

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

^{1,2}სურმავა ა., ²ინსკირველი ლ., ³გვერდნითელი ლ.

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

²საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი.

³საქართველოს 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 კმ² -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. μ 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 წმდია. გამოთვლები ჩატარებულია 3 დღე-ღამის პერიოდისათვის.

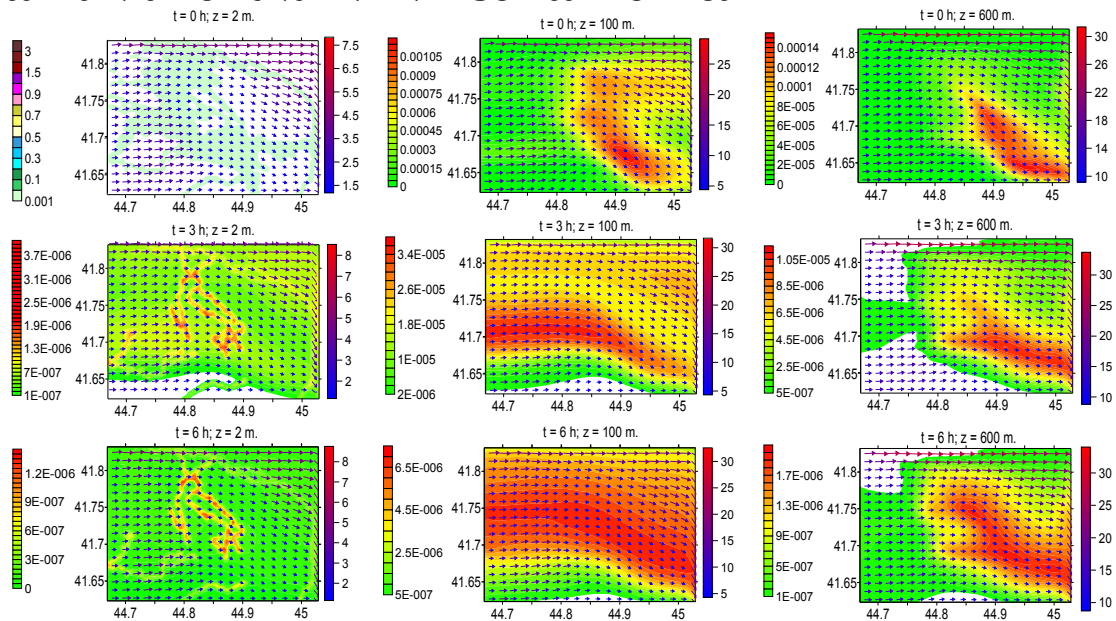
განხილულია ივნისის თვეში მშრალი ამინდის პირობებში დასავლეთის ფონური სტაციონალური საშუალო სიმძლავრის ქარის შემთხვევა. ფონური ქარის სიჩქარე იცვლება 10 მ/წმ-დან 100 მ სიმღლეზე 30 მ/წმ-მდე ტროპოპაუზის დონეზე. ატმოსფეროს ფარდობითი ტენიანობა 50%-ია.

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.

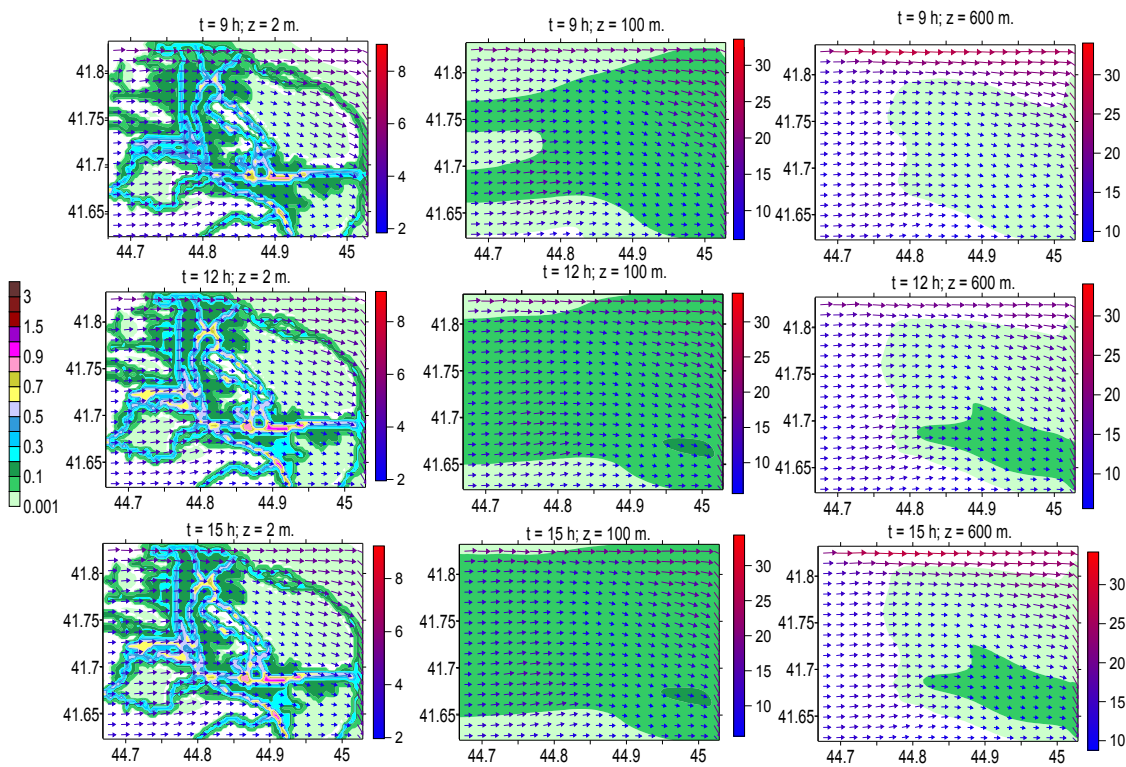
დაბინძურების წყაროები მდებარეობენ ქალაქის ცენტრალურ მაგისტრალზე და ურბანიზირებულ ტერიტორიებზე [9].

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 ($\text{ზდკ}=0.5 \text{ მგ/მ}^3$), 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.

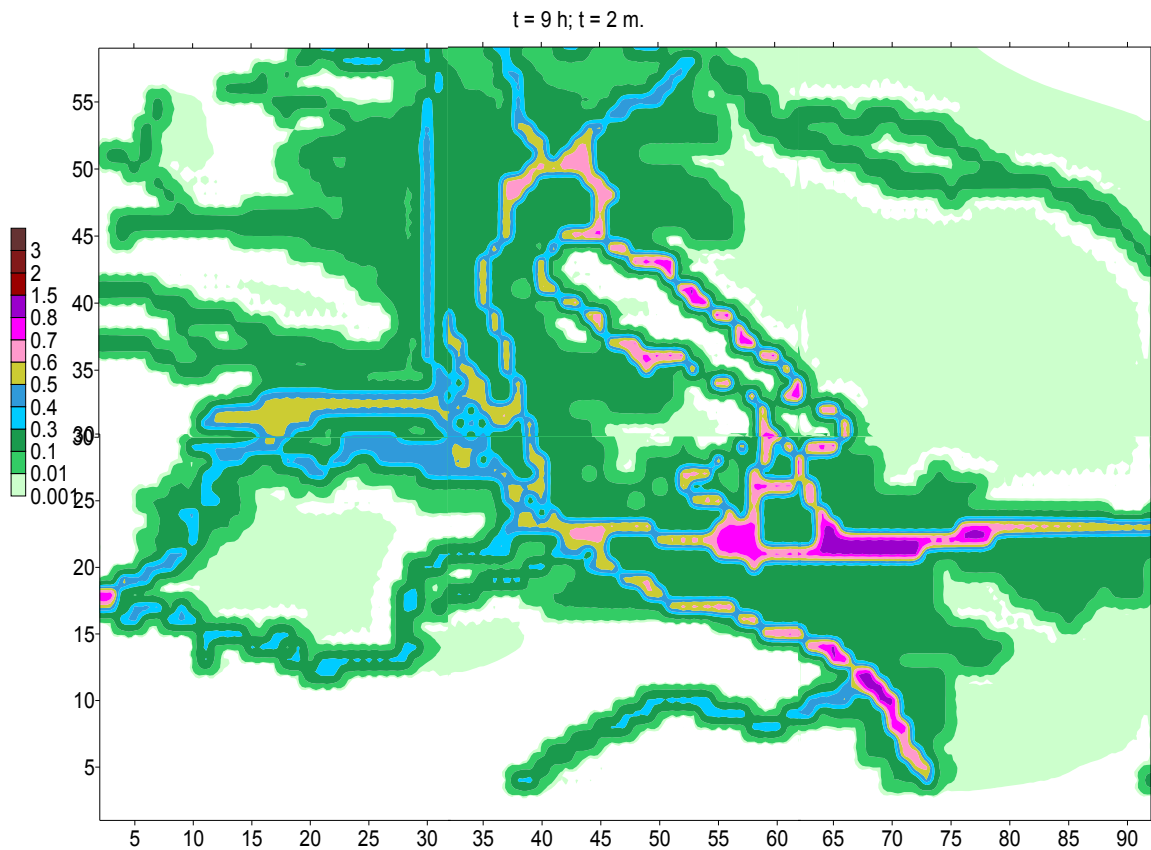


ნახ. 1. ქარის სიჩქარისა (მ/წმ) და მტვრის კონცენტრაციის (ზდკ) განაწილება, როცა $t = 0, 3$ და 6 სთ მიწის ზედაპირიდან 2, 100 და 600 მ სიმაღლეებზე



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 ნაჩვენებია 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.

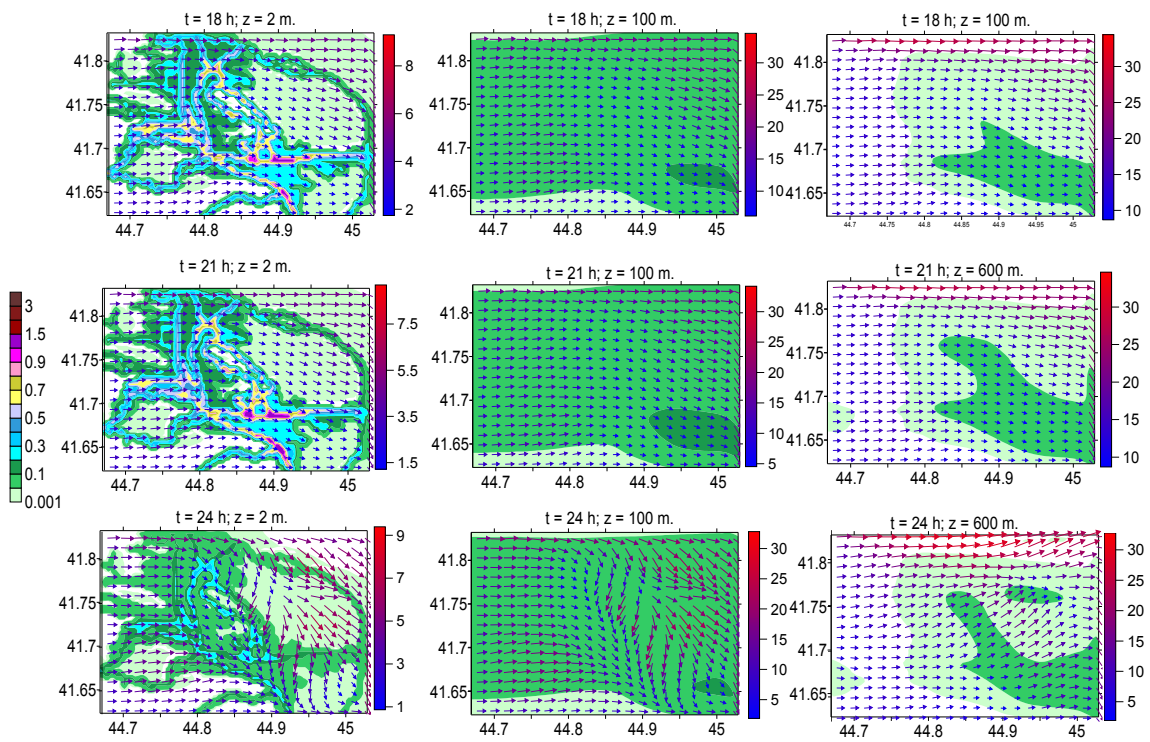


ნახ. 3. მტვრის კონცენტრაციის (ზდკ) დეტალიზირებული განაწილება, როცა $t = 9$ სთ მიწის ზედაპირიდან 2 მ სიმაღლეებზე (ღერძებზე ნაჩვენებია რიცხვითი ბადის წერტილები)

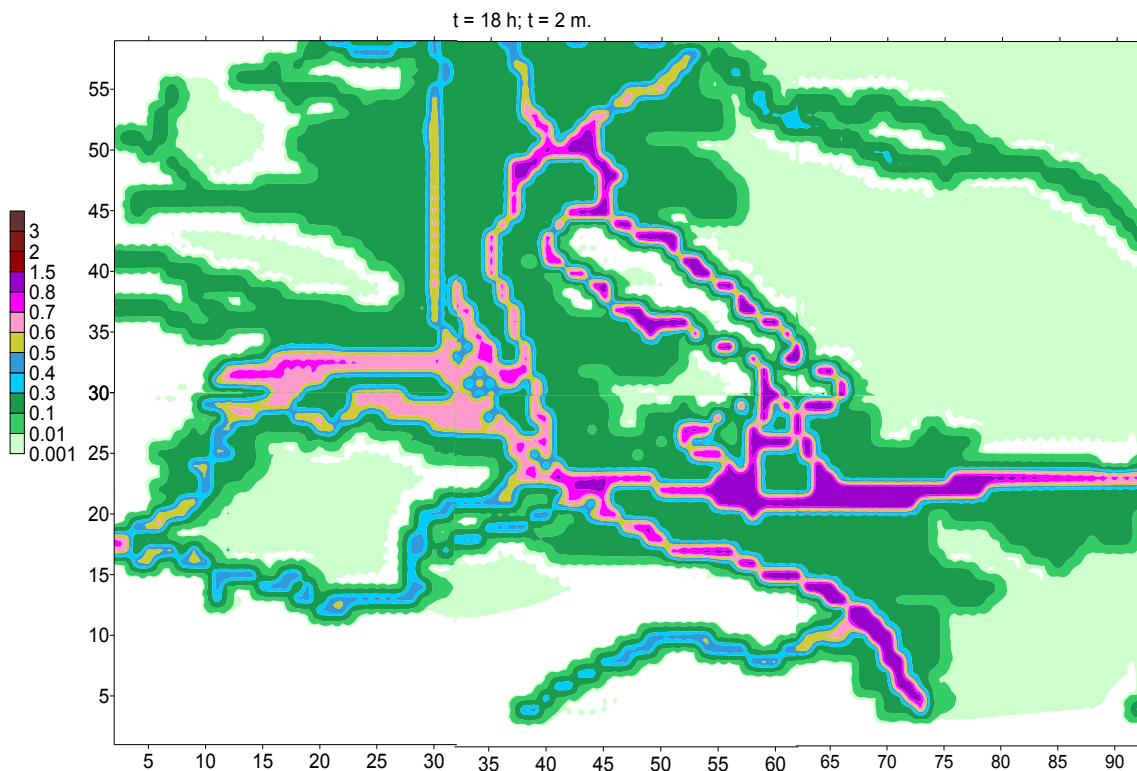
$t = 9$ სთ ის შემდეგ $t = 18$ სთ-მდე, ადგილი აქვს მტვრის კონცენტრაციების მცირე ზრდას ვაკე-საბურთალოს რაიონის მიდამოებში (ნახ. 2 და 3). მტვრის კონცენტრაციის ზრდა უფრო შესამჩნევია გლდანის – თემქის, ორთაჭალის რაიონების ტერიტორიების და თბილისის ზღვის მიდამოებში. ამ რაიონებში კონცენტრაციების მნიშვნელობები 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 კვაზისტატიკური 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.

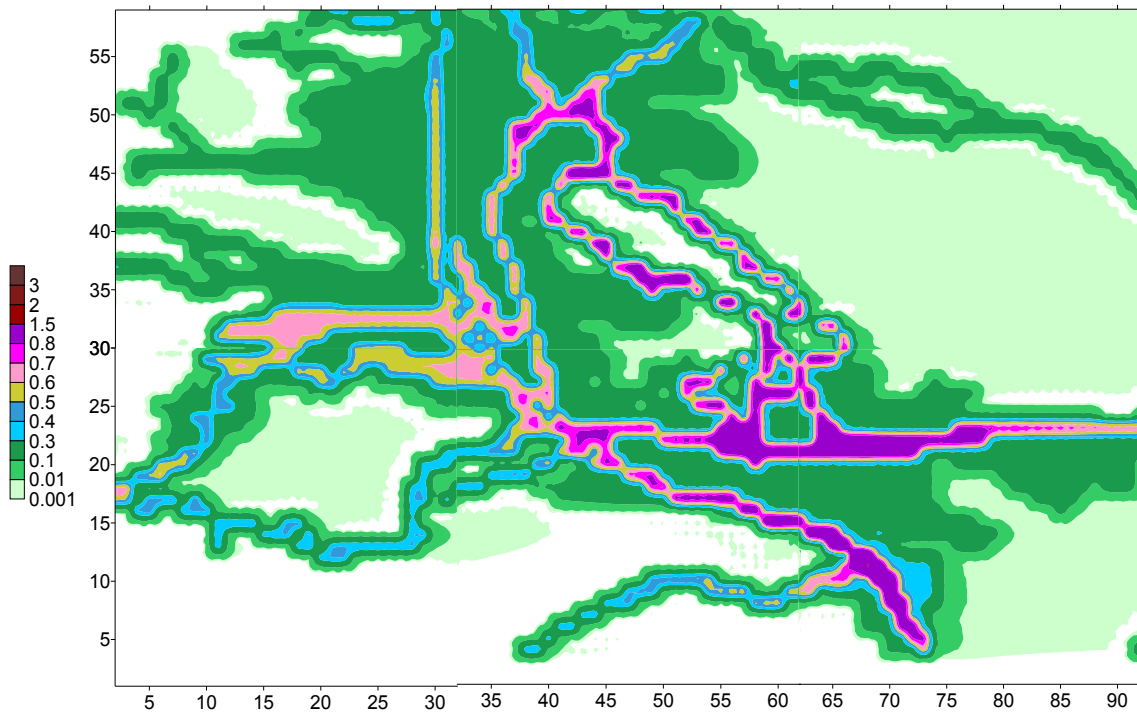
რაც შეეხება მტვრის ვერტიკალურ განაწილებას მთელი დღის განმავლობაში (9-დან 24 სთ-მდე) ატმოსფეროს 600 მ სისქის ფენაში მტვრის კონცენტრაციის მნიშვნელობები არ აღემატება 0.1 – 0.3 ზდკ-ს (ნახ. 2 და 4).



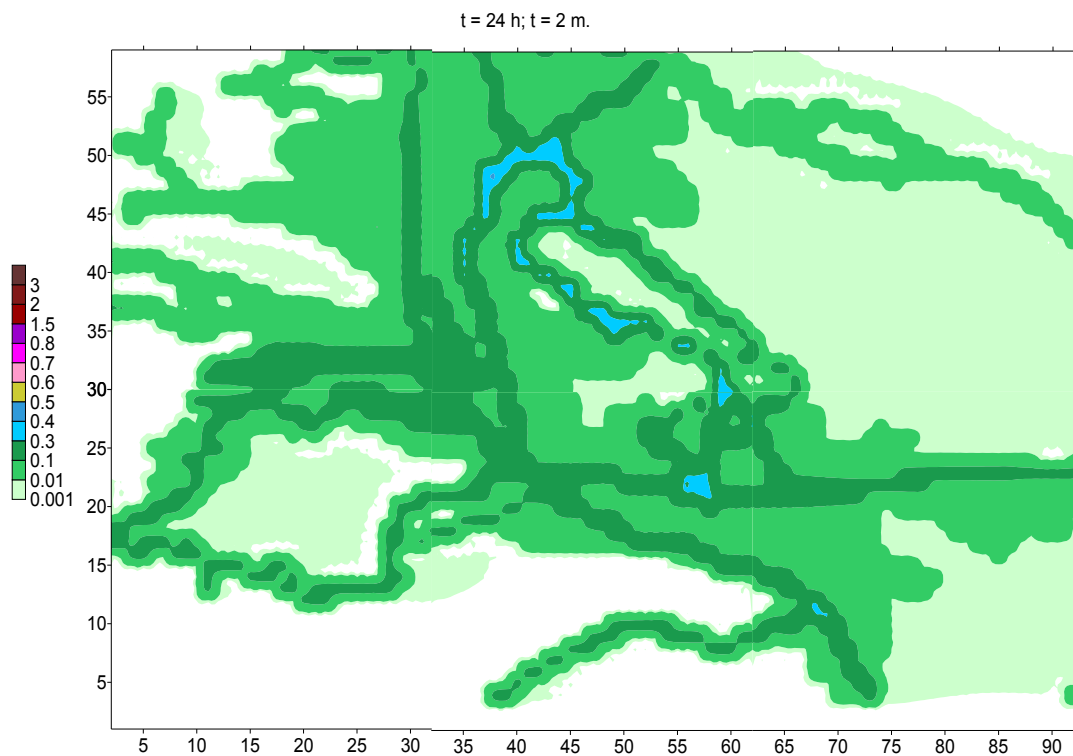
ნახ. 4. ქარის სიჩქარისა (მ/წმ) და მტვრის კონცენტრაციის (ზდკ) განაწილება, როცა $t = 18, 21$ და 24 სთ მიწის ზედაპირიდან $2, 100$ და 600 მ სიმაღლეებზე



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)

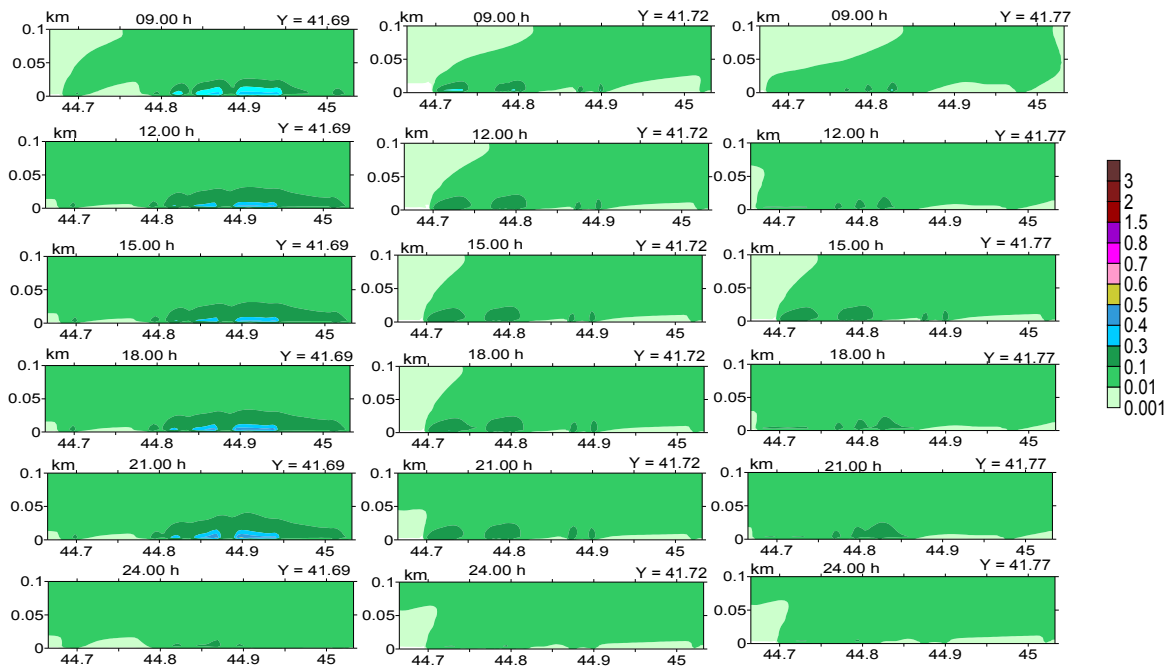
ნახ. 8-ზე მოცემულია მტვრის კონცენტრაციის ვერტიკალური განაწილება დროის სხვადასხვა მომენტებში. ნახ. 6-დან ჩანს, რომ ვერტიკალურ განაწილებაში, [3, 4]-საგან განსხვავე-

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°, Y=41. 72° და Y=41. 77°) 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 სიმძლავრის 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.