

ნ.ბეგალიშვილი, გ.რობიტაშვილი,  
მ.ტატიშვილი, თ.რობიტაშვილი  
ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი  
უკ 551.576

### კონვექციურ ღრუბლებში ბუნებრივი და ხელოვნური ნალექწარმოქმნის გამოკვლევა ოპერატიული თერმოჰიდროდინამიკური მოდელის საფუძველზე

ამჟამად მსოფლიოს მრავალი ქვეყანა განიცდის მტკნარი წყლის ნაკლებობას, რომელიც სულ უფრო და უფრო იზრდება. აღნიშნული დეფიციტის შევსების ერთ-ერთი საშუალებაა ატმოსფერული ნალექების ხელოვნური გაზრდა და გადანაწილება. ამ მიზნით კონვექციურ ღრუბლებზე დაიწყო აქტიური ზემოქმედების სამუშაოები ჯერ კიდევ გასული საუკუნის 60-იან წლებიდან. საქართველოში ასეთი ფართომასშტაბიანი ექსპერიმენტული და საცდელ-საწარმოო სამუშაოები შესრულდა 70-80-იან წლებში. ეს საქმიანობა მნიშვნელოვანი იყო აღმოსავლეთ საქართველოს იმ რეგიონებისათვის, სადაც ხშირია გვალვები და ამის გამო დიდია წყლის დეფიციტი [1]. სავსე ექსპერიმენტების ჩატარებამ მოითხოვა კონვექციური ღრუბლის ისეთი მათემატიკური მოდელების შექმნა და განვითარება, რომლებიც აღწერდნენ ზემოქმედების ფიზიკურ მექანიზმებს და სქემებს. კერძოდ, დამუშავდა გროვა ღრუბლებზე აქტიური ზემოქმედების გამარტივებული ერთგანზომილებიანი მოდელები, რომელთა გამოყენება შესაძლებელი იყო ოპერატიულ პრაქტიკაში.

მაგალითად, [2]-ში განხილულია ერთგანზომილებიანი პროგნოზული მოდელი, მიკროფიზიკის პარამეტრიზებული სქემებით. მოდელით მიღებული შედეგები შედარებულია ოგურა-ტაკახაშის ერთგანზომილებიან [5] და ამინდის კვლევის და პროგნოზის (Weather Research and Forecast Model) სამგანზომილებიან მოდელთან. მოდელში მიკროფიზიკის დეტალურად ჩართვის გამო, დანარჩენებისგან განსხვავებით, მან წარმოაჩინა ვერტიკალური სიჩქარის მკვეთრი მაქსიმუმი. უფრო მეტიც, შედეგებმა უჩვენა, რომ იგი უკეთ აღწერდა კონვექციური ღრუბლის თვისებებს, ვიდრე სამგანზომილებიანი.

[3]-ში წარმოდგენილ მოდელში ღრუბელს აქვს ცილინდრული ფორმა და გამოყენებულია ოგურა-ტაკახაშის მოდელის განტოლებები [5]. იგი შეიცავს მოძრაობის, უწყვეტობის განტოლებებს, ასევე წყლის ორთქლის, ღრუბლის წყლის, წვიმის წყლის და კრისტალების გადატანის განტოლებებს. ჩართულია შემდეგი მიკროფიზიკური პროცესები: კონდენსაცია, ავტოკონვერსია, სუბლიმაცია, დნობა, აორთქლება. მოდელი გამოიყენება ატმოსფეროს სხვადასხვა სტრატოფიზიკის შემთხვევებისათვის.

წინამდებარე ნაშრომში ბუნებრივი და ხელოვნური ნალექწარმოქმნის გამოკვლევისათვის გამოყენებულია ერთგანზომილებიანი ოპერატიული მოდელი, რომელიც განხილულია [4]-ში. ამიტომ, მოცემულ ნაშრომში ამოსავალ განტოლებებს, საწყის და სასაზღვრო პირობებს არ მოვიყვანთ. აღნიშნული მოდელის მიხედვით ღრუბელს პირობითად აქვს ცილინდრის ფორმა დროში უცვლელი რადიუსით. ჩათვლილია, რომ უარყოფით ტემპერატურაზე ღრუბლის ტენი იმყოფება გადაცივებულ მდგომარეობაში. ღრუბლის თერმო- და ჰიდროდინამიკისათვის გამოყენებულია [5]-ში განხილული მოდელის განტოლებები, ხოლო ნალექის წარმოქმნის და გამოყოფისთვის პარამეტრიზებული სქემები, რომლებიც ითვალისწინებენ შემდეგ მიკროფიზიკურ პროცესებს: კონდენსაციას, სუბლიმაციას, კრისტალიზაციას, კოაგულაციას და აორთქლებას. ზემოქმედების აღწერისათვის გამოყენებულია [6]-ში შემოთავაზებული ხელოვნური კრისტალიზაციის პარამეტრიზებული სქემა.

ნალექწარმოქმნის შეფასებისთვის უპირველეს ყოვლისა შესრულებულია ღრუბლის ბუნებრივი განვითარების მოდელირება.

ზემოქმედების იმიტაცია შემდეგნაირად ხდება: დროის რაღაც განსაზღვრულ მომენტში ღრუბლის გადაცივებულ ნაწილში ( $-6\text{--}12^{\circ}\text{C}$ ) შეგვაქვს გარკვეული რაოდენობის მაკრისტალიზებული რეაგენტი. დიფუზიის გამარტივებული განტოლების ანალიზური ამოხსნით ვიგებთ დროის გარკვეულ შუალედში პასიური რეაგენტის მიერ დაკავებულ მოცულობას, სადაც უნდა გაიყინოს განსაზღვრული რაოდენობის ღრუბლის და წვიმის წყალი. ვითვლით ხელოვნურად გაჩენილ კრისტალებზე წყლის ორთქლის სუბლიმაციასს გამოყოფილ სითბოს რაოდენობას. ჩათვლილია, რომ ეს სითბო მთლიანად გადაეცემა განსახილველ არეში ჰაერის აღმავალ ნაკადს და ათბობს მას  $\Delta T^0$ -ით. ამით იქმნება ნაკადის სიჩქარის დამატებითი გაზრდის შესაძლებლობა, რაც გამოიწვევს ღრუბლის სიმძლავრის მატებას, ე.ი. ღრუბლის მიკროფიზიკის ხელოვნური მართვა იწვევს მისი დინამიკის ცვლილებას. ატმოსფეროს განურჩევითი წონასწორობისას ( $\gamma=\gamma_b$ ) აღმავალი დენის სიჩქარის და ღრუბლის სიმძლავრის ზრდის მაქსიმუმი ითვლება შემდეგი გამოსახულებებით [7]:

$$\Delta W_{\max} = \frac{uv}{a^3 \rho} \sqrt{\frac{\lambda \theta}{\pi c_p \rho}} \quad , \quad (1)$$

$$\Delta h = \sqrt{\frac{\lambda \theta}{\pi c_p \rho s^2 a^2}} \quad , \quad (2)$$

სადაც  $v$ -ტურბულენტობის კინემატიკური კოეფიციენტი,  $a$ - ღრუბლის რადიუსი,  $\lambda$ -კონვექციის პარამეტრი,  $\theta$ -რეაგენტის მიერ დაკავებულ  $V$  მოცულობაში გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა,  $S$ -ზემოქმედების ხანგრძლივობის შებრუნებული პარამეტრი  $s = \sqrt{\lambda(\gamma_a - \gamma)}$ .

ერთჯერადი ზემოქმედებისას გამოთვლილი პარამეტრების მნიშვნელობებია  $\Delta W_{\max} \approx 1 \text{ მ/წმ}$  და  $\Delta h \approx 600 \text{ მ}$ . მათი სიდიდეები მცირეა, თუმცა მრავალჯერადი ზემოქმედებისას ღრუბლის მოცულობის ნაზრდმა შეიძლება მიაღწიოს რამდენიმე კმ-ს, ხოლო მასში კონდენსირებული წყალი უზრუნველყოფს დამატებითი ნალექების წარმოქმნას.

ზემოქმედების მოდელირება ჩატარდა ღრუბლის განვითარების სხვადასხვა სტადიაში. მიღებული შედეგები უჩვენებენ, რომ დამატებითი წყლის მიღების თვალსაზრისით უკეთესი შედეგები მიიღება იმ შემთხვევაში, როცა რეაგენტის შეტანა ღრუბელში ხდება მისი განვითარების სტადიაში.

აქტიური ზემოქმედების რიცხვითი ექსპერიმენტები ჩატარდა ატმოსფეროს სტრატოფიკაციის აღმწერი სამი რადიოზონდის მონაცემებისათვის: ორი რეალურისა და ერთი ჰიპოთეტური პროფილებისათვის. ჰიპოთეტურის შემთხვევაში ტემპერატურა ზედაპირზე  $298^{\circ} \text{ K}$ -ის ტოლი იყო და 10 კმ-ის სიმაღლემდე ეცემოდა  $6.3^{\circ} \text{ K}$ -ით თითოეულ კმ-ზე, რის შემდეგაც უცვლელი რჩებოდა.

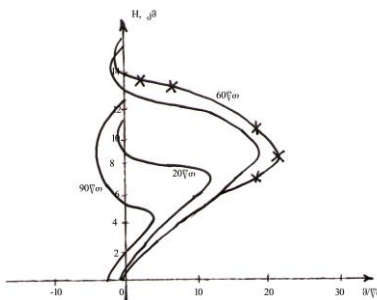
დედამიწის ზედაპირზე სითბური იმპულსის გადაცემის შემდეგ შეიქმნა კონვექციური ღრუბელი, რომლის სიმაღლე მაქსიმალური განვითარების მომენტში შეადგენდა 8.2 კმ-ს, ხოლო მისი სიცოცხლის ხანგრძლივობა იყო 72 წთ. ბუნებრივი განვითარების შემთხვევაში ღრუბლიდან გამოიყო  $5 \cdot 10^5 \text{ ტ}$ . ნალექი.

ღრუბლის განვითარების სტადიაში (მე-20 წთ) მის გადაცივებულ არეში ( $-6^{\circ} \text{ :- } -12^{\circ} \text{ C}$ ) მოვახდინეთ მაკრისტალიზებული რეაგენტით მრავალჯერადი ზემოქმედება (რაც ექვივალენტურია მაგ. 5 წთ-ში 10 "ელბრუსის" ტიპის სახენიტო ჭურვის აფეთქებისა). ამან შეცვალა ღრუბლის დინამიკა, გაიზარდა მისი სიმაღლე და აღმავალი დენების სიჩქარე. ზემოქმედებამ დასაწყისში გამოიწვია ნალექთა ინტენსივობის შემცირება, ხოლო შემდეგ მისი გაზრდა. მოიმატა ღრუბლის სიცოცხლის ხანგრძლივობამ და დაფიქსირდა  $5.95 \cdot 10^5 \text{ ტ}$  ნალექის გამოყოფა, წყლის რაოდენობა გაიზარდა დაახლოებით 20%-ით.

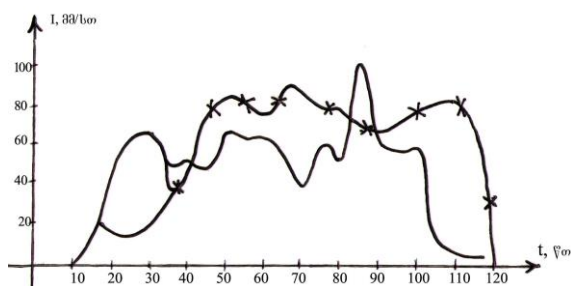
ნალექთა ინტენსივობის დროში მსვლელობისათვის დაიკვირვებოდა რამდენიმე მაქსიმუმი. ეს ახასიათებს, როგორც ბუნებრივ, ასევე ხელოვნურ ნალექწარმოქმნელ პროცესებს.

რაც შეეხება ატმოსფეროს რეალურ სტრატოფიკაციას, პირველი იყო რუისპირის (კახეთი, 1977 წ.) ზონდი. დაკვირვებულ ღრუბელს მაქსიმალური განვითარების მომენტში ჰქონდა 13 კმ სიმაღლე, 3-კმ-იანი რადიუსი, ხოლო მაქსიმალური რადიოლოკაციური ამრეკვლადობა დაფიქსირდა 9 კმ სიმაღლეზე. მოდელურმა გამოთვლებმა აჩვენა, რომ განვითარების უმაღლეს სტადიას ღრუბელი აღწევდა 55 წთ-ზე და მისი სიმაღლე შეადგენდა 13.2 კმ-ს, მაქსიმალური წყლიანობა 6.3 გ/კგ აღინიშნა 8.8 კმ-ზე და მოსული წვიმის რაოდენობა იყო  $8.5 \cdot 10^5 \text{ ტ}$ .

მე-40 წთ-ზე გადაცივებულ ნაწილში ( $-6^{\circ} \text{ :- } -10^{\circ} \text{ C}$ ) მოვახდინეთ 6-ჯერადი ზემოქმედების იმიტაცია, რის შედეგადაც  $\Delta W_{\max}$  და  $\Delta h$ -ს მნიშვნელობები შესაბამისად 1.8 მ/წმ და 1.3 კმ აღმოჩნდა. ნახ.1-ზე მოცემულია აღმავალი დენის სიჩქარის გრაფიკები ბუნებრივი განვითარების და ზემოქმედების შემთხვევებში, დროის სხვადასხვა მომენტისათვის. ნახ. 2-ზე მოცემულია ნალექის ინტენსივობის დროში ცვლილება განხილული ორივე შემთხვევისათვის.



ნახ.1 ნაკადის აღმავალი დენის სიჩქარის განაწილება სიმაღლის მიხედვით დროის სხვადასხვა მომენტებში (X-ზემოქმედების შემდეგ)



ნახ.2 ნალექების ინტენსივობის ცვლილება დროში (X-ზემოქმედების შემთხვევაში)

მეორე ზონდის (თეთრიწყარო, 1974წ.) პირობებში ღრუბლის ბუნებრივი განვითარების სიმაღლე იყო 12.6კმ, დაიკვირვებოდა ძლიერი ნალექი. მოდელირებით მიღებულმა ღრუბლის სიმაღლემ მიაღწია 13კმ-ს. მაქსიმალური წყლიანობის სიმაღლემ შეადგინა 8კმ. მოსული ნალექების რაოდენობა იყო  $3.2 \cdot 10^5$ ტ. ზემოქმედების შედეგად მოსული ნალექების რაოდენობა გაიზარდა 22%-ით.

ზემოქმედების შედეგად დინამიკას და წვიმის ინტენსივობის დროში ცვლილებას ერთნაირი სახე აქვს: საწყის მომენტში ხდება ნალექის ინტენსივობის შემცირება ბუნებრივთან შედარებით. ამ მოვლენის ახსნა ფიზიკურად შემდეგნაირად არის შესაძლებელი: მაკროსტალიზებული რეაგენტით ზემოქმედებისას ხდება დამატებითი სითბური ენერჯის გამოყოფა, რის შედეგად იზრდება აღმავალი დენის სიჩქარე. ეს იწვევს ნალექთა A წყლის ღრუბლის ზედა ნაწილში გადატანას და ღრუბლიდან მოსული ნალექების ინტენსივობის შემცირებას. ინტენსივობის დროში ცვლილებას აქვს იმპულსური ხასიათი, თუმცა მაინც შეიმჩნევა ორი მაქსიმუმი, რომლებიც ზემოქმედების შემთხვევაში დროში წანაცვლებული აღმოჩნდა.

სხვადასხვა სიმძლავრის ღრუბელზე ზემოქმედების იმიტაციამ აჩვენა, რომ სუსტ ღრუბელში ნალექის ფარდობითი ნამატი დიდია. თუმცა უფრო ხელსაყრელია ზემოქმედების ჩატარება მძლავრ კონვექციურ ღრუბელზე.

ექსპერიმენტებით დადგინდა, რომ ყოველი ღრუბლისათვის არსებობს რეაგენტის ექსტრემალური რაოდენობა, რომლისთვისაც ზემოქმედებით მიღებული დამატებითი ნალექის რაოდენობა მაქსიმალურია. რეაგენტის რაოდენობა დამოკიდებულია ღრუბლის სიმძლავრეზე და მისი განვითარების დინამიკაზე. ნალექების გაზრდისათვის საჭიროა ზემოქმედების წარმოება ღრუბლის განვითარების სტადიაში. რეაგენტის შეტანა უნდა მოხდეს ღრუბლის გადაცივებულ ნაწილში  $-6 \text{--} -10^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურულ არეში, ხოლო ზემოქმედების დროითი ინტერვალი არ უნდა აღემატებოდეს 5წთ-ს.

რეაგენტის ოპტიმალური რაოდენობის დადგენა მოითხოვს მოდელის შემდგომ განვითარებას, როგორც ბუნებრივ, ასევე ხელოვნურად განვითარებულ ღრუბლებზე დაკვირვებათა მონაცემებს.

#### ლიტერატურა- REFERENCES - ЛИТЕРАТУРА

1. Сванидзе Г.Г., Бериташвили Б.Ш. О современном состоянии проблемы искусственного увеличения осадков. Обнинск, 1978.
2. Shu-Hua Chen, Wen-Yih Sun. A one-dimensional time dependent cloud model. Journal of the Meteorological Society of Japan. Vol.80, N1, 2002.
3. Lester Alfonso, Martinez Daniel, Perez Carlos. Numerical simulations of tropical convective clouds over Cuba using one-dimensional and time-dependent cloud model. 12-th International Conf. On Clouds and Precipitation Proceedings. Switzerland, 1996.
4. ნ.ბეგალიშვილი, გ.რობიტაშვილი, ვ.შაქარაშვილი. კონვექციური ღრუბლის ოპერატიული რიცხვითი მოდელი. ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტის შრომები, ტ.100, 1996.
5. Ogura J., Takahashi T. Numerical simulation of the life cycle of a thunderstorm cell. Mon. Weath. Rev. V.99, N12, 1971.
6. თ. რობიტაშვილი, მ.ტატიშვილი. ღრუბელში მიმდინარე მიკროფიზიკური პროცესების პარამეტრიზაცია. ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტის შრომები, ტ.104, 2001.
7. კონვექციურ ღრუბლებზე აქტიური ზემოქმედების მათემატიკური მოდელირება. თემა 2.21-ის ანგარიში. ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტის ფონდები, 1995.

უაკ 551.576

**კონვექციურ ღრუბლებში ბუნებრივი და ხელოვნური ნალექწარმოქმნის გამოკვლევა ოპერატიული თერმოჰიდროდინამიკური მოდელის საფუძველზე** /ნ.ბეგალიშვილი, გ.რობიტაშვილი, მ.ტატიშვილი თ.რობიტაშვილი/. ჰმ-ს შრომათა კრებული. –2009.-ტ.114 –გვ.19-25. ქართ., რუზ. ქართ., ინგლ., რუს.

კონვექციური ღრუბლის ერთგანზომილებიანი ოპერატიული ჰიდროდინამიკური მოდელით შესრულებულია ბუნებრივი და ხელოვნური ნალექწარმოქმნის გამოკვლევა ორი რეალური და ერთი ჰიპოთეტური რადიოზონდის მონაცემების საშუალებით. მიკროფიზიკური პროცესები მოდელში წარმოდგენილია პარამეტრიზებული სახით. ზემოქმედების მოდელირება განხორციელდა მაკროსტალიზებული რეაგენტის შეტანით ღრუბლის განვითარების სხვადასხვა სტადიაზე. დადგინდა, რომ ყოველი ღრუბლისათვის არსებობს მისი განვითარების განსაზღვრული მომენტი და რეაგენტის ოპტიმალური რაოდენობა, რომლის ღრუბელში შეტანით ნალექების დამატებითი რაოდენობა მაქსიმალურია. რეაგენტის ეს რაოდენობა დამოკიდებულია ღრუბლის მაქსიმალურ სიმძლავრეზე და დინამიკის თავისებურებებზე. ზემოქმედების შედეგად იცვლება ღრუბლის მიკროფიზიკა, რაც იწვევს დინამიკის ინტენსიფიკაციას. ასეთ პირობებში იზრდება ღრუბლის სიცოცხლის ხანგრძლივობა, მისი სიმძლავრე და მოსული ნალექების რაოდენობა.

UDC 551.576

**Investigation of natural and artificial precipitation formation in convective clouds in terms of operational thermohydrodynamical model.** /N.Begalishvili, G.Robitashvili, M.Tatishvili, T.Robitashvili/.Transactions of the Institute of Hydrometeorology. 2009. –v.114,-p.19-25.-Georg.-.Summ. Georg., Ing., Russ.

Natural and artificial precipitation formation processes have been investigated using one-dimensional operational hydrodynamical model of convective cloud applying two real and one hypothetic radiosonde data. Microphysical processes are presented by parameterization schemes. The modification modelling has been carried out on the different stages of cloud growth by insertion of crystallizing reagent. It has been ascertained that for every cloud there exist the definite moment in its growth and optimal quantity of reagent, when additional precipitation increase is maximal. The mentioned amount of reagent depends on the features of growth dynamics and clouds maximal capability. In the result of modification changes were occurred in cloud microphysics, causing intensification of its dynamics. On such conditions clouds life time and the amount of precipitations have been increased.

УДК 551.576

**Исследование естественного и искусственного осадкообразования в конвективных облаках на основе оперативной термогидродинамической модели.** /Н.А. Бегалишвили, Г.А.Робиташвили, М.Р.Татишвили, Т.Г.Робиташвили/ сб. Трудов Института гидрометеорологии АН Грузии. –2009.-т.114- с.19-25 -Груз. рез. Груз., Анг., Русск.,

С помощью одномерной оперативной термогидродинамической модели конвективного облака выполнено исследование естественного и искусственного осадкообразования, используя данные двух реальных и одного гипотетического радиозондов. Микрофизические процессы в модели представлены в параметризованном виде. Моделирование воздействия проведено на разных стадиях развития облака имитацией вноса кристаллизующего реагента. Установлено, что для каждого случая существует определенный момент в развитии облака и оптимальное количество реагента, когда дополнительное увеличение осадков является максимальным. Это количество реагента зависит от особенностей динамики развития и максимальной мощности облака. В результате воздействия изменяется микрофизика облака, что вызывало интенсификацию его динамики. В этих условиях увеличиваются продолжительность существования облака и количество выпавших осадков.