секторе Сейсмологии, сейсмической опасности и риска катастроф. Им впервые разработаны теоретические вопросы подобия разных типов естественных катастроф и их параметрического унификации. В результате созданы параметрические каталоги наиболее распространенных катастроф в Грузии и произведен их расчет.

*თბუ. მ. ნოდიაშვილი. გეოფიზიკის ინსტიტუტი  
Институт геофизик им. М.З. Нодиа, ТГУ*

*მილოცვები შეადგინა ლიანა დარახველიძემ  
Поздравления составила Л.К. Дарахвелидзе.*

## ვიხსენებთ კოლეგებს - ВСПОМИНАЕМ КОЛЛЕГ

### აკადემიკოსი მერაბ ალექსიძე



2020 წლის 8 დეკემბერს 90 წელი შეუსრულდებოდა სახელოვან მამულიშვილს, საზოგადო მოღვაწეს, გამოჩენილ გეოფიზიკოსს, საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის აკადემიკოსს, ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორს, საქართველოს სახელმწიფო პრემიის ლაურეატს პროფესორმერაბ ალექსიძეს.

მ. ალექსიძე დაიბადა თბილისში 1930 წლის 8 დეკემბერს ექიმების ოჯახში. 1955 წელს წარჩინებით დაამთავრა თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ფიზიკის ფაკულტეტი, ხოლო 1958 წელს - სსრკ მეცნიერებათა აკადემიის ზუსტი მექანიკისა და გამოთვლითი ტექნიკის ინსტიტუტის (მოსკოვი) ასპირანტურა. იმავე წელს, იქვე ბრწყინვალედ დაიცვა საკანდიდატო დისერტაცია. შესანიშნავად ფლობდა რა უმაღლესი მათემატიკის მეთოდებს, მ. ალექსიძემ დიდი წარმატებები მოიპოვა, როგორც მათემატიკური ფიზიკის ფუნდამენტური საკითხების, ასევე

გეოფიზიკური მეცნიერების სხვადასხვა დარგების (გრავიმეტრია, სეისმოლოგია, გეოთერმია) გამოკვლევებში. 1964 წელს მ. ალექსიძემ მოსკოვში ო. შმიდტის სახელობის დედამიწის ფიზიკის ინსტიტუტში დაიცვა სადოქტორო დისერტაცია თემაზე: „სიმძიმის ძალის რედუქციის ზოგიერთი საკითხის კვლევა“. 1967 წელს მიენიჭა პროფესორის წოდება. 1973-1975 წლებში და 1977 წლიდან ის გეოფიზიკის ინსტიტუტის დირექტორის მოადგილეს სამეცნიერო ნაწილში. ერთდროულად მან ინსტიტუტში შექმნა ინსტიტუტის გამოთვლითი ცენტრი, რომელიც დააკომპლექტა ნ. მუსხელიშვილის სახელობის გამოთვლითი ცენტრის გამოყენებითი გეოფიზიკის განყოფილების თანამშრომლებით, სადაც ის ამ განყოფილების ხელმძღვანელი ბრძანდებოდა 1958-1973, 1976 წლებში. მალევე განყოფილება აღიჭურვა სერიული უნივერსალური გამოთვლითი მანქანა EC-1022 -ით. პროფ. მ. ალექსიძის ხელმძღვანელობით და ინსტიტუტის სათანადო განყოფილებებთან თანამშრომლობით შექმნილია საქართველოს ტერიტორიის გეოფიზიკურ მონაცემთა ბანკები და კავკასიის მიწისძვრების საინფორმაციო საძიებო სისტემები. დამუშავებულია ალგორითმები: დედამიწის გეომაგნიტური ველის დამაბულობის სხვადასხვა მდგენელების მისაღებად; დედამიწის წიაღის თერმული გაიშვიათების გრაფიტაციული ეფექტის გასათვალისწინებლად; წვიმისა და სეტყვის ღრუბლების გათვალისწინების მიზნით პროგრამების შესადგენად; გეოდეზიური დაკვირვებების საფუძველზე დეფორმაციის სამგანზომილებიანი კომპონენტის განსასაზღვრავად და სხვ. მ. ალექსიძემ შეიტანა ფუნდამენტური წვლილი თეორიული და გამოყენებითი გრავიმეტრიის განვითარებაში. მის მიერ დამუშავებულ იქნა გრავიმეტრიული ტრანსფორმაციის ორიგინალური მეთოდები, შებრუნებული ამოცანების ამოხსნის ფუნდამენტური საკითხები. მ. ალექსიძის მიერ შემოთავაზებული შებრუნებული

ამოცანების ამოხსნადობისა და მდგრადობის საკითხების ახლებური განხილვა - ყველაზე მნიშვნელოვანი მიღწევა გრავიმეტრიაში.

1983 წელს მ. ალექსიძე აირჩიეს საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის წევრ-კორესპონდენტად, ხოლო 1988 წელს - აკადემიის ნამდვილ წევრად. ის იყო ავტორი 160-მდე სამეცნიერო შრომის, მათ შორის 18 მონოგრაფიის. 1984 წელს მიენიჭა საქართველოს რესპუბლიკის სახელმწიფო პრემია მეცნიერებისა და ტექნიკის დარგში.

აკად. მ. ალექსიძე იყო ეროვნული კონგრესისა და 1992 წლის 11 ოქტომბრის საქართველოს რესპუბლიკის ცენტრალური საარჩევნო კომისიების თავმჯდომარე,

აკად. მ. ალექსიძე იყო ბრწყინვალე მეცნიერი, მაღალი ავტორიტეტის მქონე ინტელიგენტი.

მერაბ ალექსიძე ტრაგიკულად დაიღუპა 1993 წლის 10 ივლისს.

*ლიტერატურა: მერაბ ალექსიძე. ბიობიბლიოგრაფია. - მეცნიერება.-2000.-61გვ.*

## **АКАДЕМИК МЕРАБ АЛЕКСАНДРОВИЧ АЛЕКСИДЗЕ**

8 октября 2020 года исполнилось бы 90 лет видному грузинскому геофизику и общественному деятелю, человеку редких достоинств, доктору физико-математических наук, лауреату Государственной премии Грузии, академику Национальной академии наук Грузии, профессору МЕРАБУ АЛЕКСАНДРОВИЧУ АЛЕКСИДЗЕ.

Акад. М.А. Алексидзе родился и вырос, в известной в Тбилиси, семье врачей. Его брат был врачом-офтальмологом, племянник – ныне известный в Грузии хирург-офтальмолог. Род «Алексидзе» выдвинул в Грузии немало видных деятелей науки и искусства. Эта фамилия была утверждена в дворянском достоинстве Российской империей в 19-ом веке, да и Мераб Александрович, когда его спрашивали об этом, не без улыбки, отвечал: «да, мы – столбовые дворяне». Мераб Александрович в отличие от членов семьи, своей профессией избрал точные науки. В 1955 году он с отличием окончил физический факультет Тбилисского государственного университета, а в 1958 году в Москве - аспирантуру Института точной механики и вычислительной техники АН СССР. В том же году, там же защитил кандидатскую диссертацию. Прекрасно владея методами высшей математики, с аспирантской скамьи он смог добиться значительных успехов как в решении фундаментальных вопросов математической физики, так и в различных областях геофизики.

Акад. М.А. Алексидзе около сорока лет верно и самоотверженно служил грузинской науке, последние 16 лет его научной деятельности прошли в Институте геофизики, куда он, по мнению сослуживцев, стремительно ворвался в звании профессора, занял должность заместителя директора Института и вполне заслуженно упрочил имя блестящего ученого. Одновременно из Вычислительного центра им. Н.И. Мухелишвили АН Грузии, в котором М.А. Алексидзе работал до этого, перевел укомплектованный учеными-профессионалами, руководимый им, отдел вычислительной геофизики, и в Институте геофизики, естественно, при поддержке дирекции Института, организовал вычислительный центр, оснащенный серийной универсальной вычислительной машиной ЕС-1022. За относительно короткий период это направление получило в институте большое развитие. В сотрудничестве с соответствующими отделами были созданы: банки геофизических данных территории Грузии; информационные поисковые системы кавказских землетрясений, разработан алгоритм, на базе которого была создана универсальная программа распределения гипо- и эпицентров землетрясений; разработан алгоритм для получения отдельных составляющих напряженного геомагнитного поля; разработан алгоритм учета гравитационного эффекта термического разуплотнения недр Земли, основанный на решении граничных задач термоупругости; разработан алгоритм и создана программа для распознавания ливневых и градовых облаков; им предложен алгоритм определения компонентов трехмерного тензора деформации на основе геодезических наблюдений. Среди работ М.А. Алексидзе в области геофизики особо следует выделить те исследования, которые внесли фундаментальный вклад в развитие теоретической и прикладной гравиметрии по следующим основным направлениям: редукция силы тяжести, формулы для нормального значения силы тяжести и вопросы региональной интерпретации гравиметрических данных, о разрешимости и устойчивости решения обратных задач гравиметрии. Необходимо отметить, что по вопросам редукции силы тяжести М.А. Алексидзе работал еще в 1958-64 годах. Он



впервые произвел трехмерный пересчет аномального поля силы тяжести Кавказа в верхнее полу-пространство. Работы в этом направлении им были подытожены в докторской диссертации «Исследование некоторых вопросов редукции силы тяжести», которая была издана в 1965 году в Москве в виде монографии и, которая получила высокую оценку крупных специалистов. Основные монографии, в которых представлены итоги исследований и фундаментальные идеи Мераба Александровича, выполнены именно в Институте геофизики: «Решение некоторых основных задач гравиметрии».-1985, Мецниереба, 411с.; «Приближенные методы решения прямых и обратных задач гравиметрии».-1987, Москва, Наука, 334с.; «Фундаментальные функции уравнений математической физики в приближенных решениях граничных задач».- 1989, Ч. I, ТГУ, 411с. (Часть вторая этой монографии на 239 страницах составлена и издана в 2005 году учениками акад. М.А. Алексидзе академическим доктором физ.-мат. наук М. Закрадзе и профессором Дж. Кириа); «Решение некоторых прямых и обратных задач гравиметрии».-1990, Москва, Наука, 395с.; «Решение некоторых основных прямых и обратных задач сейсмологии».-1990, Мецниереба, 429с.; «Фундаментальные функции в приближенных решениях граничных задач».-1991, Москва, Наука. В 1982 году М.А. Алексидзе был избран в члены-корреспонденты АН Грузии, в 1988 году - в действительные члены. В 1994 году, как со-руководитель совместно с академиком Б.К. Балавадзе, цикла работ «Разработка и реализация гравиметрических методов для решения геофизических, геологических и инженерных задач» посмертно получил Государственную премию Грузии по науке и технике.

Под научным руководством и при консультации акад. М.А. Алексидзе защищено 18 кандидатских диссертаций и 6 докторских диссертаций. Он был автором около 160 научных статей. Акад. М. А. Алексидзе активно сотрудничал с учеными союзных республик бывшего СССР, с учеными Соцстран. Высокий научный уровень, разнообразное и широкое дарование, эрудиция давали ему возможность легко осуществлять научные связи с ними. Он являлся членом секции «Теоретическая и вычислительная геофизика» в Научном совете АН СССР по геофизическим методам разведки, был членом Европейского геофизического общества, членом Международного геофизического общества и т.д. Чтобы заняться только наукой и осуществить поставленные задачи акад. М.А. Алексидзе отказался от должности директора Института, которая отнимала у него много времени, и в 1992 году, по собственному желанию, занял должность главного научного сотрудника Института геофизики.

Известно, что с 90-ых годов прошлого столетия в республике наступили времена больших политических перемен. Царил дух революционных преобразований, независимости, возникал авангард людей с новым мировоззрением. Мераб Александрович не мог быть простым наблюдателем этих событий, как новатор, не только в науке, он активно включился в политическую жизнь страны, серьезно занялся вопросами приватизации и выборов. В 1991-1992гг. он был избран членом Государственного Совета республики, в 1991-1992гг. был заместителем председателя правления общества «Тбилисели», был председателем Центральных избирательных комиссий Национального Конгресса Грузии (1990г.) и Республики Грузия в 1992-1993 годах.

Мераб Александрович Алексидзе трагически погиб 10 июля 1993 года в возрасте 62 лет, в зените своих творческих возможностей. Погиб умный, дисциплинированный, сильный духом человек, бывший спортсмен. Невосполнимая потеря для семьи, для всех тех, кто его хорошо знал, а для Института геофизики - масштабная утрата. Причина его гибели до сих пор не установлена. Тело его было обнаружено лежащим на земле, в саду под тутовым деревом, на загородном участке Института. Факт, что он взобрался на то дерево, плоды которого очень любил. Известно, что через крону этого дерева проходила высоковольтная линия. Символично, что у окон кабинета Мераба Александровича росло тутовое дерево. Царство небесное и вечная память Мерабу Александровичу.

## ПРОФЕССОР АНАТОЛИЙ ГЕОРГИЕВИЧ БАЛАБУЕВ

В 2019 году исполнилось 130 лет со дня рождения известного грузинского геофизика, заслуженного деятеля науки Грузии, орденоносца, доктора физико-математических наук, профессора Анатолия Георгиевича Балабуева. А.Г. Балабуев известен среди геофизиков бывшего Советского Союза как исследователь вопросов метеорологии и климатологии, вопросов генезиса климата Грузии и Закавказья. Им был разработан метод генетического анализа климатических и метеорологических условий нашей страны.

А. Г. Балабуев родился 4 июля 1889 г. в Манглиси (Грузия) в семье военнослужащего. Среднее образование получил в первой Тифлисской гимназии, в 1914 году окончил физико-математический факультет Киевского государственного университета. Интересен послужной список Анатолия Георгиевича. В 1915-1916 годах он лаборант кафедры физики Высших женских курсов г. Тбилиси. С 1916 года находится по призыву на военной службе. 1917-1918 гг. – чиновник военного времени, служил в Кавказском военно-топографическом отделе Штаба Кавказского фронта. С 1921 года А.Г. Балабуев в г. Тбилиси занимается педагогической деятельностью: 1921-1923 гг. – преподаватель Первого коммерческого училища; 1923-1924 гг. – ассистент кафедры физики Закавказского Коммунистического университета; 1924-1928 гг. – ассистент кафедры физики Государственного Политехнического института; 1928-1930 гг. – лектор Государственного университета Грузии; 1930-1931 гг. – доцент Института субтропических культур; 1930-1933 гг. – доцент Закавказского лесотехнического института; 1931-1932 гг. – руководитель электро-метеорологической группы в Институте электрификации и механизации сельского хозяйства; 1932-1933 гг. – занимал должность старшего специалиста и заведовал секцией климатологии в Отделении естественных наук Закавказского филиала АН СССР; 1933-1938 гг. – профессор Закавказского лесотехнического института (в 1931-1936 гг. – заведующий кафедрой метеорологии, а в 1936-1938 гг. – заведующий кафедрой физики и метеорологии).

В 1933 году А.Г. Балабуев утвержден Межведомственной квалификационной Комиссией при Наркоме просвещения Грузинской ССР в ученом звании профессора.

С 1938 года проф. А.Г. Балабуев - сотрудник Геофизического института Закавказского филиала АН СССР. В 1938-1951 гг. он занимал должность заведующего лабораторией физики атмосферы, основанной в Институте в 1936 году. По совместительству занимал должность старшего научного сотрудника в Теоретическом отделе института. С приходом Анатолия Георгиевича в институте начали изучать: генезис климата Закавказья и переноса воздушных масс в Западной Грузии, облачные системы и грозовые явления в Тбилиси и его окрестностях. Исследовался термический режим верхних слоев атмосферы на территории Грузии. Институт начал проводить исследования синоптико-метеорологических условий на территории Грузии. Была разработана методика генетического анализа климатических и метеорологических условий для горной страны. Разработка этой проблемы, одновременно с анализом генезиса климатических условий Закавказья, послужила основанием для присуждения проф. А.Г. Балабуеву степени доктора физико-математических наук. 26 декабря 1941 года в Тбилисском государственном университете проф. А.Г. Балабуев защитил докторскую диссертацию на тему «Генезис климата Закавказья». Решением Высшей Аттестационной Комиссии от 5 июня 1941 года гражданину Балабуеву Анатолию Георгиевичу была присуждена ученая степень доктора физ.-мат. наук. Диплом доктора наук был выдан лишь 20 июня 1949 года под номером МФМ №00122. В годы Великой Отечественной войны 1941-1945 гг. А.Г. Балабуев выполнял ряд специальных заданий военного командования.

С 1951 года по 1956 год Анатолий Георгиевич - заведующий лабораторией физики атмосферы Института геофизики АН Грузии, а с 1956 года – заведующий отделом физики атмосферы. В отделе, в основном, занимались изучением условий возникновения, распределения и эволюции аэрозолей в нижних слоях атмосферы. Несмотря на то, что основное направление работ, проводимых А.Г. Балабуевым были теоретического характера, они имели сугубо практическое значение для сельского

хозяйства Грузии, так как ставили целью подвести теоретический фундамент под ведущиеся практические мероприятия по насаждению и расширению в субтропической зоне ценных культур (чай и др.). К работам А.Г. Балабуева прикладного характера относятся: районирование трасс линий электропередач по метеорологическим условиям, исследование гололедно-изморозных явлений в Закавказье и ветроэнергетических ресурсов Грузии. Также он вел исследовательскую работу по вопросам метеорологического обслуживания энергосистемы Закавказья и по вопросам борьбы с гололедом на линиях высоковольтных передач (обследование трассы Храм ГЭС-а). Им впервые построена грозовая карта Закавказья. Проф. А.Г. Балабуев всегда был в числе руководителей работ в Алазанской долине по изучению условий образования и развития облаков, обуславливающих возникновение градовых явлений, и по изысканию методов предупреждения выпадения града.

Вот, как отзываяется проф. Т. Вейнберг о работе проф. А. Г. Балабуева «Град и его образование». «эта работа заполняет собой давно чувствующийся в нашей научно-популярной литературе пробел - отсутствие научного и достаточно общепонятного изложения вопросов, касающихся града, дает ряд ценных сопоставлений и критических замечаний, в некоторой мере обоснованных на его собственных наблюдениях и исследованиях. Эта работа усугубляет ее значимость в качестве весьма полезной научно-популярной книжки, представляемой особый интерес для лиц, работающих в подверженных градобитию местностях (в частности, в Закавказье).»

В 1974 году изменилась структура Института геофизики. С 1974 года проф. А.Г. Балабуев руководил отделом физики пограничного слоя атмосферы и загрязнения воздуха сектора физики атмосферы. Отдел занимался исследованиями вопросов загрязнения воздуха и процессами распространения примесей в атмосфере, изучением весьма актуальной проблемы по исследованию условий возникновения, распределения и эволюции аэрозолей в нижних слоях тропосферы.

За время научной деятельности проф. А.Г. Балабуевым выполнено более 100 научных работ.

Проф. А.Г. Балабуев награжден правительственными наградами. В 1951 году награжден орденом Ленина, имел медали «За оборону Кавказа», «За доблестный труд в Отечественной войне». В 1961 году ему присвоено звание Заслуженного деятеля науки Грузии.

Под научным руководством проф. А.Г. Балабуева защищено свыше 10 кандидатских диссертаций. Профессор А.Г. Балабуев скончался 19 января 1980 года.

Грузинские геофизики хранят память о профессоре Анатолии Георгиевиче Балабуеве, как о ценном работнике, обладающим большой эрудицией и фундаментальными знаниями в области своей профессии.

### **МАРГАРИТА ЛЕВАНОВНА ЧЕЛИШВИЛИ (1914-2003)**

### **ЭРМОНИЯ ИОСИФОВНА ХАХУТАШВИЛИ (1914-2003)**

Исполнилось 105 лет со дня рождения кандидата физ.-мат. наук, магнитолога Маргариты Левановны Челишвили (1914-2003гг.) и главного магнитолога Душетской магнитной обсерватории Эрмонии Иосифовны Хахуташвили (1914-2003гг.).

М.Л. Челишвили в 1953-56 гг. была заведующей Душетской магнитной обсерватории, в которой производились непрерывная регистрация вариаций элементов магнитного поля и периодическое определение абсолютных значений. М.Л. Челишвили далее, до выхода на пенсию (1987г.) работала в отделе физики горных пород, где исследовала магнитные свойства горных пород.

Э.И. Хахуташвили до конца жизни в абсолютном и в вариационном магнитных павильонах обсерватории производила наблюдения над магнитными приборами, собирала, обрабатывала информацию и посылала ее в Мировой центр данных.

### **ВАХТАНГ ГЕОРГИЕВИЧ ПАПАЛАШВИЛИ (1919-2011)**

Исполняется 100 лет со дня рождения кандидата физ.- наук, старшего научного сотрудника отдела региональной сейсмологии Вахтанга Георгиевича Папалашвили (1919-2011гг.). В 1956-63 годах он занимал должность ученого секретаря института, а в 1971-1973 годах – заведующего отделом региональной геофизики. Как руководитель Кавказского зонального центра Единой системы сейсмических наблюдений В.Г. Папалашвили координировал на Кавказе проблематику по сейсмичности Кавказского региона и прогнозу землетрясений. В.Г. Папалашвили принимал участие в составлении атласа карты сейсмичности СССР по зоне Кавказа. С 2007 года находился на пенсии.

### **ОТАР ДАВИДОВИЧ ГОЦАДЗЕ (1929-1993)**

Исполняется 90 лет доктору физ.-мат. наук, руководителю отдела региональной сейсмологии Отару Давидовичу Гоцадзе (1929-1993гг.). О. Д. Гоцадзе –видный представитель третьего поколения грузинских сейсмологов. С его именем связано дальнейшее развитие сейсмологии в Грузии. Он был инициатором создания и исполнителем автоматизированной информационно- поисковой системы землетрясений, происшедших на территории Грузии, инициатором создания и внедрения цифровых сейсмографов, им разработаны алгоритмы и количественные характеристики программного обеспечения, вопросы картирования сейсмологических элементов с помощью ЭВМ.

### **НАЗИ ДАВИДОВНА НАМГАЛАУРИ (1934-2006)**

### **АЛЬБЕРТ ГРИГОРЬЕВИЧ НОДИЯ (1934-2011)**

### **ТАМАЗ ГРИГОРЬЕВИЧ САЛУКВАДЗЕ (1934-1912)**

Исполняется 85 лет со дня рождения кандидатов физ.-мат. наук Нази Давидовны Намгалаури (1934-2006 гг.), старших научных сотрудников сектора физики атмосферы Альберта Григорьевича Нодия (1934-2011гг.) и Тамаза Григорьевича Салуквадзе (1934-1912 гг.).

Н.Д. Намгалаури работала в Душетской магнитной обсерватории в должности старшего научного сотрудника, обслуживала магнитометры в вариационном павильоне, принимала участие в работах по проведению аэромагнитной съемки Кавказа, изучала структуру геомагнитного поля Кавказа и участвовала в составлении среднесуточных электрических баз данных H, D, Zсоставляющих магнитного поля Земли для периода 1880-2003 годов.

Т.Г. Салуквадзе в течение многих лет работал заведующим лабораторией динамики облаков и активных воздействий, принимал участие в исследовании радиолокационных характеристик конвективных облаков, был автором изобретения «Метод защиты территории от града».

А.Г. Нодия изучал электрическую структуру конвективных облаков, влияние облачности на содержание в атмосфере различных микропримесей, исследовал турбулентный режим атмосферы в облачные и безоблачные дни.

### **АВТАНДИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ КОРДЗАДЗЕ (1944-2018)**

Исполняется 75 лет со дня рождения руководителя сектора математического моделирования геофизических процессов моря и атмосферы, вице-президента экологической академии наук Грузии, лауреата премий имени профессора М.З. Нодия и академика М.А. Алексидзе, доктора физ.-мат. наук, профессора Автандила Александровича Кордзадзе (1944-2018гг.). Проф. А.А. Кордзадзе усовершенствовал модели динамики Черного моря и адаптировал их к грузинскому сектору моря и прилегающей акватории, разработал региональную систему прогноза состояния восточной части Черного моря.

### **ПЕТРЕ ВИКТОРОВИЧ МАНДЖГАЛАДЗЕ (1944-1993)**

Исполняется 75 лет со дня рождения главного геофизика Опытной-методической геофизической экспедиции Института геофизики, кандидата физ.-мат. наук, почетного профессора Римского университета, сейсмолога Петре Викторовича Манджгаладзе (1944-1993гг.) Основным направлением его научных исследований было изучение прямых и обратных задач сейсмологии, проблем прогноза землетрясений. П.В. Манджгаладзе принимал участие в создании прогнозной сети в Грузии и в совместных сейсмических исследованиях с учеными из Италии, Японии, Турции.

### **ТЕЙМУРАЗ ГЕОРГИЕВИЧ ОНОПРИШВИЛИ (1944-2009)**

#### **ВАХТАНГ ВЛАДИМИРОВИЧ ТКЕБУЧАВА (1944-2007)**

Исполняется 75 лет со дня рождения кандидатов физ.-мат. наук Теймураза Георгиевича Онопришвили (1944-2009гг.) и Вахтанга Владимировича Ткебучава (1944-2007 гг.).

Старший научный сотрудник отдела сейморазведки Т.Г. Онопришвили занимался изучением глубинного геологического строения территории восточной Грузии, изучал сейсмический режим и глубинное строение сейсмоактивного Джавахетского нагорья с помощью сейсмической станции «Черепаша». В 2006 году вышел на пенсию.

Старший научный сотрудник отдела гравиметрии, заместитель директора института по научно-технической части (1988-1992 гг.) В.В. Ткебучава в отделе занимался машинной обработкой оптимальных методов трансформации потенциальных полей Земли. В 1993 году перешел на другую работу.

### **ТЕМУРИ ДМИТРИЕВИЧ АБРАМИШВИЛИ (1949-2005)**

#### **ПААТА ОТАРИЕВИЧ ДЖИДЖЕЙШВИЛИ (1949-2001)**

#### **ИРАКЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ БОЛКВАДЗЕ (1949-2002)**

#### **ШОТА ПЕТРОВИЧ ДИАСАМИДЗЕ (1949-1997)**

#### **ЭЛИСО НИКОЛАЕВНА НАТЕНАДЗЕ (1949-2003)**

Исполняется 70 лет со дня рождения: кандидатов геол.-мин. наук Темури Дмитриевича Абрамишвили (1949-2005гг.) и Пааты Отариевича Джиджейшвили (1949-2001гг.), кандидатов физ.-мат. наук Ираклия Николаевича Болквадзе (1949-2002 гг.), Шота Петровича Диасамидзе (1949-1997гг.) и Элисо Николаевны Натенадзе (1949-2003гг.). Эти ученые ушли из жизни сравнительно в раннем возрасте, полные сил и энергии, творческих планов.

Научный сотрудник отдела электроразведки и инженерных электрических исследований Т.Д. Абрамишвили изучал естественные электрические поля, связанные с геологическими структурами глубинного заложения.

Старший научный сотрудник отдела физики землетрясений П.О. Джиджейшвили изучал сейсмотектонику Джавахетского нагорья.

Научный сотрудник отдела физики землетрясений И.Н. Болквадзе изучал динамические параметры очагов землетрясений Кавказа и их пространственно-временные вариации.

Старший научный сотрудник отдела сейсморазведки Ш.П. Диасамидзе совместно с сотрудниками отдела исследовал сейсмическими методами оползневые участки некоторых районов Грузии, составлял скоростные разрезы земной коры и верхней мантии в межгорной депрессии Грузии. Умер в США.

Научный сотрудник отдела региональной сейсмологии Э.Н. Натенадзе занималась изучением сейсмического режима Малоазийско-Иранского звена.

### **НАТАЛЬЯ ЗУРАБОВНА МАНДЖАВИДЗЕ (1955-2001)**

Наталья Зурабовна Манджавидзе - кандидат физико-математических наук, научная сотрудница лаборатории вариаций космических лучей Института геофизики, дочь известных грузинских физиков Тины Роинишвили и Зураба Манджавидзе. Она работала в Институте геофизики в 1977-1994 гг. Пройдя аспирантский курс в 1983-1986 гг., в 1987 году в Ленинградском физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе с большим успехом защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук, куда и перешла работать.

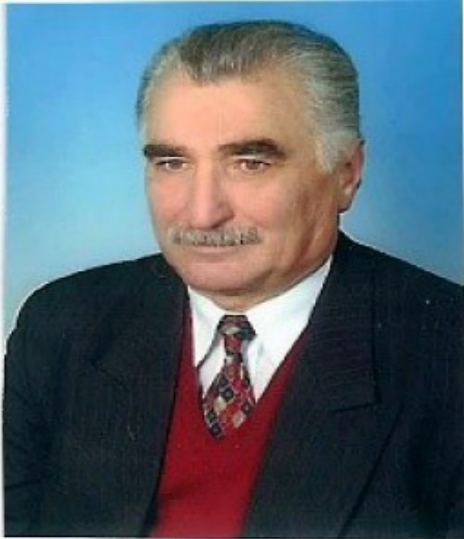
В 2009 году в Тбилиси появилась книга В Головина «Головинский проспект». На странице 251 читаем: «В физико-техническом институте на Международной конференции по космическим лучам, мы станем свидетелями удивительной «разборки». Главному эксперту в этой области-американцу Р. Рамати работа Наташи кажется несерьезной, и он покидает зал, громко произнося «Ерунда». Наташа ловит его в перерыве, начинает объяснять смысл работы и светило науки созывает еще одно – неформальное совещание. А на этом совещании соглашается с концепцией упорной грузинки, хотя она и противоречит его собственной. И не только соглашается, а приглашает Наташу поработать в США, сначала в Мэрилендском университете, а затем... 10 лет проработала Наталия Манджавидзе в Научно-исследовательском институте NASA, того самого знаменитого космического агентства... Публикации «Вашингтон пост», «Нью-Йорк таймс», «Бюллетень Американской астрономической ассоциации» - это некрологи о смерти физика-исследователя Наты Манджавидзе, первой из советских ученых, приглашенной в Говардский центр космических полетов. Наташу унесла неизлечимая болезнь".

*თსუ, მ. ნოდის სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი.  
Институт геофизик им. М.З. Нодиа, ТГУ.*

*გახსენებები შეადგინა ლიანა დარახველიძემ  
Воспоминания составила Л.К. Дарахвелидзе.*

## ნეკროლოგები

### პროფესორი მიხეილ ალანია (1935-2020)



2020 წლის 18 მაისს გარდაიცვალა ცნობილი ქართველი მეცნიერი, გეოფიზიკოსი, ასტროფიზიკოსი, კოსმოსური სხივების ფიზიკის მკვლევარი, 1969-1993 წლებში საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის გეოფიზიკის ინსტიტუტის კოსმოსური სხივების განყოფილების ხელმძღვანელი, ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი მიხეილ ალანია.

მ. ალანია დაიბადა 1935 წლის 30 აპრილს ხობის რაიონის, სოფელ შუა ქვალონში. 1953 წელს იქვე წარჩინებით დაამთავრა საშუალო სკოლა, ხოლო 1958 წელს - თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ფიზიკის ფაკულტეტი. 1958 წლიდან მ. ალანია საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის გეოფიზიკის ინსტიტუტის კოსმოსური სხივების განყოფილების თანამშრომელია. განყოფილების პრობლემას შეადგენდა, კოსმოსური სხივების ანიზოტროპიისა და

სხვადასხვა კლასის ვარიაციების გამოკვლევის საფუძველზე, მზეზე მიმდინარე პროცესებისა და დედამიწის ახლო კოსმოსური სივრცის ელექტრომაგნიტური მდგომარეობის შესწავლა. მ. ალანია აქტიურად ჩაება განყოფილების თემატური გეგმით გათვალისწინებულ სამუშაოების შესრულებაში..

1966 წელს მ. ალანიამ თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტში წარმატებით დაიცვა დისერტაცია ფიზიკა-მათემატიკის კანდიდატის სამეცნიერო ხარისხის მოსაპოვებლად თემაზე: „კოსმოსური სხივების მოდულაციური ხასიათის პერიოდული ვარიაციები მზისა და მაგნიტურ აქტივობასთან დაკავშირებით“. 1969 წელს ის აირჩიეს განყოფილების ხელმძღვანელად. მ. ალანიამ შეიმუშავა ორიგინალური კონსტრუქციის ჯვარედინი ტელესკოპი კოსმოსური სხივების მეზონურ კომპონენტებზე დაკვირვებებისათვის მიწისზედა და მიწისქვეშა დონეებზე, რამაც განაპირობა განყოფილებაში ექსპერიმენტული სამუშაოების განვითარების ახალი ეტაპი. მ. ალანიას ხელმძღვანელობით განყოფილებაში ახალგაზრდა თანამშრომელთა მიერ შეიქმნა მრავალარხიანი კომპლექსური მოწყობილობა მონაცემთა პირველადი დამუშავებისა და ოპტიმიზაციისათვის, რისთვისაც მისმა ავტორებმა საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის სპეციალური პრემია დაიმსახურეს. ჰელიოსფეროში კოსმოსური სხივების გავრცელების უფრო სრულყოფილად აღსაწერად მ. ალანიას მიერ 1978-1980 წლებში შემოთავაზებული იყო ახალი მათემატიკური მოდელი - ანიზოტროპული დიფუზიის განზოგადებული ტენზორი პლანეტათა შორისი სივრცის სამგანზომილებიანი რეგულარული მაგნიტური ველის მოდელისათვის.

მ. ალანიას მიერ გამოკვლეულია, რომ მზის 11-წლიანი აქტივობის ლუწ ციკლებში კოსმოსური სხივების განედური და რადიალური ნაკადები დრეიფის გამო მიმართულია ისე, რომ იწვევენ კოსმოსური სხივების სიმკვრივის ზრდას და რადიალური გრადიენტის შემცირებას, ხოლო კენტ ციკლებში შებრუნებული სიტუაციაა. ეს კვლევები და სხვა მეცნიერული შედეგები, დაკავშირებული კოსმოსური სხივების ვარიაციების თეორიულ, ექსპერიმენტულ, მოდელურ და მეთოდურ კვლევებთან, დაედო საფუძველად მ. ალანიას სადოქტორო დისერტაციას: „კოს-

მოსური სხივების ანიზოტროპიული დიფუზია საპლანეტაშორისო სივრცეში“, რომელიც წარმატებით დაიცვა 1982 წელს კიევის გეოფიზიკურ ინსტიტუტში. დისერტაცია მაღალ დონეზე შეფასდა მოსკოვის ფიზიკური კვლევის ინსტიტუტში. 1988 წელს მ. ალანას პროფესორის წოდება მიენიჭა. პროფ. მ. ალანია კოსმოსური სხივების განყოფილებას ხელმძღვანელობდა 1993 წლამდე.

1993 წლიდან პროფ. მ. ალანია მიწვევით გადადის პოლონეთში და მუშაობას იწყებს ქ. სიედლცეს საბუნებისმეტყველო და ჰუმანიტარულ მეცნიერებათა უნივერსიტეტის მათემატიკისა და ფიზიკის ინსტიტუტში. 1994-2009 წლებში ის ამავე ინსტიტუტის ფიზიკის დეპარტამენტის უფროსია, ხოლო 1995-2005 წლებშიაირჩიეს მათემატიკის და ფიზიკის ინსტიტუტის დირექტორად და უნივერსიტეტის სენატის წევრად., 2009-2018 წლებში ის ამავე უნივერსიტეტის ფიზიკის კათედრის გამგეა. პროფ. მ. ალანია უნივერსიტეტში ჩამოაყალიბა ახალგაზრდა მკვლევართა ჯგუფი, რომელმაც მისი ხელმძღვანელობით შეასრულა მნიშვნელოვანი მეცნიერული კვლევები კოსმოსური სხივების ვარიაციების, მზის აქტივობისა, მზის ქარის და მზე-დედამიწის კავშირების ფიზიკის დარგში. გარდა ამისა, მას მიღებული აქვს სხვა საინტერესო შედეგებიც, რომლებსაც დიდი მნიშვნელობა აქვთ დღევანდელი აქტუალური პრობლემების - კოსმოსური ამინდისა და დედამიწაზე კლიმატის ცვლილებების შესწავლაში.

პროფ. მ. ალანას ავტორობით და თანაავტორობით გამოქვეყნებულია 270 სამეცნიერო სტატია და 3 მონოგრაფია კოსმოსური სხივების, კოსმოფიზიკისა და მზე-დედამიწის კავშირების და გეოფიზიკის დარგში, მათ შორის 70-მდე შესრულებულია პოლონეთში, რომლებიც გამოქვეყნებულია მაღალი რეიტინგის მქონე ჟურნალებში. პროფ. მ. ალანას სამეცნიერო ხელმძღვანელობით დაცულია 9 საკანდიდატო დისერტაცია საქართველოს გეოფიზიკის ინსტიტუტში, ხოლო პოლონეთში - 5 აკადემიური დოქტორის და 4 მეცნიერებათა დოქტორის დისერტაციები.

პროფ. მ. ალანია იყო: 1970-2002 წლებში რუსეთის მეცნიერებათა აკადემიასთან არსებული კოსმოსური სხივების საპრობლემო საბჭოს წევრი, ხოლო 1980-2002 წლებში - რუსეთის აკადემიასთან არსებული მზე-დედამიწის კავშირების საპრობლემო საბჭოს წევრი; 1982-1996 წლებში - საქართველოს მეცნიერების აკადემიასთან არსებული მზე-დედამიწის კავშირების ფიზიკის საპრობლემო საბჭოს თავმჯდომარე; 2007 წლიდან პოლონეთის ასტროფიზიკური ნაწილაკების ქსელის წევრი და კოსმოსური სივრცის კვლევის საერთაშორისო კომისიის (COSPAR) ასოცირებული წევრი; 2005 წლიდან არჩეულია ევროპის მეცნიერებათა აკადემიის (EURASC) წევრად.

1984 წელს გეოფიზიკის ინსტიტუტის დაარსებიდან 50 წლისთავთან დაკავშირებით მ. ალანია დაჯილდოვდა საქართველოს უმაღლესი საბჭოს პრეზიდიუმის საპატიო სიგელით. 2001 წელს სიედლცეს უნივერსიტეტის წინაშე დამსახურებისათვის პროფ. მ. ალანამ მიიღო მედალი. ხოლო 2004 წელს მიიღო პოლონეთის სპორტისა და განათლების მინისტრის მედალი ახალგაზრდობის აღზრდისა და განათლებისათვის. 2009 წელს პოლონეთში ხანგრძლივი მეცნიერული მოღვაწეობის გამო პოლონეთის პრეზიდენტმა ლეხ კაჩინსკიმ პროფ. მ. ალანია დააჯილდოვა ოქროს მედალით.

2015 წლის 30 აპრილს ქ. სიედლცეს უნივერსიტეტის მათემატიკისა და ფიზიკის ინსტიტუტმა პროფ. მ. ალანას 80 წლის იუბილე გადაუხადა. სამწუხაროდ დაბადებიდან 85 წლისთავს ის თბილისში, საავადმყოფოში შეხვდა. ღვაწლმოსილი მეცნიერის, პროფესორის, თავის დარგზე შეყვარებული უნიჭიერესი ადამიანის, შესანიშნავი მეოჯახის, ბატონი მიხეილის სახელი მუდამ ემახსოვრებათ მის კოლეგებს და მეგობრებს.

*ოსუ, მ. ნოდის სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი*



## სერგო გოგმაჩაძე



2020 წლის 24 ივლისს მძიმე ავადმყოფობის შემდეგ გარდაიცვალა გეოფიზიკის ინსტიტუტის სეისმოლოგიის, სეისმური საშიშროებისა და კატასტროფების რისკის სექტორის უფროსი მეცნიერი თანამშრომელი, გეოლოგიურ მეცნიერებათა აკადემიური დოქტორი სერგო გოგმაჩაძე. 2010 წლამდე ს. გოგმაჩაძე მუშაობდა საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის კ. ზავრიევის სახელობის სამშენებლო მექანიკისა და სეისმომედეგობის ინსტიტუტის საინჟინრო სეისმოლოგიისა და ტექნიკური გამოკვლევების ლაბორატორიის გამგის თანამდებობაზე. 2012 წლიდან ის გეოფიზიკის ინსტიტუტის თანამშრომელია, მონაწილეობდა საინჟინრო-გეოლოგიურ კვლევებში. ს. გოგმაჩაძე აგრეთვე იყო საქართველოს საინჟინრო აკადემიისა და ნაციონალური აკადემიის „ფაზისი“-ს წევრი, 2012 წლიდან საქართველო-ამერიკული უნივერსიტეტის (GAU)=პროფესორი.

ს. გოგმაჩაძე 180-ზე მეტი სტატიისა და 9 მონოგრაფიის ავტორია.

გეოფიზიკის ინსტიტუტის თანამშრომლებს დიდხანს ემახსოვრებათ ეს შესანიშნავი, კეთილი, მუდამ მომღიმარი ადამიანი.

## ევგენია კურცხალია (1943-2020)

2020 წლის 21 აგვისტოს მძიმე ავადმყოფობის შემდეგ გარდაიცვალა გეოფიზიკის ინსტიტუტის თანამშრომელი 1973-2006 წლებში, ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა კანდიდატი ევგენია (ჯულია) კურცხალია. ე. კურცხალია დაიბადა 1943 წ. ქ. თბილისში, 1966 წელს დაამთავრა თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ფიზიკის ფაკულტეტი სპეციალობით „თეორიული ფიზიკა“. 1973-76 წლებში ისასპირანტია. 1978 წელს დაიცვა საკანდიდატო დისერტაცია თემაზე: „ზედა ატმოსფეროში ნეიტრალური ჰორიზონტალური ქარის დინამიკის ზოგიერთი საკითხები“. 1990 წლიდან მაგნიტოსფეროსა და იონოსფეროს განყოფილების უფროსი მეცნიერი თანამშრომელია. ევგ. კურცხალიას მიერ გამოთვლილია იონოსფეროში, 100 – 400 კილომეტრის ფარგლებში მსხვილმასშტაბოვანი ქარების სისტემები. დასაწინაა, რომ ეს ნიჭიერი მეცნიერი ადრე წავიდა ინსტიტუტიდან, სამწუხაროდ ამ ქვეყნიდანაც.

*თსუ. მ. ნოდია სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი*

## გიორგი ხერხეულიძე (1933-2020)



გიორგი ირაკლის ძე ხერხეულიძე დაიბადა 26.05 1933 ქ. თბილისში, მეცნიერთა ოჯახში. 1940წ. შევიდა და 1951 წ. დაამთავრა თბილისის #13 საშუალო სკოლა ოქროს მედალზე, იმავე წელს შევიდა ქ. თბილისის რკინიგზის ტრანსპორტის ინჟინერთა ინსტიტუტში, რომელიც დაამთავრა 1957 წ. წარჩინების დიპლომით. ინსტიტუტში მიიღო მონაწილეობა ჰიდრავლიკის ლაბორატორიის კვლევებში (მდ. გლდანულაზე ხიდის ზონაში კალაპოტური პროცესების რეგულირება).

1957 წ. დაიწყო მუშაობა საკავშირო სახელმწიფო საპროექტო ინსტიტუტში “სოიუზდორპროექტის” (“საკგზაპროექტის”) თბილისის ფილიალში, ინჟინრის თანამდებობაზე, სადაც მიიღო მონაწილეობა ხიდების, ტიპური საყრდენი კედლების პროექტებისა და ნორმა-

ტიული ხასიათის დოკუმენტების შემუშავებაში, ამ დოკუმენტებში ჩართული იყო მის მიერ შემუშავებული ნაპირდაცვითი დეზების ოპტიმალური განლაგების ფორმულები (М: “Мосгипротранс“, 1961).

1961 – 1967 წლებში მუშაობდა საქართველოს ჰიდროტექნიკისა და მელიორაციის ინსტიტუტის ჰიდროტექნიკის ლაბორატორიაში უმცროსი მეცნიერი თანამშრომლის თანამდებობაზე. აღნიშნულ პერიოდში, მდინარეთა რიონის, ვახშის და თელავისხევი-მაცანცარას კალაპოტების მოდელელებზე შეიმუშავა: მდ. რიონის წყალგამყოფი კვანძის, მდ. ვახშზე არსებული ხიდისა, და თელავისხევის (ქ. თელავში) ჩამონადენის ოპტიმალური მართვისა და რეგულირების რეკომენდაციები, რომლებიც განხორციელდა დაპროექტების შემდეგ. 1965 წელს დაამთავრა სოფლის მეურნეობის აკადემიის ასპირანტურის დაუსწრებელი კურსი სპეციალობით „სამთო მელიორაცია“, ხოლო 1967 წელს დაიცვა საკანდიდატო დისერტაცია სპეციალობით „ჰიდრავლიკა და საინჟინრო ჰიდროლოგია“.

1967 წლიდან ბოლო პერიოდამდე მუშაობდა ამიერკავკასიის რეგიონალურ სამეცნიერო-კვლევითი ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტში (ამჟამად საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტში): 1978 წ-მდე – უფროსი მეცნიერი მუშაკი, 1978–2005 წლებში ლაბორატორიის გამგე, 2005 წ-დან დღემდე – წყლის რესურსებისა და ჰიდროლოგიური პროგნოზების განყოფილების უფროსი მეცნიერი თანამშრომელი.

განვლილ პერიოდში, პასუხისმგებელი ან ხელმძღვანელის რანგში ასრულებდა სახელმწიფო პროგრამებით, სხვადასხვა ხელშეკრულებებით და გრანტებით დაფინანსებულ პროექტებს (თემებს) ღვარცოფმცოდნეობისა, მდინარეთა კალაპოტების ჰიდრავლიკისა და რეგულირების დარგში. ბოლო პერიოდში იღებდა მონაწილეობას საქართველოს ჰიდროლოგიური და გლაციოლოგიური ცნობარის მომზადებაში და საქართველოს რეგიონთა ღვარცოფსაშიმი ზონების რუკების შემუშავებაში.

ჩატარებული სამუშაოების შედეგები და მიღებული კვალიფიკაცია გამოიყენებოდა შემდეგ საქმიანობაში:

1. მონაწილეობა სახელმწიფო და საუწყებო საექსპერტო კომისიების მუშაობაში და საექსპერტო დასკვნების შემუშავებაში (სსრკ და საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიისა, სსრკ და საქართველოს მეცნიერებისა და ტექნიკის სახელმწიფო კომიტეტის სელური კომისია, საქართველოს პარლამენტის ბუნების დაცვისა და ბუნებრივი რესურსების კომისია, კავკასიის საუღელტეხილო რკინიგზის, მდ. ჭოროხზე (1998) კაშხლების აშენების, ბაქო-ჯეიჰანისა და სხვა პრობლემებთან დაკავშირებული სახელმწიფო და საუწყებო კომისიები).

2. კავკასიის, შუა აზიის, ყირიმის მდინარეებზე მდებარე მრავალი (340-ზე მეტი) ჰიდროტექნიკური ნაგებობათა პროექტის საინჟინრო ჰიდროლოგიური და ჰიდრაულიკური დასაბუთებისა და კონსტრუქციული გადაწყვეტილებების მისაღებად საჭირო კონსულტირება, დასაბუთება და რეკომენდაციების შემუშავება.

3. ქ. თბილისის აშენებული სანაპიროების (დიდმის ხიდს ზედა და ორთაჭალა ჰესის ქვედა ბიეფში) პროექტის („თბილქალაქპროექტი“) ჰიდროლოგიურ-ჰიდრაულიკური დასაბუთება. თელავის ღვარცოფსაწინააღმდეგო კომპლექსის (ზაკნიგმის ტიპის ნაგებობები) და ღვარცოფგამტარი არხის კონსტრუქციული სქემის ავტორი (პროექტის ავტორი – გ. ჩხეიძე, „საქწყალპროექტი“).

სულ გამოქვეყნებული აქვს 123 შრომა, მათ შორის: მისი რედაქციით და მონაწილეობით შემუშავდა და გამოქვეყნდა 1 მილიონიანი მასშტაბის: საქართველოს (2), ამიერკავკასიის და აღმოსავლეთის, სომხეთისა და აზერბაიჯანის ღვარცოფსაშიში ტერიტორიების რუკები და შემუშავებული იქნა 15 ნორმატიული სახის დოკუმენტი და მითითება.

დაჯილდოებულია: 1971 წ. - სსრკ ჰიდრომეტსამსახურის წარჩინების ნიშანი; 1982 წ. – სსრკ ჰიდრომეტეოროლოგიის სახელმწიფო კომიტეტის საპატიო სიგელი “სახალხო მეურნეობის ჰიდრომეტეოროლოგიურ მომსახურებაში მაღალი მაჩვენებლებისათვის”; 1983 წ. – საქართველოს დამსახურებული ინჟინრის წოდება “ნაყოფიერი მუშაობისათვის ბუნების დაცვის დარგში”; 1984 წ. – სსრკ გეოგრაფიული საზოგადოების დიპლომი – “გეოგრაფიულ მეცნიერებათა სფეროში გამორჩეული სამეცნიერო შრომებისათვის”; 2003 წ. – საქართველოს ღირსების მედალი; 2013 წ. – საქართველოს ღირსების ორდენი; 2013 წ. – Медаль за заслуги в области селеведения. “Debris Flow Association” (Russian Federation).

გიორგი ხერხეულიძე გარდაიცვალა 2020 წლის 01 ნოემბერს.

ბატონ გიორგის სახელი მუდამ ემახსოვრებათ მის მეგობრებს და კოლეგებს.

*სტუ, ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი  
თსუ, მ. ნოდისას სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი*

## მარატ ციციშვილი (1942-2020)



მარატ ციციშვილი – ფიზ.-მათ. მეცნ. კანდიდატი და ბიოლ. მეცნ. დოქტორი, პროფესორი, არაერთი დიდი საერთაშორისო პროექტისა და გრანტის ხელმძღვანელი, საბუნებისმეტყველო და სამედიცინო სამეცნიერო აკადემიების ნამდვილი წევრი, დაიბადა 1942 წლის 14 ოქტომბერს პედაგოგების ოჯახში. საკანდიდატოც და სადოქტოროც ჰქონდა დაცული მოსკოვში, უშუალოდ ეკოლოგიაში: საკანდიდატო – „რადიაციული ფონისა და ატმოსფეროს ზოგიერთი მახასიათებლების შესწავლა ამიერკავკასიაში ატომური ელექტროსადგურების ოპტიმალური განლაგებისათვის“, (1977), სადოქტორო – „ამიერკავკასიის რადიაციული მონიტორინგის შედეგები“, (1992).

მარატ ციციშვილი იყო საქართველოს პროფესიონალ ეკოლოგთა არასამთავრობო გაერთიანების – საქართველოს ეკოლოგიურ მეცნიერებათა აკადემიის დამაარსებელი და უცვლელი ხელმძღვანელი. მარატ ციციშვილი ითვლებოდა მთიანი რეგიონების რადიაციული ეკოლოგიის ფუძემდებლად, რეგიონალური ეკოლოგიის „შებენიერი ამოცანების“ ერთ-ერთ ჩამომყალიბებლად და ამომხსნელად. იგი ორი თემატური სამეცნიერო კრებულის „რადიაციული კვლევები“ და „ეკოლოგიის პრობლემები“ მთავარი რედაქტორი და გამომცემელი იყო, აგრეთვე საერთაშორისო საპრობლემო საბჭოს „რადიოლოგია და რადიაციული ეკოლოგია“ წევრი და იმავე დასახელების საერთაშორისო ჟურნალის რედკოლეგიის წევრი იყო.

სადღეისოდ მ. ციციშვილი იმ იშვიათ ქართველ მეცნიერთა რიცხვს მიეკუთვნება, რომლის თანაავტორობით დაწერილი სახელმძღვანელო „ზოგადი ეკოლოგია“ ჯერ კიდევ ხმარებაშია რუსეთში. კიდევ უფრო ცნობილია „იუნესკოს“ მიერ მოწონებული მისი ხელმძღვანელობით შექმნილი სახელმძღვანელოების სერია: „ზოგადი ეკოლოგია“ და „საინჟინრო ეკოლოგია“. 300 მეტი სამეცნიერო ნაშრომის ავტორია, რამოდენიმე საერთაშორისო სამეცნიერო საზოგადოებისა და აკადემიის წევრი; ფაქტობრივად საქართველოში იგი ახორციელებდა ეკოლოგიური კვლევების მეცნიერულ კოორდინაციას საერთაშორისო დონეზე.

მარატ ციციშვილი გარდაიცვალა 2020 წლის 14 დეკემბერს.

ნათელი ხსოვნა მასზე სამუდამოთ დარჩება ჩვენს გულეებში.

*საქართველოს ეკოლოგიურ მეცნიერებათა აკადემია  
თსუ, მ. ნოდია სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი*

**სარჩევი - Содержание – Content**

ქირია თ., ნიკოლაიშვილი მ., ლომაძე ე., ბერიშვილი გ., მეზღაძევილი ნ. - მაგნიტური (დუშეთი 1935-1989 წწ.) მიხრილობის სტატისტიკა და ღრმა თვითსწავლადი მოდელი Kiria T., Nikolaishvili M., Lomadze E., Berishvili G., Mebaghishvili N. - Magnetic (Dusheti 1935-1989) Inclination Statistics and Deep Self-Taught Model Кириа Т., Николайшвили М., Ломадзе Э., Беришвили Г., Мебагишвили Н. – Статистика магнитного склонения (Душети, 1935-1989 г.г.) и модель глубокого самообучения	7 – 12
კითვანი დ.შ. - Критерии для выделения разрывных нарушений კიტოვანი დ. - რღვევების გამოყოფის კრიტერიუმების შესახებ Kitovani D. - About the Criterias of Separation of Tectonic Disturbances	13 – 15
კითვანი დ.შ. - Случайные помехи в интервальной граничной скорости ( $V_{г\text{инт}}$ ) კიტოვანი დ. - შემთხვევითი ცდომილებები ინტერვალურ საზღვრით სიჩქარეში ( $V_{г\text{инт}}$ ) Kitovani D. - Random Interference at Interval Boundary Speed ( $V_{г\text{инт}}$ )	16 – 18
Кобзев Г., Кереселидзе З., Меликадзе Г., Джимшеладзе Т. - Инерционность уровня воды в глубоких скважинах Грузии კობზევი გ., კერესელიძე ზ., მელიქაძე გ., ჯიმშელაძე თ. - წყლის დონის ინერციულობა საქართველოს ღრმა ჰაბურდილებში Kobzev G., Kereselidze Z., Melikadze G., Jimsheladze T. - Time Difference of Water Level in Deep Boreholes of Georgia	19 - 25
მელიქაძე გ., გოგუაძე ნ. - გეოდინამიკური მონიტორინგის ორგანიზება ენგურის კაშხლის მგომარეობის შეფასების მიზნით Melikadze G., Gogvadze N. - In Order to Assessment Condition of Engury Dam Organise Geodynamic Monitoring Меликадзе Г., Гогуадзе Н. - Организация геодинамического мониторинга с целью оценки состояния Ингурской плотины	26 – 31
მელიქაძე გ., ხუნდაძე ნ., რაზმაძე-ბროკიშვილი თ. - ქ. საჩხერის მიმდებარე ტერიტორიის წყალშემცველი ჰორიზონტის ჰიდროდინამიკური პარამეტრების დადგენა და საექსპლუატაციო მარაგების შეფასება Melikadze G., Khundadze N., Razmadze-Brokishvili T. - Determining the Hydrodynamic Parameters of the Aquifer and Assessment of Proven Reserves in the Territory Adjacent to the City of Sachkhere Меликадзе Г., Хундадзе Н., Размадзе-Брокишвили Т. - Установление гидродинамических параметров водоносного горизонта и оценка эксплуатационных запасов на территории, прилегающей к г. Сачхере	32 - 41
ოდილავაძე დ., ჭელიძე თ., ქირია ჯ., ლლონტი ნ., იავოლოვსკაია ო. - საქართველოში, ხობის წმ. სოფიოს ეკლესიის მიმდებარე ტერიტორიის არქეოგეორადიოლოკაციური გამოკვლევის შედეგები Odilavadze D., Chelidze T., Kiria J., Ghlonti N., Yavolovskaya O. - In Georgia, Khobi, Results of a Archeogeoradiolocation Survey of the Area Surrounding the Church of St. Sophia Одилавაძე Д., Челидзе Т., Кирия Дж., Глonti Н., Яволовская О. - Результаты археогордиолокационных исследований прилегающей территории Хобской церкви св. Софии в Грузии	42 - 50
რაზმაძე ა. - მტკვრის ფორლანდის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის გეოლოგიური აგებულება დასავლეთ გარეკახეთის მაგალითზე Razmadze A. - Geological Structure of the Kura Foreland Fold-And-Thrust Belt: An Example from the Garekakheti Размадзе А. - Геологическое строение складчато-надвигового пояса Куринского бассейна, на примере Западного Гарекакети	51 - 58
ენუქიძე ო. - აღმოსავლეთ აჭარა-თრიალეთის ნაოჭა-შეცოცებითი სარტყელის ფრონტული ნაწილის სტრუქტურული არქიტექტურა: მიმოხილვა Enukidze O. - Structural Architecture of Frontal Part of the Eastern Achara-Trialeti Fold-And-Thrust Belt: A Review Енукидзе О. - Структурная архитектура фронтальной части Восточно Аджаро-Триалетского складчато-надвигового пояса: Обзор	59 - 69

გველესიანი ა. - ქართა და ტალღური პროცესები იონოსფეროს დონეებზე Gvelesiani A. I. - Wind and Wave Processes at the Ionosphere Levels Гвелесиани А. И. - Ветровые и волновые процессы на ионосферных уровнях	70 - 88
სურმავა ა., ინჭკირველი ლ., გვერდწითელი ლ. - ქ. თბილისის ატმოსფეროში მტვრის გავრცელების რიცხვითი მოდელირება. I. დასვლეთის ფონური სუსტი ქარის შემთხვევა Surmava A., Intskirveli L., Gverdsiteli L. - Numerical Simulation of the Tbilisi City Air Pollution by Dust : I. The Case of Western Background Light Air Сурмава А., Инцкирвели Л., Гвердцители Л. - Численное моделирование распространения пыли в атмосфере г. Тбилиси: I. случай западного фонового слабого ветра	89 - 96
სურმავა ა., ინჭკირველი ლ., გვერდწითელი ლ. - ქ. თბილისის ატმოსფეროში მტვრის გავრცელების რიცხვითი მოდელირება. II. დასვლეთის ფონური საშუალო სიძლიერის ქარის შემთხვევა Surmava A., Intskirveli L., Gverdsiteli L. - Numerical Modelling of Dust Propagation in the Atmosphere of Tbilisi City: II. The Case of Weastern Background Gentle Breeze Сурмава А., Инцкирвели Л., Гвердцители Л. - Численное моделирование распространения пыли в атмосфере г. Тбилиси: II. случай западного фонового среднего ветра	97 - 105
სურმავა ა., ინჭკირველი ლ., გვერდწითელი ლ. - ქ. თბილისის ატმოსფეროში მტვრის გავრცელების რიცხვითი მოდელირება. III. დასვლეთის ფონური ძლიერი ქარის შემთხვევა Surmava A., Intskirveli L., Gverdsiteli L. - Numerical Modelling of Dust Propagation in the Atmosphere of Tbilisi City: III. The Case of Eastern Background Fresh Breeze Сурмава А., Инцкирвели Л., Гвердцители Л. - Численное моделирование распространения пыли в атмосфере г. Тбилиси: III. Случай западного фонового сильного ветра	106 - 114
ბეგლარაშვილი ნ., ვარამაშვილი ნ., ფიფია მ., ჩიხლაძე ვ., ჯანელიძე ი. - სეტყვიანობა საქართველოში 2014-2018 წწ. Beglarashvili N., Varamashvili N., Pipia M., Chikhladze V., Janelidze I. - Hail Storms in Georgia in 2014-2018 Бегларашвили Н., Варамашвили Н., Пипия М., Чихладзе В., Джanelидзе И. - Градобития в Грузии в 2014-2018 гг.	115 - 122
ამირანაშვილი ა., კვესელავა ნ., კვილითაია ნ., საური ი., შავლაკაძე შ., ჩიხლაძე ვ. - კახეთში 2016-2020 წწ. სეტყვასაწინააღმდეგო სამუშაოების ზოგიერთი შედეგები Amiranashvili A., Kveselava N., Kvilitaia N., Sauri I., Shavlakadze Sh., Chikhladze V. - Some Results of Anti-Hail Works in Kakheti into 2016-2020 Амиранашвили А., Квеселавა Н., Квилитая Н., Саури И., Шавლაкадзе Ш., Чихладзе В. - Некоторые результаты противоградовых работ в Кахетии в 2016-2020 гг.	123 - 128
ამირანაშვილი ა., კარტველიშვილი ლ., მატზარაკის ა. - თბილისში დასვენების კლიმატის ინდექსის (HCI) ცვალებადობა Amiranashvili A., Kartvelishvili L., Matzarakis A. - Changeability of the Holiday Climate Index (HCI) in Tbilisi Амиранашвили А., Картвелишвили Л., Матзаракис А. - Изменчивость климатического индекса отдыха (HCI) в Тбилиси	129 - 137
ჯანელიძე ი. - Cr-Si-O-C სისტემაში კომპონენტების ურთიერთქმედების თერმოდინამიკური ანალიზი და მისი ეკოლოგიური ასპექტები Janelidze I. - Thermodynamic Analysis of Interaction Between the Components in the Cr-Si-O-C System and its Ecological Aspects Джанелидзе И. - Термодинамический анализ взаимодействия компонент системы Cr-Si-O-C и его экологические аспекты	138 - 145
დარახველიძე ლ. - იუბილეები / Дарахвелидзе Л. - Юбилеи	146 - 149
დარახველიძე ლ. - ვიხსენებთ კოლეგებს / Дарахвелидзе Л. - Памяти коллег	150 - 157
ნეკროლოგები	158 - 163
სარჩევი - Содержание – Content	164 - 165

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი  
IVANE JAVAKHISHVILI TBILISI STATE UNIVERSITY  
ТБИЛИССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. И. ДЖАВАХИШВИЛИ

მიხეილ ნოდიას სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტის შრომები, ტ. LXXII, 2020  
Transactions of Mikheil Nodia Institute of Geophysics, vol. LXXII, 2020  
Труды Института геофизики им. Михаила Нодиа, т. LXXII, 2020

სამეცნიერო საგამომცემლო ჯგუფის ხელმძღვანელი – ლ. დარახველიძე  
Leader of scientifically- publishing group - L. Darakhvelidze  
Руководитель научно-издательской группы – Л. К. Дараквелидзе

E-mail: [avtandilamiranashvili@gmail.com](mailto:avtandilamiranashvili@gmail.com); [geophysics.transactions@tsu.ge](mailto:geophysics.transactions@tsu.ge)  
<https://scholar.google.com/citations?user=EdMkYoYAAAAJ&hl=en>  
<http://dspace.gela.org.ge/handle/123456789/254>

თბილისი  
Tbilisi 2020 Тбилиси

დაიბეჭდა თსუ გამომცემლობის სტამბაში  
Published by TSU Press  
Напечатано в типографии ТГУ

0179 თბილისი, ილია ჭავჭავაძის გამზირი 14  
14 Ilia Chavchavadze Avenue, Tbilisi 0179  
0179 Тбилиси, просп. И.Чавчавадзе, 14  
Tel +995 (32) 225 04 84, 6284, 6278  
<http://www.press.tsu.edu.ge/>



