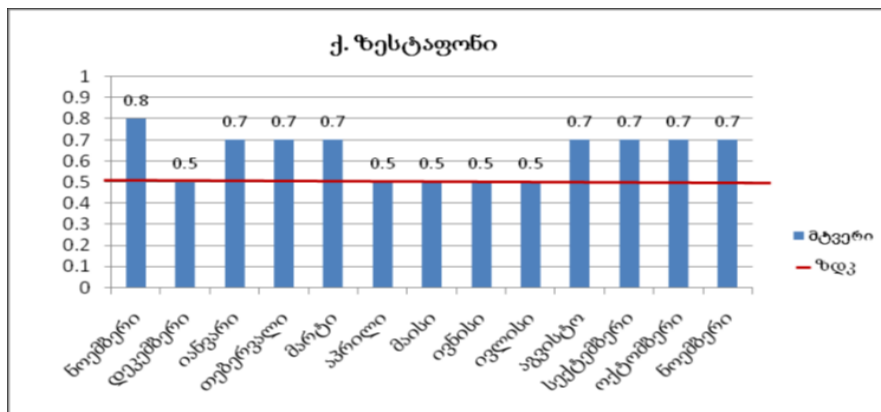


უკ 504.3.054;004.942

ქალაქ ზესტაფონის ატმოსფეროში მტვრის გავრცელების შეფასება რიცხვითი მოდელირებით
 ნ. გიგაური, ლ. გვერდნითელი, ა. სურმავა, ლ. ინჭკირველი
 საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი

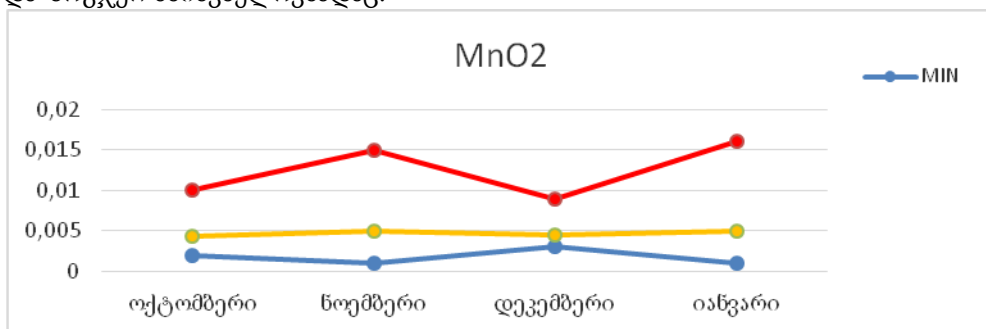
ეკოლოგიური პრობლემები სამეცნიერო-ტექნიკური პროგრესის თანმდევი მოვლენაა. იგი დღესაც აქტუალურია, ამიტომ არის, რომ ადამიანთა ჯანმრთელობის დაცვა და უსაფრთხო სასიცოცხლო გარემოს შენარჩუნება ნებისმიერი სახელმწიფოსათვის (მათ შორის საქართველოსთვისაც) უპირველესი ამოცანაა [1].

საქართველოში ატმოსფერული ჰაერის დაბინძურების ძირითადი წყაროებია: ავტოტრანსპორტი, ენერგეტიკული სექტორი, სამრეწველო ობიექტები და სოფლის მეურნეობის დარგები. სამრეწველო ზონიდან ეკოლოგიურად ერთ-ერთ რთულ რეგიონს მიეკუთვნება ზესტაფონის რაიონი, სადაც გადამუშავდება მანგანუმის კონცენტრანტი. პროცესი ხორციელდება ქ. ზესტაფონში მდებარე საერთაშორისო მნიშვნელობის შავი მეტალურგიის ობიექტში - ზესტაფონის ფეროშენადნობთა ქარხანაში (კომპანია „ჯორჯიან მანგანუმი“). აქ ყოველწლიურად იწარმოება 100000 ტ-ზე მეტი მაღალი ხარისხის ფერომანგანუმის შენადნობი. ამჟამად დაწერგულია აგრეთვე, კალციუმის კარბიდისა და მანგანუმის რექსტრაგირების ტექნოლოგია. მანგანუმის კონცენტრატისა და ფერომანგანუმის მიღებას თან ახლავს მტვრის სახით მანგანუმის სხვადასხვა შენაერთის გავრცელება საკვლევი რეგიონის გარემოს ობიექტებში. დაკვირვებები აჩვენებენ, რომ ქალაქის შედარებით სუფთა, საცხოვრებელ ზონაში განლაგებულ სტაციონალური დაკვირვების პუნქტშიც კი, ჰაერში მტვრის კონცენტრაცია ტოლია ან აღემატება ერთჯერად ზღვრულად დასაშვები კონცენტრაციის მნიშვნელობას (ზღვ= 0,5 მგ/მ (ნახ. 1) [2].



ნახ. 1. მტვრის საშუალო თვიური კონცენტრაციები (მგ/მ3) 2016 წ. ნოემბრიდან 2017 წ. დეკემბრამდე

მრავალწლიური დაკვირვების შედეგების ანალიზმა გვიჩვენა, რომ როგორც მტვრის, ასევე მანგანუმის დიოქსიდის კონცენტრაციები ატმოსფერულ ჰაერში (ნახ.2) ხშირად აღემატება შესაბამისი ზღვ-ს მნიშვნელობებს და ზოგჯერ მნიშვნელოვნადაც.



ნახ.2. მანგანუმის დიოქსიდის საშუალო თვიური კონცენტრაციები (მგ/მ3) 2016 წ. ოქტომბრიდან 2017 წ. იანვრამდე

ცნობილია, რომ როგორც მტვერი, ასევე მანგანუმის დიოქსიდი ატმოსფერულ ჰაერში შემავალი მავნე ნივთიერებების ჩამონათვალს განეკუთვნებიან და ზღვრული ნორმის გადაჭარბება ადამიანის ჯანმრთელობისათვის გარკვეულ რისკებს შეიცავს. ცხადია, ასეთ ვითარებაში ქალაქის ცენტრში, ერთ

წერტილში აღებული ნიშნის ანალიზით ვერ მივიღებთ რეგიონში არსებული მდგომარეობის რეალურ სურათს. ამიტომ მნიშვნელოვანია ატმოსფეროში მოხვედრილი დამაბინძურებელი ნივთიერებების გავრცელების კანონზომიერების, დაგროვებისა და გაზრდილი კონცენტრაციის ლოკაციის და მიგრაციის განსაზღვრისათვის გამოვიყენოთ მათემატიკური მოდელირების მეთოდი.

ზესტაფონის რეგიონს გააჩნია რთული რელიეფი. იქ ერთმანეთს ენაცვლება დაბლობი ტერიტორია, მერიდიანულად და პარალელების გასწვრივ ორიენტირებული მეზომასშტაბის ქედები და ქედთაშორისი ხეობები. 50 კმ რადიუსის ფარგლებში რელიეფის სიმაღლე იცვლება 50 მ-დან 2,5 კმ-მდე. რელიეფის სირთულიდან გამომდინარე, მათემატიკური მოდელირებისათვის მიზანშეწონილია რელიეფის მომყოლ კორდინატა სისტემის გამოყენება $\zeta = (z - \delta) / h$ სადაც $\delta(x, y)$ არის რელიეფის სიმაღლე; $h = H - \delta$; $H(t, x, y)$ არის ტროპოპაუზის სიმაღლე; t არის დრო; x, y და z არის აღმოსავლეთით და ჩრდილოეთით ვერტიკალურად მიმართული დეკარტეს კოორდინატების ღერძები.

ატმოსფერული მტვრის გავრცელების განტოლება (x, y, ζ) კოორდინატა სისტემაში ჩაიწერება შემდეგი სახით:

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

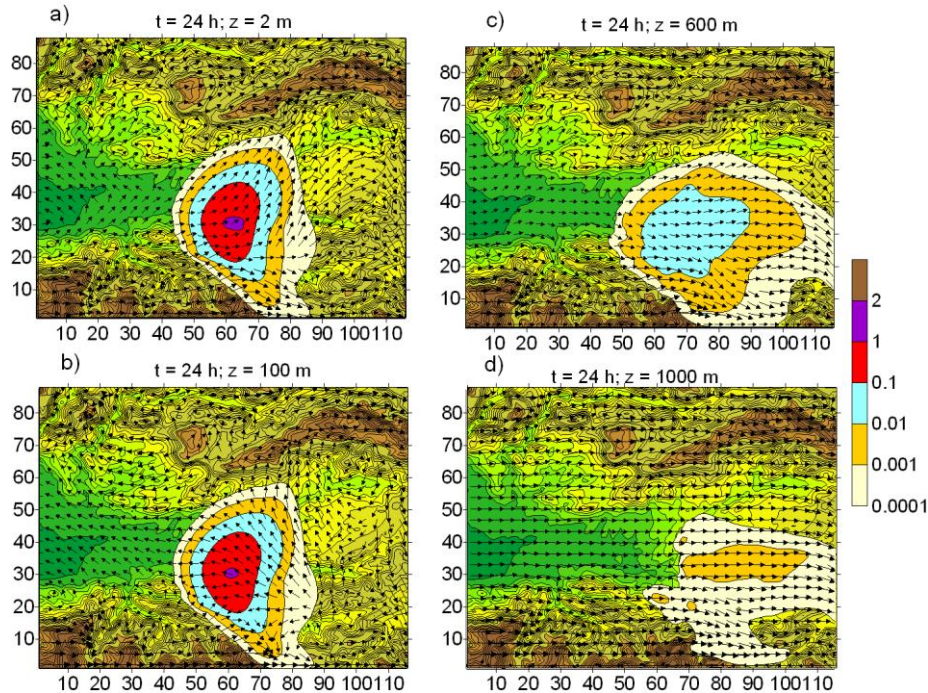
სადაც C არის ატმოსფეროში მტვრის კონცენტრაცია; u, v, w და \tilde{w} არიან ქარის სიჩქარის მდგენელები x, y, z და ζ ღერძთა გასწვრივ. მათი მნიშვნელობები განისაზღვრებიან კავკასიის რეგიონში ატმოსფერული პროცესების განვითარების რეგიონალური მოდელის [3,4] საშუალებით, ფონური მეტეოროლოგიური სიტუაციების შესაბამისად; w_0 არის მტვრის დალექვის სიჩქარე; μ და v – ჰორიზონტალური და ვერტიკალური ტურბულენტობის კინემატიკური კოეფიციენტებია; ჰაერის მიწისპირა ფენასა და თავისუფალ ატმოსფეროში ქარის სიჩქარისა და ტურბულენტობის კოეფიციენტების მნიშვნელობები განისაზღვრებიან [3, 5] მოცემული მეთოდით.

განტოლება (1) იხსნება რიცხობრივად შესაბამისი საწყისი და სასაზღვრო პირობების გამოყენებით, რომლებიც შეირჩევა კონკრეტული ამოცანისათვის. რიცხვითი ინტეგრირებისათვის გამოყენებულია $118 \times 90 \times 31$ წერტილებისაგან შემდგარი სივრცითი მართკუთხა სასრულ-სხვაობითი ბადე 0.8 კმ-იანი ჰორიზონტალური და 1/31 ვერტიკალური ბიჯით. მიწისპირა ფენის სისქე უდრის 100 მ. მიწისპირა ფენაში რიცხვითი ვერტიკალური ბადის წერტილების რაოდენობა 17-ია, ბადის ბიჯი იცვლება 2 მ-დან 15 მ-დე. დროითი ბიჯი უდრის 5 წამს.

მათემატიკური მოდელირებით გამოთვლილია ქ. ზესტაფონის ატმოსფეროში ემიტირებული ანთროპოგენული მტვრის გავრცელება სუსტი, საშუალო და ძლიერი დასავლეთის ფონური ქარის პირობებში. კონცენტრაციის საწყის და სასაზღვრო მონაცემებად ქ. ზესტაფონის ტერიტორიაზე აღებულია საქართველოს გარემოს ეროვნული სააგენტოს მიერ ატმოსფეროში 2 მ სიმაღლეზე განსაზღვრული მტვრის საშუალო თვიური კონცენტრაცია $C = 0,8$ მგ/მ³ [2]. ბადის იმ წერტილებში, რომლებიც არ მიეკუთვნებიან ქალაქს, მტვრის საწყისი კონცენტრაციები ჩათვლილია ნულის ტოლად. მტვრის ნაწილაკების დიამეტრი უდრის 10 მკმ.

ნახ.3-ზე ნაჩვენებია იენისში დასავლეთის სუსტი ქარის დროს გამოთვლილი მტვრის კონცენტრაციის სივრცითი განაწილება როცა $t=24$ სთ-ს და $z=2, 100, 600$ და 1000 მ. ნახაზზე მტვრის კონცენტრაციის იზოზოლები მოცემულია ზღვრულად დასაშვები კონცენტრაციების (ზდკ) ერთეულებში (ზდკ=0.5 მგ/მ³).

ნახ.3-დან ჩანს, რომ ქალაქის ტერიტორიაზე მტვრის კონცენტრაცია მაქსიმალურია ნიადაგის ზედაპირიდან 2 და 100 მ-ის სიმაღლეზე და უშუალოდ მის სიახლოვეს (ნახ. 3, a, b). მიწისპირა ატმოსფეროში მტვრის ღრუბელს აქვს ვერტიკალური ცილინდრის ფორმა, რომელიც დეფორმირებულია ჩრდილოეთის და სამხრეთის მიმართულებით. კონცენტრაცია 1-2 ზდკ მიღებულია უშუალოდ ქალაქის შემოგარენში 2 მ-ის სიმაღლეზე დაახლოებით 12 მ ფართობზე. ეს ზონა თანდათან მცირდება სიმაღლის ზრდასთან ერთად და 100 მ-ის სიმაღლეზე მაქსიმალური კონცენტრაცია აღინიშნება დაახლოებით 3 კმ ფართობზე. მტვერი ვრცელდება როგორც ქარის, ასევე მის საპირისპირო მიმართულებით. მტვრის გავრცელება ქარის საპირისპირო მიმართულებით შედარებით მცირეა, რაც გამოწვეულია ჰორიზონტალური ტურბულენტური და ადვექციური გადატანის ურთიერთსაპირისპირო მოქმედებით.

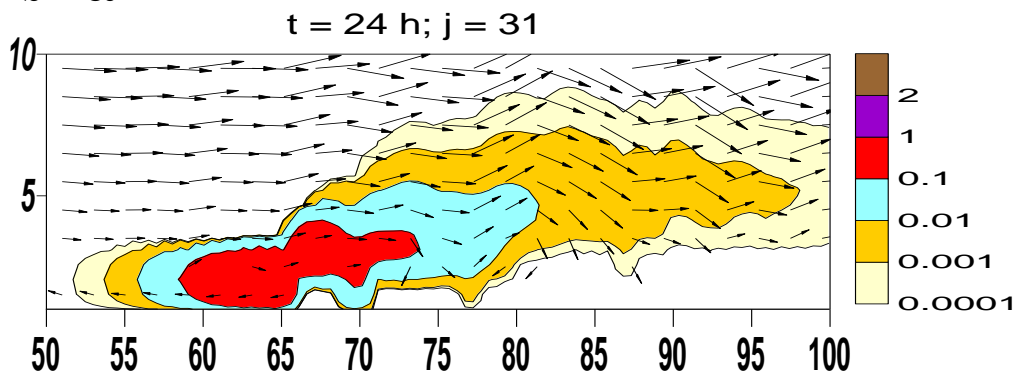


ნახ.3. ქარის სიჩქარისა და მტვრის კონცენტრაციის განაწილება მიწის ზედაპირიდან $z=2, 100, 600$ და 1000 მ სიმაღლეზე, სუსტი დასავლეთის ქარის დროს, $t=24$ სთ

გამოთვლებით მიღებული ღრუბლის ფორმა გვიჩვენებს, რომ ატმოსფეროს ზედა ფენებში მტვრის გაბნევის პროცესში ტურბულენტური დიფუზიისა და ჰორიზონტალური ადვექციის წილი სიდიდის მიხედვით დაახლოებით ერთნაირია. ამის შედაგად მტვრის ღრუბელი მნიშვნელოვნად დეფორმირდება და იღებს წაგრძელებულ ფორმას, განსაკუთრებით ქარის სიჩქარის ლოკალური ზრდის ზონაში - მდ. ყვირილასა და ჩხერიმელას ხეობების (ნახ. 3, a, b) გასწვრივ.

ატმოსფეროს სასაზღვრო ფენაში (როცა $Z > 100$ მ) მტვრის გავრცელების ფართობი იზრდება. მტვრის ადვექცია აჭარბებს ტურბულენტურ დიფუზიას (ნახ. 3, c, d).

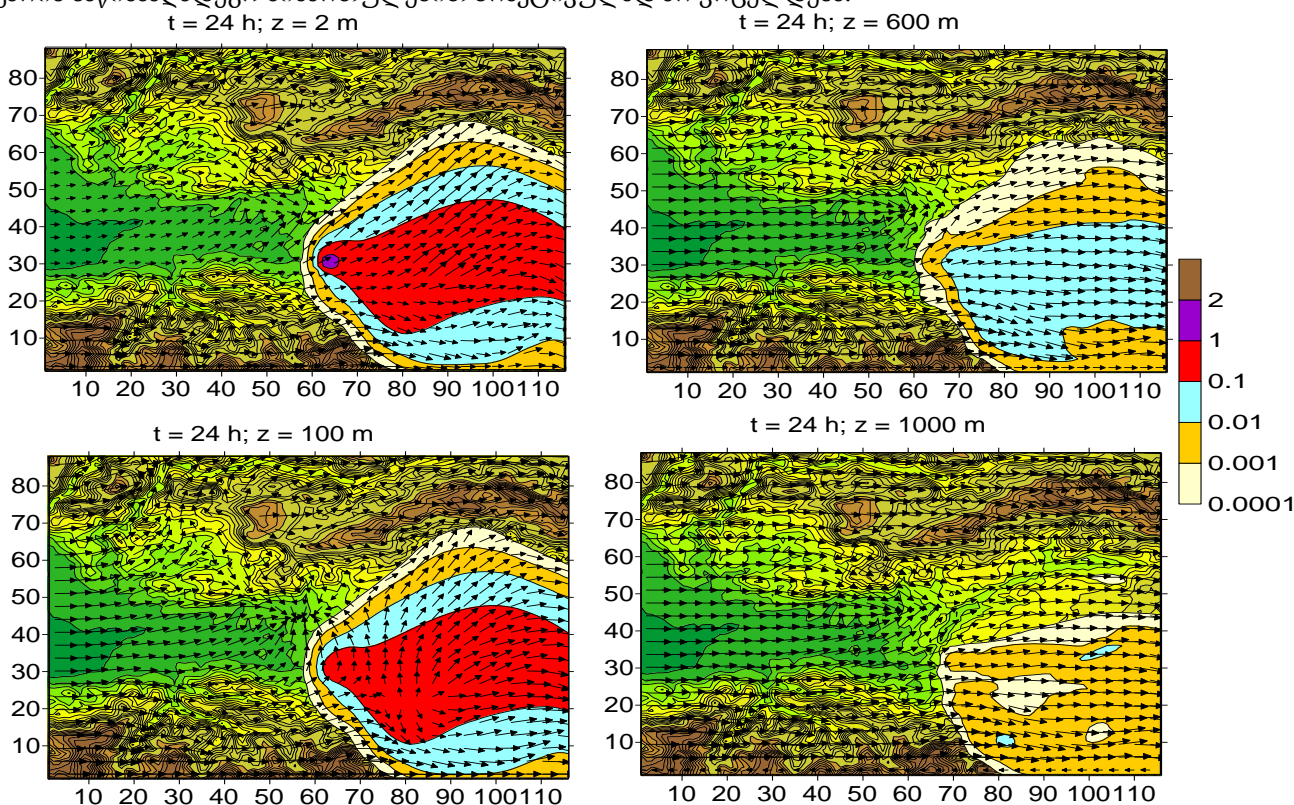
ეფექტი კარგად ჩანს ნახ. 4-ზე, სადაც წარმოდგენილია ქარის სიჩქარის ზონალური მდგენელისა და მტვრის კონცენტრაციის განაწილება ქ. ზესტაფონზე გამავალ XOZ სიბრტყის კვეთაში 3 კმ-იან სისქის ატმოსფეროს სასაზღვრო ფენაში.



ნახ. 4. ქარის სიჩქარისა და მტვრის კონცენტრაციის განაწილება ატმოსფეროს 3 კმ-იან ფენაში ქ. ზესტაფონის თავზე ($j=31$) XOZ სიბრტყეში

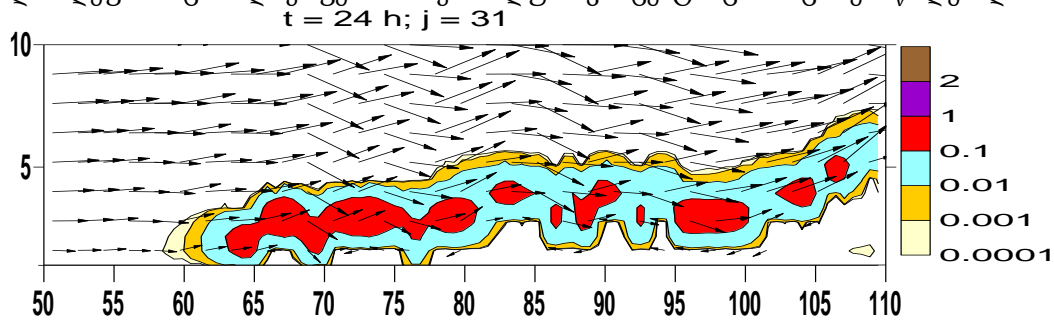
როგორც ნახ. 4-დან ჩანს, დამტვერიანების არე ქმნის ერთიან წაგრძელებულ ღრუბელს ატმოსფეროს მიწისპირა 2 კმ-იან ფენაში. კონცენტრაცია 0.1-1 ზღვ მიღებულია დაახლოებით 9 კმ სიგრძისა და 0.8 კმ სისქის, 0.01-0.1 ზღვ - 15 კმ სიგრძისა და 1.2 კმ სისქის, 0.01-0.001 ზღვ - 20 კმ სიგრძისა და 2 კმ სისქის ფენებში. ქარის საწინააღმდეგო მიმართულებით მტვერი ვრცელდება დაახლოებით 5 კმ მანძილზე, ხოლო ქარის მიმართულებით - 20 კმ-ზე. მტვრის განაწილება ღრუბელში არათანაბარია. კონცენტრაცია მაქსიმალურია ღრუბლის ცენტრალურ ნაწილში და თანდათან მცირდება პერიფერიებისკენ.

აღსანიშნავია, რომ საშუალო სიძლიერის ფონური ქარის დროს 24 საათის განმავლობაში მტვერი ვრცელდება მნიშვნელოვნად უფრო დიდ მანძილზე, ვიდრე სუსტი ფონური ქარის დროს (ნახ.5). ამასთან, მტვერი ვრცელდება როგორც ფონური ქარის, ასევე ქარის საწინააღმდეგო მიმართულებით. მნიშვნელოვანია ლიხის ქედის დინამიკური ზემოქმედება და ჰაერის ჰორიზონტალური ტურბულენტობის გავლენა მტვერის დიფუზიის პროცესზე. მათი მოქმედების შედეგად მტვერის ღრუბელი დეფორმირდება, ფართოვდება სიგანეში და მტვერის გარკვეული ნაწილი ვრცელდება ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართულებით მდ. ყვირილასა და მდ. ჩხერიმელას ხეობების გასწვრივ. უნდა აღინიშნოს, რომ მტვერის ტურბულენტური გადატანა ატმოსფეროში სუსტია ადვექციურ გადატანასთან შედარებით, შედაგად, მტვერი ზესტაფონის შემოგარენში ქარის საწინააღმდეგო მიმართულებით პრაქტიკულად არ ვრცელდება.



ნახ. 5. ქარის სიჩქარისა და მტვერის კონცენტრაციის განაწილება მიწის ზედაპირიდან $z = 2, 100, 600$ და 1000 მ სიმაღლეზე დასავლეთის საშუალო ქარის დროს, როცა $t = 24$ სთ-ს.

ნახ. 6-ზე ნაჩვენებია ქარის სიჩქარისა და მტვერის კონცენტრაციის განაწილება ქ. ზესტაფონის თავზე XOZ სიბრტყეში ატმოსფეროს ქვედა 3 კმ-იანი ფენაში დასავლეთის საშუალო ფონური ქარის დროს. მტვერის კონცენტრაცია მაქსიმალურია მტვერის ღრუბლის ცენტრში და მცირდება მის ზედა და ქვედა საზღვრებისკენ. ოროგრაფიის ზემოქმედებით წარმოშობილი ლოკალური ვერტიკალური დინებები იწვევენ მტვერის ღრუბლის დეფორმაციას და ყოფენ მას მაქსიმალური კონცენტრაციის მცირე ნაწილებად.

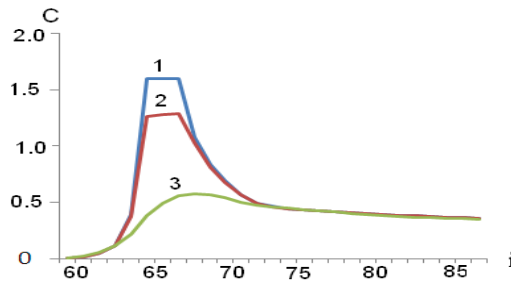


ნახ. 6. XOZ სიბრტყეში ქარის სიჩქარისა და მტვერის კონცენტრაციები საშუალო სიჩქარის ქარის დროს

ძლიერი დასავლეთის ფონური ქარის შემთხვევაში თვისობრივად მიიღება მტვერის განაწილების იგივე სურათი ($u_{\text{backg}} \approx 10 \text{ m/s}$), რომელიც მიღებული იყო საშუალო ფონური ქარის დროს. განსხვავება

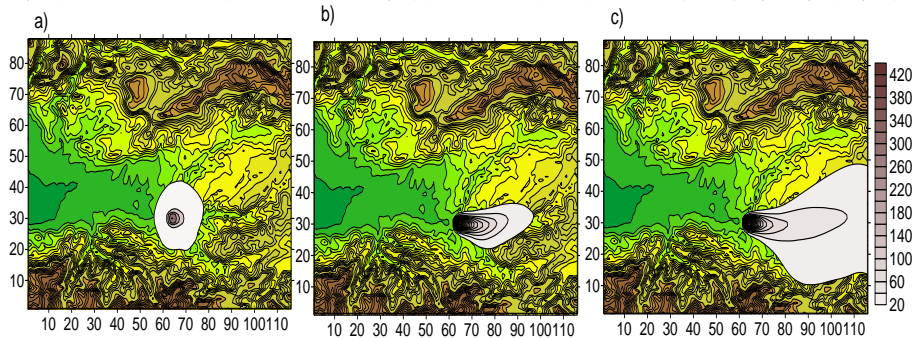
რაოდენობრივია. ძლიერი ქარის დროს მტვრის ღრუბელი ვრცელდება მეტ ფართობზე და გადაადგილდება უფრო სწრაფად. გამოთვლების თანახმად, ძლიერი ქარის დროს გადატანის სიჩქარე შეადგენს ფონური სიჩქარის 0,8 - 0,6 ნაწილს.

მე-7 ნახ.-ზე ნაჩვენებია დასავლეთის ფონური საშუალო ქარის შემთხვევაში გამოთვლებით მიღებული კონცენტრაციის $C(x)$ გრაფიკები XOZ სიბრტყეში, როცა $z=2, 100$ და 600 მ (გრაფიკები 1, 2 და 3 შესაბამისად). ნახაზიდან ჩანს, რომ კონცენტრაცია მაქსიმალურია ქალაქის თავზე. დაბინძურების წყაროდან 5 კმ-ზე უფრო ნაკლებ მანძილზე ადგილი აქვს კონცენტრაციის ვერტიკალურ შემცირებას. ქალაქიდან 5 კმ-ზე მეტ მანძილზე, ატმოსფეროს 600 მ სისქის ფენაში კონცენტრაცია ვერტიკალური მიმართულებით ერთნაირია და თანდათანობით მცირედით ქალაქიდან დაშორებისას.



ნახ. 7. მტვრის კონცენტრაციის $C(x)$ გრაფიკები XOZ სიბრტყეში როცა $t = 24$ სთ

მე-8 ნახაზზე წარმოდგენილია 24 საათის განმავლობაში ნიადაგზე დაფენილი მტვრის ზედაპირული სიმკვრივე სუსტი - a), საშუალო - b) და ძლიერი - b) ფონური დასავლეთის ქარების შემთხვევაში. წარმოდგენილი სურათიდან ჩანს, რომ სუსტი და საშუალო ფონური ქარის დროს მტვრი ეფინება მიწის ზედაპირის დაახლოებით 200 კმ² ფართობზე. დაფენის ზონებს გააჩნია წრიული და ელიფსური ფორმები.



ნახ. 8. მიწაზე დაფენილი მტვრის ზედაპირული სიმკვრივე (მგ/მ²)

ძლიერი ფონური ქარის დროს მტვრის დაფენის ზედაპირის ფართობი გაცილებით მეტია. ნიადაგზე მტვრის დაფენის არე წარმოადგენს დასავლეთიდან აღმოსავლეთისაკენ მიმართულ ზოლს, რომლის სიგრძე აჭარბებს 50 კმ-ს, ხოლო სიგანე დაახლოებით 28 კმ-ია. ყველა განხილულ შემთხვევაში 24 საათის განმავლობაში მიწის ზედაპირის 1 მ² ფართობზე დაფენილი მტვრის მაქსიმალური რაოდენობა თითქმის ერთნაირია და შეადგენს 400 მგ-ს.

ამრიგად, ჩატარებულმა რიცხვითმა მოდელირებამ გამოავლინა ზოგიერთი მეტეოროლოგიური თავისებურებები, რომლებიც ახასიათებს ქალაქში არსებული მტვრის გავრცელების პროცესს ზესტაფონის რეგიონში. სუსტი დასავლეთის ქარის შემთხვევაში ატმოსფეროს სასაზღვრო 100 მ მიწისპირა ფენაში ქ. ზესტაფონის თავზე კონცენტრაცია დაახლოებით ერთნაირია. მიწისპირა ფენის ზევით კონცენტრაცია სწრაფად მცირდება და 3 კმ სიმაღლეზე ხდება ნულის ტოლი. ვერტიკალურ პროფილში კონცენტრაცია მეტია ღრუბლის ცენტრში და მცირდება პერიფერიისკენ.

ოროგრაფია იწვევს დაბინძურების ღრუბლის დეფორმაციას. ლიხის ქედის ქარპირა მხარეს, ოროგრაფიის გავლენით, მტვრის გავრცელება აღმოსავლეთით მუხრუჭდება და იწყებს უპირატეს გადაადგილებას ჩრდილო-აღმოსავლეთის და სამხრეთ-აღმოსავლეთის მიმართულებებით მდ. ყვირილასა და ჩხერიმელას ხეობების გასწვრივ. ამასთან, ქედის ქარპირა მხარეს, ოროგრაფიით გამოწვეული აღმავალი მოძრაობა ამცირებს მტვრის სედიმენტაციის პროცესს. შედეგად, დამტვერიანების წყაროდან საკმაოდ მოშორებით დალექილი მტვრის სიმკვრივე უმნიშვნელოა.

მნიშვნელოვანია გამოთვლებით მიღებული შედეგების შედარება რეალურთან. ამ მიზნით დაგეგმილია ნატურალური დაკვირვებების ჩატარება ზესტაფონის მიმდებარე ტერიტორიასზე.

მადლიერება. სამუშაო სრულდება სსიპ შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის დაფინანსებით. გრანტი № Doc-009 .

ლიტერატურა - REFERENCES –ЛИТЕРАТУРА

1. World health organization (2009). Global Health Risk: Mortality and Burden of Diseases Attributable to Selected Major Risks. p. 23-53.
2. Ed. Georgian National Environmental Agency. Short review of Georgia environment pollution. (2017). www.nea.gov.ge. (in Georgian).
3. Кордзадзе А. А., Сурмава А. А., Деметрашвили Д. И., Кухалашвили В. Г. Численное исследование влияния рельефа Кавказского региона на распределение гидрометеорологических полей. Известия РАН, Физика атмосферы и океана, том 43, № 6, 2007, с.783-791.
4. А. Сурмава. Численное исследование локальных циркуляций в атмосфере Кахети в случае фонового восточного ветра. Труды Института геофизики им. Нодиа. 2017, т. LXVII, с. 20-36.
5. Kazakov, A. L., Lazriev, G. L. 1978. On parametrization of atmospheric boundary layer and active soil layer. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 15: 257-265.

ქალაქ ზესტაფონის ატმოსფეროში მტვრის გავრცელების შეფასება რიცხვითი მოდელირებით./ნ. გიგაური, ლ. გვერდწითელი, ა. სურმავა, ლ. ინსკირველი/სტუ-ს ჰმი-ის სამეცნ. რეფ. შრ. კრებ. . - 2018. - ტ.125. - გვ.71-76. - ქართ.; რეზ.: ქართ., ინგლ., რუს. რიცხობრივად მოდელირებული და შესწავლილია ქ.ზესტაფონში არსებული მტვრის გავრცელება ფონური სუსტი დასავლეთის ქარის შემთხვევაში. მიღებულია მტვრის სივრცული განაწილების სურათები, გაანალიზებულია ოროგრაფიის, ჰორიზონტალური და ვერტიკალური ტურბულენტობისა და ადვექციური პროცესების გავლენა მტვრის გავრცელებაზე ატმოსფეროში.

Estimation of Dust Distribution in the Zestafony District by Numerical Modeling./N. Gigauri, L. Gverdtsiteli, A. Surmava, L. Intskirveli./Transactions of the IHM at the GTU. - 2018. - vol.125. - pp.73-79. - Georg.; Summ: Georg., Eng., Rus. Dispersion of dust emitted in the atmospheric air of Zestafoni city is numerically modelled and studied in case of weak background western winds. Dust spatial distribution patterns are obtained, and the influence of orography, horizontal and vertical turbulence and advective processes on dust distribution in the atmosphere is analyzed.

Оценка распространения пыли в воздухе Зестафонского района с помощью численного моделирования./Н. Гигаури, Л. Гвердсители, А. Сурмава, Л. Интскирвели/Сб. Трудов ИГМ ГТУ-а. - 2018. - вып.125. - с.73-79. - Груз.; Рез: Груз., Англ., Рус. Численно смоделировано и изучено распространение городской пыли в воздухе г.Зестафони при фоновом западном ветре. Получены картины пространственного распределения пыли, проанализированы влияния орографии, горизонтальной и вертикальной турбулентности и процесса адвекции на диффузии пыли в атмосфере