

უაკ 551.509

## ზოგიერთი ლოკალურ-„ფენომენური“ ატმოსფერული მოვლენების შესწავლა ჰიდროთერმოდინამიკური მიდგომით

ზ.ხვედელიძე, თ.დავითაშვილი, ი.სამხარაძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი.

### შესავალი

დედამიწის ატმოსფეროში, მცირე ფართის ტერიტორიაზე, ხშირად მიმდინარეობს არაპერიოდული არაორდინალური პროცესები. ამ პროცესებს თან ახლავს არასასურველი მოვლენები ადამიანთა მსხვერპლით დამთავრებულიც კი. აღნიშნულ მოვლენებს მიეკუთვნება: ქარბორბალა, ადგილობრივი ქარები, მიწისპირა ფენაში წარმოშობილი სხვადასხვა ბუნების აღმავალი დინებები, ლოკალური ადგილები სადაც მუდმივად დაიკვირვება ე.წ. გეოფიზიკური „ფენომენური“ მოვლენები (დავით გარეჯის ტაფობი, სურამის ზეგანი, არაგვის და თერგის ხეობები). ეს მოვლენები დიდ გავლენას ახდენს ამინდზე და კლიმატზე, ამიტომ მათ შესწავლას უდიდესი თეორიული და პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს.

### ამოცანის დასმა

დედამიწის ატმოსფეროში მიმდინარე სხვადასხვა ბუნების მოვლენებიდან განსაკუთრებით საინტერესოა ქარის ველში ბრუნვითი გრიგალების შესწავლა. ამგვარი გლობალური და რეგიონალური მასშტაბის პროცესები სულ უფროდაუფრო ხშირდება და აქტიურდება ბოლო ათწლეულებში. ამ მოვლენის თეორია საკმარისად არის დამუშავებული [1-3], მაგრამ ლოკალური ტერიტორიის თავისებურებების გათვალისწინება, ყოველი ცალკეული შემთხვევისათვის მოითხოვს დამატებითი ფაქტორების გავლენის შესწავლას. მაგალითად, საქართველოს ტერიტორიისათვის აუცილებელია გამოკვლეული იქნას გრიგალის რელიეფზე, ჰორიზონტისადმი დახრის კუთხეზე და მიწისპირა ფენის თერმულ არაერთგვაროვნებაზე დამოკიდებულება. ამ ნაშრომში აღნიშნული მოვლენის შესწავლისათვის ვიყენებთ ჰიდროთერმოდინამიკის განტოლებებს ეილერისა და ლამბა-გრომეკოს ფორმით. შესაბამისი საწყისი და სასაზღვრო პირობებით [1,3]. განვიხილოთ საქართველოს ტერიტორიის ცალკეულ რეგიონებზე დაკვირვებული განსაკუთრებული მოვლენები.

ა) დავით გარეჯის ტაფობის „ფენომენი“.

დავით გარეჯის მიდამოში შეიმჩნევა განსაკუთრებული პროცესები: კერძოდ, ტაფობში მთელი წლის განმავლობაში დაიკვირვება უნალექობა, მიუხედავად იმისა, რომ ტაფობის გარშემო ამალღებულ შემოგარენზე შეიძლება თავსხმა წვიმა იყოს, ჰაერის მაღალი ტემპერატურა, ქარის მუდმივი ქროლვა ტაფობიდან გარეუბნისაკენ, მთებზე ტაფობის გარშემო თბილი და გრილი მასების შემოდინება და ხშირად გროვა-საწვიმარი ღრუბლების წარმოშობა. ტაფობის გეოლოგიური სტრუქტურიდან გამომდინარე ჰაერის ქვედა ფენებში მაღალია ტემპერატურა, რაც განაპირობებს აღმავალი დინების გაძლიერებას, ეს დინება სიმაღლის მიხედვით წარიტაცება შედარებით დაბალი ტემპერატურის მქონე პერიფერიისაკენ. ამ მოვლენების თეორიული ახსნისათვის ვისარგებლოთ ატმოსფეროს სასაზღვრო ფენაში მოქმედი განტოლებათა სისტემით, სადაც ზემოთ აღნიშნული მიზეზის გამო გადამწყვეტია ქარის სიჩქარის ვერტიკალური მდგენელი [3-6]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + W \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + k \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + W \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + k \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}, \quad (2)$$

სადაც  $t$  არის დრო;  $ox$  და  $oz$  ჰორიზონტალური და ვერტიკალური ღერძებია,  $u$ ,  $v$  და  $w$  სიჩქარის მდგენელებია შესაბამის ღერძებზე,  $\rho$  – სიმკვრივეა,  $p$  – წნევა,  $k$  – ტურბულენტობის კოეფიციენტი. ვინაიდან პროცესის ხანგრძლივობა მცირეა, ამიტომ შეიძლება მივიჩნიოთ იგი სტაციონალურად. თუ (1) განტოლებას გავწარმოებთ  $z$ -ით, (2)-ს კი  $x$ -ით და გამოვაკლებთ, სიჩქარის გრიგალის  $x$  მდგენელისათვის მივიღებთ შემდეგ განტოლებას:

$$k \frac{\partial^2 \Omega}{\partial z^2} - w \frac{\partial \Omega}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

სადაც  $\Omega$ -სიჩქარის გრიგალია.

(1),(2)-ის ამოხსნისათვის  $z$ -ის მიმართ უნდა შესრულდეს შემდეგი სასაზღვრო პირობები: როცა  $z=h$  (მიწისპირა ფენის სიმაღლე), ქარის სიჩქარის გრიგალის  $\Omega$  მნიშვნელობა უტოლდება დინამიკური სიჩქარის ვერტიკალურ გრადიენტს  $\Omega = gradV^*$ , სადაც  $V^*$  არის დინამიკური სიჩქარე და ასეთი მიდგომა შესრულებულია პირველად.

როცა  $z \rightarrow \infty$ ,  $\Omega$ -შემოსაზღვრულია. ამ პირობებით (1)-(2)-ის ამოხსნის აქვს შემდეგი სახე:

$$\Omega_x = gradV^* e^{\frac{w}{k}z}, \quad (4)$$

ამრიგად მივიღეთ, რომ  $\Omega_x$  სიმაღლის მიხედვით ექსპონენციალურად იზრდება. მიუხედავად იმისა, რომ  $\frac{w}{k}$ -მცირეა ( $10^{-5}$  რიგისაა),  $\Omega_x$  მაინც მკვეთრად იზრდება და მისი ბუნებიდან გამომდინარე იწვევს ნაკადის შიგნიდან (ტაფობიდან) ზემოთ და გარეთ გამოდინებას. ეს ფაქტი კი ამართლებს მითითებულ თავისებურებებს. ის გარემოება, რომ გრიგალი პროპორციულადაა დამოკიდებული დინამიკურ სიჩქარეზე განპირობებს ოროგრაფიული და სითბური ფაქტორების გავლენას.  $h$ - სიმაღლის ზემოთ ქარი ხდება გეოსტროფიული, ე.ი.  $\Omega_x = \alpha \Delta p$  ( $\Delta$  –ბრტყელი ლაპლასიანია, გამოდის, რომ ქარის სიჩქარის ზრდა  $\Omega_x > 0$  იწვევს წნევის გრადიენტის  $\Delta p > 0$  მატებას ისე, რომ მაქსიმალური მნიშვნელობა ტაფობის შიგნითაა. ასეთი სიტუაცია ხელს უშლის ღრუბლების წარმოშობას ტაფობში და ხელსაყრელ პირობებს ქმნის ღრუბლებისათვის გარეუბნებზე. მზუნებრივია, ნალექების განაწილებაც შესაბამისად განხორციელდება. ამრიგად, მითითებული თავისებურებანი თეორიულად დასაბუთებულია.

### სურამის ზეგანის ფაქტორი

როგორც ცნობილია, საქართველოს ტერიტორიაზე ძირითადად გაბატონებულია დასავლეთისა და აღმოსავლეთის ატმოსფერული პროცესები. საქართველოს ტერიტორიაზე სურამის ქედი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს დასავლეთიდან და აღმოსავლეთიდან შემოჭრილი ატმოსფერული ნაკადების მოძრაობაზე. ცნობილია, რომ ატმოსფეროს სასაზღვრო ფენაში, თითქმის სიბლანტის დამოუკიდებლად, ჰაერის ნაკადის წინააღმდეგობის გარსდენისას ჰაერის ნაწილაკები მოძრაობენ უფრო ნელა, ვიდრე აღნიშნული ფენის გარეთ. გარკვეულ სიტუაციაში ამას მიყვავართ გამყოფი „ზედაპირის“ წარმოქმნასთან და ამ უკანასკნელთან გრიგალის ჩასახვასთან. მართლაც, ნაკადებში წნევათა სხვაობა ზრდის ან ამცირებს (შემოჭრილი სიტუაციის მიხედვით) ნაკადის სიჩქარეს. როცა წნევა გარეგან ნაკადში მოძრაობის მიმართულებით მცირდება, მაშინ ფენის შიგა ნაწილაკები მიჰყვებიან გარეგან ნაკადს და ხახუნის მიუხედავად აგრძელებენ მოძრაობას შემხვედრი წინააღმდეგობის გასწვრივ. როცა წნევა გარეგან ნაკადში იზრდება მოძრაობის მიმართულებით, მაშინ წნევათა სხვაობა ანელებს გარეგან ნაკადს, ე.ი. გარეგან ნაკადში ნაწილაკი მოძრაობს შენელებულად, ვიდრე შინაგან ნაკადში. შეიძლება შინაგანმა ნაწილაკებმა მოძრაობა შეაჩერონ და ამოძრავდნ საპირისპირო მიმართულებით. ამრიგად, გარსდენი სხეულის ზედაპირის უკუ მოძრაობა, მიუხედავად იმისა, რომ გარეგანი ნაკადი აგრძელებს წინ მოძრაობას. ახალი ნაკადის შემოდინება ამ პროცესს აძლიერებს და პროცესი გრძელდება მანამ, სანამ არ წარმოიქმნება ჩახვეულობა მოძრაობის საწინააღმდეგო მიმართულებით. თუ დინების სიჩქარე კლებულობს ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით, მაშინ სასაზღვრო ფენაში აღიძვრება უკუმოდრაობა, რომელიც მნიშვნელოვნად აჩერებს გარე ნაკადს და წარმოქმნის გრიგალს. ამრიგად, სურამის ზეგანზე დასავლეთიდან ციკლონური შემოჭრისას  $\Delta p > 0$  იზრდება ქარის სიჩქარე ნაკადის შიგა არეში და შეხვდება რა ქედს მოხდება სიჩქარის შემცირება და შემობრუნება უკან [6]. ანტიციკლონური შემოჭრისას პროცესი წარმართება შებრუნებით და მოხდება ქედზე გადადინების გაძლიერება. სწორედ ასეთი შედეგები დაიკვირვება ყოველდღიურ პრაქტიკაში. ასეთივე მიდგომით აიხსნება ადგილობრივი ქარების არსებობა, მთა-ხეობებსა და მდინარეთა სანაპირო მიდამოებში, რომლითაც განებივრებულია საქართველო. ექსპედიციურმა დაკვირვებებმა დუშეთის რაიონში, არაგვსა და ცაიშის ხეობაში აჩვენეს, რომ ქარის სიჩქარე იზრდება სიმაღლის ზრდით 3-3,5 მ/წმ-მდე; მაქსიმუმს აღწევს 250-300 მ-ზე და გარკვეულ სიმაღლეზე იცვლის მიმართულებას. მოყვანილი რიცხვითი მნიშვნელობები დამო-

კიდებულია მეტეოროლოგიურ სიტუაციაზე და იზრდება არამდგრადობის გაზრდით, ღრუბლიანობის მომატებით, ციკლონის მოახლოებით. ყოველივე ეს მოყვანილ თეორიაში კარგად თავსდება [2].

**ქარბორბალა მცირე სიმაღლის მქონე მთა-გორიან ტერიტორიაზე**

განვიხილოთ ჰაერის მასის დიდი სიჩქარით (20 მ/წმ და მეტი) დინება წრიული ცილინდრის ფორმის გარემოში, რომელიც ბრუნავს მუდმივი  $w$  კუთხური სიჩქარით. დავუშვათ, რომ ოროგრაფიული პირობებით ბრუნვის ღერძი კი არ არის ვერტიკალური, როგორც ეს საერთოდ არის მიღებული, არამედ ჰორიზონტისადმი  $\varphi$  კუთხით არის დახრილი (კუთხე აითვლება ღერძიდან პერიფერიისაკენ). რელიეფის გავლენის გათვალისწინება ხდება ვერტიკალური კოორდინატის გარდაქმნით [4,5]. იმის გათვალისწინებით, რომ პროცესები სწრაფად ვითარდება – მოვლენები ითვლება სტაციონალურად. შესაბამისი განტოლებათა სისტემა შემდეგი სახით ჩაიწერება[1-5].

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \tag{5}$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}, \tag{6}$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z_1} - g, \tag{7}$$

სადაც  $g$  თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაა,  $oz_1$  ცილინდრის ბრუნვის ღერძია. მოვლენის მცირე დროში არსებობისას (რამოდენიმე ათეული წუთი) მასათა დეფორმაციას ადგილი არ აქვს და ხდება მხოლოდ ბრუნვა [1], მაშინ ვისარგებლოთ შემდეგი ცნობილი დამოკიდებულებით [6]:

$$u = -\omega \sin\varphi y, v = \omega \sin\varphi x, \tag{8}$$

M (8)-ის გათვალისწინებით (5)-(7) ასე გადაიწერება:

$$\omega^2 \sin^2 \varphi x = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \tag{9}$$

$$\omega^2 \sin^2 \varphi y = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}, \tag{10}$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = g, \tag{11}$$

გავამრავლოთ (5)-(7) განტოლებები შესაბამისად  $dx, dy, dz$ -ზე და შევკრიბოთ, გვექნება:

$$p + \gamma z_1 = \frac{\rho \omega^2}{2} r^2 \sin^2 \varphi + c, \tag{12}$$

სადაც  $r^2 = x^2 + y^2$ ,  $\gamma = g\rho$ ,  $c$  – მუდმივა ნაკადის გეომეტრიით განისაზღვრება. კერძოდ, მივიღოთ, რომ ნაკადის პერიფერიაში წნევა საზღვარზე შიგნიდან და გარედან ტოლია, მაშინ ეილერის განტოლების საფუძველზე ვწერთ[1,4]:

$$c = p_\infty - \frac{\rho G^2}{8\pi^2 r_0^2} - \frac{\rho \omega^2}{2} r_0^2 \sin^2 \varphi \tag{13}$$

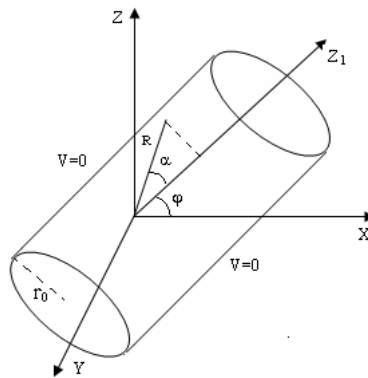
სადაც  $p_\infty$  წნევაა უსასრულოებაში, პრაქტიკულად ცილინდრის საზღვარზე, სადაც სიჩქარე ნულია.  $G = 2\pi R\omega$  – სიჩქარის ცირკულაციაა. ამრიგად (12) და (13) გვაძლევს:

$$p + \gamma z_1 - p_\infty = \frac{\rho \omega^2}{2} \sin^2 \varphi (r^2 - r_0^2) - \frac{\rho \omega^2}{2} r_0^2, \tag{14}$$

აქედან კარგად ჩანს, რომ წნევა მცირდება ბრუნვის ღერძისაკენ და მინიმალურია ღერძის გასწვრივ. ამიტომ ხდება ქარბორბალაში გარედან წატაცება და შიგნით ბრუნვა დიდი სიჩქარით. ფიზიკური რელიეფის გათვალისწინებით [4] გვაქვს:

$$p + \gamma dz_1^1 = \frac{\rho \omega^2}{2} r^2 \sin^2 \varphi + c \tag{15}$$

გამოდის, რომ რელიეფის გავლენით წნევა იზრდება რელიეფის ფარდობითი სიმაღლის  $d = \frac{H}{H-\xi(x,y)}$  პროპორციულად [1,4]. გამოვსახოთ  $r$  გრიგალის ჩასახვის წერტილიდან (სათავიდან) მოცემულ წერტილამდე  $R$  მანძილით(იხ. ნახ. 1.),  $= R \sin \alpha$ , სადაც  $\alpha$  არის კუთხე გრიგალის ბრუნვის ღერძსა და  $R$  მიმართულებას შორის. ეს კუთხე დამოკიდებულია რელიეფის ჰორიზონტისადმი დახრის სიდიდეზე.



ნახ. 1

აღნიშნულის გათვალისწინებით (15) ასე გადაიწერება:

$$p + \gamma dz_1^1 = \frac{\rho \omega^2}{2} R^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \varphi + c. \quad (16)$$

აღმოჩნდა, რომ წნევა მინიმალურია გრიგალის ცენტრში, იზრდება მანძილის პროპორციულად და მოიცავს  $\pi R^2 \sin^2 \alpha$  ფართს. მიღებული შედეგები კარგად ხსნის დაკვირვებულ მოვლენებს და თეორიულად მიღებულია პირველად.

**დასკვნები:**

- ა) დამტკიცებულია, რომ ქარის გრიგალურ ველში წნევა იზრდება ბრუნვის ღერძიდან მანძილის კვადრატის პროპორციულად, მაქსიმალურია პერიფერიაში და მინიმალური ბრუნვის ღერძის გასწვრივ;
- ბ) ჰაერის ნაკადის დინების მიმართულებით წინააღმდეგობის შეხვედრისას ადგილი აქვს ჩახვეულობების (გრიგალური) წარმოქმნას და ნაკადის შემობრუნებას ან გარსდენის გაძლიერებას მეტეოროლოგიური სიტუაციის მიხედვით;
- გ) თეორიულად დასაბუთებულია დავით გარეჯის ტაფობის თავისებურებანი.

**ლიტერატურა – REFERENCES – ЛИТЕРАТУРА**

1. ზ. ხვედელიძე „დინამიკური მეტეოროლოგია“ თსუ გამომცემლობა, 2002წ.გვ.535.
2. А.Хргиан. Физика атмосферы, том 2, Л., Гидрометиздат 1978 с 315.
3. Л. Гандин, Д. Лайхтман, Л.Матвеев, М.Юдин. Основы динамической метеорологии. Л., Гидрометиздат, 1955г. с.639.
4. З.Хведелидзе, Т. Шаламверидзе, Е. Тагвадзе „Исучение вихревых полей ветра на горной территории“. Экологические системы и приворы, М., 2009, с.41-46.
5. ზ. ხვედელიძე, დ. ჯანუაშვილი, რეგიონალური ატმოსფერული პროცესების „მადონური“ ბუნების შესახებ ლოკალური რელიეფის გავლენის გათვალისწინებით, ქესჟ „ფიზიკა“ #1(5), 2011წ.გვ.104-112.
6. Z.Khvedelidze, T.Davitashvili, I.Samkharadze “Mathematical Modelling of the hydro-dynamical flows in a narrow canals with compound bottom”, Journal “Ecology and Appliances” Moscow, Russia, No.5, pp. 60-66, 2007.

უაკ 551.509

**ზოგიერთი ლოკალურ-„ფენომენური“ ატმოსფერული მოვლენების შესწავლა ჰიდროთერ-მოდინამიკური მიდგომით.** / ხვედელიძე ზ., დავითაშვილი თ., სამხარაძე ი./ საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტის შრომათა კრებული-2013.-ტ.119.-გვ.17-21-ქართ., რეზ. ქართ., ინგლ., რუს.

დედამიწის ატმოსფეროში, ხშირად დაიკვირვება, მცირე ტერიტორიაზე განვითარებული არაპერიოდული არაორდინალური ატმოსფერული პროცესები. ამ პროცესებს თან სდევს მატერიალური ზარალი და ადამიანის მსხვერპლიც კი. აღნიშნულ მოვლენებს მიეკუთვნება: ქარბორბალა; მიკრორელიეფური ადგილობრივი ქარები; ატმოსფეროს მიწისპირა ფენაში წარმოშობილი სხვადასხვა ბუნების ადმავალი დინებები და ლოკალურ რეგიონზე თითქმის მუდმივად არსებული გეოფიზიკური „ფენომენები“. საქართველოს ტერიტორიაზე ასეთი „ფენომენები“

დავით გარეჯის ტაფობზე და სურამის პლატოზე დაიკვირვება. სტატიაში ჰიდროთერმოდინამიკის კანონების საფუძველზე მოყვანილია აღნიშნული მოვლენების ახსნა. დღემდე ასეთი მიდგომა და გაკეთებული დასკვნები ცნობილი არ არის. კერძოდ დამტკიცებულ იქნა, რომ ქარის გრიგალურ ველში წნევა იზრდება რელიეფის სიმაღლის პროპორციულად და იმ კუთხის ზრდით, რომელსაც ნაკადის ბრუნვის ღერძი ადგენს ვერტიკალურ მიმართულებასთან. მიღებულია, რომ ქარის სიჩქარის გრიგალის ვერტიკალური მდგენელი სიმაღლის მიხედვით იზრდება ექსპონენციალურად. ასეთი დამოკიდებულებით აიხსნება მითითებული მოვლენების თავისებურებანი. მიღებულ შედეგებს აქვთ, როგორც თეორიული, ასევე პრაქტიკული მნიშვნელობა.

UDC 551.509

**STUDY OF SOME LOCAL ATMOSPHERIC “PHENOMENAL” EVENTS BY HYDROTHERMODYNAMIC APPROACH** / Z.Khvedelidze, T.Davitashvili, I.Samkharadze / Transactions of the Institute of Hydrometeorology, Georgian Technical University. -2013. -V.119. -pp.17-21 -Georg.; Summ. Georg., Eng., Russ.

In the Earth atmosphere there are often observed non-periodical, non-ordinary air phenomenal events which are accompanying with material and even human damage. Such kind atmosphere phenomenal events may be: powerful wind vortex, strong local micro-orographic winds, different arising air currents in the atmosphere lower boundary layer and constantly dominated some regional geophysical “phenomenal” events. Over the territory of Georgia such kind of “phenomenal” events are observed over David Gareji depression and Surrami mountain plateau. In the present article on the bases of the hydrothermodynamic laws above mentioned phenomena is investigated. Namely it was proved that pressure in the wind vortex is arising proportionally with relief altitude and enlarged with augmentation of the angle between wind vortex axes and vertical direction. Also it was obtained that vertical component of the wind vortex was arising with altitude and it has exponential character. Obtained results are new and have as theoretical as well practical values.

УДК 551.509АА

**ИЗУЧЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ЛОКАЛЬНЫХ АТМОСФЕРНЫХ “ФЕНОМЕНАЛЬНЫХ” ЯВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДАМИ ГИДРОТЕРМОДИНАМИКИ**/ З. Хведелидзе, Т. Давиташвили, И. Самхарадзе/ Сб. Трудов Института Гидрометеорологии Грузинского Технического Университета.-2013.-т.119.-с.17-21-Груз., Рез. Груз., Англ., Рус.

В атмосфере Земли часто наблюдаются непериодические, неординарные явления, которые сопровождаются с материальными и даже человеческими жертвами. Среди таких явлений можно перечислить: мощные атмосферные вихри, локальные микрорельефные ветры, восходящие потоки, имеющие различную природу зарождения и постоянно действующие геофизические “феномены” свойственные для данного региона. Такие “феномены” на территории Грузии можно наблюдать над впадиной Давид Гареджи и Сурами плоскогорьем. В настоящей статье методами гидротермодинамики дается объяснение происхождению таких явлений. А именно было доказано, что давление в поле вихря ветра растет пропорционально высоте рельефа и по увеличению угла между осью вращения потока и вертикального направления. Также получено, что вертикальная составляющая вихря скорости ветра растет экспоненциально по высоте. Предлагаемый подход и полученные результаты имеют новизну и представляют как теоретическую так и практическую ценность.