

უკ 551.51+551.521+551.57

წყლის ფაზური გადასვლების გათვალისწინება მეზომეტეოროლოგიის ზოგიერთ რიცხვით მოდელში

გ. გელაძე, ნ. ბეგალიშვილი, ნ.ნ. ბეგალიშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი

წყლის ფაზური გადასვლები და, განსაკუთრებით, კონდენსაციის ფარული სითბო თამაშობს ერთ-ერთ მნიშვნელოვან, გადამწყვეტ როლს მეზომეტეოროლოგიის მრავალი პროცესის ფორმირებაში [1,2]. ასეთებია: ყველა სახის ღრუბელი და ნისლი, ამათი ანსამბლი, ტროპიკული ციკლონი, ტორნადო, ფიონი და ა. შ. ამასთან, ისიც უნდა ვთქვათ, რომ კონდენსაცია და კონდენსაციის ფარული სითბო არა მარტო ამ ნოტიო პროცესებს “აყალიბებს”, არამედ ის აქტიურ გავლენას ახდენს მათ დინამიკასა და თერმიკაზე.

ფიზიკიდან ცნობილია, რომ სითხის აორთქლებისათვის საჭიროა მას გარედან მივაწოდოთ სითბო; უკუპროცესის დროს, ე. ი. ორთქლის კონდენსაციისას, ენერჯის შენახვის კანონის თანახმად, ზუსტად იმდენივე სითბო გამოიყოფა რამდენი აორთქლებისას. ააი, ესაა კონდენსაციის ფარული სითბო $LL=2260 \cdot 10^3$ ჯ/კგ.

ზუსტად ასეთივე მდგომარეობაა წყლის გაყინვა-დნობის შემთხვევაშიც. ყინულის დნობის კუთრი სითბო $\lambda=334 \cdot 10^3$ ჯ/კგ. ცნობისათვისა და ამ კონსტანტებთან შედარებისათვის მოვიყვანოთ წყლის კუთრი სითბოტევადობა $c=4.2 \cdot 10^3$ ჯ/კგ*გრად.

განვიხილოთ კონდენსაციის ფარული სითბოს გამოყოფის როლი ზემოთმოყვანილი ნოტიო პროცესების ფორმირებაში.

ღრუბლები წარმოიქმნებიან ჰაერის კონვექციის შედეგად. დედამიწის ქვეფენილი ზედაპირის გათბობისას სითბოგამტარებლობის შედეგად გამთბარი ჰაერი ჰქმნის აღმავალ დენს (კონვექცია). აღმავლისას ის ფართოვდება, შესაბამისად, ცივდება. როდესაც ის მიაღწევს კონდენსაციის დონეს, ადგილი აქვს ნოტიო ჰაერის კონდენსაციას, ე. ი. ვიღებთ ღრუბელს. ამ დროს გამოიყოფა კონდენსაციის ფარული სითბო, რაც თავისთავად აძლიერებს ჰაერის კონვექციას (დინამიკა უფრო ინტენსიური ხდება). ე. ი. დედამიწის ქვეფენილის მიერ მიღებული სითბო გადაედინება ატმოსფეროს სასაზღვრო ფენის ზედა ფენებში – სითბო ტრანსფორმირდება სივრცეში.

შევნიშნოთ, რომ რეალობაში კონდენსაცია არ იწყება 100% -იანი ფარდობითი ტენიანობისას – აქ ადგილი აქვს წყლის ორთქლის გადაციებას, მაგრამ რიცხვითი მოდელების უმრავლესობაში მიღებულია დაშვება, რომ ჰაერის კონდენსაცია ხდება მომენტალურად მისი გაჯერებისას.

ეს პროცესი ნისლში ცოტა სხვანაირად მიმდინარეობს: იქ ნოტიო ჰაერის კონდენსაცია (შესაბამისად, აქ ადგილი აქვს კონდენსაციის ფარული სითბოს გამოყოფას) კონვექციის გამო კი არა ხდება, არამედ ამის ძირითადი მიზეზი არის დედამიწის, ან წყლის ქვეფენილი ზედაპირის გაციება (მაგ., ტემპერატურის დღე-ღამური სვლისას), ან თბილი ჰაერის ადვექციისას ცივ ზედაპირზე. აქაც აქვს ადგილი ენერჯის შენახვის კანონს – დღისით მიღებული მზის ენერჯია გამოიყოფა ღამე. ე. ი. ნისლის შემთხვევაში, ღრუბლებისაგან განსხვავებით, კონდენსაციის ფარული სითბო ტრანსფორმირდება დროში.

საწყის განტოლებათა სისტემას, რომელიც აღწერს ატმოსფეროს მეზოსასაზღვრო ფენაში (ამსფ) მიმდინარე პროცესებს (თერმოჰიდროდინამიკა პლიუს ნოტიო პროცესები) (x - z) ვერტიკალურ სიბრტყეში აქვს ასეთი სახე [1,2,3]:

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

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

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

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

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

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

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

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, λ, S - ატმოსფეროს ფლოტაციისა და სტრატეფიკაციის 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.

სასაზღვრო და საწყისი პირობები

ჩამოვყალიბოთ საწყისი და სასაზღვრო პირობები (1)-(6) სისტემისათვის ზოგადი სახით.

ამსფ-ის ქვედა საზღვარზე u და w - სათვის ვაძლევთ ე. წ. “მიწებების”, q, v - თვის მიღების პირობებს

$$\text{თუ } z = 0 \quad u = 0, \quad w = 0, \quad \vartheta = F(x, t), \quad q = 0, \quad v = 0, \quad (7)$$

სადაც $F(x, t)$ არის **ამსფ**-ის ქვეფენილის ტემპერატურა, რომელსაც ვიღებთ მეტეოექსპერიმენტებიდან [18]:

$$F(x, t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq 32 \text{ km}, \quad 48 \text{ km} < x \leq 80 \text{ km}, \\ 5 \sin \omega t & 32 \text{ km} \leq x \leq 48 \text{ km}, \end{cases} \quad (8)$$

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

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

$$\text{თუ } z = Z \quad u = 0, \quad \pi = 0, \quad \vartheta = 0, \quad \frac{\partial q}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad (9)$$

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

$$\text{თუ } x = 0, X \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial q}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad (10)$$

სადაც X, Z არიან **ამსფ**-ის ჰორიზონტალური და ვერტიკალური საზღვრები.

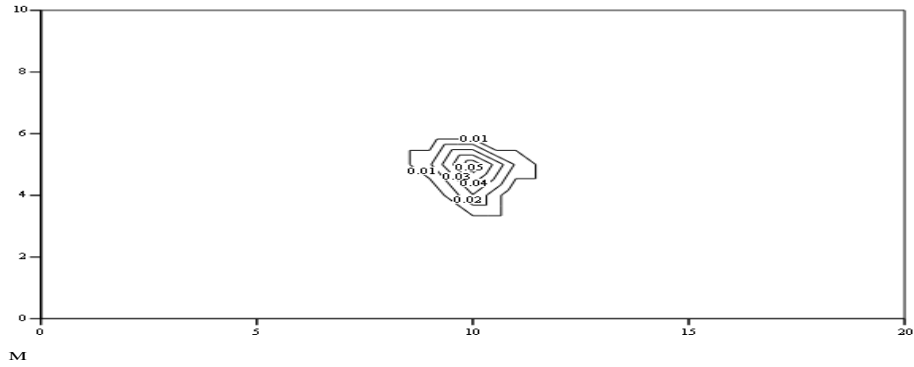
(1) – (6) სისტემისათვის საწყისად ვიღებთ შემდეგ პირობებს:

$$\text{თუ } t = 0 \quad u = 0, \quad \vartheta = 0, \quad q = 0, \quad v = 0, \quad (11)$$

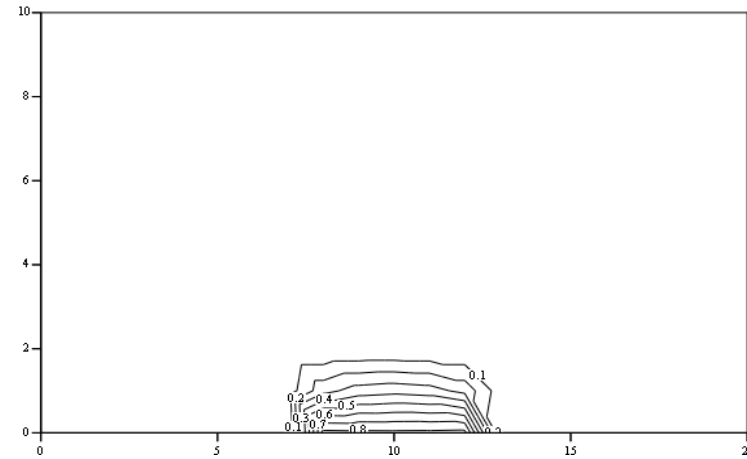
მმოცემული ამოცანის მთავარ, “მამოძრავებელ” ძალას წარმოადგენს $f(x, t)$, რომელიც იწვევს განსახილველ ლოკალურ ცირკულაციას [1, 4].

ამოცანა არსებითად არაწრფივია, ფიზიკურად კომპლექსურია და, ბუნებრივია, იხსნება რიცხვითი მეთოდებით: ცხად სასრულ-სხვაობიანი სქემას აქვს I რიგის სიზუსტე დროის მიხედვით და II ხარისხის სიზუსტე კოორდინატის მიხედვით.

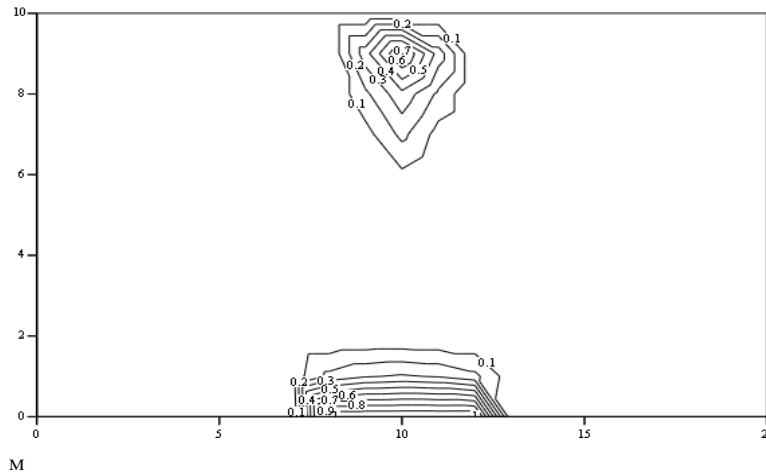
რიცხვით მოდელებში კონდენსაციის ფარული სითბოს გათვალისწინებას თავისი ისტორია აქვს. პირველი ასეთი მოდელები გაჩნდა გასული საუკუნის ჯერ კიდევ 50-იან წლებში. ნოტიო



ნახ.1. ღრუბლის წელი ანობის ვ (გ/კგ) იზოხაზები(t=9 სთ).

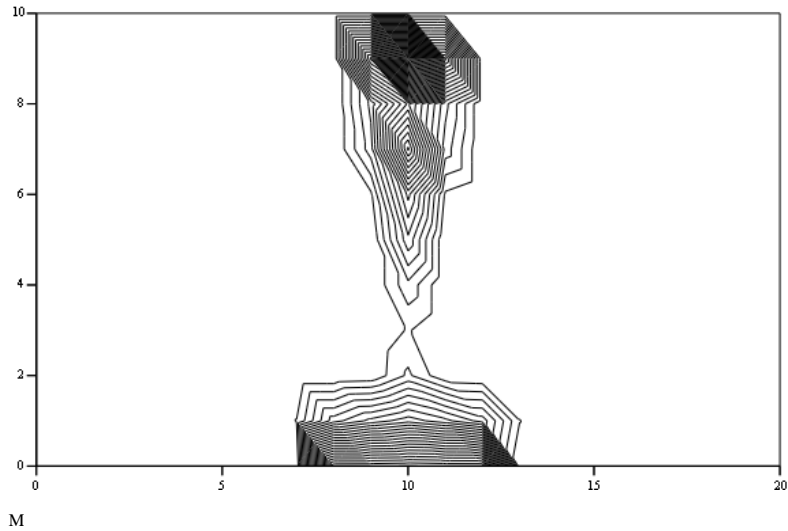


ნახ.2. ნისლის წელიანობის ვ (გ/კგ) იზოხაზები(t=21 სთ)

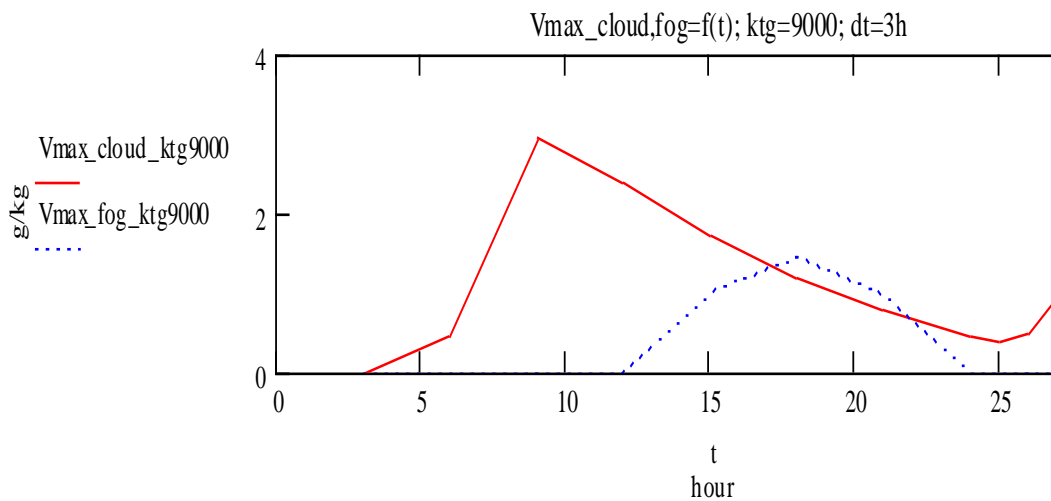


ნახ.3. ღრუბლისა და ნისლის წელიანობის v (გ/კგ) იზოხაზები (t = 15 სთ).

ნახ.4 შერჩეულ იქნა ამსფ-ის ისეთი ტემპერატურული რეჟიმი, რომლის დროსაც “ერთიანდება” ნისლი და ღრუბელი. იქმნება ტორნადოს მსგავსი “ხორთუმი”.

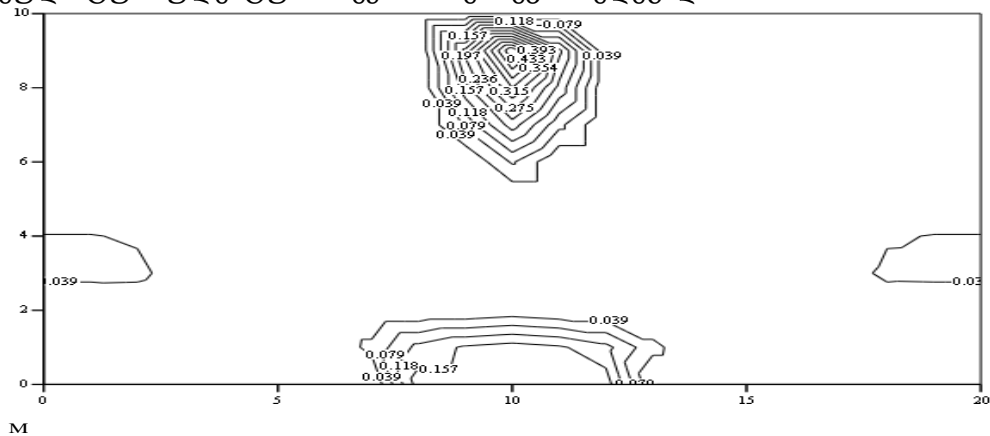


ნახ. 4. ღრუბლისა და ნისლის გაერთიანებული კომპლექსის წყლიანობის v (გ/კგ) იზოხაზები ($t = 15$ სთ).



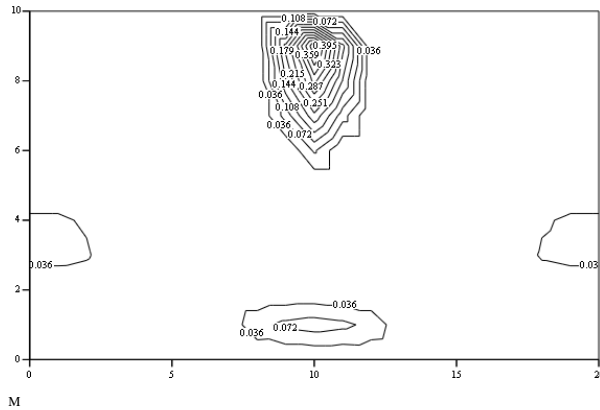
ნახ. 5. ღრუბლისა და ნისლის მაქსიმალური წყლიანობის v (გ/კგ) დამოკიდებულება დროისაგან „უწყვეტი“ ღრუბლიანობის შემთხვევაში.

ნახ. 6 მოყვანილია 4 ნოტიო სტრუქტურა (3 ფენა ღრუბელი და 1 ნისლი), რომელიც ჩამოყალიბდა გარკვეული ტურბულენტური რეჟიმის შერჩევის შედეგად.



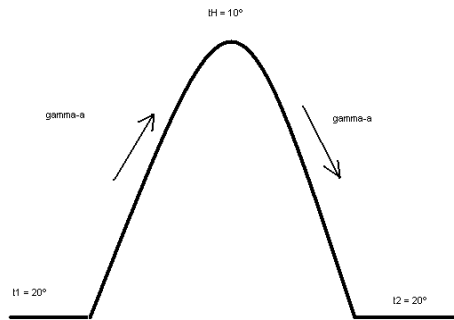
ნახ. 6 . ღრუბლებისა და ნისლის ანსამბლი (v გ/კგ, $t = 23,2$ სთ).

ნახ.7 მიღებულია 4 ფენა ღრუბელი: დედამიწის ქვეფენილის გათბობის შედეგად მოხდა წინა ნახაზზე მოყვანილი ნისლის აწევა და ფენა ღრუბლად ტრანსფორმირება.

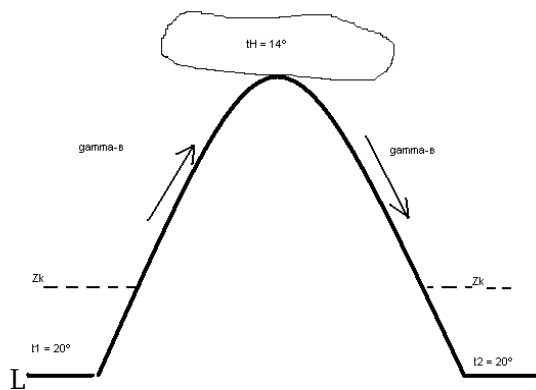


ნახ. 7. ღრუბლების ანსამბლი (v გ/კგ, $t = 23,6$ სთ).

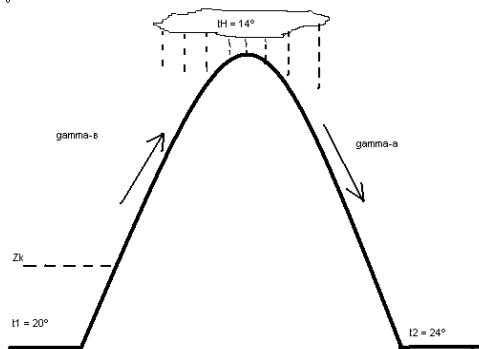
ფიონი არის ლოკალური ქარი, რომელშიც ნოტიო პროცესებს არსებითი მნიშვნელობა აქვთ. მისი გენეზისის გათვალისწინების შედეგად მოვახდინეთ ამ პროცესის ახლებური კლასიფიკაცია: ა) მშრალ-ადიაბატური ფიონი, ბ) ნოტიო-ადიაბატური ფიონი და გ) ნოტიო-მშრალ-ადიაბატური ფიონი (ნახ. 8 - 10).



ნახ. 8. მშრალ-ადიაბატური ფიონი



ნახ. 9. ნოტიო-ადიაბატური ფიონი



ნახ. 10. ნოტიო-მშრალ-ადიაბატური ფიონი

ფიონის არსებობისათვის აუცილებელ პირობას წარმოადგენს ჰაერის მთაზე გადადინება, მაგრამ ფიონის ეფექტის დაჭერა შესაძლებელია ჩვენი, 2-განზომილებიანი ბრტყელი ამოცანის პირობებშიც კი: ლოკალური ცირკულაციის შედეგად სითბური კუნძულის თავზე გვაქვს აღმავალი, პერიფერიაში კი დაღმავალი დენები. აქაც, როგორც კლასიკური ფიონის შემთხვევაში, აღმასვლისას დაიშორება ჰაერის გაციება, დაღმასვლისას კი გათბობა. ეს ისე მკვეთრად არაა გამოხატული, როგორც მთის შემთხვევაში იმიტომ, რომ ჩვენს ამოცანაში ტემპერატურის გრადიენტის მოსპობა, “წაშლა” ხდება ტურბულენტობის შედეგად (ამ შემთხვევაში წინააღმდეგობა, სითბოიზოლაცია მთის სახით არ არსებობს). აქ დაიშორება როგორც მშრალ-ადიაბატური, ასევე ნოტიო-ადიაბატური ფიონი.

რაც შეეხება ნოტიო-მშრალ-ადიაბატური ფიონს, მისი მოდელირება ხდება ასე: დროის იმ მომენტში, როდესაც ღრუბელს აქვს მაქსიმალური წყლიანობა, მათემატიკურად ვანულებთ წყლიანობას, რაც ნიშნავს ღრუბლის წყლისაგან დაცლას, “წვიმის” იმიტაციას. მის შედეგად ნოტიო ადიაბატაზე ასული ჰაერი ჩამოდის მშრალი ადიაბატით.

პირველი რიცხვითი ექსპერიმენტები გვაძლევენ დაღმავალ ჰაერში ტემპერატურის ზრდას საკონტროლო ექსპერიმენტთან შედარებით (როცა ჰაერი ჩამოდის ნოტიო ადიაბატით). რიცხვითი ექსპერიმენტები გრძელდება ამოცანის შემდგომი დახვეწის მიზნით.

ლიტერატურა – REFERENCES - ЛИТЕРАТУРА

1. Сулаквелидзе Г.К. Ливневые осадки и град. – Л.: Гидрометеиздат, 1967.
2. Гутман Л.Н. Введение в нелинейную теорию мезометеорологических процессов – Л.: Гидрометеиздат, 1969.
3. Геладзе Г.Ш. К численной модели мезомасштабного пограничного слоя атмосферы. – Сообщения АН ГССР, т. 77, #1, 1975.
4. Воронцов П.А. Аэрологические исследования пограничного слоя атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1960.
5. Матвеев Л.Т. Некоторые вопросы теории образования и эволюции слоистообразной облачности. – Тр. ААНИИ, т. 228, вып. 1, 1959.
6. Ogura Y. The evolution of a moist convective element in a shallow, conditionally unstable atmosphere : a numerical calculation. – J. Atmos. Sci., v. 20, N5, 1963.
7. Амиров А.Д. Метод расчёта полей влажности и температуры в задаче о кучевом облаке. – Изв. АН СССР. Физ. атмосфю и океана, т. 7, #7, 1971.
8. 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, вып. 14, 1975.
9. გელაძე გ. შ., ბეგალიშვილი ნ., დავითაშვილი თ. ატმოსფეროს მეზოპროცესებში სითბური ტალღის გავრცელების შესახებ. ჰიდრომეტინსტიტუტის 57-ე სამეცნიერო სესია, 2010. 20-21 მაისი.

10. გელაძე გ. შ., ბეგალიშვილი ნ., დავითაშვილი თ. ზოგიერთი ანომალური მეზოპროცესის მოდელირება. ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტის 57-ე სამეცნიერო სესია, 2010 წლის 20-21 მაისი.
11. გელაძე გ. შ. სითბური ტალღის გავრცელება ატმოსფეროს მეზოსასაზღვრო ფენაში. თსუ გამოყენებითი მათემატიკის ინსტიტუტის გაფართოებული სემინარი, 2010. 18 – 21 აპრილი.
12. გელაძე გ. შ. ატმოსფეროს მეზომასშტაბური სასაზღვრო ფენის ზოგიერთი ანომალური პროცესის რიცხვითი მოდელირება. თსუ გამოყენებითი მათემატიკის ინსტიტუტის გაფართოებული სემინარი, 2010. 18 – 21 აპრილი.

წყლის ფაზური გადასვლების გათვალისწინება მეზომეტეოროლოგიის ზოგიერთ რიცხვით მოდელში / გ. გელაძე, ნ. ბეგალიშვილი, ნ. ბეგალიშვილი/სტუ-ს 33-ის სამეცნ. რეგ. შრ. კრებ. . - 2018. - ტ.125. - გვ.14-20. - ქართ.; რეზ.: ქართ., ინგლ., რუს. განხილულია წყლის ფაზური გარდაქმნების გათვალისწინების მეთოდები ატმოსფეროს მეზომასშტაბური სასაზღვრო ფენის ზოგიერთ რიცხვით მოდელში. ჩვენი მოდელის საშუალებით იმიტირებულია რიგი ისეთი ნოტიო პროცესებისა, როგორცაა ნისლი, ღრუბელი, ნისლისა და ღრუბელთა ანსამბლი. მოცემულია ფიქსირების ახალი კლასიფიკაცია და მათი მოდელირების შესაძლებლობა ბრტყელი ამოცანის შემთხვევაში.

Account of phase transformations of water in some numerical models of mesometeorology / G. Geladze, N. Begalishvili, N. Begalishvili /Transactions of the IHM at the GTU. - 2018. - vol.125. - pp.14-21. - Georg.; Summ: Georg., Eng., Rus.

Methods of accounting for water phase transformations in some numerical models of the mesoscale atmospheric boundary layer are considered. With the help of our model, a number of humidity processes such as fog, cloud, fog and cloud ensemble were simulated. A new classification of foehns is carried out; the possibility of their modeling in the case of a plane problem is given.

Учёт фазовых превращений воды в некоторых численных моделях мезометеорологии / Г. Геладзе, Н. Бегалишвили, Н. Бегалишвили/ Сб. Трудов ИГМ ГТУ-а. - 2018. - вып.125. - с.14-21. - Груз.; Рез: Груз., Англ., Рус.

Рассмотрены методы учёта фазовых превращении воды в некоторых численных моделях мезомасштабного пограничного слоя атмосферы. С помощью нашей модели был смоделирован ряд таких влажностных процессов, как туман, облако, ансамбль тумана и облаков. Проведена новая классификация фёнов; дана возможность их моделирования в случае плоской задачи.