

უაკ 504.5.054

სმოგის რიცხვითი მოდელის შესახებ

*გ. გელაძე, **ნ. ბეგალიშვილი

*თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის გამოყენებითი მათემატიკის ინსტიტუტი, თბილისი, საქართველო givi-geladze@rambler.ru

**ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი, საქართველო, თბილისი.

თემის აქტუალურობა. სულ უფრო იზრდება რიცხვითი მოდელირების როლი ჰიდრომეტეოროლოგიური პროცესების შესწავლის დარგში. თანაც კვლევათა ფრონტი ვითარდება ყველა მიმართულებით. ამ მიმართულებებს შორის განსაკუთრებული ადგილი უჭირავთ მეზომეტეოროლოგიურ პროცესებს. ამჟამად შექმნილია რიგი ცალკეული მეზომეტეოროლოგიის რიცხვითი მოდელებისა (ატმოსფეროს მეზომეტეოროლოგიური სასაზღვრო ფენა – **ამსფ**, ღრუბლები, სხვადასხვა სახის ნისლი, აეროზოლის ტურბულენტური დიფუზია და ა. შ.). მაგრამ განსაკუთრებულ აქტუალურობას იძენს ისეთი რიცხვითი მოდელების შექმნა, რომლებიც შეისწავლიან ამ პროცესებს ერთიან კომპლექსში, მათ შორის არსებული რთული ურთიერთკავშირების გათვალისწინებით.

გარდა ამისა, 21-ე საუკუნეში ყოველგვარი გადაჭარბების გარეშე შეიძლება ითქვას, რომ ნომერ პირველი არის ეკოლოგიური წონასწორობის შენარჩუნების პრობლემა, რაც გამოწვეულია ყველასათვის კარგად ცნობილი გარემოს ძალიან ინტენსიური დაბინძურებით, გლობალური დათბობითა და ა. შ.

აქედან გამომდინარე ვფიქრობთ, რომ მეტად საშური საქმეა **ამსფ**-ის თერმოჰიდროდინამიკის ფონზე შესწავლილ იქნას ღრუბელ- და ნისლფორმირება (სწორედ ამ მეტეოროლოგიურ ობიექტებში ხდება მავნე ნივთიერებების აკუმულირება, სხვადასხვა სმოგების წარმოქმნა) და აეროზოლის ტურბულენტური დიფუზია რიცხვითი მოდელირების მეთოდების საშუალებით.

ასევე აღსანიშნავია, რომ თემა არის ნამდვილად „ქართული“, გამომდინარე მეზომეტეოროლოგიური პროცესების მასშტაბებისა და ჩვენი ქვეყნის ფიზიკო-გეოგრაფიული პირობებიდან.

თემის აქტუალურობა განპირობებულია აგრეთვე ისეთი მეტად მნიშვნელოვანი დარგებით, როგორცაა ამინდის ლოკალური პროგნოზი, საავიაციო-, აგრო- და საზღვაო მეტეოროლოგია, ეკოლოგია, სამშენებლო მექანიკა, ქარის ენერგეტიკა და ა. შ.

აღსანიშნავია ის ფაქტიც, რომ სწორედ ნისლი და ღრუბლები არიან პასუხისმგებელი დედამიწის რადიაციულ და წყლის ბალანსზე; მათი სახით მომავლისათვის გვაქვს მტკნარი წყლის უსასრულო მარაგი; ასევე დიდია მათი როლი ჩვენი პლანეტის ელექტრომაგნიტური რეჟიმის ჩამოყალიბებაში; გასახსენებელია ის ფაქტიც, რომ ამ პროცესებზე რამდენიმე ათეული წლის განმავლობაში ჩვენს რესპუბლიკაში ხორციელდებოდა აქტიური ზემოქმედება [1, 2].

ჩვენი კვლევის ობიექტს წარმოადგენს **ამსფ**, ფენა, რომელშიც ვლინდება ქვეფენილის არაერთგვაროვნება (ტემპერატურული, ოროგრაფიული, „წყლიანური“, ანტროპოლოგიური და ა. შ.). მისი ჰორიზონტალური ზომებია 100 – 200 კმ, ვერტიკალური კი 2 კმ. ძირითად აქცენტს ვაკეთებთ **ამსფ**-ის თერმოჰიდროდინამიკაზე, ნოტიო (ფენა ღრუბლები, ნისლი) ველებსა და აეროზოლის გავრცელებაზე.

ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს ჩვენს მიერ უკვე დამუშავებული **ამსფ**-ის რიცხვითი მოდელის სრულყოფა. აქცენტს ვაკეთებთ ეკოლოგიური თვალსაზრისით ისეთ მომენტებზე, როგორცაა ფენა ღრუბლებისა და რადიაციული ნისლის მოდელირება, **ამსფ**-ში აეროზოლის გავრცელება, სმოგის სიმულაცია.

იმ დარგის ამოცანები, რომლებშიც ჩვენ გვიხდება მუშაობა, **ამსფ** და, ზოგადად, მეზომეტეოროლოგია, აღიწერება თერმოჰიდროდინამიკისა და დიფუზიის პარაბოლური ტიპის არსებითად არაწრფივ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემით. ამიტომ ისინი იშვიათი გამონაკლისის შემთხვევების გარდა იხსნებიან კომპიუტერზე რიცხვითი მეთოდების საშუალებით. ამჟამად ძირითადად საქმე გვაქვს 2-განზომილებიან ($x - z$ სიბრტყეში) ამოცანებთან.

საწყის განტოლებათა სისტემა. ზოგადად, კლასიკური ჰიდროდინამიკიდან ცნობილია, რომ სასაზღვრო ფენა არის სითხის ის ფენა, რომელშიც ვრცელდება კედლის არაერთგვაროვნება, კერძოდ, **ამსფ** არის ატმოსფეროს ის ფენა, რომელშიც ვლინდება დედამიწის ზედაპირის, როგორც კედლის, არაერთგვაროვნება (ტემპერატურული, ოროგრაფიული, „წყლიანური“, ანტროპოგენური და ა. შ.). მისი ჰორიზონტალური და ვერტიკალური მასშტაბებია დაახლოებით 100 – 200 კმ, და 2 კმ, შესაბამისად. ჩვენ ვიხილავთ 2-განზომილებიან არასტაციონარულ ამოცანას ვერტიკალურ ($x - z$) სიბრტყეში. მცირე ჰორიზონტალური ზომების გამო შეგვიძლია კორიოლისის ძალა უგულებელვყოთ. როგორც მიღებულია **ამსფ**-ის ამოცანების განხილვისას, არ ვითვალისწინებთ ჰაერის სიმკვრივის ვარდნას სიმაღლის მიხედვით.

თუ გამოვიყენებთ მაკრომასშტაბური მოვლენების მეზოპროცესებზე ზეგავლენის გათვალისწინების მეთოდს, ზუსინესკის თავისუფალი კონვექციის გამარტივებას, კვაზისტატიკურ მიახლოებას, ტურბულენტობის კოეფიციენტების მუდმივობას, მაშინ ამსფ-ის თერმოჰიდროდინამიკისა (წყლის ორთქლის ფაზური გარდაქმნის გათვალისწინებით) და მასში აეროზოლის გავრცელების ამოცანის საწყის განტოლებათა სისტემას ექნება ასეთი სახე [2 – 6]:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\partial \pi}{\partial x} + \Delta' u, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial z} = \lambda \vartheta, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} + S w = \frac{L}{c_p} \Phi + \Delta' \vartheta, \quad (4)$$

$$\frac{dq}{dt} + \gamma_q w = -\Phi + \Delta' q, \quad (5)$$

$$\frac{dv}{dt} = \Phi + \Delta' v, \quad (6)$$

$$\frac{dc}{dt} - w_0 \frac{\partial c}{\partial z} = \Delta' c, \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + w \frac{\partial}{\partial z}, \quad \Delta' = \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2}{\partial z^2},$$

სადაც u, w არიან ქარის ჰორიზონტალური და ვერტიკალური მდგენელები, შესაბამისად, π, θ, q – წნევის ანალოგის, პოტენციური ტემპერატურისა და ხვედრითი სინოტივის ნაზრდები, შესაბამისად, v - ხვედრითი წყლიანობა, c - აეროზოლის კონცენტრაცია, λ, S - ატმოსფეროს ფლოტაციისა და სტრადიფიკაციის პარამეტრები, შესაბამისად, γ_q - ფონური ხვედრითი სინოტივის ვერტიკალური გრადიენტი, Φ - წყლის ორთქლის კონდენსაციის სიჩქარე, L - კონდენსაციის ფარული სითბო, c_p - მშრალი ჰაერის კუთრი სითბოტევადობა მუდმივი წნევის დროს, μ, ν - ტურბულენტობის ჰორიზონტალური და ვერტიკალური კოეფიციენტები, შესაბამისად, w_0 - აეროზოლის დაღეკვის სიჩქარე.

ჩამოვაცალიბოთ სასაზღვრო და საწყისი პირობები (1) – (7) სისტემისათვის ზოგადი სახით.

$$\text{თუ } z = 0 \quad u = 0, \quad w = 0, \quad \vartheta = F(x, t), \quad q = 0, \quad v = 0, \quad c = 0, \quad (8)$$

სადაც $F(x, t)$ არის ამსფ-ის ქვეფენილის ტემპერატურა, რომელსაც „ვიღებთ“

მეტეოექსპერიმენტებიდან:

$$F(x, t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq 32 \text{ km}, \quad 48 \text{ km} < x \leq 80 \text{ km}, \\ 5 \sin \omega t & 32 \text{ km} \leq x \leq 48 \text{ km}, \end{cases} \quad (9)$$

აქ ω არის დედამიწის დღე-ღამური ბრუნვის კუთხური სიჩქარე. ე. ი. ამსფ-ის ამოცანას ვიხილავთ ქვეფენილის მხოლოდ ტემპერატურული არაერთგვაროვნების, კერძოდ, სითბური „კუნძულის“ ტემპერატურის დღე-ღამური სვლის კანონით გათვალისწინების პირობებში.

ამსფ-ის ზედა საზღვარზე ვაძლევთ u, π, θ - ის მიღვევისა და q, v, c - ის უწყვეტობის პირობებს:

$$\text{თუ } z = Z \quad u = 0, \quad \pi = 0, \quad \vartheta = 0, \quad \frac{\partial q}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial z} = 0, \quad (10)$$

გამომდინარე ფიზიკური მოსაზრებებიდან და რიცხვითი რეალიზაციის მოხერხებულობიდან ამსფ-ის გვერდით საზღვრებზე ვაძლევთ ასეთ პირობებს:

$$\text{თუ } x = 0, X \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial q}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial x} = 0, \quad (11)$$

სადაც X და Z არიან ამსფ-ის ჰორიზონტალური და ვერტიკალური საზღვრები. სისტემისათვის (1) – (6) საწყისად ვიღებთ შემდეგ პირობებს:

$$\text{თუ } t=0 \quad u=0, \quad \theta=0, \quad q=0, \quad v=0, \quad (12)$$

რადგან ტურბულენტური დიფუზიის განტოლება (7) იხსნება მეყსეული წერტილოვანი წყაროდან აეროზოლის დისპერგიების შემდეგ, ამიტომ მისთვის საწყისი პირობა ჩაიწერება ასეთი სახით:

$$\text{თუ } t=t_0 \quad c = M \delta(x-x_0, z-z_0), \quad (13)$$

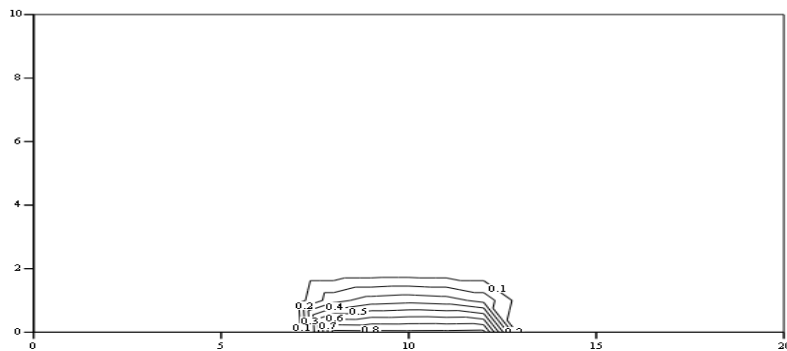
სადაც t_0 არის აეროზოლის დისპერგიების მომენტი, M – აეროზოლის წყაროს სიმძლავრე, ხოლო (x_0, z_0) – წყაროს კოორდინატები.

ამრიგად, ჩვენი ძირითადი ამოცანა დაყვანილია (1) – (7) სისტემის მართკუთხა ($0 \leq x \leq X, 0 \leq z \leq Z$) არეში ამოხსნაზე (8) – (13) სასაზღვრო და საწყისი პირობების გათვალისწინებით.

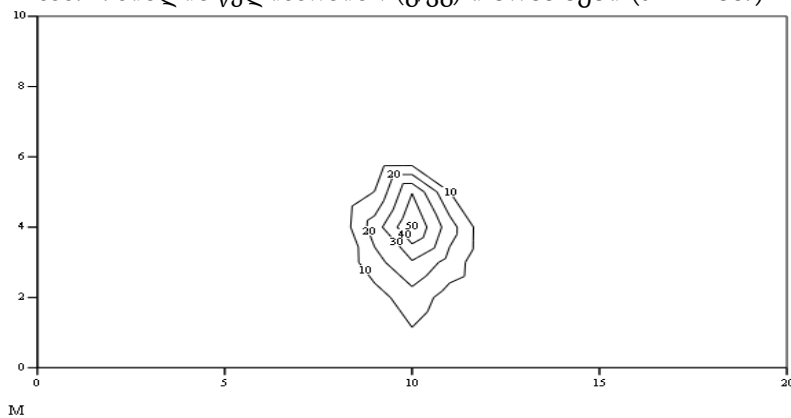
მოცემული სისტემა იხსნება ცხადი სასრულ-სხვაობიანი რიცხვითი სქემის საშუალებით. (1), (4) – (7) განტოლებების აპროქსიმაცია ხდება ბრაიენის სქემის მიხედვით, რომელიც არ ხასიათდება არაწრფივი არამდგრადობით. (2) და (3) განტოლებების ინტეგრებას ვახდენთ ტრაპეციის ფორმულით.

განხილულ რიცხვით სქემას აქვს პირველი რიგის აპროქსიმაცია დროის მიხედვით და მეორე რიგის აპროქსიმაცია კოორდინატის მიხედვით.

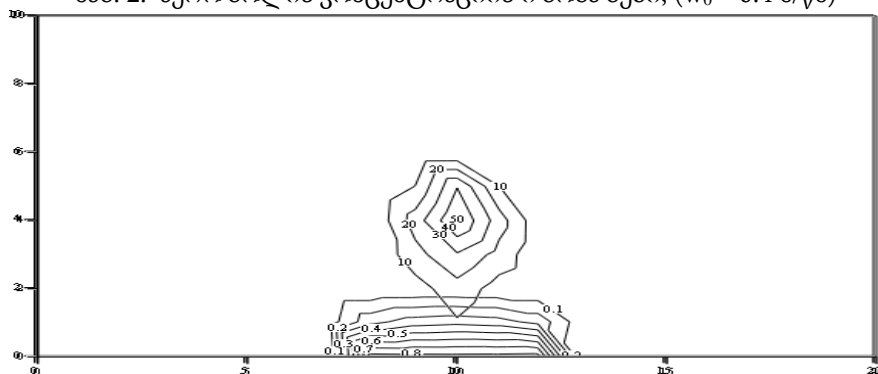
ამოცანის ამოხსნის შედეგად მივიღეთ სიმულირებული ნისლი, ღრუბელი და მათ ფონზე აეროზოლის „ღრუბელი“ და ვახდენთ ღრუბლისა და აეროზოლის „ღრუბლისა“ და ნისლისა და აეროზოლის „ღრუბლის“ ზედდებას. და სწორედ ესაა სმოგი. მომყავს შესაბამისი გრაფიკები.



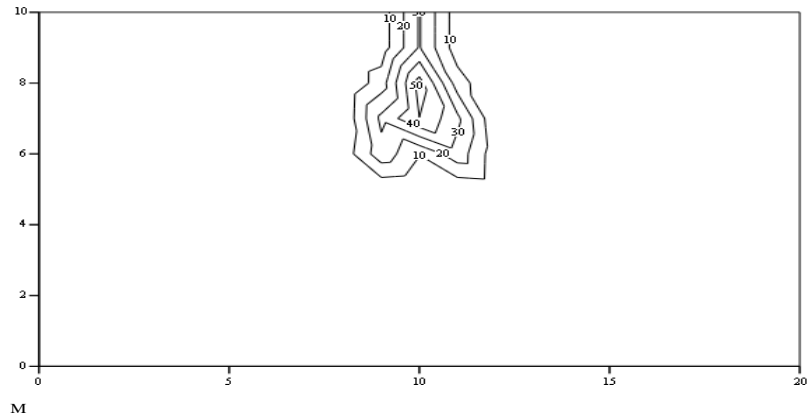
ნახ. 1. ნისლის წელიანობის v (გ/კგ) იზოხაზები ($t = 21$ სთ)



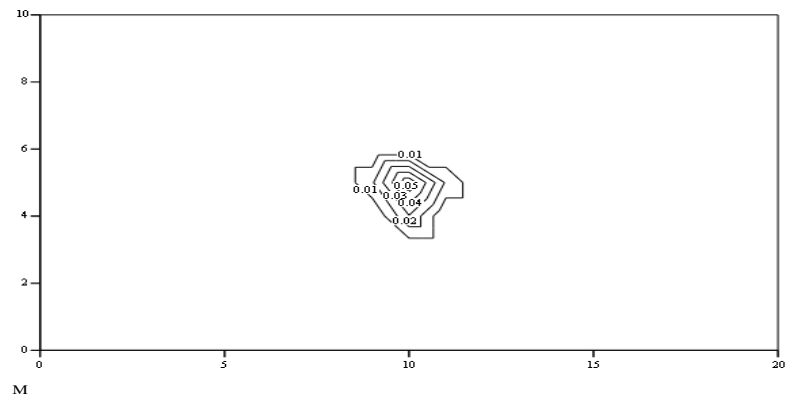
ნახ. 2. აეროზოლის კონცენტრაციის იზოხაზები, ($w_0 = 0.4$ მ/წმ)



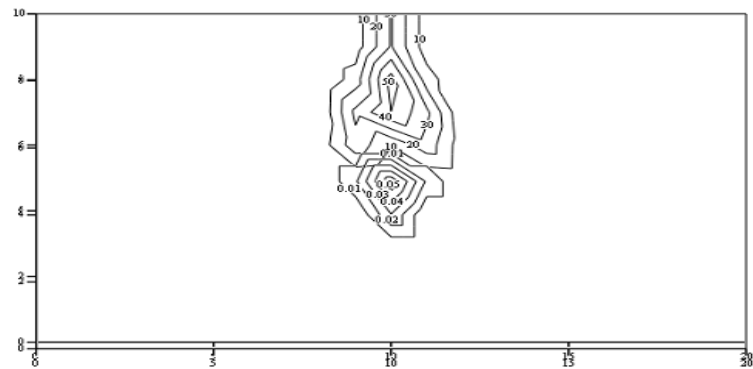
ნახ.3. სმოგი (ნისლი + აეროზოლი).



ნახ. 4. აეროზოლის კონცენტრაციის იზოხაზები, $w_0 = 0$.



ნახ. 5. ღრუბლის წყლიანობის v (გ/კგ) იზოხაზები ($t = s$).



ნახ. 6. სმოგი (ღრუბელი + აეროზოლი).

ნახ. 3 და ნახ. 6 აშკარად ჩანს ნოტიო ველებისა და აეროზოლის „ღრუბლის“ გადაფარვა – სწორედ ესაა სმოგი .

ლიტერატურა – REFERENCES – ЛИТЕРАТУРА

1. Сулаквелидзе Г. К. Ливневые осадки и град. – Л.: Гидрометеоиздат, 1967, 409 с.
2. Гутман Л. Н. Введение в нелинейную теорию мезометеорологических процессов – Л.: Гидрометеоиздат, 1969, -295 с.
3. Амиров А. Д. , Геладзе Г. Ш., Перов В. Л. Учёт фазовых переходов влаги в некоторых задачах мезометеорологии. – Тр. Зап.-Сиб регион. н.-и. гидрометеорол. ин-та, 1975, вып. 14, 5-17.
4. Геладзе Г. Ш., Мишвеладзе Б. А., Сулаквелидзе Г. К. Численное моделирование распространения аэрозоля в мезомасштабном пограничном слое атмосферы. – Сообщения АН ГССР, 1976, т. 83, № 3, с. 605 – 608.
5. გელაძე გ. შ. , ბეგალიშვილი ნ. ა. ზოგიერთი ანომალური მეზოპროცესის მოდელირება. ჰიდრომეტეინსტიტუტის 57-ე სამეცნიერო სესია, 2016 წლის 20–21 მაისი.

6. გელაძე გ. შ. ატმოსფეროს მეზომასშტაბური სასაზღვრო ფენის ზოგიერთი ანომალიური პროცესის რიცხვითი მოდელირება. თსუ გამოყენებითი მათემატიკის ინსტიტუტის გაფართოებული სემინარი, 2010 წ. 18 – 21 აპრილი.

უკ 504.5.054

სმოგის რიცხვითი მოდელის შესახებ/გ. გელაძე, ნ.ბეგალიშვილი/ სტუ-ის ჰმი-ს სამეცნ. რეგ. შრ. კრებ. – 2021- - ტ.131. -გვ.77-81. - ქართ.; რეზ.: ქართ., ინგლ., რუს.

რიცხვითი მეთოდების საშუალებით მოდელირებულია ატმოსფეროს მეზომასშტაბური სასაზღვრო ფენაში (ამსფ) ფორმირებული ღრუბლისა და ნისლის განვითარების სრული ციკლი.

მოდელირებულია აგრეთვე ამსფ-ში აეროზოლის გავრცელება წერტილოვანი წყაროდან.

ამსფ-ში ნოტიო პროცესებისა და აეროზოლის გავრცელების მოდელების "ზედდების" შედეგად შესაძლებელია მოგის ფორმირების სიმულაცია.

UDC 504.5.054

About numerical model of smog/ G. Geladze, N. Begalishvili/Scientific Reviewed Proceedings of the IHM, GTU. – 2021. – vol.131. – pp. 77-81. -Georg.; Abst.: Georg., Eng., Rus

A numerical model of the full cycle of cloud and fog genesis in the mesoboundary layer of atmosphere has been created.

A numerical model of the distribution of aerosol from an instantaneous point source into the mesoboundary layer of the atmosphere has been created.

The formation of smog is simulated based on the synthesis and "overlay" of the two above models.

УДК 504.5.054

О численной модели смога. /Г. Геладзе, Н. Бегалишвили// Сб. Трудов ИГМ, ГТУ. - 2021. - вып.131. - с. 77-81. - Груз.; Рез. Груз., Англ., Рус

Создана численная модель полного цикла генезиса облака и тумана в мезопогрансое атмосферы.

Создана численная модель распространения аэрозоля из мгновенного точечного источника в мезопогрансое атмосферы.

Смоделировано возникновение смога на основе синтеза и «наложения» двух вышеприведённых моделей.