

მ. ზ. ნოღია და მ. ს. აბაქაძე

# გეოფიზიკა ნაწილი I

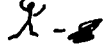
გრაფიკული და გრაფიკული მხატვრობა

სვალის სახელობის თბილისის სახელმწიფო  
უნივერსიტეტის გამომცემლობა

---

თბილისი  
1954





## წინასიტყვაობა

თანამედროვე გეოფიზიკა, ამ სიტყვის სრული მნიშვნელობით, შეიცავს სამ ძირითად დარგს, სახელდობრ, დედამიწის ქერქის ან, უკუთ რომ ვთქვათ, დედამიწის მყარი ნაწილის ფიზიკას, ატმოსფეროს ფიზიკას და ჰიდროსფეროს ფიზიკას. ხშირად, ვინრო გაგებით, გეოფიზიკა გულისხმობს მხოლოდ დედამიწის ქერქის ან მისი მყარი ნაწილის ფიზიკას, რადგან ასევე ხშირად ატმოსფეროს ფიზიკის მაგიერ ხმარობენ სიტყვა მეტეოროლოგიას, ჰიდროსფეროს ფიზიკის მაგიერ—ჰიდროლოგიას. მართალია, ტერმინების ასეთი შენაცვლება არ არის ზუსტი, მაგრამ ზოგჯერ, პირობით, ეს შეიძლება დაშვებულ იქნას.

სახელწოდების გამარტივების მიზნით წინამდებარე წიგნის ავტორები ტერმინ გეოფიზიკას იყენებენ დედამიწის მყარი ნაწილის ფიზიკის მნიშვნელობით.

ეს წიგნი, შეიძლება ითქვას, წარმოადგენს „ტიქნიკა და შრომას“ მიერ 1933 წელს გამოცემულ მ. ზ. ნოდის წიგნის „გეოფიზიკის“ I ნაწილის მეორე გამოცემას და არსებითად შეიცავს ძირითად ცნობებს გრავიმეტრიიდან<sup>1</sup> და გრავიმეტრიული ძიებიდან.

მ. ნოდის მიერ 1933, 1935 და 1941 წლებში გამოცემული გეოფიზიკის I, II და III ნაწილი შეიცავს ძირითად ცნობებს შესაბამისად გრავიმეტრიიდან, მაგნიტოლოგიიდან და სეისმოლოგიიდან, მხოლოდ ზოგადი კურსის მოცულობით, რაც, რა თქმა უნდა, ამ ყაამად ვერ დააკმაყოფილებს იმ ვაზრდილ მოთხოვნელებს, რომლებიც წარმოიშვა სპეციალისტების მომზადებასთან დაკავშირებით სამიებო გეოფიზიკაში როგორც ფიზიკის, ისე გეოლოგიის ბაზაზე. ამასთან, თვით ზოგადი გეოფიზიკის კურსიც საგრძნობლად გაიზარდა მას შემდეგ, რაც ზემოხსენებული წიგნები გამოიცა.

წინამდებარე წიგნი მიზნად ისახავს რამდენადმე მანაც შეავსოს აღნიშნული ხარვეზი გეოფიზიკის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან დარგში.

ჩვენი წიგნის დანიშნულებაა მომსახურება გაუწიოს როგორც სტალინის ახელბობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის, ისე საქართველოს კიროვის სახელბობის პოლიტექნიკური ინსტიტუტის სათანადო სპეციალობის სტუ-

<sup>1</sup> გრავიმეტრია შედგება ორი სიტყვისაგან: ლათინური gravis—ძიმე და ბერძნული μέτρος—ვზომავ.

დენტებს და ამავე დროს ცოტად თუ ბევრად გამოსადეგი იყოს თვითგანათლების მიზნებისათვისაც.

რა თქმა უნდა, წიგნი არ იქნება მოკლებული ზოგიერთ ნაკლოვანებას, რომელთა მითითებისათვის ავტორები მხოლოდ მაღლობელი იქნებიან.

წიგნის რვა (I—VIII) თავი დაწერილია მ. ნოდის მიერ, ხოლო დანარჩენი რვა თავი (IX—XVI) მ. აბაკელიას მიერ მიხაილოვის, სოროკინის, ანდრეევისა და სხვათა სახელმძღვანელოების მიხედვით; გამოყენებულია აგრეთვე დიტერატურის სიაში დასახელებული შრომები.

აღსანიშნავია, რომ ამიერკავკასიაში პირველად ძიების გეოფიზიკური მეთოდების კურსის კითხვა დაიწყო 1930 წლის დეკემბერში ამიერკავკასიის სამთო-მეტალურგიული (ახლა საქართველოს კიროვის სახელობის პოლიტექნიკური) ინსტიტუტის გეოლოგიურ-საძიებო ფაკულტეტის V კურსის სტუდენტებისათვის, გამოყენებითი გეოლოგიის კათედრის ხაზით, რომლის გამგე იყო პროფ. ვადისტრატი გაბუნია.

დასასრულდ, ავტორები მადლობას უხდებიან ბ. ბაღვაძეს ზოგიერთი რჩევისათვის, დ. ვეკუას, გ. მანაგაძეს, ვ. აბაშიძეს და ე. ფაველნიშვილს წიგნის კორექტიურაზე გაწეული დახმარებისათვის.

აღსანიშნავია სტალინის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის გამომცემლობისა და სტამბის გულისხმიერი ოპერატიულობა, რამაც ავტორებს საგრძნობლად გაუადვილა წიგნის გამოცემა.

აბაკელია

თბილისი, მაისი, 1954 წ.

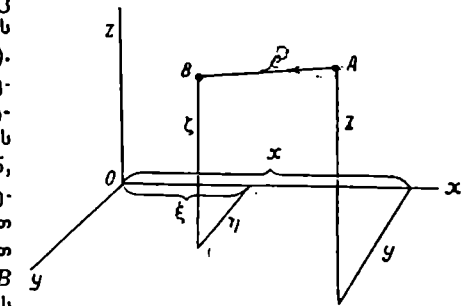
# თავი I

## დედამიწის გრავიტაციული\* ველის მოკლე თეორია

### § 1. სიმძიმის ძალა

სიმძიმის ძალა მოცემულ წერტილში წარმოადგენს ორი ძალის თანაბარ-მოქმედს—ნიუტონისეული მიზიდულობის ძალისა მთელი მასის მხრით და ცენტრდამშვორი ძალისა, რომელიც გამოწვეულია დედამიწის ბრუნვით თავის ღერძის გარშემო.

განვიხილოთ ჯერ პირველი მათგანი და დავუშვათ, რომ ჩვენ გვაქვს ორი მატერიალური წერტილი  $A$  და  $B$  სწორხაზოვანი კოორდინატებით  $(x, y, z)$  და  $(\xi, \eta, \zeta)$ , რომლებიც ერთმანეთს მიიზიდავენ ნიუტონის კანონის შესაბამისად (ნახ. 1). კოორდინატთა სათავე მოვათავსოთ დედამიწის სიმძიმის ცენტრში ისე, რომ  $z$  ღერძი თანხვედეს დედამიწის ბრუნვის ღერძს, მაშინ, ცხადია,  $x$  და  $y$  ღერძები მოექცევა ეკვატორის სიბრტყეში; მათ მიმართულებათა შესახებ ქვემოთ გვექნება ლაპარაკი. იყოს  $B$  წერტილში მოთავსებული მასის ელემენტი  $dm$  და  $A$  წერტილში ერთეულადი მასა. მაშინ მიზიდულობის ძალა  $dF$ , რომელსაც  $A$  წერტილში მოთავსებული ერთეულადი მასა განიცდის დედამიწის მასის ზემოხსენებულ  $dm$  ელემენტის მხრით, იქნება



ნახ. 1.

$$dF = f \frac{dm}{\rho^2}, \tag{1.1}$$

სადაც  $\rho$  მანძილია  $A$  და  $B$  წერტილებს შორის,  $f$  მიზიდულობის მუდმივია, რომელიც დამოკიდებულია საზომ ერთეულებისაგან. CGS-ის სისტემაში  $f = = 6,67 \times 10^{-8}$  და მისი განზომილებაა  $C^3G^{-1}S^{-2}$ .

\* წარმოშობილია ლათინური სიტყვიდან gravitas, atis—სიმძიმე.

წერისა და მსჯელობის გამართებებისათვის დაეუშვათ, რომ დაკვირვების წერტილში მასა ერთეულის ტოლია; მაშინ, ცხადია, სიმძიმის ძალის მნიშვნელობა დინებში რიცხობრივად ტოლი იქნება მისი აჩქარების მნიშვნელობისა გალებში. ქვემოთ ხშირად ზუსტი გამოთქმის მაგიერ „სიმძიმის ძალის აჩქარება“ სიმოკლისათვის გამოყენებულია გამოთქმა „სიმძიმის ძალა“.

როგორც ნახაზიდან ჩანს,  $\rho$  სიდიდისათვის გვექნება:

$$\rho^2 = (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2 \quad (1.2)$$

ან

$$\rho = \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2} \quad (1.2')$$

მოენახოთ ახლა ამ მიზიდულობის ძალის პროექციები კოორდინატთა ღერძებზე, რისთვისაც საკმარისია  $dF$  ძალის გამოსახულება გაეამრავლოთ იმ კუთხეების კოსინუსებზე, რომლებსაც აღნიშნული მიზიდულობის ვექტორი ქმნის შესაბამის საკოორდინატო ღერძთან. სიმბოლურად ჩვენ ეს ასე შეგვრძლია დაეწეროთ:

$$\begin{aligned} dF_x &= dF \cos(dF, x) \\ dF_y &= dF \cos(dF, y) \\ dF_z &= dF \cos(dF, z) \end{aligned} \quad (1.3)$$

ანალიტიკური გეომეტრიიდან კი ცნობილია, რომ:

$$\begin{aligned} \cos(dF, x) &= \frac{\xi - x}{\rho} \\ \cos(dF, y) &= \frac{\eta - y}{\rho} \\ \cos(dF, z) &= \frac{\zeta - z}{\rho} \end{aligned} \quad (1.4)$$

მაშინ (1), (3) და (4) მოგვცემს:

$$\begin{aligned} dF_x &= f \frac{dm}{\rho^2} \cdot \frac{\xi - x}{\rho} = f \frac{\xi - x}{\rho^3} dm \\ dF_y &= f \frac{dm}{\rho^2} \cdot \frac{\eta - y}{\rho} = f \frac{\eta - y}{\rho^3} dm \\ dF_z &= f \frac{dm}{\rho^2} \cdot \frac{\zeta - z}{\rho} = f \frac{\zeta - z}{\rho^3} dm \end{aligned} \quad (1.5)$$

გამოვიანგარიშოთ ახლა  $F_x$ ,  $F_y$  და  $F_z$  მდგენელები იმ ძალისა, რომლითაც მთელი დედამიწა მიიზიდავს  $A$  წერტილში მოთავსებულ ერთეულად მასას. ამისათვის საკმარისია შევაჯამოთ ყველა  $dF_x$ ,  $dF_y$ ,  $dF_z$  ელემენტარული ძალები შესაბამისი  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  მდგენელების მიხედვით, რაც შეიძლება წარმოადგენილ იქნას შემდეგი ინტეგრალების სახით:

$$\begin{aligned}
 F_x &= f \int \frac{\xi-x}{\rho^3} dm \\
 F_y &= f \int \frac{\eta-y}{\rho^3} dm \\
 F_z &= f \int \frac{\zeta-z}{\rho^3} dm
 \end{aligned}
 \tag{1.6}$$

მივმართოთ ახლა ცენტრდამშორი ძალის განხილვას. შექანიკიდან ცნობილია, რომ ცენტრდამშორი ძალა მიმართულია ბრუნვის ღერძისადმი პერპენდიკულარულად, ამ ღერძიდან გარეთეკენ და რომ ეს ძალა  $C$ , როდესაც ის ერთეულად მასაზე მოქმედებს, გამოისახება ასე:

$$C = \frac{v^2}{r}, \tag{1.7}$$

სადაც  $v$  ხაზოვანი სიჩქარეა  $A$  წერტილის წრიული მოძრაობისა, ხოლო  $r$  — ამ წერტილის მანძილი ბრუნვის ღერძიდან.

გამოვიანგარიშოთ  $C$  ძალის  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $C_z$  პროექციები საკოორდინატო ღერძებზე, რისთვისაც (7) გამოსახულება უნდა გავამრავლოთ შესაბამისი კუთხეების კოსინუსებზე. ადვილი დასანახია, რომ ამ კუთხეების კოსინუსებია:  $\frac{x}{r}$ ,  $\frac{y}{r}$  და 0. ამიტომ

$$C_x = \frac{v^2 x}{r^2}, \quad C_y = \frac{v^2 y}{r^2}, \quad C_z = 0 \tag{1.8}$$

შევკვალოთ ხაზოვანი სიჩქარე  $v$  მისი ტოლი  $\omega r$  გამოსახულებით, სადაც  $\omega$  დედამიწის ბრუნვის კუთხური სიჩქარეა თავისი ღერძის გარშემო; მაშინ (8) ასეც დაიწერება:

$$C_x = \omega^2 x, \quad C_y = \omega^2 y. \tag{1.8'}$$

ამავე გზით (7) გამოსახულება შეიძლება დაიწეროს ასე:

$$C = \omega^2 r. \tag{1.7'}$$

ცენტრდამშორი ძალა მიისწრაფვის წერტილი დააშოროს ბრუნვის ღერძს, ე. ი. ის უქუდგებითი ძალაა.

დედამიწის თავის ღერძის გარშემო ბრუნვის  $\omega$  კუთხური სიჩქარის რიცხვითი სიდიდე საკმაოდ მცირეა, როგორც ეს შემდეგი გამოთქმიდან ჩანს:

$$\omega = \frac{2\pi}{86164} \text{ სექ.}^{-1}, \tag{1.9}$$

სადაც მნიშვნელი საშუალო სეკუნდების რიცხვია ვარსკვლავიერ დედამიწეში (დედამიწის ერთი შემობრუნების დრო).

ზემოთ მიღებული შედეგების საფუძველზე  $g$  სიმძიმის ძალის  $g_x$ ,  $g_y$  და  $g_z$  პროექციები შეიძლება დაიწეროს შემდეგი სახით:

$$g_x = f \int \frac{\xi - x}{\rho^3} dm + \omega^2 x \quad (1.10)$$

$$g_y = f \int \frac{\eta - y}{\rho^3} dm + \omega^2 y \quad (1.11)$$

$$g_z = f \int \frac{\zeta - z}{\rho^3} dm \quad (1.12)$$

✧ § 2. სიმძიმის ძალის პოტენციალი  
ავილოთ ფუნქცია

$$W = f \int \frac{dm}{\rho} + \frac{1}{2} \omega^2 (x^2 + y^2) \quad (1.13)$$

და ვიპოვოთ მისი კერძო წარმოებულები  $x$ ,  $y$  და  $z$  კოორდინატების მიხედვით, რომლებიც  $\rho$  სიდიდის მეშვეობით არაცხადად შედის ამ ფუნქციაში. მართლაც

$$\frac{\partial W}{\partial x} = -f \int \frac{dm}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \omega^2 x \quad (1.14)$$

(2) გამოსახულებიდან

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = -\frac{\xi - x}{\rho},$$

რომლის (14)-ში ჩასმა მოგვცემს:

$$\frac{\partial W}{\partial x} = f \int \frac{\xi - x}{\rho^2} dm + \omega^2 x \quad (1.14')$$

(14') გამოსახულების (10) გამოსახულებასთან შედარება გვარწმუნებს, რომ მათი მარჯვენა ნაწილები ტოლია, რის გამოც ტოლია მათი მარცხენა ნაწილებიც. ეს დასკვნა შეიძლება გავაგრძელოთ სხვა მდგენელებზეც, რის შემდეგ გვექნება:

$$\begin{aligned} g_x &= \frac{\partial W}{\partial x} \\ g_y &= \frac{\partial W}{\partial y} \\ g_z &= \frac{\partial W}{\partial z} \end{aligned} \quad (1.15)$$

ჩვენ ვხედავთ, რომ  $W$  ფუნქციის კერძო წარმოებულები, აღებული მისი სივრცითი  $A$  წერტილის კოორდინატებით, უდრის მიზიდულობის ძალის მდგე-



ნელეს ამავე კოორდინატების შესაბამ ლერძთა მიხედვით. ასეთ ფუნქციას ეწოდება პოტენციალური ფუნქცია ანუ, უბრალოდ, სიმძიმის ძალის პოტენციალი.

$W$  ფუნქციის კერძო წარმოებულებათ სიმძიმის ძალის  $g_x, g_y$  და  $g_z$  მდგენელების შენაცვლება, პირველ ყოვლისა, საგრძნობლად აადვილებს ყველა გამოთვლას. მაგრამ, გარდა ამისა, პოტენციალური ფუნქციის შემოღებას აქვს მრავალი სხვა უპირატესობაც, რადგან ეს დარგი მათემატიკური ფიზიკისა საქმაოდ ღრმად არის დამუშავებული.

გამოკვლევა ამტკიცებს, რომ  $IV$  პოტენციალს  $A$  წერტილისათვის აქვს სასრულო მნიშვნელობა, როდესაც ის მდებარეობს დედამიწის შიგნითაც,

თუმცა  $\frac{1}{\rho}$  სიდიდე, რომელიც (13) გამოსახულების პირველ წევრში ინტეგრალის ქვეშ დგას, უსასრულო ხდება თვით  $A$  წერტილისათვის, რომლისათვის  $\rho$  ტოლია ნულისა.  $W$  პოტენციალი რომ სასრულო სიდიდე იყოს, ამისათვის საკმარისია დავამტკიცოთ, რომ ინტეგრალი

$$f \int_0^{\rho} \frac{dm}{\rho} \quad (1.I)$$

მიისწრაფვის ნულისაკენ, როდესაც  $\rho$  მიისწრაფვის ნულისაკენ.

შემოფარგლოთ  $A$  წერტილიდან ელემენტარული კონუსი  $d\tau$  სხეულოვანი კუთხით (ნახ. 2) და გამოვიანგარიშოთ  $dm$  ელემენტარული მოცულობა, რომელიც  $A$  წერტილიდან  $\rho$  მანძილითაა დაშორებული. ჩვენ ვხედავთ, რომ

$$dv = \rho^2 d\tau d\rho, \quad (1.II)$$

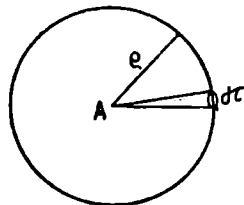
ხოლო

$$dm = \sigma \rho^2 d\tau d\rho, \quad (1.III)$$

სადაც  $\sigma$  სიმკვრივეს ნიშნავს.

ჩაესვით მნიშვნელობა  $dm$  (III) გამოსახულებიდან (I) გამოსახულებაში, რის შემდეგ გვექნება:

$$f \int_0^{\rho} \frac{dm}{\rho} = f \int_0^{\rho} \int_0^{4\pi} \int_0^{\rho} \sigma \rho d\tau d\rho, \quad (1.IV)$$



ნახ. 2.

სადაც ინტეგრაცია ვრცელდება  $\rho$  რადიუსის მქონე სფეროს მოცულობაზე. დავუშვათ, რომ  $\sigma$  სიმკვრივის უდიდესი მნიშვნელობა  $\rho$  რადიუსის მქონე სფეროს მოცულობაში არის  $\sigma'$ , რაც უფლებას გვაძლევს დავწეროთ:

$$f \int_0^{\rho} \frac{dm}{\rho} \leq \sigma' \int_0^{\rho} \int_0^{4\pi} \rho d\tau d\rho \quad (1.V)$$

ინტეგრაციისა და სათანადო ზღვრების ჩასმის შემდეგ მივიღებთ:

$$\int \int_0^{\rho} \frac{dm}{\rho} \leq 2\pi\sigma'\rho^2, \quad (1.VI)$$

საიდანაც ჩანს, რომ  $\rho$  რადიუსის ნულამდე შემცირებისას ინტეგრალი (VI) მისწრაფვის ნულისაკენ, რაც გვინდოდა დაგვემტკიცებინა.

### § 8. პოტენციალური ფუნქციის ძირითადი თვისებანი

დავამტკიცოთ ახლა, რომ (15) დამოკიდებულებები წარმოადგენენ  $W$  პოტენციალური ფუნქციის ზოგადი თვისებების კერძო შემთხვევებს.

$s$  მიმართულებით გადავიდეთ  $A(x, y, z)$  წერტილიდან უსასრულოდ ახლო მდებარე მეზობელ  $A'$  წერტილში, რომლის კოორდინატებია:  $x+dx$ ,  $y+dy$ ,  $z+dz$ . აღვნიშნოთ  $ds$ -ით ელემენტარული მანძილი  $A.A'$ , რის შემდეგ გვექნება:

$$\begin{aligned} dx &= ds \cos(s, x) \\ dy &= ds \cos(s, y) \\ dz &= ds \cos(s, z) \\ ds &= \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}, \end{aligned} \quad (1.16)$$

სადაც  $\cos(s, x)$  სიმბოლურად აღნიშნავს ელემენტ  $ds$  და  $x$  ღერძს შორის მოთავსებული კუთხის კოსინუსს. წერტილ  $A'$ -ში  $W$  პოტენციალური ფუნქცია მიიღებს  $dW$  ნამატს, რომელიც ასე გამოიხატება:

$$dW = \frac{\partial W}{\partial x} dx + \frac{\partial W}{\partial y} dy + \frac{\partial W}{\partial z} dz. \quad (1.17)$$

ეს გამოსახულება (15) და (16) ფორმულების მიხედვით, თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ

$$\begin{aligned} g_x &= g \cos(g, x) \\ g_y &= g \cos(g, y) \\ g_z &= g \cos(g, z), \end{aligned}$$

შემდეგ სახეს მიიღებს:

$$dW = g ds [\cos(g, x) \cos(s, x) + \cos(g, y) \cos(s, y) + \cos(g, z) \cos(s, z)], \quad (1.17')$$

სადაც კვადრატულ ფრჩხილში მოქცეული გამოთქმა ტოლია იმ კუთხის კოსინუსისა, რომელიც მოთავსებულია  $s$  მიმართულებასა და  $g$  სიმძიმის ძალას შორის, რის გამო (17') ასე დაიწერება:

$$dW = g ds \cos(g, s) \quad (1.17'')$$

და აქედან

$$\frac{dW}{ds} = g \cos(g, s) \quad (1.17''')$$

ანუ

$$\frac{dW}{ds} = g, \quad (1.17^{IV})$$

სადაც  $g$ , აღნიშნავს  $g$  სიმძიმის ძალის პროექციას  $s$  მიმართულებაზე.

ამრიგად, პოტენციალური ფუნქციის ნებისმიერი მიმართულებით წარმოებული უდრის ძალის მდგენელს, რომელიც ამ მიმართულებით მოქმედებს. ცხადია, რომ (15) დამოკიდებულებები, როგორც ზემოთაც აღვნიშნეთ, კერძო შემთხვევებია  $W$  პოტენციალური ფუნქციის ზოგადი თვისებისა, რომელიც ესეცაა მივიღეთ.

აქვე უნდა შევნიშნოთ, რომ (17<sup>IV</sup>) ფორმულა, რომელიც შეიძლება ასეც გადაიწეროს:

$$dW = g \cdot ds, \quad (1.17^V)$$

გამოხატავს ცნობილ დამოკიდებულებას  $dW$  მუშაობასა,  $g$ , მოქმედ ძალასა და  $ds$  გავლილ გზას შორის. განვიხილოთ ახლა ორი კერძო შემთხვევა (17<sup>IV</sup>) დამოკიდებულების მიხედვით.

პირველი შემთხვევისათვის ავიღოთ  $s$  მიმართულება პერპენდიკულარულად  $g$  სიმძიმის ძალისადმი. ამ შემთხვევაში

$$\cos(g, s) = 0,$$

და (17<sup>IV</sup>) დამოკიდებულება მოგვცემს:

$$\frac{dW}{ds} = 0$$

ანუ ინტეგრაციის შემდეგ

$$W = \text{const.} \quad (1.18)$$

$W$ , როგორც ვიცით,  $x$ ,  $y$  და  $z$  კოორდინატების ფუნქციაა, და ამიტომ (18) დამოკიდებულება წარმოადგენს რაღაც ზედაპირის განტოლებას, რომელსაც ის თვისება ახასიათებს, რომ მის ყოველ წერტილში სიმძიმის ძალა მიმართულია ამ ზედაპირისადმი ნორმალის თანხედენილად. ასეთ ზედაპირს ეწოდება დონებრივი ზედაპირი. სხვადასხვა მნიშვნელობა  $\text{const}$ -ისათვის განტოლება (18)-ში მოგვცემს სხვადასხვა დონებრივ ზედაპირს. ერთ-ერთი მისი მნიშვნელობა შეესაბამება ზედაპირს, რომელიც დაემთხვევა ოკეანეების წყლის თავისუფალ აუშფოთებელ ზედაპირს. ამ ზედაპირს აღიარებენ როგორც დედამიწის ფიგურას და მას ჩვეულებრივად გეოიდს უწოდებენ. ოკეანეს ზედაპირი, როდესაც ის საყვებით შშვილია, საკმაოდ ზუსტად ემთხვევა დონებრივ ზედაპირს, ე. ი. გეოიდს. სიმძიმის ძალა, როგორც ნათქვამიდან ჩანს, გეოიდის ზედაპირის ყოველ წერტილში ემთხვევა ამავე წერტილში გავლებულ ნორმალს გეოიდის ზედაპირისადმი.

პირობიდან  $W = \text{const}$  სრულიად არ გამომდინარეობს, რომ

$$g = \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial z}\right)^2}$$

მუდმივი იყოს. ამიტომ სიმძიმის ძალა  $g$  თავის სიდიდით საერთოდ არ არის მუდმივი დონებრივი ზედაპირის ყველა მოცემული წერტილისათვის, მხოლოდ ის ყოველთვის ნორმალურადაა მიმართული ამ ზედაპირისადმი.

გადავიდეთ ახლა მეორე შემთხვევაზე და (17<sup>III</sup>) დამოკიდებულებაში დავუშვათ, რომ

$$\cos(g, s) = +1.$$

მაშინ

$$\frac{dW}{ds} = g$$

ან

$$ds = \frac{dW}{g}. \quad (1.19)$$

ელემენტი  $ds$  ამ შემთხვევაში ემთხვევა მოკმედ ძალას, ე. ი. დონებრივი ზედაპირის ნორმალს და წარმოადგენს მანძილს, აღებული მოცემულ წერტილში ორ მეზობელ, უსასრულოდ ახლო მდებარე, დონებრივ ზედაპირთა შორის, რომელთა განტოლებანია:

$$W = C \text{ და } W = C + dW,$$

სადაც  $C$  რომელიმე სასრულო მუდმივია, და  $dW$  უსასრულოდ მცირე მუდმივი ნაშთია. აქედან დავსკვნით, რომ მანძილი ორ მეზობელ უსასრულოდ ახლო მდებარე დონებრივ ზედაპირს შორის უკუპროპორციულია მოკმედი ძალისა; ეს იმას ნიშნავს, რომ აღნიშნული დონებრივი ზედაპირები არ არის ყველგან ერთნაირად დაშორებული ერთიმეორეს.

აგრეთვე (19) ფორმულიდან ჩანს, რომ, რადგანაც  $g$  სასრულო სიდიდეა,  $ds$  იმავე რიგის მცირეა, როგორც  $dW$ , და არ უდრის ნულს, როდესაც  $dW$  არ უდრის ნულს. აქედან გამომდინარეობს, რომ შეუძლებელია დონებრივი ზედაპირების ერთმანეთთან გადაკვეთა ან შეხება.

ამავე დროს (17<sup>V</sup>) დამოკიდებულებიდან ჩანს, რომ პოტენციალის ნაშთი უდრის მუშაობას, რომელსაც ასრულებს მოკმედი ძალა ერთეული მასის გადატანისას ერთი დონებრივი ზედაპირიდან მეორეზე. დონებრივ ზედაპირზე გადაადგილებისას კი არავითარი მუშაობა არ სრულდება, რადგანაც

$$dW = 0.$$

#### § 4. სიმძიმის ძალის პოტენციალის დაშლა

სიმძიმის ძალის პოტენციალი, რომელიც მოცემულია ზემოთ (13) გამოსახულების სახით, პრაქტიკულად არ გამოიყენება, ვინაიდან ჩვენთვის უცნობია როგორც მასათა განაწილება დედამიწის შიგნით, ისე დედამიწის ზესტი

ფორმა, რის გარეშე შეუძლებელია  $f \int \frac{dm}{\rho}$  ინტეგრალის უშუალო გამოანგარიშება.

ერთგვაროვან არამბრუნავ დედამიწისათვის,  $M$  მასით და  $R$  რადიუსით,  $IV$  პოტენციალის გამოსახულება დედამიწის ზედაპირის რომელიმე წერტილში მიიღება მარტივ სახეს, სახელდობრ,  $f \frac{M}{R}$ . დედამიწის ფორმა უმნიშვნელოდ განსხვავდება სფეროს ფორმისგან, რის გამოც  $IV$  პოტენციალის გამოთქმას შეიძლება მიეცეთ სახე, რომელიც უფრო გამოსაყენებელი იქნება შემდეგში.

დავშალოთ ინტეგრალებში  $\frac{1}{\rho}$  ფუნქცია მწკრივად, შემდეგ ჩავატაროთ

ინტეგრაცია წვერ-წვერად; მწკრივიდან ავიღოთ რამდენიმე პირველი წვერი საპირო სიზუსტის მიხედვით. როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, დედამიწა თავის ფორმით უახლოვდება სფეროს, რის გამო შეიძლება დავკმაყოფილოდეთ წვერების მცირე რიცხვით.  $W$  პოტენციალისათვის მიღებული მწკრივი შეიძლება გამოყენებულ იქნას  $g$  სიძიმის ძალისათვის ისევე მწკრივის სახის გამოსახულების მისაღებად. დედამიწის ზედაპირზე უშუალოდ გაზომილი  $g$  სიდიდის მნიშვნელობების შედარება მათი თეორიულ მნიშვნელობებთან, რომლებიც მწკრივიდან მიიღება, მოგვცემს საშუალებას განვსაზღვროთ კოეფიციენტები ამ მწკრივისა. ამავე დროს ამ გზით შეიძლება დადგენა იმისა, თუ სათანადო გამოანგარიშებისათვის მწკრივის რამდენი წვერია საკმარისი.

მეფართოთ კვლავ 1 ნახაზს და მანძილები კოორდინატა სათავიდან  $B(\xi, \eta, \zeta)$  და  $A(x, y, z)$  წერტილამდე აღვნიშნოთ შესაბამისად  $r$  და  $r_1$ -ით, ხოლო მათ შორის მოქცეული კუთხე  $\gamma$ -თი. გავიხსენოთ, რომ  $A$  წერტილში მოთავსებულია ერთეულადი მასის მქონე სხეული, რომელიც მიიზიდება  $B$  წერტილში მოთავსებული  $dm$  მასის მქონე დედამიწის ელემენტით. მაშინ 1 ნახაზის მიხედვით გვექნება:

$$\begin{aligned} r^2 &= \xi^2 + \eta^2 + \zeta^2, & r_1^2 &= x^2 + y^2 + z^2 \\ \rho^2 &= r_1^2 + r^2 - 2rr_1 \cos \gamma, \end{aligned} \quad (1.20)$$

რომლის საფუძველზე  $\frac{1}{\rho}$  ინტეგრალებში ფუნქცია შეიძლება დაიშალოს მწკრივად შემდეგი სახით:

$$\frac{1}{\rho} = (r_1^2 + r^2 - 2rr_1 \cos \gamma)^{-\frac{1}{2}} = \frac{1}{r_1} \left[ 1 + \left( \frac{r}{r_1} \right)^2 - 2 \frac{r}{r_1} \cos \gamma \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1.21)$$

ამ გამოსახულებაში  $\cos \gamma$  რომ  $\frac{e^{\gamma i} + e^{-\gamma i}}{2}$  გამოსახულებით შევცვალოთ, მივიღებთ:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{r_1} \left[ 1 + \left( \frac{r}{r_1} \right)^2 - \frac{r}{r_1} (e^{r'} + e^{-r'}) \right]^{-\frac{1}{2}} =$$

$$= \frac{1}{r_1} \left( 1 - \frac{r}{r_1} e^{r'} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( 1 - \frac{r}{r_1} e^{-r'} \right)^{-\frac{1}{2}}.$$

დავშალოთ მწკრივებად ფრჩხილებში მოქცეული გამოსახულებები, რისთვისაც გავიხსენოთ, რომ

$$(1-x)^{-\frac{1}{2}} = 1 - \frac{1}{2}(-x) + \frac{-\frac{1}{2}\left(-\frac{1}{2}-1\right)}{1 \cdot 2}(-x)^2 +$$

$$+ \frac{-\frac{1}{2}\left(-\frac{1}{2}-1\right)\left(-\frac{1}{2}-2\right)}{1 \cdot 2 \cdot 3}(-x)^3 +$$

$$+ \frac{-\frac{1}{2}\left(-\frac{1}{2}-1\right)\left(-\frac{1}{2}-2\right)\left(-\frac{1}{2}-3\right)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4}(-x)^4 + \dots =$$

$$= 1 + \frac{1}{2}x + \frac{3}{8}x^2 + \frac{5}{16}x^3 + \frac{35}{128}x^4 + \dots$$

ასევე

$$\left( 1 - \frac{r}{r_1} e^{r'} \right)^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{1}{2} \frac{r}{r_1} e^{r'} + \frac{3}{8} \left( \frac{r}{r_1} \right)^2 e^{2r'} + \frac{5}{16} \left( \frac{r}{r_1} \right)^3 e^{3r'} + \dots$$

$$\left( 1 - \frac{r}{r_1} e^{-r'} \right)^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{1}{2} \frac{r}{r_1} e^{-r'} +$$

$$+ \frac{3}{8} \left( \frac{r}{r_1} \right)^2 e^{-2r'} + \frac{5}{16} \left( \frac{r}{r_1} \right)^3 e^{-3r'} + \dots \quad (1.22)$$

გადავამრავლოთ ორივე მწკრივი ერთმანეთზე და დავალაგოთ ნამრავლი  $\frac{r}{r_1}$  შეფარდების მაჩვენებელთა მიხედვით, რაც მოგვცემს:

$$\left( 1 - \frac{r}{r_1} e^{r'} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( 1 - \frac{r}{r_1} e^{-r'} \right)^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{r}{r_1} \cdot \frac{1}{2} (e^{r'} + e^{-r'}) +$$

$$+ \left( \frac{r}{r_1} \right)^2 \left[ \frac{1}{8} + \frac{3}{8} (e^{2r'} + e^{-2r'}) \right] +$$

$$+ \left( \frac{r}{r_1} \right)^3 \left[ \frac{3}{16} (e^{r'} + e^{-r'}) + \frac{5}{16} (e^{3r'} + e^{-3r'}) \right] + \dots \quad (1.23)$$

გადავიდეთ ისევ უკან ტრიგონომეტრიულ ფუნქციებზე, რის შემდეგ ჩვიქნება:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{r_1} \left[ 1 + \frac{r}{r_1} \cos\gamma + \left(\frac{r}{r_1}\right)^2 \left(\frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cos 2\gamma\right) + \left(\frac{r}{r_1}\right)^3 \left(\frac{3}{8} \cos\gamma + \frac{5}{8} \cos 3\gamma\right) + \dots \right] \quad (1.24)$$

კოეფიციენტები  $\frac{r}{r_1}$  შეფარდების სხვადასხვა ხარისხებთან, ე. ი.  $\cos\gamma$ ,  $\frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cos 2\gamma$  და ა. შ. ატარებს სფერული ფუნქციების სახელწოდებას.

სიმძიმის ძალის  $W$  პოტენციალური ფუნქცია ახლა დაიწერება ასე:

$$W = \frac{f}{r_1} \int \left[ 1 + \frac{r}{r_1} \cos\gamma + \left(\frac{r}{r_1}\right)^2 \left(\frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cos 2\gamma\right) + \left(\frac{r}{r_1}\right)^3 \left(\frac{3}{8} \cos\gamma + \frac{5}{8} \cos 3\gamma\right) + \dots \right] dm + \frac{1}{2} \omega^2 (x^2 + y^2) \quad (1.25)$$

სანამ (25) გამოსახულების ინტეგრაციას შევეუდგებოდეთ, გადავწყვიტოთ საკითხი (24) მწკრივის კრებადობის შესახებ. ჩვენ ვხედავთ, რომ ამ მწკრივში  $\frac{r}{r_1}$  შეფარდების სხვადასხვა ხარისხებთან კოეფიციენტები მიღებულია (22)

მწკრივებიდან, როგორც სხვადასხვა კოეფიციენტების ნამრავლთა ჯამები, და რადგანაც ეს კოეფიციენტები ყველა დადებითია, ამიტომ (24) გამოსახულების კოეფიციენტებიც დადებითი უნდა იყოს, თუ ყურადღებას არ მივაქცევთ ნიშანს  $\cos\gamma$ ,  $\cos 2\gamma$  და ა. შ. გამოდის, რომ ეს კოეფიციენტები თავის უდიდეს მნიშვნელობებს მიაღწევენ, როდესაც  $\cos\gamma$  და  $\gamma$ -ს ჯერადი რაკლების კოსინუსებს ექნებათ უდიდესი მნიშვნელობა, ე. ი. როდესაც  $\gamma = 0$ .

მივმართოთ (21) ტოლობას და დავუშვათ, რომ იქ  $\gamma = 0$ ; მაშინ მივიღებთ:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} &= \frac{1}{r_1} \left[ 1 + \left(\frac{r}{r_1}\right)^2 - 2 \frac{r}{r_1} \right]^{-\frac{1}{2}} = \frac{1}{r_1} \left[ \left(1 - \frac{r}{r_1}\right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} = \\ &= \frac{1}{r_1} \left(1 - \frac{r}{r_1}\right)^{-1} = \frac{1}{r_1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{r}{r_1}} = \\ &= \frac{1}{r_1} \left[ 1 + \frac{r}{r_1} + \left(\frac{r}{r_1}\right)^2 + \left(\frac{r}{r_1}\right)^3 + \dots \right]. \end{aligned}$$

ამ მწკრივის კოეფიციენტების შედარება (24) მწკრივის კოეფიციენტებთან ამტკიცებს, რომ ეს უკანასკნელები არ აღემატება ერთს. გამოდის, რომ (24) მწკრივი არის ხარისხობრივი მწკრივი ისეთი კოეფიციენტებით, რომლებიც ერთეულს არ აღემატება; ასეთი მწკრივი აბსოლუტურად კრებადია, თუ შეფარდება  $\frac{r}{r_1} < 1$ . როდესაც  $\frac{r}{r_1} > 1$ , (24) მწკრივი განშლადია, ხო-

ლო როდესაც  $\frac{f}{r_1}$  ერთეულის ტოლია, შეიძლება დამტკიცდეს, რომ (24)

მწკრივი იკრიბება, თუ  $\cos^2 \gamma < 1$ .

შევუდგეთ ახლა (25) მწკრივის წევრ-წევრად ინტეგრაციას და გადავწე-  
როთ ის შემდეგი სახით:

$$W = \frac{f}{r_1} \int dm + \frac{f}{r_1^3} \int r \cos \gamma dm + \frac{f}{r_1^3} \int r^2 \left( \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cos^2 \gamma \right) dm + \\ + \frac{f}{r_1^3} \int r^3 \left( \frac{3}{8} \cos \gamma + \frac{5}{8} \cos 3\gamma \right) dm + \dots + \frac{1}{2} \omega^2 (x^2 + y^2) \quad (1.26)$$

ვინაიდან აქ ინტეგრაცია დედამიწის მთელ მოცულობაზე წარმოებს, ამიტომ, თუ მის მასას  $M$ -ით აღვნიშნავთ, მაშინ (26) გამოსახულების მარჯვენა ნაწილის პირველი წევრისათვის გვექნება:

$$\frac{f}{r_1} \int dm = \frac{fM}{r_1} \quad (1.27)$$

იმავე გამოსახულების მარჯვენა ნაწილის მეორე წევრი, თუ ანალიტიკური გეომეტრიიდან მოვიგონებთ დამოკიდებულებას, რომ

$$\cos \gamma = \frac{\xi x + \eta y + \zeta z}{rr_1},$$

ასე დაიწერება:

$$\frac{f}{r_1^3} \int r \cos \gamma dm = \frac{f}{r_1^3} \int \frac{\xi x + \eta y + \zeta z}{r_1} dm = \\ = \frac{f}{r_1^3} \left[ x \int \xi dm + y \int \eta dm + z \int \zeta dm \right].$$

მექანიკიდან ცნობილია, რომ

$$\int \xi dm = mx_0, \quad \int \eta dm = my_0, \quad \int \zeta dm = mz_0,$$

სადაც  $m$  სხეულის მასაა და  $x_0, y_0, z_0$  მისი სიმძიმის ცენტრის კოორდინატებია.

რადგანაც კოორდინატთა სათავე დედამიწის სიმძიმის ცენტრშია, ამიტომ მისი სამივე კოორდინატი ნულის ტოლია, და გამოსახულება

$$\frac{f}{r_1^3} \int r \cos \gamma dm = 0. \quad (1.28)$$

გადმოვწეროთ მესამე წევრი იმავე გამოსახულების მარჯვენა ნაწილისა

$$\frac{f}{r_1^3} \int r^3 \left( \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cos 2\gamma \right) dm,$$



რომელიც, თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ

$$\cos 2\gamma = 2\cos^2 \gamma - 1,$$

$$\cos \gamma = \frac{\xi x + \eta y + \zeta z}{r r_1},$$

შემდეგნაირად გადაიწერება:

$$\begin{aligned} \frac{f}{r_1^3} \int r^2 \left( \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cos 2\gamma \right) dm &= \frac{f}{2r_1^3} \int r^2 (3\cos^2 \gamma - 1) dm = \\ &= -\frac{f}{2r_1^3} \int \left[ \frac{3(\xi x + \eta y + \zeta z)^2}{r_1^2} - r^2 \right] dm \end{aligned} \quad (1.29)$$

მრგვალ ფრჩხილებში მოთავსებულ სამწევრის კვადრატში აყვანის შემდეგ ინტეგრალქვეშ გვექნება წევრები  $2\xi x \eta y$ ,  $2\xi x \zeta z$  და  $2\eta y \zeta z$ , რომლებიც მოგვექმენ შემდეგი სახის ინტეგრალებს:

$$\int \xi \eta dm, \quad \int \xi \zeta dm \quad \text{და} \quad \int \eta \zeta dm.$$

ეს ინტეგრალები, რომლებიც მექანიკაში ცნობილია ინერციის ნამრავლების სახელწოდებით, შეიძლება გახდეს ნულის ტოლი, თუ საკოორდინატო ღერძებს მივცემთ სათანადო მიმართულებებს, სახელდობრ, თანხედენილს ინერციის მთავარ ღერძებთან.

ჩვენს შემთხვევაში მხოლოდ  $z$  საკოორდინატო ღერძი, რომელიც დეამიწის ბრუნვის ღერძს წარმოადგენს, ემთხვევა ინერციის ერთ-ერთ მთავარ ღერძთაგანს, რის გამო ნულის ტოლი გახდება ინერციის ნამრავლები

$$\int \xi \zeta dm \quad \text{და} \quad \int \eta \zeta dm.$$

ჩენი მიზანია, რომ ინერციის შესაბამე ნამრავლი

$$\int \xi \eta dm$$

გახდეს აგრეთვე ნულის ტოლი. ამისათვის საჭიროა საკოორდინატო ღერძები  $x$  და  $y$  შემოვებარუნოთ გარკვეული კუთხით  $z$  ღერძის გარშემო. საკოორდინატო ღერძების შერჩევისას ჩვენ  $x$  და  $y$  ღერძებისათვის არ მიგვიცია გარკვეული მიმართულება, რის გამო მივცეთ მათ ახლა ისეთი მიმართულებანი, რომ ისინი დაემთხვენ ინერციის მთავარ ღერძებს. შემობრუნების ეს კუთხე, რა თქმა უნდა, ისაზღვრება სათანადო დაკვირვებებიდან.

ზემოთქმულის შემდეგ, თუ მხედველობაში მივიღებთ  $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ , მაშინ (29) გამოსახულება შეიძლება ასე დაიწეროს:

$$\frac{f}{r_1^3} \int r^2 \left( \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cos 2\gamma \right) dm = \frac{f}{2r_1^3} \int \left( 3 \frac{\xi^2 x^2 + \eta^2 y^2 + \zeta^2 z^2}{r_1^2} - r^2 \right)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{f}{2r_1^3} \int \frac{x^2(3\xi^2 - r^2) + y^2(3\eta^2 - r^2) + z^2(3\zeta^2 - r^2)}{r_1^3} dm = \\
&\frac{f}{2r_1^3} \left[ x^2 \int (3\xi^2 - r^2) dm + y^2 \int (3\eta^2 - r^2) dm + \right. \\
&\quad \left. + z^2 \int (3\zeta^2 - r^2) dm \right]. \quad (1.30)
\end{aligned}$$

შემოვიღოთ ეხლა ინერციის  $A$ ,  $B$ ,  $C$  მომენტები  $x$ ,  $y$ ,  $z$  საკოორდინატო ღერძთა მიმართ. ზემოთქმულის თანახმად, ეს იქნება ინერციის მთავარი მომენტები:

$$A = \int (\zeta^2 + \eta^2) dm, \quad B = \int (\xi^2 + \zeta^2) dm, \quad C = \int (\xi^2 + \eta^2) dm. \quad (1.31)$$

აღვილი შესამოწმებელია, რომ (30) გამოსახულების მარჯვენა მხარეზე კვადრატულ ფრჩხილში მოქცეული ინტეგრალი, ე. ი.

$$\int (3\xi^2 - r^2) dm = C + B - 2A.$$

ამისათვის საკმარისია მოვიგონოთ, რომ  $r^2 = \xi^2 + \eta^2 + \zeta^2$ , და მრგვალ ფრჩხილს შიგნით მოქცეულ გამოსახულებას მივუმატოთ და გამოვაკლოთ  $\eta^2$  და  $\zeta^2$ . ასევე:

$$\int (3\eta^2 - r^2) dm = A + C - 2B$$

$$\int (3\rho^2 - r^2) dm = B + A - 2C.$$

ჩავსვათ ეს სიდიდეები (30) გამოსახულებაში, მაშინ გვექნება:

$$\begin{aligned}
&\frac{f}{r_1^3} \int r^2 \left( \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cos 2\gamma \right) dm = \\
&= \frac{f}{2r_1^3} \left[ x^2(C + B - 2A) + y^2(A + C - 2B) + z^2(B + A - 2C) \right].
\end{aligned}$$

ეს ტოლობა შეიძლება გარდაიქმნას და მას მიეცეს შემდეგი სახე:

$$\begin{aligned}
&\frac{f}{r_1^3} \int r^2 \left( \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cos 2\gamma \right) dm = \\
&= \frac{f}{2r_1^3} \left[ \frac{3}{2} (x^2 - y^2)(B - A) + \left( \frac{x^2 + y^2}{2} - z^2 \right) (2C - A - B) \right]. \quad (1.32)
\end{aligned}$$

ჩავსვათ (32) ტოლობაში  $x$ ,  $y$  და  $z$  მართკუთხოვანი კოორდინატების მაგიერ სფერული კოორდინატები:  $\varphi$ ,  $\lambda$  და  $r$ . ზემოთნაჩვენები  $x$  და  $y$  ღერძების სათანადოდ შემობრუნება შეცვლის მხოლოდ  $\lambda$  კოორდინატს  $\lambda_0$  კუთხით,  $\varphi$  და  $r$  უცვლელი დარჩება. ამიტომაც გვექნება:

$$\begin{aligned}x &= r_1 \cos \varphi \cos(\lambda - \lambda_0), \\y &= r_1 \cos \varphi \sin(\lambda - \lambda_0), \\z &= r_1 \sin \varphi,\end{aligned}\tag{1.33}$$

სადაც  $\lambda$  სიგრძეა, რომელიც აითვლება რომელიმე საწყისი მერიდიანიდან, ხოლო  $\varphi$  გეოცენტრული განედია. წერის შემოკლების მიზნით  $\lambda - \lambda_0$  გამოსახულების მაგიერ ვწერთ  $\lambda$ .

სათანადო ჩასმის შემდეგ გვექნება:

$$\begin{aligned}& \frac{f}{r_1^3} \int r^2 \left( \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cos 2\gamma \right) dm = \\&= \frac{f}{r_1^3} \left[ \frac{3}{4} \cos^2 \varphi \cos 2\lambda (B - A) - \frac{3}{2} \left( \sin^2 \varphi - \frac{1}{3} \right) \left( C - \frac{A+B}{2} \right) \right].\end{aligned}\tag{1.34}$$

ახლა სიმძიმის ძალი სპოტენციალისათვის (26), (27), (28), (33) და (34) ტოლობათა საფუძველზე შეიძლება დაიწეროს შემდეგი გამოსახულება:

$$\begin{aligned}W &= \frac{f}{r} \left\{ M + \frac{1}{r^2} \left[ \frac{3}{4} \cos^2 \varphi \cos 2\lambda (B - A) - \right. \right. \\&\quad \left. \left. - \frac{3}{2} \left( \sin^2 \varphi - \frac{1}{3} \right) \left( C - \frac{A+B}{2} \right) \right] + \dots \right\} + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \varphi.\end{aligned}\tag{1.35}$$

ამ ფორმულაში  $r$  სიდიდეს მოცილებული აქვს ინდექსი 1, რადგან ის შემდეგში არ გვექირდება. იგულისხმება, რომ  $r$  რადიუსი დაკვირვების  $A$  წერტილის ვექტორია.

სიმძიმის ძალის  $W$  პოტენციალის დაშლა, რომელიც წარმოდგენილია (35) გამოსახულებით, ზუსტია მეორე რიგის მცირე სიდიდეებამდე, თუ პირველი რიგის მცირე სიდიდით ჩავთვლით დედამიწის დაბრტყელებას.

რა თქმა უნდა, შეიძლება  $W$  პოტენციალის დაშლისათვის გამოვიყენოთ (25) გამოსახულების სხვა წევრებიც, მაგრამ, როგორც გამოთვლები ამტკიცებს, ზემოთ აღებული წევრებიც საკმარისია, რომ მიღებულ იქნას ზოგიერთი საინტერესო შედეგი დედამიწის ფორმისა და მის ზედაპირზე სიმძიმის ძალის განაწილების შესახებ.

### § 5. იდეალური გეოიდის განტოლება

გამოსახულება (35), თუ მივიღებთ აღნიშვნას

$$\frac{C - \frac{A+B}{2}}{M} = K,$$

გადაიწერება შემდეგი სახით:

$$W = \frac{fM}{r} \left[ 1 + \frac{3(B-A)}{4r^2M} \cos^2 \varphi \cos 2\lambda + \right.$$

$$+ \frac{K}{2r^3} (1 - 3\sin^2\varphi) + \frac{\omega^2 r^3}{2fM} \cos^2\varphi \Big]. \quad (1.36)$$

თუ ჩვენ (36) გამოსახულებას გავეტოლებთ ნებისმიერ მუდმივს, მაშინ თანახმად (12) ტოლობისა, მივიღებთ დონებრივი ზედაპირის განტოლებას. გეოიდის განტოლების მისაღებად საჭიროა ნებისმიერ მუდმივს მიეცეს გარკვეული მნიშვნელობა, რომელიც მოინახება, თუ გეოიდზე ავიღებთ რომელიმე წერტილს და მის კოორდინატებს ჩავსვამთ (36) ტოლობის მარჯვენა ნაწილში. ამ მიზნისათვის ავიღოთ ის წერტილი, სადაც  $x$  ღერძი გადაპრის გეოიდის ზედაპირს. ამ წერტილის სფერული კოორდინატებია  $\varphi = 0$ ,  $\lambda = 0$  და  $r = a$ , რადგანაც, როგორც ვიცით,  $x$  ღერძი დედამიწის ეკვატორზე ძევს. მაშინ (36) მოგვეცემს:

$$\frac{fM}{a} \left[ 1 + \frac{3(B-A)}{4a^2M} + \frac{K}{2a^2} + \frac{\omega^2 a^3}{2fM} \right] = \text{const.}$$

სწორედ ეს არის საპოვნი მუდმივი გეოიდის განტოლებისათვის, რის გამო გეოიდის განტოლება, (36) გამოსახულების მიხედვით, ცხადია, ასე დაიწერება:

$$\begin{aligned} \frac{fM}{r} \left[ 1 + \frac{3(B-A)}{4r^2M} \cos^2\varphi \cos 2\lambda + \frac{K}{2r^3} (1 - 3\sin^2\varphi) + \frac{\omega^2 r^3}{2fM} \cos^2\varphi \right] = \\ = \frac{fM}{a} \left[ 1 + \frac{3(B-A)}{4a^2M} + \frac{K}{2a^2} + \frac{\omega^2 a^3}{2fM} \right]. \end{aligned} \quad (1.37)$$

გეოიდის ეს განტოლება შეიძლება დაიწეროს ასეც:

$$\frac{r}{a} = \frac{1 + \frac{3(B-A)}{4r^2M} \cos^2\varphi \cos 2\lambda + \frac{K}{2r^3} (1 - 3\sin^2\varphi) + \frac{\omega^2 r^3}{2fM} \cos^2\varphi}{1 + \frac{3(B-A)}{4a^2M} + \frac{K}{2a^2} + \frac{\omega^2 a^3}{2fM}} \quad (1.38)$$

შემოვიღოთ აღნიშვნები:

$$\frac{3(B-A)}{4a^2M} = p \quad (1.I) \quad \frac{K}{2a^2} = n \quad (1.II) \quad \frac{\omega^2 a^3}{fM} = q, \quad (1.III)$$

მაშინ (38) განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{r}{a} = \frac{1 + \frac{a^2}{r^3} p \cos^2\varphi \cos 2\lambda + \frac{a^3}{r^3} n (1 - 3\sin^2\varphi) + \frac{r^3}{2a^3} q \cos^2\varphi}{1 + p + n + \frac{1}{2} q} \quad (1.39)$$

ვინაიდან ყველა დასკვნებს ჩვენ ვაკეთებთ პირველი რიგის მცირე სიდიდეების მიხედვით, ამიტომ უკანასკნელი გამოსახულება შეიძლება გავამარტივოთ.  $n$  და  $q$  მცირე სიდიდეებია დედამიწის დაბრტყელების რიგისა, ხოლო  $p$  კიდევ უფრო მცირეა, რაც გამოწვეულია იმით, რომ დედამი-

წა თავის ფორმით ძლიერ უახლოვდება სფეროს. გარდა ამისა, რადგანაც შეფარდებები  $\frac{a^2}{r^2}$  და  $\frac{a^3}{r^3}$  გამრავლებულია პირველი რიგის მცირე სიდიდეებზე, ჩვენ დავეშვებთ მეორე რიგის მცირე სიდიდის ცდომილებას, თუ მათ შევცვლით ერთით. ამავე საფუძვლით მნიშვნელში მოქცეული სიდიდეებიდან შეიძლება შენარჩუნებულ იქნას 1, ხოლო დანარჩენი მცირე სიდიდეები გადაიტანება მრიცხველში შებრუნებული ნიშნით. მაშინ (39) განტოლება, თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ  $\cos^2\varphi = 1 - \sin^2\varphi$ , ასე დაიწერება:

$$\frac{r}{a} = 1 + p(\cos^2\varphi \cos 2\lambda - 1) - 3n \sin^2\varphi - \frac{q}{2} \sin^2\varphi. \quad (1.40)$$

ღედამიწისათვის, ვინაიდან ის ძლიერ უახლოვდება ბრუნვის სხეულს, ინერციის მომენტები  $A$  და  $B$  შეიძლება მივიჩნიოთ თითქმის ერთმანეთის ტოლად, რის შედეგად  $p$ , როგორც (I)-დან ჩანს, შეიძლება მივიჩნიოთ მეორე რიგის მცირე სიდიდეთ და უკუვავლოთ ის გამოსახულება, სადაც ის შეიღის როგორც გამრავლი. მაშინ (40) განტოლება ასე დაიწერება:

$$\frac{r}{a} = 1 - \left( 3n + \frac{1}{2} q \right) \sin^2\varphi. \quad (1.41)$$

ცნობილია, რომ სფეროიდი წარმოადგენს სხეულს, რომელიც მიიღება ელიფსის ბრუნვით სიმეტრიის ერთ-ერთი მისი ღერძის გარშემო. დავეწროთ სფეროიდის განტოლება ნახევარღერძებით:  $a$ ,  $a$  და  $b$ :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1. \quad (I.V)$$

ამ სფეროიდის დაბრტყელებაა

$$a = \frac{a-b}{a}. \quad (1.V)$$

შემოვიღოთ სფერული კოორდინატები  $r$ ,  $\varphi$  და  $\lambda$  და გადავწეროთ სფეროიდის განტოლება (I.V) ამ კოორდინატებში:

$$\frac{r^2 \cos^2\varphi}{a^2} + \frac{r^2 \sin^2\varphi}{b^2} = 1. \quad (1.VI)$$

შევცვალოთ ამ განტოლებაში  $b$  მისი ტოლი  $a(1-\alpha)$  გამოსახულებით და ვიპოვოთ შეფარდება  $\frac{r}{a}$ :

$$\frac{r}{a} = \left[ \cos^2\varphi + \frac{\sin^2\varphi}{(1-\alpha)^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1.VII)$$

ა6

$$\frac{r}{a} = \left[ \frac{1 - 2\alpha \cos^2\varphi + \alpha^2 \cos^2\varphi}{(1-\alpha)^2} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$\frac{r}{a} = (1 - \alpha)(1 - 2\alpha \cos^2 \varphi + \alpha^2 \cos^2 \varphi) - \frac{1}{2}.$$

დავშალოთ მეორე ტერმინში მოქცეული გამოსახულება ნიუტონის ბინომის მიხედვით და შევინარჩუნოთ  $\alpha$  სიდიდის მხოლოდ პირველი ხარისხები, მაშინ გვექნება:

$$\frac{r}{a} = (1 - \alpha)(1 + \alpha \cos^2 \varphi) = 1 + \alpha \cos^2 \varphi - \alpha - \alpha^2 \cos^2 \varphi$$

$$\frac{r}{a} = 1 + \alpha(\cos^2 \varphi - 1) - \alpha^2 \cos^2 \varphi$$

ან სიზუსტით  $\alpha$  სიდიდემდე:

$$\frac{r}{a} = 1 - \alpha \sin^2 \varphi. \tag{1.42}$$

(41) და (42) ტოლობათა შედარებიდან ირკვევა, რომ

$$\alpha = 3n + \frac{1}{2} q \tag{1.43}$$

### § 6. სიმძიმის ძალა გეოიდის ზედაპირზე

ვიპოვოთ სიმძიმის ძალის სიდიდე ჩვენი იდეალური გეოიდის ზედაპირზე. როგორც ვიცით, სიმძიმის ძალა ყველა წერტილში მიმართულია გეოიდის ნორმალის თანხედენილად, რის გამო პოტენციალური ფუნქციის ძირითადი თვისების თანახმად ჩვენ  $g$  სიმძიმის ძალას მივიღებთ  $W$  ფუნქციის გარეგანი ნორმალით დიფერენცირების შედეგად:

$$g = - \frac{\partial W}{\partial n},$$

სადაც ნიშანი აღებულია უარყოფითი, ვინაიდან სიმძიმის ძალა მიმართულია შიგნითკენ, ე. ი. ნორმალის დადებითი მიმართულებების საწინააღმდეგოდ.

მაგრამ (36) განტოლებაში  $n$  ნორმალის მიმართულება არ შედის; სამაგიეროდ, როგორც ვიცით, დედამიწის ცენტრისაკენ მიმართული  $r$  ძლიერ უახლოვდება ნორმალს შესაბამე წერტილში. მოვიგონოთ, რომ დედამიწის ზედაპირზე მოცემულ წერტილისათვის კუთხე ნორმალსა და ეკვატორის სიბრტყეს შორის არის გეოგრაფიული განედი  $\varphi$ , ხოლო კუთხე ცენტრისაკენ მიმართულ  $r$  რადიუსსა და იმავე ეკვატორის სიბრტყეს შორის გეოცენტრული  $\varphi'$  განედია. აქედან ცხადია, რომ კუთხე  $n$  ნორმალსა და  $r$  რადიუსს შორის იქნება  $\varphi - \varphi'$ . ამიტომ, თუ ჩვენ (36) განტოლების დიფერენცირებას მოვახდენთ  $r$ -ით, ჩვენ მივიღებთ სიმძიმის ძალის არა სრულ მნიშვნელობას, არამედ მის პოტენციალს, რომელიც ტოლია

$$g \cos(\varphi - \varphi') = - \frac{\partial W}{\partial r}$$

ვინაიდან კუთხე  $\varphi - \varphi'$  ძლიერ მცირეა და იცვლება 0-დან (ეკვატორზე და პოლუსებზე)  $11', 9$ -მდე ( $45^\circ$  განედზე), სადაც  $\cos(\varphi - \varphi')$  ლებულობს შესაბამისად 1 და 0,999995 მნიშვნელობებს, ჩვენ შეგვიძლია დაწეროთ:

$$g = - \frac{\partial W}{\partial r}.$$

ამ წარმოებულის მისაღებად გავაღვიფრენციალოთ (36) განტოლება  $r$ -ით:

$$g = \frac{fM}{r^2} \left[ 1 + \frac{9(B-A)}{4r^2 M} \cos^2 \varphi \cos 2\lambda + \frac{3K}{2r^2} (1 - 3\sin^2 \varphi) - \frac{\omega^2 r^3}{fM} \cos^2 \varphi \right]. \quad (1.44)$$

ღელამიწისათვის, როგორც ზემოთაღ იყო ნათქვამი, ინერციის  $A$  და  $B$  მომენტები ძლიერ ახლოსაა ერთმანეთთან, რის გამო შეიძლება მათი ურთიერთ გატოლება. მაშინ განტოლებები (36), (37) და (44) გამარტივდება და მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$W = \frac{fM}{r} \left[ 1 + \frac{K}{2r^2} (1 - 3\sin^2 \varphi) + \frac{\omega^2 r^3}{2fM} \cos^2 \varphi \right], \quad (1.45)$$

$$\begin{aligned} \frac{fM}{r} \left[ 1 + \frac{K}{2r^2} (1 - 3\sin^2 \varphi) + \frac{\omega^2 r^3}{2fM} \cos^2 \varphi \right] &= \\ &= \frac{fM}{a} \left( 1 + \frac{K}{2a^2} + \frac{\omega^2 a^3}{2fM} \right), \end{aligned} \quad (1.46)$$

$$g = \frac{fM}{r^2} \left[ 1 + \frac{3K}{2r^2} (1 - 3\sin^2 \varphi) - \frac{\omega^2 r^3}{fM} \cos^2 \varphi \right]. \quad (1.47)$$

გეოიდის ზედაპირის წერტილებისათვის  $g$  სიმძიმის ძალის გამოსახულების მისაღებად საჭიროა (44) ან (47) ტოლობაში ჩავსვათ  $r$ -ის მნიშვნელობა (40) ან (41) განტოლებიდან.

ჩვენ გვინდა მივიღოთ, ეგრეთ წოდებულ, კლეროს თეორემის გამოსახულება, რომელიც საშარტლიანია მეორე რიგის მცირე სიდიდემდე. ამიტომ (47) განტოლების მარჯვენა ნაწილის პირველი მამრავლის მნიშვნელში  $r$ -ის მაგიერ ჩავსვათ მისი მნიშვნელობა (41) განტოლების მიხედვით და მეორე მამრაველში მეორე და მესამე წევრები გავამრავლოთ შესაბამისად  $\frac{a^2}{a^2}$  და  $\frac{a^3}{a^3}$ , რის შემდეგ, თუ  $n$  და  $q$  სიდიდეების მნიშვნელობებს გამოვიყენებთ, გვექნება:

$$g = \frac{fM}{a^2} \frac{1 + \frac{3a^2}{r^2} n(1 - 3\sin^2\varphi) - \frac{r^2}{a^2} q \cos^2\varphi}{\left[ 1 - \left( 3n + \frac{1}{2} q \right) \sin^2\varphi \right]}$$

ანუ, თუ  $\frac{a}{r}$  შეფარდებას წინანდებურად ერთს გაუტოლებთ და, მნიშვნელის კვადრატში აყვანისა და გაყოფის შემდეგ, უკუვაგდებთ  $n$  და  $q$  მცირე სიდიდეთა კვადრატებს, ჩვენ  $g$  სიმძიმის ძალის აჩქარებისათვის გეოიდზე მივიღებთ:

$$g = \frac{fM}{a^2} (1 + 3n - q) [1 + (2q - 3n)\sin^2\varphi]. \quad (1.48)$$

აღვნიშნოთ ის ნაწილი, რომელიც არაა დამოკიდებული  $\sin^2\varphi$  სიდიდებზე,  $g_0$ -თი; მაშინ

$$g_0 = \frac{fM}{a^2} (1 + 3n - q). \quad (1.48')$$

ცხადია, რომ  $g_0$  არის სიმძიმის ძალის მნიშვნელობა იმ ადგილზე, სადაც  $\varphi = 0$ , ე. ი. ეკვატორზე.

ახლა, თუ სიმოკლისათვის შემოვიღებთ აღნიშვნას

$$\beta = 2q - 3n, \quad (1.49)$$

მაშინ (48) ასე დაიწერება:

$$g = g_0(1 + \beta \sin^2\varphi). \quad (1.48'')$$

პოლუსისათვის  $\varphi = 90^\circ$ , რის გამო, თუ შესაბამის სიმძიმის ძალის აჩქარებას  $g_p$ -თი აღვნიშნავთ, დაიწერება:

$$g_p = g_0(1 + \beta), \quad (1.48''')$$

რაც  $\beta$ -სათვის მოგვცემს:

$$\beta = \frac{g_p - g_0}{g_0}. \quad (1.49')$$

ჩავსვათ (49) ფორმულაში  $3n$ -ის მნიშვნელობა (43) დამოკიდებულებიდან; მაშინ მივიღებთ:

$$\beta = \frac{5}{2} q - \alpha \quad (1.49'')$$

ანუ (49')-ის მიხედვით:

$$\frac{5}{2} q - \alpha = \frac{g_p - g_0}{g_0} \quad (1.49''')$$



განტოლებები (48'') და (49''') გამოსახავს ვერეთწოდებულ კლეროს თეორემას, ამასთან პირველ მათგანს ხშირად იხსენიებენ როგორც იმავე ავტორის პირველ ფორმულას, ხოლო მეორეს—როგორც მეორე ფორმულას. შეიძლება, რა თქმა უნდა, მეორე ფორმულა დაიწეროს იმ სახითაც, როგორც ეს მოცემულია (49'') განტოლებაში.

$q$  სიდიდე, რომელიც  $\frac{\omega^2 a^3}{fM}$ -ის ტოლია, შეიძლება წარმოვიდგინოთ

$$\frac{\omega^2 a}{fM} \text{-ის სახით,}$$

$$\frac{\omega^2 a}{a^2}$$

საიდანაც ჩანს, რომ  $q$ , მეორე რიგის მცირეების სიზუსტით, უდრის ცენტრდამშორი ძალისა და სიმძიმის ძალის შეფარდებას ეკვატორზე.

განტოლება (48'') გვაძლევს გეოიდის ზედაპირზე სიმძიმის ძალის ნორმალური განაწილების კანონს. (49') განტოლებიდან ჩანს, რომ  $\beta$  სიდიდის ცოდნისათვის საჭიროა სიმძიმის ძალის გაზომვა ეკვატორზე და პოლუსზე; მაგრამ, ცხადია, რომ ამ გაზომვების შენაცვლება შეიძლება გაზომვებით ორ ნებისმიერ წერტილში  $\varphi_1$  და  $\varphi_2$  განედებით. მართლაც, მაშინ (48'')-ის მიხედვით დავეწერთ ორ განტოლებას:

$$g_1 = g(1 + \beta \sin \varphi_1) \quad (1.1)$$

$$g_2 = g(1 - \beta \sin \varphi_2),$$

საიდანაც ვიპოვით  $g$ , და  $\beta$ -ს მნიშვნელობებს, რომელთა ჩასმა შეიძლება (48'') და (49') ფორმულებში მესამე უცნობის მოსაძიებლად.

მაგრამ ზემოთ დაწერილ (I) განტოლებათა საიმედო ამოხსნისათვის საჭიროა, რომ კოეფიციენტები  $\beta$  უცნობთან შედლებისამებრ იყოს სხვადასხვა, რაც განხორციელდება, თუ ერთი პუნქტთაგანი იქნება ეკვატორის მახლობლად, მეორე კი პოლუსის მახლობლად. ზუსტი მიზნებისათვის  $g$ , და  $\beta$  ისაზღვრება არა ორი, არამედ მრავალი პუნქტის საფუძველზე. ამ ხერხით შეიძლება გამოირიცხოს დაკვირვებათა შეცდომები და, გარდა ამისა, რაც მთავარია, ადგილობრივი ანომალიების გავლენები.

განტოლება (49'') საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ დედამიწის სფეროიდი დაბრტყელება, რისთვისაც გამოყენებულია  $q$  სიდიდე, რომელიც საკმაო სიზუსტითაა ცნობილი, და  $\beta$  კოეფიციენტი, რომელიც, როგორც დავინახეთ, ისაზღვრება აგრეთვე საკმაო სიზუსტით.

#### † § 7. სიმძიმის ნორმალური ძალის ფორმულები

განტოლება (47) სამართლიანია დაბრტყელების მიმართ მეორე რიგის მცირე სიდიდეებამდე. უფრო ზუსტი ფორმულის მიღება შეიძლება  $g$ -სათვის, თუ გავაგრძელებთ (25) მწკრივის დაშლას და კოეფიციენტების მესამე რიგის მცირე სიდიდეებამდე გამოანგარიშებას. ასეთი გზით მიღებული ზოგადი ფორმულის სახე შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგნაირად:

$$\sqrt{g} = g_0(1 + \beta \sin^2 \varphi - \beta_1 \sin^2 2\varphi + \beta_2 \cos^2 \varphi \cos 2\lambda + \dots) \quad (1.50)$$

შეიძლება (47) განტოლება და მისი მსგავსი განტოლებები მიღებულ იქნას აგრეთვე სხვა ხერხითაც, რაზედაც აქ არ შევჩერდებით.

კოფიციენტები, რონლებიც შეღის (48'') და (50) განტოლებათა მარჯვენა ნაწილებში, ე. ი.  $g_0$ ,  $\beta$ ,  $\beta_1$ , და სხვა, ისაზღვრება ვრავიმეტრიულ დაკვირვებებიდან, როგორც ეს ნაჩვენებია იყო წინა პარაგრაფში. განტოლებათა რიცხვი იმდენი იქნება, რამდენი მნიშვნელობაც დაკვირვებით გვექნება მიღებული  $g$ -სათვის. ცხადია, ასეთ განტოლებათა ამოხსნა იწარმოებს უმცირეს კვადრატების ხერხით.

არსებით სიძველეს ასეთ განტოლებათა შედგენისას წარმოადგენს ის გარემოება, რომ შემოთხოვენილი ფორმულები გვაძლევენ სიმძიმის ძალის მნიშვნელობებს ზღვის დონეზე, იმ დროს, როდესაც დაკვირვებით მიღებული  $g$  შეესაბამება დედამიწის ფიზიკურ ზედაპირს და უმთავრესად ხმელეთს. ეს გარემოება იწვევს  $g$ -ს დანაკვირვებ მნიშვნელობებში სათანადო შესწორებათა შეტანის საჭიროებას, ე. ი. სიმძიმის ძალის რედუქციას.

თეორიული მნიშვნელობა  $g$ -სი, გამოანგარიშებული სიმძიმის ნორმალური ძალის რომელიმე ფორმულის მიხედვით, ჩვეულებრივად აღინიშნება  $\gamma$ -თი (გამა), ხოლო მნიშვნელობა, რომელიც გამოანგარიშებულია სფეროიდის ზედაპირის მიხედვით, აღინიშნება  $\gamma_0$ -ით.

თეორიული ფორმულების საფუძველზე გამოანგარიშებული მნიშვნელობანი  $g$  სიმძიმის ძალისა გვაძლევს ცოტად თუ ბევრად ზუსტ წარმოდგენას სიმძიმის ძალის განაწილების შესახებ დედამიწის ზედაპირზე. მათი შედარება უშუალოდ გაზომილ  $g$  სიდიდეებთან, სათანადო შესწორებათა შეტანის შემდეგ, მოგვცემს, როგორც მოსალოდნელი იყო, გარკვეულ განსხვავებას, რომელსაც უწოდებენ სიმძიმის ძალის ანომალიას მოცემულ წერტილში.

### § 8. სიმძიმის ძალის პოტენციალის მეორე წარმოებულთა მნიშვნელობა

ჩვენ ვნახეთ, რომ სიმძიმის ძალის  $W$  პოტენციალის პირველი წარმოებულები  $x$ ,  $y$  და  $z$ -ის მიხედვით წარმოადგენენ სიმძიმის ძალის აჩქარების პროექციებს შესაბამის ღერძებზე.

განვიხილოთ ასლა  $W$  პოტენციალის მეორე წარმოებულთა მნიშვნელობანი, რომლებიც ასე დაიწერება:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial^2 W}{\partial y^2}, \quad \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}, \quad \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y}, \quad \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z}, \quad \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} \quad (1.51)$$

სიმოკლისათვის ამ წარმოებულთათვის შეიძლება შემოღებულ იქნას შემდეგი აღნიშვნები შესაბამისად:

$$W_{xx}, W_{yy}, W_{zz}, W_{xy}, W_{xz}, W_{yz} \quad (1.51')$$

გარდა ამისა შემოვიღოთ აღნიშვნა

$$W = \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \quad (1.51'')$$

$$W = W_{yy} - W_{xx}$$

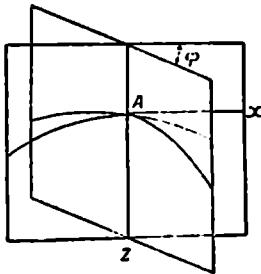
ანუ

საქიროა ალენიზნოთ, რომ (13) განტოლებიდან შეიძლება მივიღოთ ტოლობა

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} = 2\omega^2, \quad (1.52)$$

რონელიც აკავშირებს (51)-ის პირველ სამ მეორე წარმოებულს. რაც შეეხება დანარჩენ სამ მეორე წარმოებულს, ისინი განსაზღვრავენ ღონებრივი ზედაპირის ფორმას მოცემულ წერტილში.

ღონებრივ ზედაპირზე მოცემული  $A$  წერტილი მივიჩნიოთ კოორდინატთა სათავედ და ღერძი  $z$  მიემართოთ ქვევით ზედაპირისადმი ამ წერტილში გავლებული ნორმალის თანხედენილად. ადვილი დასანახია, რომ მაშინ  $xy$  სიბრტყე იქნება მხები სიბრტყე ღონებრივ ზედაპირისადმი მოცემულ წერტილში. ღონებრივი ზედაპირის ნორმალურ განკვეთათა მისაღებად გავავლოთ რიგი სიბრტყეები მოცემულ ნორმალზე  $A$  წერტილში. ეს ნორმალური განკვეთები, საერთოდ, წარმოადგენენ ბრტყელ მრუდებს. საკოორდინატო სიბრტყე  $xz$  მივიღოთ ძირითად სიბრტყედ და კუთხე, რომელსაც რომელიმე გამკვეთი სიბრტყე ადგენს მასთან, ალენიზნოთ  $\varphi$  ასოთი. მაშინ ყოველი ასეთი ნორმალური განკვეთის სიმრუდისათვის მოცემულ წერტილში, დიფერენციალური გეომეტრიის მიხედვით, შეიძლება დაიწეროს:



ნახ. 3.

$$\frac{1}{\rho\varphi} = r\cos^2\varphi + 2r\sin\varphi\cos\varphi + r\sin^2\varphi, \quad (1.53)$$

სადაც  $\frac{1}{\rho\varphi}$  ნორმალური განაკვეთის სიმრუდეა და

$$r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, \quad \varphi = \frac{\partial^2 z}{\partial x\partial y}, \quad t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}, \quad (1.53')$$

როდესაც ზედაპირის განტოლება მოცემულია

$$z = f(x, y)$$

განტოლების სახით.

ჩვენს შემთხვევაში ღონებრივი ზედაპირის განტოლება

$$W = \text{const}$$

$x, y, z$  კოორდინატების ფუნქციაა და ამრიგად არ არის ამოხსნილი  $z$ -ის მიმართ. ამიტომ შევადგინოთ  $W$ -დან მეორე წარმოებულები იმ დაშვებით, რომ  $z$  არის არაცხადი ფუნქცია  $x$  და  $y$ -ისა. მაშინ

$$\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial x} = 0 \quad (1.54)$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial y} = 0$$

მეორეჯერ დიფერენცირება გვაძლევს:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial W}{\partial z} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} &= 0 \\ \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} &= 0 \\ \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial W}{\partial z} \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} &= 0 \end{aligned} \quad (1.55)$$

ჩვენ ამ განტოლებებში უნდა შევიტანოთ  $\frac{\partial z}{\partial x}$  და  $\frac{\partial z}{\partial y}$  (54) განტოლებებიდან და შემდეგ განვსაზღვროთ  $r$ ,  $s$  და  $t$ . ეს ამოცანა ძლიერ მარტივდება იმის გამო, რომ საკოორდინატო სიბრტყე  $xy$  ემთხვევა ზედაპირისადმი მხებ სიბრტყეს კოორდინატთა სათავეში და  $z$  ღერძი მიმართულია ვერტიკალურად ქვევით, რის გამო

$$\frac{\partial W}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial z} = g.$$

შევიტანოთ ეს (54) განტოლებებში, საიდანაც დაიწერება:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial z}{\partial y} = 0$$

ამ მნიშვნელობათა (55) განტოლებაში შეტანა მოგვცემს:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + g \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} + g \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = 0$$

$$\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + g \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0,$$

საიდანაც (53')-ის მიხედვით მივიღებთ

$$r = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = -\frac{1}{g} W_{xx}$$

$$s = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} = -\frac{1}{g} W_{xy}$$

$$t = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = -\frac{1}{g} W_{yy}$$

(1.54'')

ჩავსვათ ეს მნიშვნელობები (53) განტოლებაში, რომელიც ნორმალური განკვეთის სიმრუდისათვის მოგვცემს შემდეგს:

$$\frac{1}{\rho_{\varphi}} = -\frac{1}{g} (W_{xx} \cos^2 \varphi + W_{xy} \sin 2\varphi + W_{yy} \sin^2 \varphi) \quad (1.55)$$

მივიღოთ ამ განტოლებიდან იმ განკვეთათა სიმრუდენი, რომლებიც ემთხვევიან  $xz$  და  $yz$  საკოორდინატო სიბრტყეებს, რისთვისაც  $\varphi$  კუთხე გავუტოლოთ შესაბამისად ნულსა და  $\pi/4$ -ს. მაშინ მივიღებთ პირველი განკვეთისათვის:

$$\frac{1}{\rho_{xz}} = -\frac{1}{g} W_{xx}, \quad (1.56)$$

მეორე განკვეთისათვის

$$\frac{1}{\rho_{yz}} = -\frac{1}{g} W_{yy}. \quad (1.57)$$

მოვნახოთ ახლა ის მიმართულება  $\varphi$ , სადაც  $1/\rho_{\varphi}$  აქვს ექსტრემუმი, ე. ი. მაქსიმუმი და მინიმუმი; ცხადია, რომ ეს იქნება მთავარი კვეთების მიმართულება. ამისათვის გავადიფერენციალოთ (55) განტოლების მარჯვენა ნაწილი, შემდეგ გავუტოლოთ ის ნულს და ამოვხსნათ  $\varphi$ -ის მიმართ. მაშინ:

$$-W_{xx} \sin 2\varphi - 2W_{xy} \cos 2\varphi + W_{yy} \sin 2\varphi = 0$$

ანუ

$$(W_{yy} - W_{xx}) \sin 2\varphi - 2W_{xy} \cos 2\varphi = 0.$$

და აქედან

$$\operatorname{tg} 2\varphi = -\frac{2W_{xy}}{W_{xx} - W_{yy}}. \quad (1.58)$$

ეს განტოლება  $\varphi$  კუთხისათვის გვაძლევს ორ მნიშვნელობას, რომლებიც ერთმანეთისაგან განსხვავდება  $\pi/2$ -ით, ვთქვათ,  $\varphi_0$  და  $\varphi_0 + \frac{\pi}{2}$ . დავუშვათ, რომ  $\varphi_0$  არის ის ამოხსნა, რომელსაც შეესაბამება სიმრუდის მაქსიმუმი, ხოლო  $R_1$  შესაბამისი რადიუსია; მეორე მთავარი კვეთისათვის, რომლის სიმრუდე მინიმალურია, სიმრუდის რადიუსი იყოს  $R_2$ . სათანადო ჩანმის შემდეგ (55) განტოლება მოგვცემს შესაბამისად:

$$\frac{1}{R_1} = -\frac{1}{g} (W_{xx} \cos^2 \varphi_0 + W_{xy} \sin 2\varphi_0 + W_{yy} \sin^2 \varphi_0) \quad (1.59)$$

$$\frac{1}{R_2} = -\frac{1}{g} (W_{xx} \sin^2 \varphi_0 - W_{xy} \sin 2\varphi_0 + W_{yy} \cos^2 \varphi_0).$$

მათი სხვაობისათვის მივიღებთ:

$$\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} = \frac{1}{g} (-W_{xx} \cos 2\varphi_0 - 2W_{xy} \sin 2\varphi_0 + W_{yy} \cos 2\varphi_0),$$

ანუ

$$\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} = \frac{1}{g} (W_{\Delta} \cos 2\varphi_0 - 2W_{xy} \sin 2\varphi_0)$$

თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ (58)-დან

$$-2W_{xy} = W_{\Delta} \operatorname{tg} 2\varphi_0,$$

მაშინ გვექნება:

$$\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} = \frac{1}{g} W_{\Delta} (\cos 2\varphi_0 + \operatorname{tg} 2\varphi_0 \sin 2\varphi_0),$$

ანუ

$$\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} = \frac{1}{g} W_{\Delta} \frac{1}{\operatorname{cosec} 2\varphi_0},$$

საიდანაც მივიღებთ

$$\cos 2\varphi_0 = \frac{W_{\Delta}}{g \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)}. \quad (1.60)$$

მარჯვენა ნაწილის მნიშვნელობა აქ ყოველთვის დადებითია, რადგან სიმრუდის ორ მთავარ რადიუსიდან  $R_1$  უმცირესია. ამიტომაც  $\cos 2\varphi_0$  გამოსახულების ნიშანი უნდა დამუხტვეს  $W_{\Delta}$ -ის ნიშანს, რითაც ისაზღვრება კვადრანტი, რომელსაც მიეკუთვნება  $\varphi_0$ .

$\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}$  სიდიდეს ზოგჯერ უწოდებენ სფერულობიდან ზედაპირის გადახრის ზომას მოცემულ წერტილში.

განვიხილოთ ახლა სიმძიმის ძალის პოტენციალის სხვა მეორე წარმობებულები. ადვილი დასანახია, რომ

$$\begin{aligned} W_{xx} &= \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial W}{\partial x} \right) = \frac{\partial g}{\partial x} \\ W_{yy} &= \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial W}{\partial y} \right) = \frac{\partial g}{\partial y} \end{aligned} \quad (1.61)$$

აქედან ჩანს, რომ ეს ორი მეორე წარმობებული გამოხატავს სიმძიმის ძალის ცულებას ჰორიზონტალურ სიბრტყეზე, ამასთან პირველი  $x$  ღერძის თანხვედენილად, რომელიც მიმართულია ჩრდილოეთისაკენ, მეორე  $y$  ღერძის თანხვედენილად, რომელიც აღმოსავლეთისაკენაა მიმართული, რის გამოც ამ წარმობებულებს სიმძიმის ძალის ჰორიზონტალური გრადიენტები ეწოდება.

დავწეროთ  $g$ -ს სრული დიფერენციალი:

$$dg = \frac{\partial g}{\partial x} dx + \frac{\partial g}{\partial y} dy + \frac{\partial g}{\partial z} dz$$

და გავაინტეგრალთ იგი ორ მოცემულ წერტილს  $(x_1, y_1, z_1)$  და  $(x_2, y_2, z_2)$  შორის. მაშინ, თუ მათი შესაბამის სიმძიმის ძალებს  $g_1$  და  $g_2$ -ით აღვნიშნავთ, გვექნება:

$$g_2 - g_1 = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial g}{\partial x} dx + \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial g}{\partial y} dy + \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial g}{\partial z} dz. \quad (1.62)$$

ცხადია, რომ აქ  $\frac{\partial g}{\partial z}$  ზემოთ დაწერილი (61) გამოსახულების ანალოგიურად

შემდეგნაირად გამოიხატება:

$$W_{zz} = \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial W}{\partial z} \right) = \frac{\partial g}{\partial z}. \quad (1.61')$$

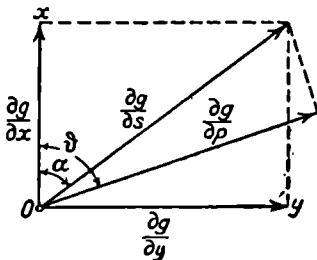
რადგანაც  $z$  ღერძი ზედაპირისადმი ნორმალის თანხედენილადაა მიმართული, ეს ტოლობა გამოსახავს იმ აზრს, რომ  $W_{zz}$  არის წარმოებული სიმძიმის ძალისა ვერტიკალთ, რის გამო მას ზოგჯერ უწოდებენ სიმძიმის ძალის ვერტიკალურ გრადიენტს.

$W_{zz}$  წარმოებულის მნიშვნელობის მონახვა შეიძლება სხვადასხვა ხერხით. განვიხილოთ ერთი მათგანი, რისთვისაც მივმართოთ (52) ტოლობას, საიდანაც დაიწერება:

$$W_{zz} = 2\omega^2 - (W_{xx} + W_{yy}), \quad (1.63)$$

აქ  $\omega$  ცნობილია, ხოლო  $W_{xx}$  და  $W_{yy}$  ისაზღვრება ქვემოთ მოყვანილ ფორმულებიდან.

წარმოვიდგინოთ  $\frac{\partial g}{\partial x}$  და  $\frac{\partial g}{\partial y}$  წარ-



ნახ. 4.

მოებულები ვექტორების სახით, რომლებიც გავლებულია მოცემული წერტილებიდან კოორდინატთა ღერძების პარალელურად, როგორც 4 ნახაზზეა ნაჩვენები. მათი გეომეტრიული ჯამი მართკუთხედის დიაგონალის სახით გვაძლევს  $\frac{\partial g}{\partial s}$  ვექ-

ტორს, რომლის თანხედენილად სიმძიმის ძალა იზრდება ყველაზე უფრო სწრაფად. ამ ვექტორს ეწოდება სრული პორიზონტალური გრადიენტი. მისი სიდიდე, როგორც ვხედავთ, ტოლი იქნება:

$$\frac{\partial g}{\partial s} = + \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} = + \sqrt{W_{xx}^2 + W_{yy}^2}. \quad (1.64)$$

კუთხე  $x$  ღერძთან, ე. ი. აზიმუტი, ისაზღვრება გამოსახულებიდან;

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\frac{\partial g}{\partial y}}{\frac{\partial g}{\partial x}} = \frac{W_{yy}}{W_{xx}}. \quad (1.65)$$

შესაბამისი კვადრანტის პოვნა არ არის ძნელი, თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ რადგანაც  $\frac{\partial g}{\partial s} > 0$ ,  $\sin \alpha$ -ს ნიშანი დაემთხვევა მრიცხველის ნიშანს,  $\cos \alpha$ -სი კი—მნიშვნელის ნიშანს. ადვილად მივიღებთ აგრეთვე  $p$  გრადიენტს ნებისმიერი მიმართულებით, რომელიც ისაზღვრება  $\theta$  აზიმუტით (იხ. ნახ.) ამ მიმართულებაზე  $\frac{\partial g}{\partial s}$ -ის  $\frac{\partial g}{\partial p}$  პროექცია ასე გამოიხატება:

$$\frac{\partial g}{\partial p} = \frac{\partial g}{\partial s} \cos(\theta - \alpha) = \frac{\partial g}{\partial s} \cos \alpha \cos \theta + \frac{\partial g}{\partial s} \sin \alpha \sin \theta,$$

ააიდანაც, თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ

$$\frac{\partial g}{\partial s} \cos \alpha = \frac{\partial g}{\partial x},$$

$$\frac{\partial g}{\partial s} \sin \alpha = \frac{\partial g}{\partial y},$$

გვექნება.

$$\frac{\partial g}{\partial p} = \frac{\partial g}{\partial x} \cos \theta + \frac{\partial g}{\partial y} \sin \theta = W_{xx} \cos \theta + W_{yy} \sin \theta. \quad (1.66)$$

$W_{xx}$  და  $W_{yy}$  წარმოებულები შეიძლება წარმოვიდგინოთ ასეც:

$$W_{xx} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial W}{\partial x} \right) = \frac{g_x}{\partial x} \quad \text{და} \quad W_{yy} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial W}{\partial y} \right) = \frac{g_y}{\partial y} \quad (1.67)$$

გამოდის, რომ  $W_{xx}$  და  $W_{yy}$  ვერტიკალთა აღებული წარმოებულებია სიმძიმის ძალის  $g_x$  და  $g_y$  მდგენელებისა  $x$  და  $y$  ღერძებით.

ვთქვათ,  $W_{xx}$  და  $W_{yy}$  არ არის ტოლი ნულისა, რაც (67)-ის მიხედვით იმას ნიშნავს, რომ  $g$  სიმძიმის ძალის მიმართულება, რომელიც კოორდინატთა სათავეში  $x$  ღერძს ემთხვევა, ამავე  $x$  ღერძით გადაადგილებისას უკვე აღარ ემთხვევა მას, რადგანაც  $g_x$  და  $g_y$  მდგენელები, რომლებიც კოორდინატთა სათავეში ნულის ტოლია, ახალ წერტილში 0, 0,  $dx$  კოორდინატებით მიიღებენ რაღაც ნამატებს, სახელდობრ,  $\frac{\partial g_x}{\partial x} dx$  და  $\frac{\partial g_y}{\partial x} dx$ , ანუ, რაც იგივეა,

$W_{xx} dx$  და  $W_{yx} dx$  შესაბამისად. სიმძიმის ძალის ის პროექცია  $xz$  სიბრტყეზე, რომელიც კოორდინატთა სათავეში  $x$  ღერძს ემთხვევა, 0, 0,  $dx$  კოორდინატებთან წერტილში ამ ღერძთან უკვე შეადგენს კუთხეს, რომელიც მისი აქამდე სიმციარის გამო შეიძლება გაუტოლოთ  $\frac{W_{xx} dx}{g}$ ; ასევე შესაბამისი კუთხე  $yx$

სიბრტყეზე იქნება  $\frac{W_{yy} dx}{g}$ -ის ტოლი. აქედან ცხადია, რომ სიმძიმის ძალის

მიმართულება მოცემულ წერტილში  $x$  ღერძთან შექმნის  $\frac{dx}{g} \sqrt{W_{xx}^2 + W_{yy}^2}$



კუთხეს. გარდა ამისა, სიბრტყე, რომელიც  $z$  ღერძზე გადის, და სიმძიმის ძალის ახალი მიმართულება მოქცეულია  $\alpha$  აზიმუტში, რომელიც ისაზღვრება (65) ტოლობით.

ფიზიკიდან ცნობილია, რომ რომელიმე ძალის ძალხაზი წარმოადგენს ხაზს, რომლის მიმართულება ემთხვევა მოქმედი ძალის მიმართულებას მოცემულ წერტილში. როგორც  $W'_{xx}$  და  $W'_{yy}$  წარმოებულთა მნიშვნელობების განხილვიდან ჩანს, სიმძიმის ძალის ძალხაზი არ წარმოადგენს სწორ ხაზს. ჩვენ შეგვიძლია ძალხაზის სიმრულე მოცემულ წერტილში და ზანამხებ სიბრტყის ზედაპირის აზიმუტი გამოვსახოთ შესაბამისად ასე:

$$\frac{1}{g} \sqrt{W'^2_{xx} + W'^2_{yy}},$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{W'_{yy}}{W'_{xx}} \quad (65')$$

### § 6. სიმძიმის ძალის პოტენციალის მეორე წარმოებულთა ნორმალური მნიშვნელობანი

ზოგიერთი მიზნისათვის საჭიროა გვექონდეს სიმძიმის ძალის პოტენციალის მეორე წარმოებულთა ნორმალური მნიშვნელობანი. ამისათვის მივიჩნით დედამიწის ფორმად ბრუნვის ელიფსოიდი და განვსაზღვროთ მისი ზედაპირის ნებისმიერი წერტილისათვის  $W'_{xx}$ ,  $W'_{yy}$  და სხვა იმ დაშვებით, რომ ადგილობრივი ანომალიები გამორიცხულია. ჩვენ ვიცით, რომ სფეროიდის მთავარი კვეთები თანხვედრა შესაბამისად მერიდიანსა და პირველ ვერტიკალს. ამიტომ მათი აზიმუტები  $\varphi_1 = 0$  და  $\varphi_2 = 90^\circ$  (58) განტოლებაში ჩასმის შედეგად მოგვეცემს:

$$W_{zy} = 0 \quad (1.68)$$

სფეროიდისათვის მერიდიანის სიმრუდის  $R_1$  რადიუსი გეოდეზიაში აღინიშნება  $M$ -ით, ხოლო მერიდიანისადმი პერპენდიკულარულ სფეროიდის ნორმალური განკვეთის  $R_2$  რადიუსი —  $N$ -ით; გარდა ამისა, შევცვალოთ სიმძიმის ძალის მნიშვნელობა  $g$  მისი ნორმალური მნიშვნელობით  $\gamma_0$  მაშინ (56), (57) და (60) ასე გადაიწერება:

$$W_{xx} = -\frac{\gamma_0}{M}; \quad (1.69)$$

$$W_{yy} = -\frac{\gamma_0}{N}; \quad (1.70)$$

$$W_{\Delta} = \gamma_0 \left( \frac{1}{M} - \frac{1}{N} \right) \quad (1.71)$$

ახლა (63) ტოლობა შემდეგ სახეს მიიღებს:

$$W'_{xx} = 2\omega^2 + \gamma_0 \left( \frac{1}{M} + \frac{1}{N} \right) \quad (1.72)$$

მივმართოთ  $x$  ღერძი ჩრდილოეთისაკენ,  $y$  ღერძი კი აღმოსავლეთისაკენ. მაშინ გვექნება:

$$dx = M d\varphi \text{ და } dy = N \cos\varphi d\lambda,$$

სადაც  $\varphi$  და  $\lambda$  განედი და გრძედია მოცემული წერტილისა. ამიტომ (61) ახლა ასე დაიწერება:

$$W_{xx} = \frac{1}{M} \frac{\partial g}{\partial \varphi} \quad - \quad (1.73)$$

$$W_{yy} = -\frac{1}{N \cos\varphi} \frac{\partial g}{\partial \lambda}. \quad (1.74)$$

$g$  შევცვალოთ  $\gamma_0$ -ით და მხედველობაში მივიღოთ ტოლობა

$$\gamma_0 = g_0 (1 + \beta \sin^2 \varphi),$$

რის შემდეგ გვექნება:

$$\frac{\partial g}{\partial \varphi} = \frac{\partial \gamma_0}{\partial \varphi} = \beta g_0 \sin 2\varphi.$$

რადგანაც გეოიდისათვის სიმძიმის ძალა არ არის გრძედზე დამოკიდებული, ამიტომ

$$\frac{\partial g}{\partial \lambda} = \frac{\partial \gamma_0}{\partial \lambda} = 0.$$

ამ მნიშვნელობათა (73) და (74)-ში ჩასმის შემდეგ მივიღებთ:

$$W_{xx} = \frac{\beta g_0}{M} \sin 2\varphi \quad (1.73')$$

$$W_{yy} = 0 \quad (1.74')$$

ჩვენ ვხედავთ, რომ ზემოთ გამოყვანილი ფორმულები საშუალებას გვაძლევს მოვნახოთ რიცხვითი სიდიდე ყველა ნორმალურ მნიშვნელობისა სიმძიმის ძალის პოტენციალის მეორე წარმოებულთა დედამიწის სფეროიდის ზედაპირზე. ამისათვის საკმარისია აღნიშნულ ფორმულებში ჩავსვათ რიცხვითი მნიშვნელობები იქ შემავალ სიდიდეებისათვის:  $\omega^2$ ,  $g_0$ ,  $\beta$ ,  $a$  და  $e$ -სათვის.

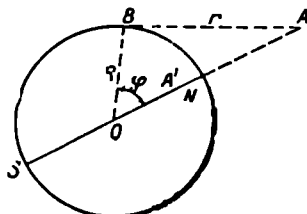
## თ ა ვ ი II

### მიზიდულობის ძალის პოტენციალის ზოგადი შეფასება

§ 1. მატერიალური სფერული შრის მიერ გარეგანი წერტილის მიზიდვა

ნახაზზე 5 წარმოდგენილია სფერული შრე, რომლის  $O$  ცენტრში მოთავსებულია სფერულ კოორდინატთა სათავე. პოლარული ღერძი გადის ერთეულადი მასის მქონე  $A$  წერტილში, რომელიც განიკედის მიზიდულობას სფერულ შრიდან. იყოს  $B$  ნებისმიერი წერტილი მოცემული სფერული შრისა  $\varphi$  პოლარული მანძილით,  $\lambda$  გრძედით და  $R$  რადიუსი-ვექტორით, რომელიც, ცხადია, ჩვენი სფეროს რადიუსის ტოლია. იყოს  $dm$  ელემენტარული მასა  $B$  წერტილისა და  $r$  მისი მანძილი  $A$  წერტილიდან. მაშინ მიზიდულობის პოტენციალი  $B$  წერტილში მოქცეულ  $dm$  მასისა  $A$  წერტილში მოქცეულ ერთეულად მასაზე ასე დაიწერება:

$$v = f \frac{dm}{r} \quad (2.1)$$



ნახ. 5.

მთელი სფერული შრის პოტენციალისათვის იმავე ერთეულად მასაზე  $A$  წერტილში ჩვენ შეგვიძლია დაწეროთ:

$$V = f \int \frac{dm}{r}, \quad (2.2)$$

სადაც ინტეგრაცია ვრცელდება სფეროს მთელ ზედაპირზე. ადვილი დასანახია, რომ

$$dm = \sigma d\sigma,$$

სადაც  $\sigma$  ზედაპირული სიმკვრივეა ჩვენი მატერიალური შრისა, ე. ი. ნივთიერების რაოდენობაა ზედაპირის ერთეულზე და  $d\sigma$  სფერული ზედაპირის ელემენტია. როგორც ცნობილია,  $d\sigma$  გამოიხატება ნამრავლით მერიდიანის ელემენტისა პარალელის ელემენტზე, რომლებიც შეიძლება გავლებულ იქნას ჩვენს სფეროზე. პირველი მათგანი ტოლია  $Rd\varphi$ -ისა, მეორე კი  $R \sin\varphi d\lambda$ -სი, რადგანაც  $R \sin\varphi$  რადიუსია იმ პარალელისა, რომელიც შეესაბამება  $\varphi$  პოლარულ მანძილს. ამრიგად, ჩვენ ახლა შეგვიძლია დაწეროთ:

$$dm = \delta R^2 \sin \varphi d\varphi d\lambda. \quad (2.3)$$

AOB სამკუთხედიდან

$$r^2 = R^2 + \rho^2 - 2R\rho \cos \varphi, \quad (2.4)$$

სადაც

$$\rho = OA.$$

(2) გამოსახულებაში  $dm$ -ის მნიშვნელობის (3)-დან ჩასმა მოგვცემს:

$$V = f \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \delta \frac{R^2}{r} \sin \varphi d\varphi d\lambda.$$

ინტეგრაციის ზღვრები აქ გასაგებია, თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ სფეროს მთელი ზედაპირისათვის ფ პოლარული მანძილი იცვლება ჩრდილო და სამხრეთ პოლუსებს შორის, ე. ი.  $O$ -დან  $\pi$ -მდე,  $\lambda$  კი—მთელ გრძედზე, ე. ი.  $O$ -დან  $2\pi$ -მდე. თუ სფერულ შრეს ერთგვაროვნად მივიჩნევთ, ე. ი. ბ-მუდმივად ჩავთვლით, მაშინ შეიძლება. მისი გატანა ინტეგრალის ნიშნის გარეთ და დაიწერება:

$$V = 2\pi f \delta \int_0^{\pi} \frac{R^2}{r} \sin \varphi d\varphi. \quad (2.5)$$

ამ ინტეგრალის გამოსათვლელად მივიჩნიოთ  $r$  ცვალებადად. მაშინ (4) განტოლებიდან გადიფერენციალებით მივიღებთ:

$$r dr = R \rho \sin \varphi d\varphi,$$

საიდანაც:

$$R^2 \sin \varphi d\varphi = \frac{r R}{\rho} dr.$$

ამ გამოსახულების (5)-ში ჩასმა გვაძლევს:

$$V = 2\pi f \delta \int_{\rho-R}^{\rho+R} \frac{R}{\rho} dr. \quad (2.5')$$

ინტეგრაციის საზღვრები მოინახება (4) განტოლებიდან, თუ  $\varphi$ -ს გავუტოლებთ  $O$ -სა და  $\pi$ -ს. როგორც ვხედავთ,  $\varphi = 0$  მოგვცემს ორ ამოხსნას, რის გამო საკითხის სწორი გადაჭრისათვის აუცილებელია მივმართოთ ნახაზს და ვიქონიოთ მხედველობაში, რომ ინტეგრაცია იწარმოებს  $N$  ჩრდილო პოლუსიდან, რომელიც  $A$  წერტილიდან დაშორებულია  $\rho - R$  მანძილით,  $S$  სამხრეთ პოლუსამდე, რომლისთვისაც შესაბამისი მანძილი  $\rho + R$ -ის ტოლია. (5') გამოსახულებაში  $\frac{R}{\rho}$  მუდმივი სიდიდეა, რის გამო შეიძლება მისი ინტეგრალის ნიშნის გარეთ გატანა, რაც მოგვცემს:

$$V = 2\pi f \delta \frac{R}{\rho} \int_{\rho-R}^{\rho+R} dr = 4\pi f \delta \frac{R^2}{\rho} \quad (2.5'')$$

მთელი სფერული შრის მასა  $m$  გამოიხატება ფორმულით:

$$m = 4\pi R^2 \delta,$$

რომლის (5'')-ში ჩასმა მოგვცემს:

$$V = f \frac{m}{\rho}. \quad (2.5'')$$

აქედან ჩანს, რომ ერთგვაროვანი სფერული შრის მიზიდულობის პოტენციალი გარეგან წერტილზე უდრის ისეთი მატერიალური წერტილის მიზიდულობის პოტენციალს, რომლის მასა ტოლია ამ შრის მასისა და მოთავსებულია ამავე შრის ცენტრში.

მოვნახოთ ახლა ჩვენი სფერული შრის მიზიდულობის ძალა  $A$  წერტილზე. ეს ძალა, სიმეტრიის მოსაზრებათა საფუძველზე, ცხადია, მიმართულია  $AO$  სწორი ხაზით, რომელზედაც იზომება მანძილი  $\rho$ . თუ გავიხსენებთ პოტენციალური ფუნქციის ძირითად თვისებას, რომ პოტენციალური ფუნქციის წარმოებული ნებისმიერ მიმართულებით უდრის იმ ძალის მდგენელს, რომელიც ამ მიმართულებით მოქმედებს, მაშინ გვექნება:

$$F = \frac{dV}{d\rho},$$

რაც (5''') მიხედვით ასე დაიწერება:

$$F = -f \frac{m}{\rho^2}. \quad (2.6)$$

ჩვენ ეხედავთ, რომ სწორედ ასევე გამოიხატება მიზიდულობის ძალა  $m$  მასის მქონე მატერიალური წერტილისა  $\rho$  მანძილზე.

აქედან დავასკვნით, რომ ერთგვაროვანი სფერული შრე გარეგან წერტილს მიიზიდავს ისე, თითქოს მთელი მისი მასა თავმოყრილია მის ცენტრში. სასარგებლოა ეციოდეთ, რომ

$$\frac{d^2V}{d\rho^2} = \frac{d}{d\rho} \left( -f \frac{m}{\rho^2} \right) = 2f \frac{m}{\rho^3}. \quad (2.7)$$

## § 2. მატერიალური სფერული შრის მიერ შინაგანი წერტილის მიზიდვა

გადავიდეთ ახლა იმ შემთხვევის განხილვაზე, როდესაც მისაზიდი წერტილი სფერული შრის შიგნითაა. წინა პარაგრაფში ჩატარებულ მსჯელობათა საფუძველზე არ არის ძნელი დავწმუნდეთ იმაში, რომ ამ შემთხვევისათვისაც ძალაში რჩება განტოლება (5), საიდანაც, თუ ინტეგრაციის ცვლადად  $r$ -ს მივიჩნევთ, მივიღებთ (5') განტოლებას, რომელშიაც ინტეგრაციის ქვედა საზღვარი სხვა იქნება. მართლაცდა, როგორც ნახაზი 5-დან ჩანს, შინაგანი  $A'$  წერტილის მანძილი  $N$  პოლუსიდან უდრის

$$ON - OA' = R - \rho,$$

რის გამო

$$V = 2\pi f \delta \int \frac{R+\rho}{R-\rho} \frac{R}{\rho} dr,$$

საიდანაც:

$$V = 4\pi f \delta R. \quad (2.8)$$

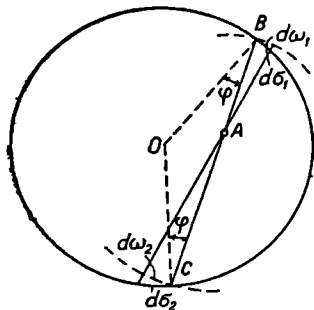
თუ ამ ტოლობაში  $m$  მასას შემოვიტანთ მსგავსად იმისა, როგორც წინა პარაგრაფში, მივიღებთ:

$$V = f \frac{m}{R}. \quad (2.8')$$

სფერული შრისათვის მოცემული მასითა და რადიუსით ეს გამოსახულება მულშივია და არ არის დამოკიდებული შინაგანი წერტილის მდებარეობაზე, რაც  $\rho$  მანძილით ისაზღვრება. (8')-ის დიფერენცირება  $\rho$ -თი მოგვცემს მიზიდულობის ძალას

$$F = \frac{dV}{d\rho} = 0,$$

ე. ი. ერთგვაროვანი სფერული შრე შინაგან წერტილს არ მიიზიდავს. ეს შესანიშნავი დასკვნა შეიძლება ერთბაშად კაცს ჰოჩენოს ცოტა არ იყოს ახირობულად, მაგრამ გეომეტრიული გზით ამ დასკვნის მიღება უფრო გასაგები ხდება.



ნახ. 6.

მართლაც,  $A$  იყოს შინაგანი წერტილი სფერული შრისა (ნახ. 6) და ჩვენი სფერული შრის ზედაპირზე ავიღოთ  $d\sigma_1$  ელემენტი, რომელიც, ვთქვათ, შემოფარგლულია ნებისმიერი ფორმის კონტურით. გავავლოთ ამ კონტურის ყველა წერტილიდან სწორი ხაზები  $A$  წერტილზე და გავაგრძელოთ ისინი ჩვენი შრის გადაჭრამდე, სადაც, ცხადია, მივიღებთ  $d\sigma_2$  ზედაპირის მეორე ელემენტს. გამოდის, რომ  $d\sigma_1$  და  $d\sigma_2$  ელემენტები სფერულ შრეზე მიიღება იმ ელემენტარულ კონუსების ზედაპირების გადაკვეთის შედეგად,

რომელთაც საერთო წვერი აქვთ  $A$  წერტილში. ჩვენ ვხედავთ, რომ  $A$  წერტილს  $d\sigma_1$  და  $d\sigma_2$  ელემენტები მიიზიდავენ შესაბამისად  $AB$  და  $AC$  მიმართულებით, ე. ი. ერთ სწორ ხაზით, რაც საკვებით დასაშვებია აღნიშნულ ელემენტთა სიმცირის გამო. ამიტომ შეიძლება დაიწეროს:

$$F_1 = f \delta \frac{d\sigma_1}{AB^2} \quad \text{და} \quad F_2 = f \delta \frac{d\sigma_2}{AC^2},$$

სადაც  $F_1$  და  $F_2$  მიზიდულობის ძალაა  $d\sigma_1$  და  $d\sigma_2$  ელემენტებისათვის შესაბამისად. ეს ძალები რომ ერთმანეთის საწინააღმდეგოთაა მიმართული თავის.

თავად ნათელია, რის გამო საკმარისია დაეამტკიცოთ მათი თანატოლობა სიდიდის მიხედვით. გავალოთ ამისათვის  $B$  წერტილზე დამხმარე სფერო, რომლის ცენტრი  $A$  წერტილია და, ვთქვათ, რომ ჩვენი ელემენტარული კონუსი ამ სფეროს ზედაპირიდან ამოკვეთს  $d\omega_1$  ელემენტს, რომელიც წარმოადგენს  $d\sigma_1$  ელემენტის ორთოგონალურ პროექციას, რადგანაც კონუსის მსახველები დამხმარე სფეროს რადიუსებს წარმოადგენენ. აქედან ცხადია, რომ

$$d\omega_1 = d\sigma_1 \cos \varphi,$$

სადაც  $\varphi$  ის კუთხეა, რომელიც მოქცეულია ჩვენი ორივე სფეროს ნორმალთა შორის  $B$  წერტილში, ე. ი.  $\angle OBA$  ტოლია. ახლა იმავე  $A$  წერტილიდან გავალოთ მეორე დამხმარე სფერო  $C$  წერტილზე, რის შემდეგ საეცებით ანალოგიური მსჯელობით შეგვიძლია დავწეროთ, რომ

$$d\omega_2 = d\sigma_2 \cos \varphi,$$

რადგანაც  $CO$  და  $CA$  ნორმალებს შორის მოქცეული კუთხე ტოლია იმავე  $\varphi$ -სა, რომელიც ფუძესთან მდებარე კუთხეა  $OBC$  ტოლფერდა სამკუთხედისა. თუ  $d\sigma_1$  და  $d\sigma_2$  ელემენტებს  $d\omega_1$  და  $d\omega_2$  პროექციებით შევცვლით,  $F_1$  და  $F_2$  ძალებისათვის მივიღებთ:

$$F_1 = f \int \frac{d\omega_1}{AB^2 \cos \varphi} \text{ და } F_2 = f \int \frac{d\omega_2}{AC^2 \cos \varphi}. \quad (2.9)$$

მაგრამ დამხმარე სფეროების ზედაპირთა ელემენტები ერთმანეთს ხომ შეეფარდებიან, როგორც მათი რადიუსების კვადრატები, ე. ი.

$$\frac{d\omega_1}{d\omega_2} = \frac{AB^2}{AC^2}$$

ან

$$\frac{d\omega_1}{AB^2} = \frac{d\omega_2}{AC^2}.$$

ამ ტოლობის შედარება (9) ტოლობებთან გვარწმუნებს, რომ

$$F_1 = F_2, \quad (2.9')$$

რაც უნდა დაგვემტკიცებინა. ჩვენ ვხედავთ, რომ ჩვენი სფერული შრის ყოველი ელემენტის მიერ გამოწვეული მიზიდულობა გაბათილებული იქნება საწინააღმდეგო ელემენტის მიზიდულობით, რის გამო, ცხადია, სფერული შრის შიგნით მოთავსებული წერტილი მიზიდულობის არაეითარ მოქმედებას არ განიცდის.

### § 8. მიზიდულობა მატერიალური სფეროს მიერ

განვიხილოთ მიზიდულობა სასრულო სისქის შრის მიერ და შემდეგ მისგან გადავადეთ სრულ სფეროზე. ასეთი შრე, რა თქმა უნდა, შეიძლება განვიხილოთ, როგორც უსასრულოდ თხელ კონცენტრულ შრეების უსასრულო რიცხვისა. შემოვიღოთ მოცულობითი სიმკვრივისათვის აღნიშვნა  $\rho'$

და მოენახოთ დამოკიდებულება ამ უკანასკნელსა და ზედაპირულ ზ სიმკვრივეს შორის. ზედაპირული სიმკვრივე, როგორც ვიცით, არის მასის რაოდენობა, რომელიც მოდის ზედაპირის ერთეულზე, რის გამო

$$\delta = \frac{dm}{d\sigma},$$

სადაც  $dm$  მასის ელემენტი, რომელიც ზედაპირის  $d\sigma$  ელემენტზე მოდის. როგორც ვიცით,

$$\delta' = \frac{dm}{d\tau},$$

სადაც  $d\tau$ , როგორც მოცულობის ელემენტი, ტოლია  $d\sigma dR$ , რადგანაც  $dR$  სფერული შრის სისქეა. ამიტომაც

$$dm = \delta d\sigma = \delta' d\sigma dR,$$

ანუ

$$\delta = \delta' \cdot dR.$$

ჩავსვათ  $\delta$ -ს ეს მნიშვნელობა (5'')-ში და ჩავატაროთ ინტეგრაცია  $R$ -ით სფერული შრის შინაგანი ზედაპირის  $R_1$  რადიუსისა და გარეგანი ზედაპირის  $R$  რადიუსის ფარგლებში. მაშინ გვექნება:

$$V = 4\pi f \frac{\delta'}{\rho} \int_{R_1}^R R^2 dR = \frac{4}{3} \pi f \frac{\delta'}{\rho} (R^3 - R_1^3). \quad (2.10)$$

ამ ფორმულაში სფერული შრის მასის

$$M = \frac{4}{3} \pi (R^3 - R_1^3) \delta'$$

ჩასმის შემდეგ მივიღებთ:

$$V = f \frac{M}{\rho}. \quad (2.10')$$

ეს გამოსახულება თანხვედბა წინანდელს და, რომ ის გამოსადეგი იყოს სრული სფეროსათვის, საჭიროა  $R_1 = 0$ . ცხადია, მაშინ

$$V = \frac{4}{3} \pi f \delta' \frac{R^3}{\rho}, \quad (2.10'')$$

და, თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ

$$M = \frac{4}{3} \pi R^3 \delta',$$

ჩვენ კვლავ გვექნება (10') პოტენცილისათვის. ადვილი დასანახია, რომ ეს ფორმულა დარჩება ძალაში მაშინაც, როდესაც სასრულო სისქის სფერული შრე ან სფერო არაა ერთგვაროვანი, მაგრამ შედგება ერთგვაროვანი კონ-



ცენტრული შრეებიდან, ე. ი. სიმკვრივე ფუნქციაა მხოლოდ მანძილისა ცენტრიდან და არა მიმართულებისა.

ამრიგად, გარეგან წერტილზე მიზიდულობის ძალა სასრულო სისქის შრის ან სფეროსი გამოიხატება ისევე, როგორც წინათ, ე. ი. ისინი მიიზიდავენ ისე, თითქოს მთელი მათი მასა მათ ცენტრშია მოქცეული. მეორე წარმოებულისათვის აქაც კვლავ მივიღებთ (7) ფორმულას.

ვნახოთ ახლა, რას მივიღებთ, როდესაც  $\rho$ -საზიდი წერტილი იქნება თვით შრეში ან სფეროს შიგნით. გაეავლოთ მოცემულ  $A$  წერტილზე, როგორც 7 ნახაზზეა ნაჩვენები, კონცენტრული სფერო, რომელიც მთელ მასას გაყოფს ორ ნაწილად: ერთი მათგანია შრე  $S_1$ , რომლისათვის  $A$  წერტილი შინაგანია, მეორე კი  $S_2$  შრეა, რომლისათვის  $A$  წერტილი გარეგანია. როგორც ვიცით,  $S_1$  სრულიად არ იზიდავს  $A$  წერტილს, რომელიც მისთვის შინაგანია. შემოვიღოთ  $S_1$  და  $S_2$  შრეების შესაბამისი პოტენციალურ ფუნქციებისათვის აღნიშვნები  $V_1$  და  $V_2$ . მაშინ, თუ მთელი შრის პოტენციალს  $V$ -თი აღვნიშნავთ, გვექნება:

$$V = V_1 + V_2.$$

მაგრამ, თანახმად წინა პარაგრაფის (8)-ისა,

$$V_1 = 4\pi f \delta' \int_{\rho}^R R dR = 2\pi f \delta' (R^2 - \rho^2),$$

ხოლო (10)-ის თანახმად

$$V_2 = \frac{4}{3} \pi f \frac{\delta'}{\rho} (\rho^3 - R_1^3),$$

რის შემდეგ დაიწერება:

$$V = \frac{2}{3} \pi f \delta' \left( 3R^2 - \rho^2 - 2 \frac{R_1^3}{\rho} \right),$$

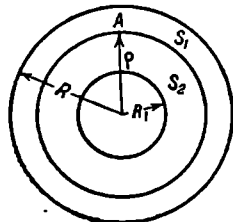
საიდანაც  $R_1 = 0$  შემთხვევისათვის, ე. ი. სფეროსათვის

$$V = \frac{2}{3} \pi f \delta' (3R^2 - \rho^2).$$

აქედან

$$F = \frac{dV}{d\rho} = -\frac{4}{3} \pi f \delta' \rho. \quad (2.11)$$

ამ ფორმულიდან ჩანს, რომ ერთგვაროვანი სფეროს შიგნით მიზიდულობა პროპორციულია მანძილისა ცენტრამდე. თუ  $\rho = 0$ , მაშინ  $F = 0$ , რაც იმას ნიშნავს, რომ ცენტრში მიზიდულობის ძალა ნულის ტოლია. მართლაც,



ნახ. 7.

ცენტრი იმყოფება ისეთ თანატოლ ძალთა მოქმედების ქვეშ, რომლებიც წყვილ-წყვილად აბათილებენ ერთმანეთს.

(11) დამოკიდებულების  $\rho$ -თი გადიფერენციალება მოგვცემს:

$$\frac{d^2V}{d\rho^2} = -\frac{4}{3} \pi f \delta',$$

რომელიც მუდმივ სიდიდეს წარმოადგენს და არ არის  $A$  წერტილის მდებარეობაზე დამოკიდებული, სანამ ეს უკანასკნელი სფეროს შიგნითაა მოქცეული.

შევადაროთ ზემოთ მიღებული ფორმულები ერთმანეთს.

მისაზიდი წერტილი  $\rho$  მანძილზეა ცენტრიდან:

1) სფეროს გარეთ:

$$V = \frac{4}{3} \pi f \delta' \frac{R^3}{\rho},$$

$$F = \frac{dV}{d\rho} = -\frac{4}{3} \pi f \delta' \frac{R^3}{\rho^2},$$

$$\frac{d^2V}{d\rho^2} = \frac{8}{3} \pi f \delta' \frac{R^3}{\rho^3}.$$

2) სფეროს შიგნით:

$$V = \frac{2}{3} \pi f \delta' (3R^2 - \rho^2),$$

$$F = \frac{dV}{d\rho} = -\frac{4}{3} \pi f \delta' \rho,$$

$$\frac{d^2V}{d\rho^2} = -\frac{4}{3} \pi f \delta'.$$

გამოვიყენოთ ეს ფორმულები იმ შემთხვევისათვის, როდესაც მისაზიდი წერტილი ზედვება სფეროს ზედაპირზე, ე. ი.  $\rho = R$ . მაშინ 1) და 2) ფორმულებიდან მივიღებთ:

$$V = \frac{4}{3} \pi f \delta' R^2.$$

როგორც ვხედავთ, სფეროს ზედაპირზე პოტენციალი ისაზღვრება ცალსახად და თვითონ პოტენციალური ფუნქცია უწყვეტად იცვლება ზედაპირზე გასვლისას.

სიმძიმის ძალისათვის ორივე ფორმულა მოგვცემს:

$$F = \frac{dV}{d\rho} = -\frac{4}{3} \pi f \delta' R,$$

საიდანაც ჩანს, რომ მიზიდულობის ძალა და პოტენციალის პირველი წარმოებულები ისაზღვრება ცალსახად და იცვლება უწყვეტად. რაც შეეხება პოტენციალის მეორე წარმოებულს 1)-დან და 2)-დან გვექნება შესაბამისად:

$$\frac{d^2 V}{d\rho^2} = \frac{8}{3} \pi f \delta'$$

$$\frac{d^2 V}{d\rho^2} = -\frac{4}{3} \pi f \delta'.$$

ამ ფორმულების შედარება გვიმტკიცებს, რომ პოტენციალური ფუნქციის მეორე წარმოებული წყვეტას განიკდის სფეროს ზედაპირზე გაელისას და იცვლება  $\mp 4\pi f \delta'$  ტოლი ნახტომით მიმართულების მიხედვით: გარედან შიგნით თუ შებრუნებით. ამ გარემოებას აქვს პრაქტიკული მნიშვნელობა, რადგან ის წარმოადგენს მიზიდულობის პოტენციალის ერთ ერთ ძირითად თვისებას.

§ 4. პოტენციალური ფუნქციის მეორე დიფერენციალური პარამეტრი მიზიდულობის პოტენციალური ფუნქციისათვის

$$V = f \int \frac{dm}{r},$$

რომელიც, ვთქვათ, ფუნქციაა  $x, y, z$  მართკუთხა კოორდინატებისა. შევადგინოთ მეორე წარმოებულების ჯამი

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}.$$

იყოს  $r$  მანძილი ორ  $A(x, y, z)$  და  $B(x', y', z')$  წერტილს შორის. მაშინ, როგორც ვიცით, შეიძლება დაიწეროს:

$$r^2 = (x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z' - z)^2,$$

$$\frac{\partial r}{\partial x} = -\frac{x' - x}{r}.$$

გარდა ამისა, როგორც ვიცით,

$$\frac{\partial V}{\partial x} = F_x = f \int \frac{x' - x}{r^3} dm,$$

$$\frac{\partial V}{\partial y} = F_y = f \int \frac{y' - y}{r^3} dm,$$

$$\frac{\partial V}{\partial z} = F_z = f \int \frac{z' - z}{r^3} dm.$$

ამ ფორმულების გადიფერენციალება მოგვცემს:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right) = -f \int \left[ \frac{1}{r^3} + 3 \frac{x' - x}{r^5} \frac{dr}{dx} \right] dm =$$

$$= -f \int \left[ \frac{1}{r^3} - 3 \frac{(x' - x)^2}{r^5} \right] dm, \quad (2.12)$$

და ასევე

$$\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -f \int \left[ \frac{1}{r^3} - 3 \frac{(y'-y)^2}{r^5} \right] dm,$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -f \int \left[ \frac{1}{r^3} - 3 \frac{(z'-z)^2}{r^5} \right] dm.$$

აქედან ადვილი შესამოწმებელია, რომ

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0. \quad (2.13)$$

ეს არის ეგრეთ წოდებული ლაპლასის განტოლება, რომელსაც სიმბოლურად ზნირად ასეც წერენ:

$$\Delta_2 V = 0.$$

ეს უკანასკნელი გამოსახულება ცნობილია მეორე დიფერენციალური პარამეტრის სახელწოდებით.

განტოლება (13) მართებულია მხოლოდ სივრცის იმ წერტილებისათვის, რომლებიც არ მიეკუთვნება მიმზიდველ მასებს, რადგანაც მაშინ სხვაობები  $x'-x$ ,  $y'-y$ ,  $z'-z$  და მასთან ერთად  $r$  მიისწრაფვის ნულისაკენ, რის გამო (12)-ში ინტეგრალქვეშა ფუნქცია ზღვარში იქნება  $\frac{0}{0}$ -ის ტოლი.

განუსაზღვრელობის აცილების მიზნით, მთლიანად სხეულის შიგნით მოქცეულ მისაზიდ წერტილის გარშემო შემოვწეროთ სფერო სასრულო რადიუსით, რომელიც, ვთქვათ, იმდენად მცირეა, რომ ამ სფეროს შიგნით სიმკვრივე მუდმივად შეიძლება მივიჩნიოთ. იყოს  $V_1$  მთელი სხეულის მიზიდულობის პოტენციალი ჩვენი სფეროს გამოკლებით, რომლის მიზიდულობის პოტენციალი მისაზიდ წერტილზე იყოს  $V_2$ . მაშინ მთელი სხეულისათვის გვექნება

$$V = V_1 + V_2,$$

და აქედან:

$$\Delta_2 V = \Delta_2 V_1 + \Delta_2 V_2, \quad (2.14)$$

რადგანაც  $V_1$ -სათვის  $r$  არსად არ იქნება ნულის ტოლი, ჩვენ შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\Delta_2 V_1 = 0.$$

დავწეროთ გამოსახულება სფეროს მიზიდულობის პოტენციალისა შინაგან წერტილზე

$$V_2 = \frac{2}{3} \pi f \delta' (3R^2 - \rho^2),$$

რომლისათვის გვექნება:

$$\frac{\partial V_2}{\partial x} = -\frac{4}{3} \pi f \delta' \rho \frac{\partial \rho}{\partial x} = -\frac{4}{3} \pi f \delta' (x-x'),$$

რადგანაც, როგორც ვიცით,

$$\rho^2 = (x'-x)^2 + (y'-y)^2 + (z'-z)^2,$$

საიდანაც

$$\rho \frac{\partial \rho}{\partial x} = x - x'$$

განმეორებითი გადიფერენციალების შემდეგ მივიღებთ:

$$\frac{\partial^2 V_2}{\partial x^2} = -\frac{4}{3} \pi f \delta'$$

როგორც ვხედავთ, ამ ტოლობის მარჯვენა ნაწილი არ არის  $x$ -ზე დამოკიდებული, რის გამო

$$\frac{\partial^2 V_2}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 V_2}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 V_2}{\partial z^2} = -\frac{4}{3} \pi f \delta'$$

აქედან:

$$\frac{\partial^2 V_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_2}{\partial z^2} = \Delta_2 V_2 = -4\pi f \delta'$$

ამ გამოსახულების  $\Delta_2 V_2$ -ს მაგიერ (14)-ში ჩასმა მოგვცემს

$$\Delta_2 V = -4\pi f \delta'. \quad (2.15)$$

ეს არის, ეგრეთ წოდებული, პუასონის განტოლება, რომელიც, ცხადია, უფრო ზოგადია; ვიდრე ლაპლასის განტოლება, რადგანაც ეს უკანასკნელი მიიღება (15)-დან დაშვებით  $\delta' = 0$ .

ჩვენ ზემოთ ვნახეთ, რომ მიზიდულობის პოტენციალის მეორე წარმობებულები ნახტომისებურად იცვლება, როდესაც მისაზიდი წერტილი გაივლას სხეულის ზედაპირში. ეს გარემოება, როგორც ესეცაა ვნახეთ, გამოვლინდა აგრეთვე. (15) განტოლებაში.

როგორც, ვიცით განტოლება

$$\nabla = \text{const}$$

საზღვრავს მიზიდულობის ძალის დონებრივ ზედაპირს. მარცხენა ნაწილის პირველი წარმობებულები გვაძლევს ნორმალის მიმართულებას და რადგანაც ეს წარმობებულები ყველგან უწყვეტი, სასრული და ცალსახაა, ამიტომ, ცხადია, ასეთივე თვისებები გააჩნია დონებრივი ზედაპირისადმი ნორმალის მიმართულებასაც. მეორე წარმობებულებს, რომლებითაც ზედაპირის სიმრუდე ისაზღვრება, გააჩნია წყვეტა სიმკვრივისთან დაკავშირებით. აქედან მიზიდულობის ძალის დონებრივი ზედაპირის სიმრუდე ნახტომისებურად იცვლება იქ, სადაც ეს ზედაპირი გადის წყვეტილოვანი სიმკვრივის ადგილზე, კერძოდ, სხეულის ფიზიკურ ზედაპირზე.

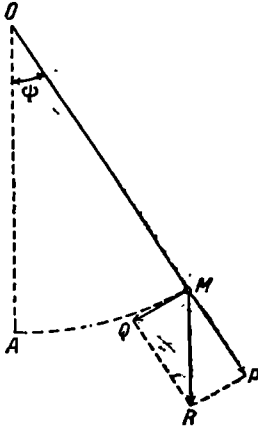
ასეთივე თვისება გააჩნია გეოიდის ზედაპირს, რომელიც ისაზღვრება სიმძიმის ძალის პოტენციალით. სიმძიმის ძალა, როგორც ვიცით, წარმოადგენს მიზიდულებისა და ცენტრდამშორი ძალების ჯამს, რომელთაგან თითოეულს აქვს პოტენციალი. ამიტომაც სავსებით ბუნებრივია გეოიდის ზედაპირისათვის ზემოაღნიშნული თვისება. მართლაც, როგორც ცნობილია, გეოიდის სიმრუდე ნახტომისებურად იცვლება ოკეანეებისა და ზღვების ნაპირებზე, იქ, სადაც გეოიდი შეიჭრება ხმელეთის შიგნით, და აგრეთვე ხმელეთის ქვეშ; გარდა ამისა მაშინაც, როდესაც გეოიდი წააწყდება სხვადასხვა სიმკვრივის ქანებს. ცხადია, რომ თვით ოკეანეებზე გეოიდის ზედაპირს ასეთი უსწორმასწორობა არ ახასიათებს.

### თ ა ვ ი III

#### სიმიძიძის ძალის აბსოლუტური განსაზღვრა

##### § 1. მათემატიკური საქანის თეორია

საქანი წარმოადგენს უველაზე მარტივს, მოხერხებულ და ზუსტ ხელსაწყოს სიმიძიძის ძალის აბსოლუტური განსაზღვრისათვის, რის გამო მას დღემდე იყენებენ ამ მიზნისათვის. როგორც დაინახეთ, საქანს, სხვა ხელსაწყობთან ერთად, იყენებენ აგრეთვე სიმიძიძის ძალის შეფარებითი განსაზღვრის მიზნითაც.



ნახ. 8.

სანამ სათანადო საქანიან აპარატების აღწერას შევეუდგებოდეთ, განვიხილოთ მათემატიკური საქანის თეორია.

ვთქვათ,  $M$  არის მძიმე მატერიალური წერტილი ერთეულადი მასით, რომელიც დაკიდულია არაუქიმად და არაწონად  $OM$  ძაფზე, ე. ი. ჩვენ გვაქვს მათემატიკური საქანი. ეს საქანი, რომლის სიგრძე  $l$ -ის ტოლია, თავიდან გადახრილი იყო თავის წონასწორობის  $OA$  მდგომარეობიდან  $\alpha$  კუთხით, რის შემდეგ ის თავისანაბრად იყო მიტოვებული. რომელიც  $l$  დროის მომენტში საქანს უკავია მდებარეობა  $OM$ , რომელიც  $OA$ -სთან ქმნის  $\psi$  კუთხეს; ამ უკანასკნელს გადახრის კუთხე ანუ ელონგაცია ეწოდება. ელონგაციის მაქსიმალური მნიშვნელობა, ცხადია, იქნება  $\alpha$ , რომელსაც, როგორც ცნობილია, ამპლიტუდა ეწოდება.  $M$  წერტილზე მოქმედებს სიმიძიძის ძალის აჩქარება  $g$ , რომელიც ნახაზე აღნიშნულია  $MR$  ვექტორით; მისი მდგენელებია  $MP$  და  $MQ$  ვექტორები. რადგანაც მდგენელი  $MP$  ემთხვევა  $OM$  ძაფის მიმართულებას, ის გათანაბრებული იქნება ძაფის წინააღმდეგობით. მდგენელი  $MQ$  ეპერპენდიკულარება  $OM$  მიმართულებას და, ცხადია, წარმოადგენს  $MA$  რკალის მხებზე  $M$  წერტილში. აშკარაა, რომ მდგენელი

$$MQ = g \sin \psi; \tag{3.1}$$

სწორედ ეს მდგენელი იწვევს საქანის მოძრაობას  $A$  წერტილისაკენ  $g \sin \psi$  აჩქარებით.

მეორე მხრით, თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ რკალი  $MA = l \psi$ , მაშინ  $M$  წერტილის მოძრაობის აჩქარებისათვის გვექნება:

$$-\frac{d^2(l\psi)}{dt^2} = -l \frac{d^2\psi}{dt^2}, \quad (3.2)$$

სადაც ნიშანი მინუსი აღებულია იმის გამო, რომ ძალა, რომელიც  $A$  წერტილისკენაა მიმართული, ისწრაფვის შეამციროს  $\psi$  კუთხე.

ვინაიდან ზემოთ მოყვანილი ფორმულები ერთ და იმავე სიდიდეს გამოხატავენ, შეიძლება დავწეროთ:

$$-l \frac{d^2\psi}{dt^2} = g \sin \psi$$

ან

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} = -\frac{g}{l} \sin \psi, \quad (3.3)$$

რომელიც წარმოადგენს საქანის მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებას. გავამრავლოთ ამ განტოლების ორივე ნაწილი  $2 \frac{d\psi}{dt} dt$ -ზე, რის შემდეგ გვექნება:

$$2 \frac{d^2\psi}{dt^2} \frac{d\psi}{dt} dt = -2 \frac{g}{l} \sin \psi \frac{d\psi}{dt} dt,$$

ანუ

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{d\psi}{dt} \right)^2 = 2 \frac{g}{l} \frac{d}{dt} (\cos \psi),$$

საიდანაც ინტეგრაციის შემდეგ მივიღებთ:

$$\left( \frac{d\psi}{dt} \right)^2 = \frac{2g}{l} \cos \psi + C, \quad (3.4)$$

სადაც  $C$  ინტეგრაციის ნებისმიერი მუდმივია. ამ მუდმივის მოსანახავად განვიხილოთ საქანის მდებარეობა, როდესაც  $\frac{d\psi}{dt} = 0$ , ე. ი. მისი სიჩქარე ნულის ტოლია. ცხადია, რომ საქანის სიჩქარე ნულის ტოლი იქნება მხოლოდ მაშინ, როდესაც ის იმყოფება წონასწორობის წერტილიდან უკიდურეს დაშორების წერტილში, ე. ი.

$$(\psi)_{t=0} = \alpha, \text{ თუ } \left( \frac{d\psi}{dt} \right)_{t=0} = 0.$$

მაშინ:

$$0 = \frac{2g}{l} \cos \alpha + C,$$

საიდანაც:

$$C = -\frac{2g}{l} \cos \alpha.$$

ამ გამოსახულების (4)-ში შეტანა მოგვცემს:

$$\left(\frac{d\psi}{dt}\right)^2 = \frac{2g}{l} (\cos\psi - \cos\alpha). \quad (3.5)$$

ამ განტოლებას ფიზიკური აზრი აქვს მხოლოდ მაშინ, როდესაც მისი მარჯვენა ნაწილი დადებითია ან უკიდურეს შემთხვევაში ნულის ტოლია, რაც ასე დაიწერება:

$$\cos\psi \geq \cos\alpha.$$

გამოდის, რომ  $\psi$  კუთხე ლეზულობს მნიშვნელობებს  $+\alpha$ -დან  $-\alpha$ -მდე, ე. ი.  $\psi$  კუთხე იცვლება ნულიდან ორივე მიმართულებით  $\alpha$  ზღვრულ მნიშვნელობამდე. ამრიგად,  $\alpha$  არის საქანის წონასწორობის მდებარეობიდან გადახრის უდიდესი კუთხე, ე. ი. საქანის რხევის ამპლიტუდა.

დროის შუალედს, რომელიც უნდება საქანის მოძრაობას მისი ერთი უკიდურეს მდებარეობიდან, როდესაც მისი ამპლიტუდა  $+\alpha$ -ს უდრის, მეორე უკიდურეს მდებარეობამდე  $-\alpha$  ამპლიტუდით, ეწოდება საქანის რხევის პერიოდი და ჩვეულებრივად აღინიშნება  $T$  ასოთი.

დავწეროთ (5) განტოლება ასე:

$$dt = \sqrt{\frac{l}{2g}} \frac{d\psi}{\sqrt{\cos\psi - \cos\alpha}} \quad (3.6)$$

აქედან საქანის რხევის პერიოდის მისაღებად დავწეროთ:

$$T = \int_0^T dt = \sqrt{\frac{l}{2g}} \int_{-\alpha}^{+\alpha} \frac{d\psi}{\sqrt{\cos\psi - \cos\alpha}}. \quad (3.7)$$

შეცვალოთ ამ ტოლობაში კოსინუსი მისი გამოსახულებით ნახევარი კუთხის სინუსის შემწვობით:

$$\cos\psi = 1 - 2\sin^2 \frac{\psi}{2},$$

$$\cos\alpha = 1 - 2\sin^2 \frac{\alpha}{2},$$

რის შემდეგ გვექნება

$$T = \sqrt{\frac{l}{2g}} \int_{-\alpha}^{+\alpha} \frac{d\psi}{\sqrt{2 \left( \sin^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \frac{\psi}{2} \right)}}. \quad (3.7')$$

ამ განტოლების მარჯვენა ნაწილში ინტეგრალქვეშა ფუნქცია არ იცვლის თავის სიდიდეს, თუ  $\psi$  შენაცვლებული იქნება  $-\psi$ -ით, რის გამოც ის ინტერვალში  $(-\alpha, 0)$  მიიღებს იმავე მნიშვნელობას, რასაც ინტერვალში  $(+\alpha, 0)$ . ამიტომაც შეიძლება დავკამაყოფილდეთ უკანასკნელი ინტერვალით, თუ გავაორკეცებთ თვით ინტეგრალს, რის შემდეგ გვექნება:



$$T = \sqrt{\frac{l}{g}} \int_0^{\alpha} \frac{d\psi}{\sqrt{\sin^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \frac{\psi}{2}}} \quad (3.7'')$$

შემოვიღოთ ინტეგრაციის ახალი ცვლადი  $\varphi$  და დაეუშვათ, რომ

$$\sin \frac{\psi}{2} = k \sin \varphi, \quad (3.8)$$

სადაც

$$k = \sin^2 \frac{\alpha}{2}.$$

(8) ფორმულიდან აღვიღოთ მივიღებთ:

$$d\psi = \frac{2k \cos \varphi d\varphi}{\cos \frac{\psi}{2}}$$

აბ

$$d\psi = \frac{2k \cos \varphi d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}.$$

გარდა ამისა,

$$\sin^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \frac{\psi}{2} = k^2 - k^2 \sin^2 \varphi = k^2 (1 - \sin^2 \varphi) = k^2 \cos^2 \varphi.$$

ამ გამოსახულებების (7'')-ში ჩასმის შემდეგ გვექნება:

$$T = \sqrt{\frac{l}{g}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{2k \cos \varphi d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} \cdot \sqrt{k^2 \cos^2 \varphi}}$$

აბ

$$T = 2 \sqrt{\frac{l}{g}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}, \quad (3.9)$$

სადაც ინტეგრაციის ახალი საზღვრები 0 და  $\pi/2$  მიიღება, თუ (8) ფორმულაში ჩავსვათ შესაბამისად  $\psi = 0$  და  $\psi = \alpha$ . (9) განტოლების მარჯვენა ნაწილში მდგომი ინტეგრალი არის ეგრეთ წოდებული პირველი რიგის ელიპსური ინტეგრალი, რომელიც არ დაიყვანება ელემენტარულ ფუნქციებზე. ამიტომ დაეშალოთ ინტეგრალქვეშა ფუნქცია მწკრივად:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}} = (1 - k^2 \sin^2 \varphi)^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{1}{2} k^2 \sin^2 \varphi + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} k^4 \sin^4 \varphi + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} k^6 \sin^6 \varphi + \dots$$

ამ მწკრივის 0-დან  $\pi/2$ -მდე საზღვრებში ინტეგრაციის დროს ჩვენ საქმე გვექნება განსაზღვრულ ინტეგრალებთან, რომელთა ზოგადი გამოსახულება ასეთია:

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^{2n} \varphi d\varphi = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \dots (2n-1)}{2 \cdot 4 \dots 2n} \frac{\pi}{2},$$

საიდანაც:

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \varphi d\varphi = \frac{1}{2} \frac{\pi}{2},$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^4 \varphi d\varphi = \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \frac{\pi}{2},$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^6 \varphi d\varphi = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} \frac{\pi}{2}.$$

ამიტომ

$$\begin{aligned} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi}} &= \frac{\pi}{2} \left[ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 + \right. \\ &\left. + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 k^4 + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 k^6 + \dots \right]. \end{aligned}$$

ახლა, თუ  $k$ -ს მაგიერ კვლავ  $\sin \frac{\alpha}{2}$ -ს დავუბრუნდებით, მაშინ (9) ასე დაიწერება:

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left( 1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \frac{9}{64} \sin^4 \frac{\alpha}{2} + \frac{25}{256} \sin^6 \frac{\alpha}{2} + \dots \right). \quad (3.10)$$

საკმარისად მცირე  $\alpha$ -ს შემთხვევაში შეიძლება დავკმაყოფილდეთ პირველი წევრით და დავწეროთ:

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (3.11)$$

განტოლება (11) შეიძლება უშუალოდ მივიღოთ (3) დიფერენციალური განტოლებიდან, თუ იქ  $\sin \psi$  იქნება  $\psi$  კუთხით შენაცვლებული:

$$\frac{d^2 \psi}{dt^2} = -\frac{g}{l} \psi. \quad (3.12)$$

ამ განტოლების ინტეგრალი შეიძლება დაიწეროს ასე:

$$\phi = x \sin \left( \sqrt{\frac{g}{l}} t + \frac{\pi}{2} \right),$$

რაც შეიძლება შემოწმდეს უშუალო გადიფერენციალებით.

საწყის მომენტში, როდესაც  $t=0$ ,  $\phi = \alpha$ , რის გამო  $\phi$  წონასწორობის მდგომარეობიდან უღიდეს დაშორებას მეორე მხარეზე მიიღწევს

$$t \sqrt{\frac{g}{l}} + \frac{\pi}{2} = \frac{3}{2} \pi.$$

აქედან  $t$ , რომელიც  $T$  პერიოდს უდრის, მოგვცემს:

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

(10) გამოსახულებაში მოცემული სხვა წევრების გავლენის შეფასების მიზნით ქვემოთ  $\alpha$ -ს რამოდენიმე მნიშვნელობისათვის მოყვანილია მეორე და მესამე წევრების რიცხვითი მნიშვნელობანი:

$\alpha$	$\frac{1}{4} \sin^2 \frac{\alpha}{2}$	$\frac{9}{64} \sin^4 \frac{\alpha}{2}$
15'	0,0000012	0,0000003 $\times 10^{-6}$
30'	0,0000048	0,000005 $\times 10^{-6}$
1°0'	0,0000190	0,0008 $\times 10^{-6}$
5°0'	0,000476	0,5 $\times 10^{-6}$

აქედან ჩანს, რომ მესამე წევრის გავლენა შეიძლება უგულვებლევყოთ, თუ სიზუსტე გვინდა  $10^{-6}$ -მდე და  $\alpha < 5^\circ$ -ზე. თანამედროვე ხელსაწყოებში ამპლიტუდა  $1^\circ$ -ს არ აღემატება, ჩვეულებრივად კი  $15'$  რივისაა. როგორც ცნობილია, სიზუსტე საკმარისია  $10^{-7}$ -მდე, რის გამო მხოლოდ მეორე წევრის გავლენა ანგარიშგასაწევი. ამიტომ (10) ფორმულა შეიძლება ასე გადავწეროთ:

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left( 1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right), \quad (3.10')$$

ან  $\alpha$  კუთხის სიმცირის გამო

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left( 1 + \frac{1}{16} \alpha'^2 \sin^2 1' \right), \quad (3.10'')$$

სადაც  $\alpha'$  გამოხატულია წუთებში.

## § 2. ფიზიკური საქანის თეორია

ფიზიკური საქანი იგულისხმება როგორც მყარი სხეული, რომელსაც შეუძლია რხევითი მოძრაობა პორიზონტულ ღერძის გარშემო. ყოველი ფიზიკური საქანი შეიძლება განხილულ იქნას როგორც უსასრულოდ მრავალ მათემატიკურ საქანთა ერთობლიობა, რომელთა დაკიდების წერტილები სა-

ერთო ღერძზეა. ჩვენი მიზანია მოენახოთ ფიზიკური საქანის ეგრეთ წოდებული დაყვანილი სიგრძე, ე. ი. სიგრძე ისეთი მათემატიკური საქანისა, რომლის რხევის პერიოდი ტოლია მოცემული ფიზიკური საქანის რხევის პერიოდისა.

გავამრავლოთ (3) განტოლების ორივე ნაწილი  $m l^2$ -ზე:

$$m l^2 \frac{d^2 \psi}{dt^2} = -g m l \sin \psi. \quad (3.13)$$

ამ განტოლების მარცხენა ნაწილი შეიძლება დაიწეროს ასე:

$$m l \frac{d^2 \psi}{dt^2} l,$$

სადაც  $l \frac{d^2 \psi}{dt^2}$  აჩქარებაა ჩვენი მატერიალური წერტილისა, რომლის მასა  $m$ -ის ტოლია, რის გამო  $m l \frac{d^2 \psi}{dt^2}$  მამოძრავებელ ძალას წარმოადგენს, ხოლო მისი  $l$ -ზე გამრავლება გვაძლევს ამ ძალის მომენტს, რომელიც, როგორც (13) ტოლობიდან ჩანს, უდრის ვერტიკალურად მოქმედ  $mg$  ძალას  $l \sin \psi$  მხარზე გამრავლებულს.

გამოვიყენოთ (13) განტოლება მატერიალურ წერტილთა სისტემისათვის, რისთვისაც საჭიროა ექნება მისი მარცხენა და მარჯვენა ნაწილს მივუწეროთ ჯამის ნიშანი, რომელიც გავრცელდება სისტემის ყველა წერტილზე. ცხადია, რომ  $l$  იქნება მანძილი ყოველი წერტილისა დაკიდების ღერძიდან და  $\psi$  კი კუთხე  $l$ -სა და ვერტიკალურ მიმართულებას შორის. რადგანაც კუთხური აჩქარება საერთოა მყარი სისტემის ყველა წერტილისათვის, ამიტომ ის დაიწერება ჯამის ნიშნის გარეთ:

$$\frac{d^2 \psi}{dt^2} \sum m l^2 = -g \sum m l \sin \psi.$$

საქანისათვის, რომელიც შედგება წერტილთა უსასრულო მრავალ რიცხვიდან  $dm$  ელემენტარული მასით ჯამის ნიშანი საჭიროა შევცვალოთ ინტეგრალის ნიშნით, რომელიც ვრცელდება მთელ სხეულზე:

$$\frac{d^2 \psi}{dt^2} \int l^2 dm = -g \int l \sin \psi dm. \quad (1.14)$$

აღვილი დასანახია, რომ მარცხენა ნაწილში მდგომი ინტეგრალი ფიზიკური საქანის ინერციის მომენტია მისი დაკიდების ღერძის მიმართ. შემოვიღოთ აღნიშვნა:

$$K = \int l^2 dm.$$

მემართოთ ახლა (9) ნახაზს, სადაც ფიზიკური საქანის  $C$  სიმძიმის ცენტრში მოთავსებულია კოორდინატთა მართკუთხა სისტემის სათავე,  $y$  ღერძი მიმართულია ვერტიკალურად ზევითკენ, ხოლო  $x$  ღერძი აღებულია სა-

ქანის რხევის სიბრტყეში. იყოს  $a=AC$  მანძილი  $C$  სიმძიმის ცენტრსა და დაკიდების ღერძს შორის. ჩვენი საქანის ყოველი წერტილისათვის, როგორც ნახაზიდან ჩანს, შეიძლება დაიწეროს:

$$l \sin \psi = PR = QC + NR = a \sin \theta + x,$$

სადაც  $\theta$  კუთხეა  $AC$  სწორი ხაზის გადაბრისა ვერტიკალური მიმართულებიდან და  $N$  ძეგს  $y$ -თა ღერძის გაგრძელებაზე. გავამრავლოთ ამ განტოლების პირველი და უკანასკნელი ნაწილი  $dm$ -ზე და გავინტეგრავლოთ იგი ჩვენი საქანის მთელ მოცულობაზე:

$$\int l \sin \psi dm = a \sin \theta \int dm + \int x dm,$$

სადაც  $a \sin \theta$ , რომელიც საქანის ყველა წერტილისათვის ყოველ მოცემულ მომენტში მუდმივია, გატანილია ინტეგრალის ნიშნის გარეთ. როგორც ვიცით,

$$\int dm = M,$$

სადაც  $M$  საქანის მასაა, ხოლო

$$\int x dm = 0,$$

როდესაც კოორდინატთა სათავედ მიჩნეულია სისტემის სიმძიმის ცენტრი, როგორც ეს ჩვენს შემთხვევაშია: მართლაც

$$x_0 = \frac{1}{M} \int x dm,$$

სადაც  $x_0$  სიმძიმის ცენტრის კოორდინატია და, პირობის თანახმად, იგი ნულის ტოლია, რადგანაც კოორდინატთა სათავეს შეესაბამება.

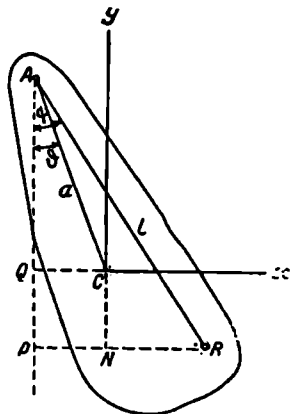
- ამრიგად, განტოლება (14) ახლა შეგვიძლია დავწეროთ შემდეგი სახით:

$$\frac{d^2 \psi}{dt^2} K = -g a M \sin \theta, \quad (3, 14')$$

სადაც  $a M$  არის საქანის ეგრეთ წოდებული სტატიკური მომენტი დაკიდების ღერძის მიმართ. კუთხე  $\theta$ , როგორც ნახაზიდან ჩანს,  $\psi$  კუთხიდან განსხვავდება მუდმივი სიდიდით, რომელიც დამოკიდებულია მოცემული წერტილის მდებარეობაზე  $AC$  სწორი ხაზის მიმართ, რის გამო

$$\frac{d^2 \psi}{dt^2} = \frac{d^2 \theta}{dt^2}.$$

ახლა (14') განტოლება შეიძლება ასეც ჩაიწეროს:



ნახ. 9.

$$K \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -gaM \sin\varphi \quad (3.14'')$$

ანუ

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = -\frac{g}{\frac{K}{Ma}} \sin\varphi. \quad (3.15)$$

ამ განტოლების (3) განტოლებასთან შედარება გვიჩვენებს, რომ ისინი ერთნაირია. მართლაც, ფიზიკური საქანის (15) განტოლებაში დაეუშვათ, რომ

$$\frac{K}{aM} = l; \quad (3.16)$$

მაშინ მივიღებთ მათემატიკური საქანის განტოლებას. გამოდის, რომ ფიზიკური საქანი იზხევა ისე, როგორც მათემატიკური საქანი  $l$  სიგრძით, ოღონდ ეს  $l$  უნდა აკმაყოფილებდეს (16) ტოლობას. მათემატიკური საქანის  $l$  სიგრძეს, რომელიც (16) ტოლობას აკმაყოფილებს, ეწოდება ფიზიკური საქანის დაყვანილი სიგრძე.

მიემართოთ 10 ნახაზს, სადაც  $AC$  ხაზის მიმართულებაზე აღებულია  $B$  წერტილი ისე, რომ  $AB = l$

იყოს ფიზიკური საქანის დაყვანილი სიგრძე. მაშინ  $B$  წერტილს ეწოდება რხევათა ცენტრი, რომელსაც გააჩნია ის შესანიშნავი თვისება, რომ შეიძლება მოცემული ფიზიკური საქანი შენაცვლებულ იქნას მათემატიკური საქანით, თუ პირველის მთელი მასა კონცენტრირებული იქნება ამ წერტილში: ამ ფიზიკური საქანის რხევის პერიოდი გამოიხატება ცნობილი (10'') ფორმულით, სადაც  $l$  იქნება დაყვანილი სიგრძე,  $a$  ამპლიტუდა, ე. ი.  $AC$  ამ  $AB$  ხაზების უდიდესი გადახრა ვერტიკალური მიმართულებიდან.

რხევათა ცენტრი ჩვეულებრივ ფიზიკურ საქანში იმყოფება სადაც მის შიგნით და არაფრით ის აღნიშნული არ არის, რის გამო მისი მონახვა

შეუძლებელია. მეორე მხრით სიმძიმის ძალის განსაზღვრისათვის აუცილებელია ვიცოდეთ ფიზიკური საქანის დაყვანილი სიგრძე  $l$ , რისთვისაც უნდა ვიცოდეთ ამ საქანის რხევათა ცენტრი. უფრო გვიან მოხერხდა საკმაოდ მარტივი მეთოდის მოცემა ფიზიკური საქანის რხევათა ცენტრის მოსანახლად, როგორც ამას ქვემოთ დავინახავთ.

ვთქვათ,

$$K = \int r^2 dm$$

მოცემული სხეულის ინერციის მომენტი რომელიც ღერძის მიმართ, რომელიც  $A$  წერტილში გადის. მოვინახოთ ამავე სხეულის ინერციის მომენტი  $K_0$  იმ ღერძის მიმართ, რომელიც, ეპარალელურა რა წინანდელ ღერძს, გადის მის  $C$  სიმძიმის ცენტრში (ნახ. 10).  $R$  ნებისმიერი წერტილია  $dm$  ელემენტარული მასით,  $r$  და  $\rho$  მანძილებია  $R$  წერტილისა, შესაბამისად პირველი და მეორე ღერძიდან, როგორც ეს ნახაზზეა ნაჩვენები; გარდა ამისა იყოს წინანდებურად  $AC = a$ .  $ACR$  სამკუთხედიდან, სადაც  $\varphi = \angle RCA$ , გვაქვს:

$$r^2 = \rho^2 + a^2 - 2a\rho \cos\varphi,$$

ანუ

$$\int r^2 dm = \int \rho^2 dm + a^2 \int dm - 2a \int \rho \cos\varphi dm,$$

რაც, თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ

$$K_0 = \int \rho^2 dm,$$

ასე დაიწერება:

$$K = K_0 + a^2 M - 2a \int \rho \cos\varphi dm,$$

სადაც  $M$ , როგორც წინათ, საქანის მასაა. დავუშვათ, რომ კოორდინატთა მართკუთხა ღერძების სათავე საქანის სიმძიმის  $C$  ცენტრშია და ღერძი  $x$  გადის  $A$  წერტილში. მაშინ:

$$x = \rho \cos\varphi,$$

საიდანაც

$$\int \rho \cos\varphi dm = \int x dm = 0,$$

რასაც, როგორც ზემოთ ვნახეთ, ადგილი აქვს, როდესაც კოორდინატთა სათავე სიმძიმის ცენტრს ემთხვევა. ახლა გვექნება:

$$K = K_0 + a^2 M, \quad (3.17)$$

რაც წარმოადგენს სწორედ საპოვნ დამოკიდებულებას.

(16) ფორმულაში  $K$  სიდიდის მაგიერ შესაბამ სიდიდეების ჩასმა (17) ფორმულიდან მოგვცემს:

$$l = \frac{K_0}{aM} + a. \quad (3.18)$$

შეიძლება დავუშვათ, რომ ჩვენი საქანი ირხევა წინანდელი ღერძის პარალელურად  $B$  წერტილში გამავალი ღერძის გარშემო. აღვნიშნოთ ამ ღერძის შესაბამისი დაყვანილი სიგრძე  $l'$ -ით. რა თქმა უნდა,  $l'$ -ისათვის ჩვენ შეგვიძლია დავწეროთ (18)-ის ანალოგიური გამოსახულება. როგორც ვხედავთ, (18)-ში  $K_0$  და  $M$  არ არის დამოკიდებული ღერძის მდებარეობაზე. რაც შეეხება  $a$ -ს, რომელიც წინანდელი ღერძისათვის  $AC$  მონაკვეთს უდრიდა, ახ-

ლა ის, ცხადია,  $BC$  მონაკვეთის ტოლია, რომელიც  $l-a$  სხვაობას უდრის. ამიტომაც:

$$l' = \frac{K_0}{(l-a)M} + l - a$$

ან, რადგანაც (18)-დან

$$l-a = \frac{K_0}{aM},$$

ამიტომ სათანადო ჩასმის შემდეგ გვექნება:

$$l' = \frac{K_0}{\frac{K_0}{aM} M} + \frac{K_0}{aM} = a + \frac{K_0}{aM}. \quad (3.19)$$

ამ გამოსახულების შედარება (18)-თან გვიჩვენებს, რომ  $l' = l$ , ე. ი. ახალი დაყვანილი სიგრძე  $l'$  უდრის  $l$  წინანდელს; ეს კი იმას ნიშნავს, რომ ახალი ლერძის მიმართ  $T'$  რხევათა პერიოდი უდრის წინანდელი ლერძის მიმართ  $T$  რხევათა პერიოდს. ნათქვამიდან გამოდის, რომ  $A$  და  $B$  წერტილები წარმოადგენენ ურთიერთ შეუღლებულ წერტილებს, რადგანაც, თუ ერთ მთვანზე გადავლებთ დაკიდების ლერძს, მეორე გახდება რხევათა ცენტრად, და პირიქით, ამასთან, რაც მთავარია, შესაბამისი რხევათა პერიოდები თანაბარია.



საქანი, რომელსაც რხევათა ორი ლერძი გააჩნია, რომელთა მიმართ რხევათა პერიოდები ტოლია, ცნობილია შესაბრუნებელი საქანის სახელწოდებით. ასეთ საქანში დაყვანილი სიგრძე უდრის სწორედ მანძილს რხევათა ორივე ლერძს შორის, რაც შესაძლებლად ხდის მის მონახვას უშუალო დაკვირვებებიდან. ყველა სხვა საქანში დაყვანილი სიგრძის მონახვა არ შეიძლება განხორციელებულ იქნას ისე ადვილად და ზუსტად, როგორც შესაბრუნებელი საქანის შემთხვევაში. ამის გამო სიმძიმის ძალის აბსოლუტურ განსაზღვრათა მიზნით ყველაზედ გამოსადეგი აღმოჩნდა შესაბრუნებელი საქანი.

### § 3. მინიმალური საქანი

(18) გამოსახულებაში შედის  $K_0$  და  $M$ , რომლებიც მოცემული მყარი სხეულისათვის მუდმივი სიდიდეებია. ამის გამო საქანის დაყვანილი სიგრძე  $l$  და, მაშასადამე, მისი რხევის პერიოდიც ერთი და იგივეა დაკიდების ყველა ლერძისათვის, რომლებიც თანაბრად დაშორებულია სიმძიმის ცენტრიდან. მართლაც, ვთქვათ,  $A$  და  $B$  შეუღლებული წერტილებია, ხოლო  $C$  სიმძიმის ცენტრია დაყვანილი საქანისა (ნახ. 11). ჩვენ ყოველთვის შეგვიძლია  $AB$  სწორ ხაზზე ავიღოთ  $A'$  წერტილი ისე, რომ  $AC = CA' = a$ . თუ

ახლა საქანს დაკიდებთ ლერძზე, რომელიც  $A'$  წერტილზე გაივლის და ამავე დროს პარალელური იქნება დაკიდების წინანდელი ლერძისა, მაშინ ჩვენ კვლავ გვექნება წინანდელი დაყვანილი სიგრძე  $l$ ; ამავე დროს რხევათა ცენტრად მოგვევლინება წერტილი  $B'$ , რომელიც სიმეტრიულად ძვეს  $C$  წერტილის მიმართ. ამრიგად, ახლა ჩვენ გვაქვს 4 წერტილი, სახელდობრ,  $A, B$  და



$A'$ ,  $B'$ , რომლებიც  $C$  სიმძიმის ცენტრთან ერთად განლაგებულია ერთ სწორ ხაზზე. როგორც დავინახეთ, რხევათა ღერძებს, რომლებიც ამ 4 წერტილზე ურთიერთისდაღმი პარალელურად გადიან, შეესაბამება საქანის ერთი და იგივე დაყვანილი სიგრძე და, ცხადია, რხევის ერთი და იგივე პერიოდი. რა თქმა უნდა, დაყვანილი სიგრძეებია  $AB$  და  $A'B'$ , მაგრამ არა  $AA'$  და არა  $BB'$ . გამოდის, რომ არაა საკმარისი მოინახოს წერტილთა წყვილი, რომელთაც შეესაბამებათ ტოლი პერიოდები, საჭიროა კიდევ შემოწმდეს, რომ ეს წყვილი არაა  $AA'$  ან  $BB'$ ; მხოლოდ ამის შემდეგ შეიძლება მტკიცება, რომ მანძილი ნაპოვნ წყვილ წერტილთა შორის  $l$ -ის ტოლია. რა თქმა უნდა, რაც უფრო დიდი იქნება მანძილი  $A'$  და  $B$  ან  $A$  და  $B'$  წერტილებს შორის, მით უფრო ადვილი იქნება შეცდომის შემჩნევა. სხვანაირად რომ ვთქვათ, ეს იმას ნიშნავს, რომ წერტილი  $C$  შესაფერისად შორს უნდა იყოს  $AB$  ან  $A'B'$  მანძილების შუამდებარე წერტილებიდან, ე. ი. მანძილი  $a$  საგრძნობლად უნდა განსხვავდებოდეს  $l/2$  მანძილისაგან. მეორე მხრივ, ჩვენ ეხლავე დავინახეთ, რომ განსაკუთრებით ხელსაყრელია სწორედ  $C$  წერტილის ისეთი მდებარეობა, როდესაც  $a = l/2$ .

თუ ჩვენ საქანის რხევათა პერიოდის ცვლილებებს მივაწვრთ არა საქანის ღერძის სიგრძის ცვლილებას, არამედ პრიზმის გადაადგილებას საქანში, მაშინ შეიძლება დავსვათ საკითხი, ხომ არ შეიძლება ავაგოთ ისეთი საქანი, რომლის პერიოდზე რაც შეიძლება ნაკლებ გავლენას ახდენს პრიზმის წიბოს გადაადგილება, რაც, (16)-ის მიხედვით, შეიძლება ასე ჩამოვყავალიბოთ; ხომ არ შეიძლება ავაგოთ ისეთი საქანი, რომლის  $l$  არ არის  $a$ -ზე დამოკიდებული, ე. ი. წარმოებული  $\frac{dl}{da}$  ნულის ტოლია. ამ საკითხის გადასაწყვეტად ვაწარმოოთ სათანადოდ (18) განტოლება და წარმოებული გაუტოლოთ ნულს. მაშინ

$$\frac{dl}{da} = -\frac{K_0}{a^2 M} + 1 = 0,$$

საიდანაც:

$$a = \sqrt{\frac{K_0}{M}}. \quad (3.20)$$

გარდა ამისა, (18) და (20) მიხედვით გვექნება:

$$l = \frac{1}{a} \cdot \frac{K_0}{M} + a = 2a. \quad (3.21)$$

როგორც ვხედავთ, სიმძიმის ცენტრი  $AB$  მანძილს ამ შემთხვევაში ყოფს ორ თანაბარ ნაწილად. ეს ის შემთხვევაა, როდესაც დაკიდვის ღერძის ყველა პარალელური მდებარეობიდან საქანის დაყვანილ სიგრძეს და, მაშასადამე, მის რხევის პერიოდს შეესაბამება მინიმუმი. ასეთ საქანს მინიმალური ეწოდება. როგორც დავინახეთ, მინიმალურ საქანს აქვს ის თვისება, რომ მისი დაკიდ-

ბის ღერძის მდებარეობის მცირე ცვლილება არ გამოიწვევს არც დაყვანილი სიგრძისა და არც პერიოდის ცვლილებას, რაც ესოდენ დასაფასებელია. მეორე მხრით, ცხადია, მინიმალური საქანი ვერ აკმაყოფილებს პირობას, რომელიც საჭიროა, რათა დაეადგინოთ განსხვავება იმ ორ წყვილ ურთიერთ დაკავშირებულ წერტილს შორის, რომელთა შესახებ ზემოთ გვქონდა ლაპარაკი.

**§ 4. სიმძიმის ძალის აბსოლუტური განსაზღვრა შესაბრუნებელი საქანის შემწეობით**

ნახაზ 12-ზე წარმოდგენილია შესაბრუნებელი საქანი; ამ საქანს რხევისათვის გააჩნია ორი ღერძი  $A$  და  $B$ , ისე განლაგებული, რომ მათი შესაბამისი რხევის პერიოდები ერთმანეთის ტოლია. წინა ორ პარაგრაფში განხილული ფიზიკური საქანის თვისების მიხედვით გამოდის, რომ შესაბრუნებელი საქანის დაკიდების ორი ღერძი თანხედება ურთიერთ წერტილებს, რის გამო მანძილი მათ შორის ტოლია მისი  $l$  დაყვანილი სიგრძისა. თუ ახლა ჩვენ სათანადოდ გავზომავთ  $l$  მანძილს  $A$  და  $B$  წერტილების შესაბამის პრიზმების წიბოებს შორის და მის მნიშვნელობას ჩავსვამთ (11) ფორმულაში, სადაც  $T$  პერიოდი განსაზღვრულია სათანადო დაკვირვებით, მივიღებთ  $g$  სიმძიმის ძალის აბსოლუტურ მნიშვნელობას.



ნახ. 12.

$A$  და  $B$  პრიზმები უძრავად არის ჩამაგრებული საქანის ტანში, რომ სავსებით გამორიცხული იყოს მათი ოდნავი გადაადგილებაც კი. მეორე მხრით, დროთა განმავლობაში სხვადასხვა მიზეზის გამო ირღვევა  $A$  და  $B$  ღერძების შესაბამისი პერიოდების ტოლობა, რის აღსადგენად მიმართავენ იმ ერთ ან ორ ტვირთს, რომელთა მოძრაობა შესაძლებელია საქანის ღერძის გასწვრივ, რაც, ცხადია, დაკავშირებულია საქანის სიმძიმის ცენტრისა და ინერციის მომენტის სათანადო შეცვლასთან; ამ გზით, რა თქმა უნდა, შეიძლება მივალწიოთ ურთიერთ წერტილების დამთხვევას პრიზმების წიბოებთან. ნახაზზე მოძრავი ტვირთები აღნიშნულია  $V$  და  $W$  ასოებით, ამასთან ამ უკანასკნელის გადაადგილება ხდება მიკრომეტრიანი ხრახნით, რომელიც ნახაზზე არ არის ნაჩვენები.  $D$  ის ტვირთია, რომლის მეშვეობით საქანის სიმძიმის ცენტრი საგრძნობლად გადაადგილებულია მისი შუა წერტილიდან, რის გამო  $a_1 \neq a_2$  საგრძნობ ფარგლებში. საჭიროა აქვე აღინიშნოს, რომ  $A$  და  $B$  პრიზმების მოქმედი წიბოები, რომლების გარშემო

წარმოებს რხევები, პირისპირ არიან ერთმანეთისაკენ მიმართული, რაც სავსებით გასაგებია. ნახაზ 12-ზე წარმოდგენილ კეტერის შესაბრუნებელ საქანს, რომლის აღწერილობა ავტორის მიერ მოცემულ იქნა 1818 წელს, აღმოაჩნდა მრავალი ნაკლი.

კეტერის საქანის მთავარი ნაკლი დაკავშირებულია მის გარეგან ფორმასთან, რომელიც არ არის სიმეტრიული. ამის გამო ორ სხვადასხვა მდგომარეობაში საქანის რხევისას პაერის წინააღმდეგობა არ იქნება ერთნაირი. პაერის გავლენა კი საქანის პერიოდზე, როგორც ქვემოთ დავინახავთ, მნიშ-

ენელოვანია, რასაც მაშინ არ ექცეოდა სათანადო ყურადღება. გარდა ამისა, კეტერის საქანის პრიზმების წიბოებს, ექვს გარეშეა, არ უნდა ჰქონოდა ერთნაირი ფორმა, რის გამო მითი გაელენა პერიოდზე ორ სხვადასხვა მდგომარეობაში არ იქნებოდა ერთნაირი. საექვეა აგრეთვე მოძრავი ტვირთის საქანზე ისეთი სახით დამაგრება, რომ მას არ განეცადა რაიმე გადაადგილება. ამასთან უნდა გვახსოვდეს, რომ, როგორც ქვემოთ დავინახავთ, სიმძიმის ძალის სიზუსტეს ერთ მილიგალს შეესაბამება დაყვანილი სიგრძის ერთი მიკრონი.

შეცდომის მთავარი მიზეზი იყო ისიც, რომ დაკვირვების მეთოდი არ ითვალისწინებდა შესწორებას შტატივის რხევებზე, რაზედაც ჩვენ ქვემოთ შეეჩერდებით.

შესაბრუნებელი საქანის შემდგომმა განვითარებამ შესაძლებელი გახადა ისეთი საქანის აგება, რომელიც ან თავისუფალია ასეთი ნაკლოვანებებისაგან, ანდა მათი გამორიცხვის საშუალებას იძლევა. პირველყოელისა, შეეჩერდეთ აქ დაკვირვებათა იმ მეთოდზე, რომლის გამოყენებისას სრულიად არ არის საჭირო, რომ საქანის რხევის პერიოდები ორივე მდგომარეობაში ერთმანეთის ტოლი იყოს. მხოლოდ ამის შემდეგ გახდა შესაძლებელი საქანების დამზადება მოძრავი ტვირთის გარეშე, რომლის რეგულირებას წინათ სჭირდებოდა საკმაოდ დიდი დრო. გავეცნოთ ამ მეთოდს.

ვთქვათ, გვაქვს იდეალური საქანი, რომელსაც გააჩნია  $l$  დაყვანილი სიგრძე და შესაბამისი  $T$  პერიოდი, რომლებიც სულ მუდამ უცვლელია. მაშინ სათანადო დაკვირვების შედეგად ჩვენ სულ მუდამ და ყველგან მივიღებთ უცვლელ  $l$  სიგრძეს და რხევის თანაბარ პერიოდებს საქანის ორივე მდგომარეობისათვის. შეენიშნოთ გაკვირება, რომ რხევის პერიოდს სხვადასხვა ადგილას, რა თქმა უნდა, სხვადასხვა იქნება. მაგრამ ასეთი საქანი სინამდვილეში არ არსებობს. კიდევაც რომ მოეხერხებია ვინმეს ასეთი საქანის დამზადება, სულ ერთია, მის ამ თვისებებს დაარღვევდა ტემპერატურისა და ჰაერის წნევის მერყეობა და ის ცვლილებები, რომლებიც მიმდინარეობენ თვით საქანის მასალაში მოლეკულებისა, ატომებისა და სხვა ნაწილაკთა გადაჯგუფების გამო.

ვთქვათ საქანით, რომლის პრიზმების წიბოთა შორის  $l$  მანძილია, ვაწარმოეთ დაკვირვება და მივიღეთ პერიოდები  $T_1$  და  $T_2$ , რომლებიც საკმარისად ახლოა იდეალურ  $T$  პერიოდთან. მაშინ ჩვენ შეგვიძლია ვთქვათ, რომ  $T_1$  პერიოდს შეესაბამება დაყვანილი სიგრძე  $l_1$  და  $T_2$  პერიოდს დაყვანილი სიგრძე  $l_2$ , ხოლო  $T$  იდეალურს—დაყვანილი სიგრძე  $l$ . დაკვირვების შედეგად ჩვენთვის ცნობილია  $T_1$ ,  $T_2$  და  $l$ , ხოლო არ არის ცნობილი  $T$ ,  $l_1$  და  $l_2$ . დავწეროთ ცნობილი ფორმულები:

$$T_1 = \pi \sqrt{\frac{l_1}{g}}, \quad T_2 = \pi \sqrt{\frac{l_2}{g}}, \quad T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}};$$

უკანასკნელი ფორმულის პირველი და მეორე ფორმულებზე გაყოფით და შემდეგ კვადრატში აყვანით, ადვილად მივიღებთ:

$$\frac{l}{l_1} = \frac{T^2}{T_1^2}, \quad \frac{l}{l_2} = \frac{T^2}{T_2^2}$$

ანუ

$$lT_1^2 = l_1T^2, \quad lT_2^2 = l_2T^2. \quad (3.22)$$

თუ გავიხსენებთ, რომ

$$a_1 + a_2 = l,$$

(18) ფორმულის მიხედვით, საქანის პირველი და მეორე მდგომარეობისათვის შესაბამისად გვექნება:

$$l_1 = a_1 + \frac{K_0}{a_1 M}$$

$$l_2 = a_2 + \frac{K_0}{a_2 M},$$

სადაც  $K_0$  და  $M$  სიდიდეებს აქვს წინანდელი მნიშვნელობა.

ამ გამოსახულებათა (22) ტოლობებში ჩასმის შემდეგ, თუ  $l$  სიდიდეს  $a_1 + a_2$  ჯამით შევცვლით, გვექნება:

$$(a_1 + a_2)T_1^2 = \left( a_1 + \frac{K_0}{a_1 M} \right) T^2$$

$$(a_1 + a_2)T_2^2 = \left( a_2 + \frac{K_0}{a_2 M} \right) T^2.$$

ამ განტოლებებიდან გამოვირიცხოთ  $\frac{K_0}{M}$ , რისთვისაც გავამრავლოთ პირველი  $a_1$ -ზე, მეორე— $a_2$ -ზე და შედეგი შევაერთოთ. გვექნება

$$(a_1 + a_2)(a_1 T_1^2 - a_2 T_2^2) = (a_1^2 - a_2^2) T^2,$$

ანუ

$$a_1 T_1^2 - a_2 T_2^2 = (a_1 - a_2) T^2,$$

საიდანაც:

$$T^2 = \frac{a_1 T_1^2 - a_2 T_2^2}{a_1 - a_2}$$

ან, თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ  $T_1$  მუდამ ახლო ძევს  $T_2$ -სთან, ე. ი.

$$T_2 = T_1 + \Delta T$$

და

$$T_2^2 \approx T_1^2 + 2T_1 \Delta T,$$

გვექნება:

$$T^2 = T_1^2 - 2 \frac{a_2 T_1}{a_1 - a_2} \Delta T = T_1^2 \left( 1 + 2 \frac{a_2}{a_1 - a_2} \frac{\Delta T}{T_1} \right).$$

თუ აქედან კვადრატულ ფესვს ამოვიღებთ ისე, რომ ფრჩხილში მოქცეულ გამოსახულებას ბინომის ფორმულის მიხედვით დაეშლით და მხოლოდ  $\Delta S$ -ის რიგის წევრს შევინარჩუნებთ, გვექნება:

$$T = T_1 \left( 1 - \frac{a_2}{a_1 - a_2} \frac{\Delta T}{T_1} \right).$$

წარმოვიდგინოთ ისევ  $\Delta T$  როგორც  $T_2 - T_1$  და გავხსნათ ფრჩხილი. მაშინ:

$$T = T_1 + \frac{a_2}{a_1 - a_2} (T_1 - T_2). \quad (3.23)$$

ეს ფორმულა წყვეტს დასმულ საკითხს. როდესაც  $T_1 = T_2$ , ვღებულობთ, რომ  $S = S_1$ , როგორც უნდა იყოს სწორედ სინამდვილეში, რადგანაც მაშინ  $l$ -ჩენი საქანის დაყვანილი სიგრძეა.

ამასთან (23) ფორმულაში  $a_1 - a_2$  სხვაობა არ უნდა იყოს მცირე, რადგანაც მაშინ მეორე წევრი მარჯვნივ, როგორც ორ მცირე სიდიდეთა შეფარდება, დიდი გახდებოდა. გამოდის, რომ ჩვენი საქანის სიმძიმის ცენტრისადგომბლად გადაადგილებული უნდა იყოს მისი შუა ადგილიდან, რაც შედეგია ორი წყვილი ურთიერთ წერტილების არსებობისა, რის შესახებაც ზემოთ იყო აღნიშნული. ამის გამოა სწორედ, რომ საქანის ერთი ბოლო უფრო მძიმეა, ვიდრე მეორე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახაზ 12-ზე, სადაც უძრავი ტვირთი  $D$  ემსახურება აღნიშნულ მიზანს. ზოგიერთ, უფრო სრულყოფილ ხელსაწყოში, გარეგანი სიმეტრიის დასაცავად, საქანის ორივე ბოლოზე წამოკმულია გარეგნულად სავსებით ერთნაირი ტვირთი, რომელთაგან ერთი მასიუერია, მეორე კი ღრუა.

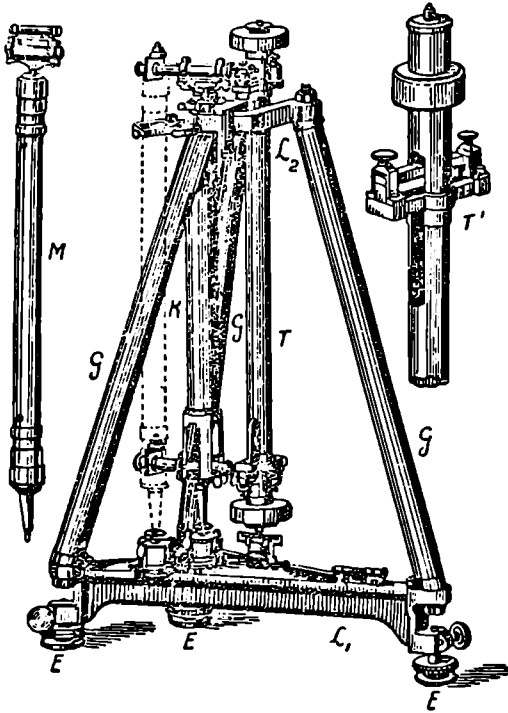
$T$  პერიოდის (23) ფორმულით გამოთვლისათვის საჭიროა ვიცოდეთ  $a_1$  და  $a_2$  სიდიდეთა მნიშვნელობები; მაგრამ მათი ცოდნა საკმარისია 0,1 მილიმეტრის სიზუსტითაც, რადგანაც  $T_1 - T_2$  სხვაობა ასეთ შემთხვევაში საკმარისად მცირეა, როგორც ზემოთაც იყო აღნიშნული.  $a_1$  და  $a_2$  სიდიდეების აღნიშნული სიზუსტით განსაზღვრისათვის ხელსაწყოს შესაბრუნებელი საქანით ყოველთვის გააჩნია შესაფერისი მოწყობილობა.

ჩვენ უკვე ვიცით, რომ საქანის ცვალებადობის თვალსაზრისით პირობა:  $a_1 \neq a_2$  არაა ხელსაყრელი. მეორე მხრით, ჩვენ დავინახეთ, რომ შესაბრუნებელი საქანი ძლიერ განსხვავდება მინიმალურიდან, მაგრამ წინათ ამ ნაკლს სათანადო ყურადღება არ ექცეოდა.

ქვემოთ მოგვყავს რეპსოლდის მიერ აგებული შესაბრუნებელი საქანი, რომელიც, როგორც შემდგომმა მისმა ფართე გამოყენებამ დაამტკიცა, წარმოადგენს მოხერხებულ ხელსაწყოს სიმძიმის ძალის აბსოლუტურ განსაზღვრისათვის (ნახ. 13). ხელსაწყოს აქვს შემდეგი ძირითადი ნაწილები: შტატივი, ერთი ან რამდენიმე საქანი, კომპარატორი და მასშტაბი.

ხელსაწყოს შტატივი შედგება ორი, ზედა და ქვედა, პორიზონტალური სამკუთხისებური მასიუერი  $L_1$  და  $L_2$  ჩარჩოსაგან, რომლებიც ერთმანეთთან შეერთებულია სამი მასიუერი  $l$  ღეროთი. ქვედა ჩარჩოს გააჩნია სამი ამწევი  $E$  ბრაზნი, რომელთა შემწეობით ხდება შტატივის ნიველირება. ზედა ჩარჩოზე დამაგრებულია ბრტყლად მოშლიფებული აქატის ფირფიტა, რომელზედაც ეშვება  $T$  საქანის პრიზმის წიბო. ქვედა ჩარჩოზე, თვით საქანის ქვემოთ, დამაგრებულია სკალა, რომლის შემწეობით შეიძლება აითვალოს საქანის რხევათა ამპლიტუდები.

თვით  $T$  საქანი წარმოადგენს თითბრის მილს, რომლის სიგრძე და ვანიკვეთის დიამეტრი ტოლია 125 და 4 სმ შესაბამისად. საქანის ორივე ბოლოზე ჩამოკმულია ორი, მოცულობით ტოლი და წონით სხვადასხვა, ცილინდრული ფორმის ტვირთი. საქანის ორივე ბოლოში, შეძლებისდაგვარად ურთიერთი წერტილების სიახლოვეში, ჩასმულია აქატის ორი პრიზმი მახვილი წიბოებით, რომელთა გარშემო ირხევა საქანი. საქანის ერთ-ერთი  $T'$  ბოლო ცალკეა ნაჩვენები 13 ნახაზის მარჯვნივ. პრიზმები ჩამაგრებულია მომქერი ხრახნების შემწვობით, მაგრამ ადვილად ხერხდება მათი ერთმანეთით შენაცვლება. იმისათვის, რომ შესაძლებელი იყოს პრიზმების წიბოებზე მიკროსკოპების ოკულარული მიკრომეტრის დაყენება, საქანის მილში თითოეული პრიზმის ზეაწერტილის პირდაპირ გაკეთებულია სათანადო ხვრელი.



ნახ. 13.

კომპარატორი  $K$  წარმოადგენს ვერტიკალურად დასაყენებელ თითბრის მილს, რომელიც თავის ბოლოებზე ატარებს ორ მიკრომეტრიან მიკროსკოპს. კომპარატორის ქვედა წვეტიანი ბოლო ფარდობა საგანგებო ბუდეს, რომლის გადაადგილება, კომპარატორის სწორად დაყენებისათვის, შეიძლება ყველა მიმართულებით; კომპარატორის ზედა ბოლო ზის საგანგებო ლაგერში, რომლის წყალობით მთელი კომპარატორის შემოტრიალება შეიძლება მისი ვერტიკალური ღერძის გარშემო. კომპარატორის ღერძის ვერტიკალურად დაყენება ხდება თარაზოს შემწვობით. კომპარატორის შემოტრიალებით მისი ვერტიკალური ღერძის გარშემო შეიძლება მიკროსკოპები მიემართონ ან საქანის პრიზმების წიბოებზე, ან გვერდით გამართულ ვერტიკალურ მასშტაბზე, რომლის დახმარებით იზომება მანძილი ამ წიბოებს შორის.

მასშტაბი  $M$  გაკეთებულია ისეთივე სიმსხოს მქონე თითბრის მილიდან, როგორც თვით საქანი. ამ მილის შიგნით ორივე ბოლოზე მიმაგრებულია პატარა ფირფიტები, რომლებზედაც დატანილია ზუსტი დანაყოფები; უკანას-

კნელთა დანახვა შეიძლება მილის კედელში გაკეთებული ხერხების შემწეობით. მასშტაბის მილის შიგნით მოთავსებულია ლითონის თერმომეტრი. ეს უკანასკნელი შედგება ორი ერთმანეთში ჩადებული ფოლადის და თუთიის მილისაგან, რომელთა ბოლოები ზემოთ ყრუდაა დამაგრებული ერთმანეთთან; ტემპერატურის ცვლილების გამო თავისუფალი ბოლოები სათანადოდ გადაინაცვლებენ ურთიერთისადმი, რაც იზომება კომპარატორის ერთ-ერთი მიკროსკოპის შემწეობით. მასშტაბს შტატივზე აყენებენ კომპარატორის ანალოგიურად, რაც ნახაზზე ნაჩვენებია პუნქტირით.

ხელსაწყოს დაერთვის აგრეთვე მოწყობილობა, რომლის შემწეობით ისახლება  $a_1$  და  $a_2$  სიდიდეთა სხვაობა. მის განხილვაზე აქ არ შევჩერდებით.

### § 5. სიმძიმის ძალის განსაზღვრის შესაძლებელი სიზუსტე შესაბარუნებელი საქანიანი ხელსაწყოს შემწეობით

$g$  სიმძიმის ძალის გამოსაანგარიშებლად, როგორც ვიცით, იყენებენ (11) ფორმულას, სადაც უნდა ჩაისვას დაკვირვებიდან მიღებული რიცხვითი მნიშვნელობანი მოცემული საქანის რხევის  $T$  პერიოდისა და მისი  $l$  დაყვანილი სიგრძის. აქედან ცხადია, რომ სიზუსტე, რომლითაც საქარა განისაზღვროს  $g$  სიდიდე, საზღვრავს აგრეთვე  $T$  და  $l$  სიდიდეთა სიზუსტეს. (11) ტოლობიდან, წინასწარ გალოგარიტმებით და შეპდეგ გადიფერენციალებით:

$$\frac{dT}{T} = \frac{1}{2} \frac{dl}{l} - \frac{1}{2} \frac{dg}{g}, \quad (3.24)$$

საიდანაც, თუ  $g$  სიდიდის განსაზღვრის  $dg$  სიზუსტისათვის მივიჩნევთ რომელიმე გარკვეულ მნიშვნელობას, მაშინ შეიძლება  $dT$  და  $dl$ -თვის მოინახოს შესაბამისი მნიშვნელობები. თანამედროვე გრაჟიმეტრიაში  $g$  სიდიდისათვის სავსებით მისაღწევადია მიჩნეული სიზუსტე ერთ მილიგალამდე, რაც ჯერჯერობით საკმარისია როგორც გეოდეზიის, ისე გეოფიზიკისა და გეოლოგიის მიზნებისათვის, როგორცაა დედამიწის დაბრტყელება, გეოიდის ფორმა, დედამიწის ქერქის აგებულება და სხვა. ერთი მილიგალი = 0,001 სმ/სეკ<sup>2</sup>, ე. ი. შეადგენს  $g$  სიდიდის, რომელიც დაახლოებით 980 სმ/სეკ<sup>2</sup> ტოლია, თითქმის  $1 \cdot 10^{-6}$  ნაწილს. გამოდის, რომ  $g$  სიდიდის განსაზღვრის შეფარდებითი სიზუსტე ამავე რიცხვის, ე. ი.  $1 \cdot 10^{-6}$ -ის ტოლია. (24) ფორმულიდან ჩანს, რომ საქანის  $l$  დაყვანილი სიგრძის განსაზღვრის შეფარდებითი სიზუსტეც ამავე რიგისაა, ე. ი.  $1 \cdot 10^{-6}$  უდრის, რაც სეკუნდიანი საქანის შემთხვევისათვის  $l$  სიგრძის განსაზღვრაში მოგვეცემს  $1 \mu$  რიგის შეცდომას. იმავე (24) ფორმულიდან ჩანს, რომ  $T$  პერიოდისათვის შეფარდებითი სიზუსტე იქნება  $0,5 \cdot 10^{-6}$ , რაც იმავე სეკუნდიანი საქანის შემთხვევისათვის  $T$  პერიოდის განსაზღვრაში მოგვეცემს  $0,5 \cdot 10^{-6}$  რიგის შეცდომას. ნახევარსეკუნდიანი საქანისათვის შეცდომები უნდა იქნეს  $0,25 \mu$  და  $0,25 \cdot 10^{-6}$  სეკუნტზე ნაკლები, რაშიაც არ არის ძნელი დავრწმუნდეთ.

ფორმულები (10) და (11) გამოყვანილია  $g$  სიმძიმის ძალის განსაზღვრისათვის იდეალურ პირობებში, როდესაც საქანი აბსოლუტურად მყარი სხეუ-

ლია, მისი სიგრძე უცვლელია, მისი რხევა წარმოებს უძრავ და უცვლელ შტატივზე, უპაერო სივრცეში, მუდმივი ტემპერატურისას, მასზე არ მოქმედებს არავითარი სხვა ძალა, გარდა სიმძიმის ძალისა და ა. შ. სინამდვილეში კი მთელი რიგი ფაქტორების ზეგავლენით საქანის დაყვანილი სიგრძე სულ მუდამ ცვლილებაშია, რაც იწვევს *T* პერიოდის ასეთივე ცვლილებას, თუმცა ამავე დროს შესაძლებელია პერიოდი იცვლებოდეს ზოგიერთი ფაქტორის სხვა გზით მოქმედი გავლენის შედეგად და ა. შ. მართლაც, დაკვირვებები მიმდინარეობს საქანის შემწვობით, რომელიც დრეკადია, რის გაყო ის რხევის დროს განიცდის სხვადასხვა დეფორმაციას, მისი პრიზმის წიბო სრიალებს საყრდენზე, შტატივიც დრეკადია ყველა აქედან გამომდინარე შედეგით, ჰაერის ტემპერატურა დაკვირვების სივრცეში ცვალებადია და სხვა. ამიტომ ისეთი მაღალი სიზუსტის მისაღწევად, რომელიც ზემოთ იყო აღნიშნული, საქირაო საგულდაგულო შესწავლა იმ მიზეზებისა, რომლებიც ამახინჯებენ დაკვირვების შედეგებს, რათა შესაძლებელი იყოს სათანადო შესწორებათა შეტანა საქანის / დაყვანილ სიგრძეში და მის *T* პერიოდში. ეს შესწორებებია:

1. შესწორება ამპლიტუდაზე, რაც გამოანგარიშებული უნდა იქნას (10'') ფორმულის მიხედვით.
2. შესწორება ტემპერატურაზე. საქანის დაყვანილი სიგრძე საქირაო მიყვანილ იქნეს გარკვეულ ტემპერატურაზე, მაგალითად, 15°-ზე.
3. შესწორება საათის სელაზე.
4. შესწორება ჰაერის სიმკვრივეზე.
5. შესწორება შტატივის რხევაზე.
6. შესწორება პრიზმის წიბოს ფორმაზე.
7. შესწორება დედამიწის მაგნიტური ველის გავლენაზე.

ზემოთ ჩამოთვლილი შესწორებები სათანადოდ იქნება განხილული ქვემოთ.

*საქანის ციხისა გეგმა*

### § 6. საქანის რხევის პერიოდის განსაზღვრა თანხვედნის მეთოდით

საქანის რხევის *T* პერიოდი ისაზღვრება მისი რხევათა შედარების საშუალებით ასტრონომიული საათის საქანის რხევებთან; ასტრონომიული საათის სელა კი შემოწმებული უნდა იქნეს დროის სათანადო ასტრონომიული განსაზღვრის მიხედვით; საქანიან საათის მაგიერ შეიძლება ქრონომეტრის გამოყენებაც. ამაჟამად ყველაზე უფრო მიზანშეწონილად და ძიჩნეული რხევათა შედარება თანხვედნის მეთოდით. ვთქვათ, გვაქვს საქანიანი ნორმალური საათი, რომლის ჩვენება მუდამ თანხვედება ასტრონომიული გზით განსაზღვრულ დროის მომენტს. იყოს მისი საქანი ერთსეკუნდიანი, რაც იმას ნიშნავს, რომ ეს საქანი ერთ სრულ რხევას შეასრულებს ორი სეკუნდის განმავლობაში; სხვანაირად რომ ვთქვათ, საქანი წონასწორობის მდგომარეობის გავლის მომენტიდან კვლავ ამ წონასწორობის მდგომარეობის საწინააღმდეგე მიმართულებით გავლას ანდომებს ერთ სეკუნდს. ცხადია წონასწორობის მდგომარეობის ერთ და იმავე მიმართულებით ზედიზედ გავლას ასეთი საქანი მოანდომებს ორ სეკუნდს. დაკვიდრთ სამუშაო საქანი, რომლის რხევის  $T_1$  პერიოდს



ვეძებთ, საათის საქანის წინ ისე, რომ მისი რხევა ხდებოდეს საათის საქანის რხევის სიბრტყის პარალელურ სიბრტყეში. თუ სამუშაო საქანის რხევის პერიოდი  $T_1$  ცოტათი განსხვავდება საათის საქანის რხევის  $T=1$  სეკ. პერიოდისაგან, მაშინ ჩვენ ამ საქანების ერთდროულად რხევის დროს ვამჩნევთ, რომ დროგამოშვებით საქანები წონასწორობის მდგომარეობას გაივლიან ერთდროულად; ყოველ ასეთ შემთხვევაში ჩვენ ვამბობთ, რომ მოხდა საქანების თანხედენა, რის შემდეგ საქანები კვლავ აიშლებიან მეორე თანხედენამდე და ა. შ. თანხედენის დროს შეაძლებელია საქანები მიდიოდნენ ერთნაირი ან საწინააღმდეგო მიმართულებით. ჩვენ ჯერ განვიხილოთ ერთნაირი მიმართულების თანხედენები. მოვიყვანოთ ჩვენი საქანები რხევით მოძრაობაში და რამდენიმე ხნის შემდეგ, ვთქვათ, მათ გაიარეს წონასწორობის მდგომარეობა ერთდროულად ერთი და იმავე ნიმართულებით; ამ მომენტიდან, რომელსაც ჩვენ ნულით აღვნიშნავთ, ვთვალოთ საათის საქანის რხევათა რიცხვი, ე. ი. მისი ყოველი გავლა წონასწორობის მდგომარეობაში. თუ  $T_1 < T$ , მაშინ საათის საქანი თანდათან ჩამორჩება სამუშაო საქანს და რამდენიმე ხნის შემდეგ ისინი კვლავ ერთდროულად გაივლიან წონასწორობის მდგომარეობას, მაგრამ ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართულებით. ჩვენ მოვეუცადოთ იმ დროს, როდესაც საქანები წონასწორობის მდგომარეობას გაივლიან კვლავ ერთნაირი მიმართულებით. ვთქვათ, პირველი მომენტიდან ამ უკანასკნელ მომენტამდე საათის საქანმა შეასრულა  $c$  რხევა, რაც ჩვენ უშუალოდ დათვლით გვაქვს მიღებული; ძნელი მისახვედრია არ არის, რომ სამუშაო საქანი ამ დროის განმავლობაში  $(c+2)$  რხევას შეასრულებს, რადგან იგი უფრო ჩქარა ირხევა;  $c$  რიცხვს აქ ემატება 2 და არა 1, რადგან  $T$  და  $T_1$  ნახევარი პერიოდებია და არა სრული; თანხედენა რომ ერთნაირი მიმართულებით მოხდეს, სამუშაო საქანს საათის საქანთან შედარებით დასკირდება დამატებით ერთი სრული რხევის ან, რაც იგივეა, ორჯერ ნახევარი რხევის შესრულება. რადგანაც  $T_1$  პერიოდი ისეთივე ხასიათის განსაზღვრულ უცვლელ სიდიდეს წარმოადგენს, როგორსაც პერიოდი  $T$ . ჩვენ შეგვიძლია დავეწეროთ შემდეგი ტოლობა:

$$cT = (c+2)T_1, \quad (3.25)$$

რომელიც, რადგან  $T=1$ , ასე უნდა დაიწეროს:

$$c = (c+2)T_1$$

ან

$$T_1 = \frac{c}{c+2}. \quad (3.26)$$

სამუშაო საქანის  $T_1$  პერიოდი მეტი რომ ყოფილიყო საათის საქანის პერიოდზე, მაშინ მივიღებდით:

$$T_1 = \frac{c_1}{c_1-2}. \quad (3.26')$$

(26) და (26') ტოლობანი შეიძლება დაიწეროს შემდეგი სახით:

$$T_1 = \frac{c}{c \pm 2} . \quad (3.26'')$$

აქედან, რადგანაც  $c$  დაკვირვებიდან ვიცით, ადვილად ვიპოვით  $T_1$ -საც. ჩვენ წინა მაგალითის განხილვისას მხოლოდ ისეთი თანხედნები ავიღეთ, როდესაც საქანები ერთი და იმავე მიმართულებით მოძრაობდნენ; რასაკვირველია, ეს არ არის სავალდებულო, და ჩვენ შეგვიძლია ავიღოთ მათთან ერთად ისეთი თანხედნებიც, როდესაც საქანები ერთიმეორის საწინააღმდეგოდ მოძრაობენ. ამ შემთხვევაში თანხედნათა რიცხვი ორჯერ გადიდება და სათანადო ტოლობა ახლა ასე დაიწერება:

$$cT = (c \pm 1)T_1 . \quad (3.27)$$

საიდანაც, რადგან  $T = 1$  სექ., გვექნება:

$$T_1 = \frac{c}{c \pm 1} . \quad (3.27')$$

გავადიფერენციალოთ (27') ტოლობა და შევცვალოთ დიფერენციალები შესაბამის სასრული სხვაობებით, რის შედეგად დაიწერება გამოსახულება:

$$\Delta T = \pm \frac{\Delta c}{(c \pm 1)^2} .$$

აქედან ჩანს თანხედნათა მეთოდის დიდი უპირატესობა, რომელიც იმაში მდგომარეობს, რომ  $c$  სიდიდის ზრდასთან დაკავშირებით  $\Delta T$  ცდომილება,  $\Delta c$ -ს ერთი და იმავე მნიშვნელობისათვის, ძლიერ ეცემა. ეს გარემოება შესაძლებლად ხდის  $T$  პერიოდის  $1.10^{-7}$  სექ. სიზუსტით განსაზღვრას, თუ  $c$  სიდიდეს სათანადოდ შევარჩევთ.

(27') ფორმულა გამოყვანილია იმ შემთხვევისათვის, როდესაც სამუშაო საქანის  $T_1$  პერიოდი დაახლოებით ერთ სექუნდს უდრის. ახლა, თუ ჩვენ  $T_1$  პერიოდს დაახლოებით 0,5 სექ. ტოლს ავიღებთ, მაშინ (27)-ის მაგიერ გვექნება:

$$cT = (2c \pm 1)T_1 \quad (3.28)$$

ან, რადგანაც  $T = 1$ , მივიღებთ:

$$T_1 = \frac{c}{2c \pm 1} . \quad (3.28')$$

ავიღოთ შემთხვევა, როდესაც მნიშვნელში  $\pm$ ნიშანია, მაშინ:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{c}{2c+1} = \frac{c + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}}{2c+1} = \frac{c + \frac{1}{2}}{2c+1} - \frac{\frac{1}{2}}{2c+1} = \\ &= \frac{2c+1}{2(2c+1)} - \frac{1}{2(2c+1)} = \frac{1}{2} - \frac{1}{4c+2} , \end{aligned}$$

$$T_1 = 0,5 \text{ სეკ} - \frac{1}{4c+2};$$

ეს ის შემთხვევაა, როდესაც  $T_1 < 0,5$  სეკ. თუ  $T_1 > 0,5$  სეკ., მაშინ გვე-  
ქნება:

$$T_1 = 0,5 \text{ სეკ.} + \frac{1}{4c-2},$$

ან ზოგადად:

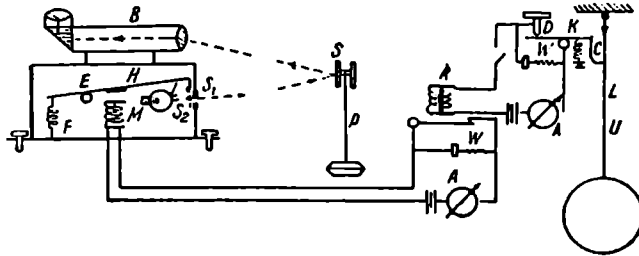
$$T_1 = 0,5 \pm \frac{1}{4c \pm 2}.$$

თუ, მაგალითად, სამუშაო საქანისათვის დაახლოებით  $T_1 = 0,5 \pm 0,008$ , მაშინ ყოველ 30 სეკუნდში საშუალოდ ერთი თანხედენა მოხდება; მართლაც,  $30 \text{ სეკუნდში სამუშაო საქანი } 60 \text{ რხევას შეასრულებს დაახლოებით, რის გამო } 0,008 \times 60 = 0,48$ , ე. ი. შეადგენს თითქმის 0,5 სეკუნდს.

სამუშაო საქანის რხევის პერიოდის განსაზღვრაში  $2,5 \cdot 10^{-7}$  სეკ. სიზუსტის მისაღწევად, რომელიც შეესაბამება სიმძიმის ძალის  $1.10^{-3} CGS$  სიზუსტით განსაზღვრას, აუცილებელია გვექონდეს, გარდა ზუსტი საათისა, სათანადო დამხმარე ხელსაწყოები, რომელნიც ტექნიკურად გააადვილებენ და დააზუსტებენ თანხედენათა მომენტების აღნიშვნას დაკვირვების დროს. ამ მიზნისათვის იყენებენ სხვადასხვა სისტემის თანხედენის აპარატებს. ერთი ისეთი ხელსაწყო სქემატურად წარმოდგენილია ნახაზ 13-ზე.

*L* ელექტრონათურის სინათლე ხერცელში გველის შემდეგ ეცემა *P* საქანის ზედა ბოლოზე მიმაგრებულ *S* პატარა სარკეზე, რომელიც მას არეკლავს *B* ქოგარისაკებ, სადაც ხერცელის მკაფიო გამოსახულება მოჩანს. როდესაც საქანი *P* არ ირხევა, მაშინ ხერცელის გამოსახულება თანხედება ქოგარის ჰორიზონტალურ შუაძაფს; საქანის რხევის დროს *S* სარკის დახრათა ცვალებადობის გამო გამოსახულება მოძრაობს *B* ქოგარის მხედველობის არეში ზევით და ქვევით. *S*<sub>1</sub> უძრავი ხერცელის პარალელურად მოთავსებულია მეორე მოძრავი ხერცელი *S*<sub>2</sub>, რომელიც მიმაგრებულია *E* ღერძზე მბრუნავ *H* ბერკეტზე; ამ უკანასკნელს იზიდავს ელექტრომაგნიტი *M*, როდესაც მასში დენს გაატარებენ, რომლის ჩართვა და ამორთვა წარმოებს  $\chi$  საათის საქანის შეწყობით; დენის შეწყვეტისთანავე *F* ზამბარაკი *H* ბერკეტს კვლავ დაუბრუნებს მის საწყის მდგომარეობას. ხერცელი *S*<sub>2</sub> თავისი ზევით და ქვევით მოძრაობის დროს განსაზღვრულ მომენტებში სავსებით ემთხვევა *S*<sub>1</sub> ხერცელს. ამ დროს ფაქტიურად ისინი წარმოადგენენ ერთ ხერცელს, რის შედეგად *L* ნათურის სინათლის სხივი თავისუფლად მიდის საქანის *S* სარკისაკენ; დანარჩენი დროის განმავლობაში *L* ნათურის სინათლე არ ეცემა საქანის *S* სარკეს და ხერცელის გამოსახულებაც არ მოჩანს. მაშასადამე, თუ აპარატი ამუშავებულია, ე. ი. ირხევა სამუშაო საქანი *P* და  $\chi$  საათის საქანიც, თანხედენის მომენტს სწორედ მაშინ ექნება ადგილი, როდესაც ხერცელის გამოსახულება ქოგარის ჰორიზონტალურ ძაფზე გაივლის. მართლაც, საათის საქანის წონისწორობის მდებარეობაში გველის მომენტს აღნიშნავს ის გარემოება, რომ

გამოსახულება გამოჩნდება, რაც, როგორც ზევით დავინახეთ, მოხდება მხოლოდ მაშინ, როდესაც საქანის კონტაქტი ჩართავს ან ამორთავს დენს ელექტრომაგნიტში; სამუშაო საქანი, როგორც ვთქვით, ისეა დაყენებული, რომ წონასწორობის მდებარეობაზე გავლის დროს გამოსახულებას მივიღებთ კოგრის ჰორიზონტალურ შუა ძაფზე. რასაკვირველია, შეიძლებადა ორივე საქანის სხეუანიარადაც დაყენება: მაგ., საათის საქანის კონტაქტები ჩაგვეერთო მისი უკიდურესი დამოკრების მომენტებში და ა. შ.



ნახ. 14.

ჩვენ აქ არ შეეჩერდებით ამ აპარატის სხვა დეტალებზე, რომელთაგან ზოგიერთები ნახაზიდანაც გასაგებია. არ შეეჩერდებით აგრეთვე უკანასკნელ ხანებში თვით დაკვირვების მეთოდების გაუმჯობესებათა ცდებზე და მიღწევებზე. აღვნიშნავთ მხოლოდ, რომ ამჟამად გამოშუშავებულია თანხვედრათა აღნიშვნის ფოტოგრაფიული და აგრეთვე ფოტოელექტრული მეთოდების მთელი რიგი, რომლებიც გრაფიკული დაკვირვებათა მნიშვნელოვანი გაადვილების და გაიაფების რეალურ შესაძლებლობას გვაძლევენ.

## § 7. ძირითადი საყრდენი გრაფიკული პუნქტები ხსრ კავშირში

სიმძიმის ძალის აბსოლუტური განსაზღვრა, რომლის შედეგად მიიღება თვით სიდიდე  $g$ , ე. ი. სიმძიმის ძალის აბსოლუტური მნიშვნელობა, ხდება შესაბრუნებელი საქანების შემწეობით. მაგრამ ერთდროულად თანდათან დამუშავდა სიმძიმის ძალის შეფარდებითი განსაზღვრის ხერხები, რომლებიც უზრუნველყოფენ  $g$  სიდიდის სხვაობის განსაზღვრას ორ სხვადასხვა პუნქტში. ამასთან ეს ხერხები აღმოჩნდა შეუდარებლად უფრო მარტივი და ამავე დროს უფრო ზუსტიც, ვიდრე ზემოთ აღწერილი აბსოლუტური ხერხი. ამ გარემოებით აიხსნება, რომ აბსოლუტურ დაკვირვებათა წარმოება თანდათან შეწყდა. ცხადია, რომ ამ შემთხვევისათვის საჭიროა ვიცოდეთ სიმძიმის ძალის აბსოლუტური სიდიდე დედამიწის ზედაპირის ერთ გამოსავალ წერტილში მაინც. ასეთ პუნქტად ამჟამად მიჩნეულია პოტსდამის გეოდეზიური ინსტიტუტი, სადაც 1898—1904 წლებში ჩატარებულ იქნა სიმძიმის ძალის აბსოლუტური განსაზღვრა შესაძლებელი მაღალი სიზუსტით. სათანადო დაკვირვებები 40 სერიის რაოდენობით წარმოებულ იქნა ხუთი სხვადასხვა შესაბრუნებელი საქანის შემწეობით, რის შედეგად პოტსდამის გეოდეზიური ინსტიტუტის საქანთა ზალისათვის ( $\varphi = 52^{\circ}22',88$  ჩრდ.,  $\lambda = 13^{\circ}4',06$  აღმ. გრინ-

ვიჩიდან,  $H$  სიმაღლე ზღვის დონიდან 87 მ.) სიმძიმის ძალის აჩქარების მნიშვნელობა უდრის

$$981,274 \pm 0,003 \text{ სმ/სეკ}^2.$$

სეკუნდიანი საქანის სიგრძე  $L = 994,239 \pm 0,003$  მმ.

მრავალი წლის განმავლობაში ლენინგრადში, მეტროლოგიის საკავშირო სამეცნიერო-საკვლევო ინსტიტუტში მიმდინარეობს მუშაობა სიმძიმის ძალის აბსოლუტური განსაზღვრისათვის. დ. ი. მენდელეევის იდეის მიხედვით, დაკვირვება წარმოებდა საქანებზე, რომლებიც შედგებოდა 21,5 და 35 მ სიგრძის მქონე ფოლადის მავთულეებზე დაკიდებული მძიმე სფეროებიდან. პირველი პერიოდის დაკვირვებებიდან 1906—1911 წლებში ივანოვის მიერ მიღებულ იქნა  $g = 981,948 \pm 0,011$  გალ. ბასკოვა 1933—1936 წლებში მიიღო წინასწარი მნიშვნელობა  $g = 981,928$  გალ. ამჟამად იმავე ინსტიტუტში წარმოებს ცდები სიმძიმის ძალის აბსოლუტური მნიშვნელობის განსაზღვრისათვის თავისუფლად ვარდნილი სხეულის მეთოდით. როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, სიმძიმის ძალის აჩქარება პოტსდამში ყველა თანამედროვე განსაზღვრისათვის წარმოადგენს საფუძველს. ამასთან დაკავშირებით ყოველ სახელმწიფოს გააჩნია ერთი ან რამდენიმე საყრდენი პუნქტი, რომლებიც უშუალოდ დაკავშირებულია პოტსდამთან. სსრ კავშირს გააჩნია ოთხი ასეთი პუნქტი:

#### დაკავშირების წელი

პულკოვო	. 1897, 1901, 1930
მოსკოვი .	. 1913
ყაზანი .	. 1908, 1913
პოლტავა	. 1927

გარდა პოტსდამთან კავშირისა, ეს პუნქტები არაერთხელ იყო ერთმანეთთან დაკავშირებული. ყველა ეს კავშირი საფულდაგულოდ განხილულ იქნა ნ. პარიისკის მიერ, რის შედეგად ხსენებულ საყრდენი პუნქტათვის მის მიერ შედგენილ იქნა გამათანაბრებელი სისტემა სიმძიმის ძალის აჩქარებათა მნიშვნელობებისა. ნ. პარიისკის მონაცემები ასეთია:

საყრდენი პუნქტის ადგილმდებარეობა	$\varphi$	$\lambda$	$H$	განტოლებული მნიშვნელობა	საშუალო ცდობილება
1. პულკოვო, ობსერვატორიის სარდაფი .	59°46',3	30°19',7	71 მ	981,9005	$\pm 0,0005$
2. მოსკოვი, ობსერვატორია, შუა სარდაფი .	55°45',3	37°34',3	145 „	981,5590	$\pm 0,0007$
3. ყაზანი, ობსერვატორიის სარდაფი . . . . .	55°47',4	49°07',3	76 „	981,5587	$\pm 0,0008$
4. პოლტავა, ობსერვატორიის სარდაფი . . . . .	49°36',0	34°34',0	146 „	981,0064	$\pm 0,0007$

აღსანიშნავია, რომ პოტსდამთან კავშირი აქვს აგრეთვე თბილისსა და ოდესას, მაგრამ, რადგანაც კავშირი აქ არასაკმარისად საიმედოა, ამიტომ ეს პუნქტები საყრდენად არ არის მიჩნეული.

მოგვყავს აქვე ცხრილი იმ პუნქტებისა, სადაც სიმძიმის ძალის აბსოლუტური განსაზღვრები დაყვანილია პოტსდამზე:

წელი	პუნქტი	გამოყენებული საკანები	პოტსდამზე დაყვანილი მნიშვნელობანი
1889	მადრიდი	ოთხი შესაბრუნებელი საკანი . . . . .	981,270
1894	პარიზი	ოთხი შესაბრუნებელი საკანი სხვადასხვა სიგრძისა და წონისა	581,282
1894	რომი	ძაფიანი ორი საკანი სხვადასხვა სიგრძისა . . . . .	981,274
1904	ვენა	ორი შესაბრუნებელი საკანი სხვადასხვა წონისა . . . . .	981,283
1906	პოტსდამი	ხუთი შესაბრუნებელი საკანი სხვადასხვა წონისა	981,274
1936	ლენინგრადი	გრძელი საკანები მათელუბზე . . . . .	981,272

\_\_\_\_\_

## თ ა 3 0 I V

### სიმძიმის ძალის შეფარდებითი განსაზღვრა სპანინანი ხელსაწყოს შიგნითი

#### § 1. სპანინანი ხელსაწყოს შემწობით სიმძიმის ძალის შეფარდებითი განსაზღვრის მეთოდის ხაფუძვლები

სიმძიმის ძალის აბსოლუტურ განსაზღვრათა წარმოება, როგორც დაეინახეთ, დაკავშირებულია დიდ სიძნელებთან და ამასთან მოითხოვს ხანგრძლივ დაკვირვებებს, რის გამო, ცხადია, არ იყო არავითარი იმედი, რომ ამ მეთოდით მოკლე ხნის განმავლობაში მოხერხდებოდა სიმძიმის ძალის განაწილების შესწავლა დედამიწის ზედაპირზე. ამიტომ, როგორც ზემოთაც იყო აღნიშნული, იმ თავითვე, ჯერ კიდევ გასული საუკუნის დასაწყისიდან, მიმართეს სიმძიმის ძალის შეფარდებით განსაზღვრას, როცა იზომება მხოლოდ სხვაობა ან შეფარდება სიმძიმის ძალის მნიშვნელობებისა ორ სხვადასხვა პუნქტში. მთავარი უპირატესობა შეფარდებითი მეთოდისა აბსოლუტური მეთოდის წინაშე იმაში მდგომარეობს, რომ დაკვირვებისათვის ის იყენებს უცვლელი ფორმის საქანს, რომელსაც გააჩნია მხოლოდ ერთი უცვლელი დაკიდების ღერძი, რაც, ცხადია, შეუდარებლად ამარტივებს შესაბამის დაკვირვებათა წარმოებას, როგორც ამას ქვემოთ დაეინახავთ.

გამოიყვანოთ ზოგიერთი ძირითადი ფორმულა სიმძიმის ძალის შეფარდებითი განსაზღვრისათვის. ვთქვათ გვაქვს სამუშაო საქანი, რომლის სიგრძე  $l$ -ის ტოლია. თუ ჩვენ ამ საქანით განვსაზღვრავთ  $g$  სიმძიმის ძალის აჩქარებას ორ სხვადასხვა პუნქტში, შეგვიძლია დავწეროთ:

$$T_1 = \pi \sqrt{\frac{l}{g_1}} \quad \text{და} \quad T_2 = \pi \sqrt{\frac{l}{g_2}},$$

სადაც  $g_1$ ,  $g_2$  და  $T_1$ ,  $T_2$  სიმძიმის ძალისა და საქანის რხევის პერიოდის მნიშვნელობებია შესაბამისად პირველ და მეორე პუნქტში. დავუშვათ, რომ  $g_1$  ცნობილია, ე. ი. სიმძიმის ძალის აბსოლუტური მნიშვნელობა პირველი პუნქტისათვის ცნობილია, რაც იმას ნიშნავს, რომ ეს პუნქტი საყრდენი პუნქტია. მაშინ ზემოთ დაწერილი ფორმულებიდან, მათი კვადრატში აყვანისა და ერთმანეთზე გაყოფის შემდეგ, მივიღებთ:

$$\frac{g_2}{g_1} = \frac{T_1^2}{T_2^2}, \quad (4.1)$$

$$\xi_2 = \frac{T_1^2}{T_2^2} \xi_1. \quad (4.2)$$

ამ ფორმულის მარჯვენა ნაწილში შემავალი ყველა სიდიდე ცნობილია, რის გამო შეიძლება მოინახოს  $\xi_2$  სიდიდის მნიშვნელობაც. თუ აბსოლუტური მნიშვნელობა სიმძიმის ძალისა პირველ პუნქტში, რომელიც გამოსავალ პუნქტადაა მიჩნეული, არ არის ცნობილი, მაშინ (2) ფორმულა ამყარებს გარკვეულ დამოკიდებულებას  $\xi_2$  და  $\xi_1$  შორის.

ჩვენ ვხედავთ, რომ საქანის დაყვანილი სიგრძე  $l$ , რომლის გაზომვა ასე ძნელია, სრულიად გაქრა (2) ფორმულიდან. ამასთან შესაძლებელია ზოგიერთი შესწორება უგულვებელყოთ, რადგანაც შეიძლება ისინი გავხადოთ ერთმანეთის ტოლად ორივე პუნქტში. მაგრამ უნდა გვახსოვდეს, რომ საქანის სიგრძე მუდმივი უნდა დარჩეს ორივე პუნქტისათვის, რისთვისაც საჭიროა ყოველგვარი გავლენა, რომელიც კვლის საქანის სიგრძეს ან მის პერიოდს, გამორიცხულ იქნეს, ან სათანადო სიზუსტით იქნეს გაანგარიშებული და შეტანილი (2) ფორმულაში. რომ ვიყოთ დარწმუნებული საქანის სიგრძის უცვლელობაში, საჭიროა მას შემდეგ, რაც  $g$  გავზომეთ ერთ ან რამდენიმე პუნქტში, კვლავ დავბრუნდეთ გამოსავალ პუნქტში და აქ განვსაზღვროთ საქანის რხევის პერიოდი; გამოსავალ პუნქტში საქანის რხევის იმ პერიოდების თანხმობა, რომლებიც იქნა მიღებული სხვა პუნქტებში დაკვირვებათა წინ და შემდეგ, წარმოადგენს ერთგვარ კონტროლს საქანის სიგრძის უცვლელობაზე. არის შემთხვევები, როდესაც საქანის სიგრძე იცვლება ჩვენთვის სრულიად შეუმჩნეველი მიზეზების გამო, განსაკუთრებით ხელსაწყოს ერთი პუნქტიდან მეორეზე გადატანისას. ასეთი შემთხვევითი გავლენის შემცირების მიზნით ხელსაწყოს ჩვეულებრივად გააჩნია სამი ან ოთხი საქანი, რომელთა პერიოდების თანხმობა რომელიმე პუნქტზე საშუალებას იძლევა ჩავთვალოთ, რომ საქანის სიგრძე არ შეცვლილა.

საქანიანი ხელსაწყოს სიდიდისა და წონის შემცირების მიზნით იყენებენ ნახევარსეკუნდიან საქანებს, რომელთათვის, როგორც ვიცით, სიმძიმის ძალის შეცვლა  $0,001$  სმ/სეკ<sup>2</sup> სიდიდით იწვევს პერიოდის  $2,5 \cdot 10^{-7}$  სეკუნდით შეცვლას; ამიტომაც სიზუსტე განსაზღვრისა, როგორც რხევათა პერიოდისა, ისე ყველა საჭირო შესწორებისა, უნდა იყოს ამ სიდიდეზე ნაკლები, ვთქვათ,  $1 \cdot 10^{-7}$  სეკ; რომლისადმი ჩვეულებრივად მიისწრაფვიან ამჟამად.

ფორმულა (2) პრაქტიკული გამოყენებისას ქმნის ზოგიერთ უხერხულობას, რადგანაც სათანადო გამოთვლისათვის შეიძინიშნაინი ლოგარითმები არც კი არის საკმარისი, რაც გამოწვეულია იმ გარემოებით, რომ  $T_1$  და  $T_2$  პერიოდები, როგორც ზემოთ იყო ნათქვამი, იზომება სიზუსტით მეშვიდე ნიშნამდე. ვინაიდან  $T_1$  და  $T_2$  სიდიდეთა შორის განსხვავება მცირეა, ეს ფორმულა შეიძლება ისე გარდაიქმნას, რომ საქმე გვეკონდეს  $T_2 - T_1 = \Delta T$  სხვაობასთან, რომლის გამოანგარიშებისათვის საკმარისი იქნება ნიშანთა მცირე რიცხვი. მართლაც, ფორმულა (2) შეიძლება გადაეწეროს ასე:



$$g_2 = g_1 \frac{T_1^4}{(T_1 + \Delta T)^4} = \left(1 + \frac{\Delta T}{T_1}\right)^{-4} g_1,$$

რომელიც მწკრივად გაშლის შემდეგ, მოგვცემს:

$$g_2 = g_1 - 2g_1 \frac{\Delta T}{T_1} + 3g_1 \left(\frac{\Delta T}{T_1}\right)^2 - 4g_1 \left(\frac{\Delta T}{T_1}\right)^3 + \dots \quad (4.3)$$

უფრო ხშირად  $\Delta T$  იმდენად მცირეა, რომ მისი კვადრატი შესაძლებელია უგულებელყოფილ იქნეს, რის გამო საკმარისია დაკემაყოფილდეთ ამ ფორმულის მარჯვენა ნაწილის პირველი ორი წევრით. მოცემული პუნქტისათვის (3) ფორმულით სიმძიმის ძალის გამოანგარიშებისას საკმარისია მეორე წევრი გამოეთვალო ოთხი ან ხუთი ნიშნით.

შევაფასოთ გავლენა  $g$  სიმძიმის ძალის განსაზღვრაზე იმ შეცდომისა, რომლითაც საქანის რხევის პერიოდი  $T$  ისაზღვრება. ამისათვის გამოვიანგარიშოთ კოეფიციენტის სიდიდე  $\Delta T$ -სთან (3) ფორმულის მეორე წევრში, სადაც  $g_1$  მივიჩნით 980000 მილიგალის ტოლად, ხოლო  $T_1 = 0,508$  სექ., მაშინ დამრგვალების შემდეგ, გვექნება:

$$-\frac{2g_1}{T_1} = -0,386 \cdot 10^{-7}.$$

აქედან ჩანს, რომ  $10^{-7}$  სექ. შეცდომას  $T$  პერიოდის განსაზღვრაში შეესაბამება 0,3858 მილიგალი, ან შრგველად 0,4 მილიგალი  $g$ -ს გაზომვაში; შებრუნებით, 1 მილიგალს  $g$ -სთვის ასევე შეესაბამება  $2,5 \cdot 10^{-7}$  სექ. შეცდომა  $T$  პერიოდისათვის.

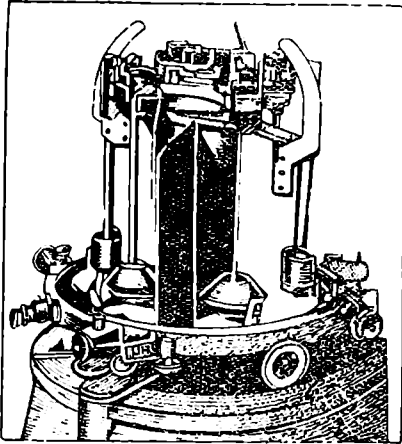
## § 2. ოთხსაქანიანი ხელსაწყოები

ჩვენ არ შევჩერდებით იმ საქანიანი ხელსაწყოების განხილვაზე, რომლებიც სხვადასხვა ავტორის მიერ აგებულ იქნა სხვადასხვა დროს და რომლებსაც გააჩნდა მრავალი სხვადასხვა ნაკლოვანება. როგორც მოსალოდნელი იყო, დროთა განმავლობაში ამ ხელსაწყოების თანდათან გაუმჯობესების შედეგად წარმოიშვა უფრო სრულყოფილი კონსტრუქციის ხელსაწყოები. ამჟამად მოიპოვება საქანიანი ხელსაწყოები ოცდაათ სხვადასხვა ტიპამდე.

ადრინდელ პერიოდში აგებულ საქანიან ხელსაწყოთა შორის აღსანიშნავია შტერნეის ხელსაწყო, რომელსაც პირველად მხოლოდ ერთი საქანილა გააჩნდა. ამ ხელსაწყოს ერთი მთავარი ნაკლი ის იყო, რომ მას არ გააჩნდა შტატივის რხევაზე შესწორების განსაზღვრის საშუალება, ხოლო მეორე მთავარი ნაკლი დაკავშირებული იყო იმ გარემოებასთან, რომ ყოველი დაკვირვების შემდეგ აუცილებელი იყო საქანის ჩამოხსნა და მისი შენაცვლება მეორეთი, რაც იწვევდა დროის დაკარგვას, რომელიც საპირო იყო ახლად დაკიდებული საქანის ტემპერატურის გათანაბრებისათვის გარემოსთან.

უფრო სრულყოფილი ხელსაწყო აგებულ იქნა შტიუკრატის მიერ გასული საუკუნის ოთხმოცდაათიანი წლების შუაში. ამ ხელსაწყოს სამი საქანი გააჩნდა და არა ოთხი, როგორც ეს ჰქონდა იმავე ავტორის შემდეგი გამო-

შეების ოთხსაქანიან ხელსაწყოს, რომელიც მან გასული საუკუნის მიწურულში ააგო. ჩვენ ქვემოთ დავინახავთ, რომ შტატივის რხევებზე შესწორების განსაზღვრა რეზონანსის ხერხით სამსაქანიანი ხელსაწყოს შემთხვევაში მოსახერხებელია ნხოლოდ ორი საქანისათვის, იმ დროს როდესაც ოთხსაქანიანი ხელსაწყოათვის ეს მოსახერხებელია ოთხივე საქანისათვის. ამიტომაც ჩვენ აქ აღვწერთ შტიუკრატის ტიპის ოთხსაქანიან ხელსაწყოს, რომელსაც აშეამად უფრო ხშირად იყენებენ.

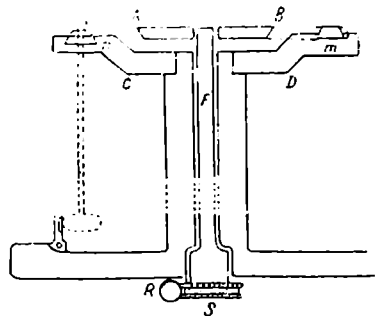


ნახ. 15.

ნახაზ 15-ზე წარმოდგენილია ერთ-ერთი უკანასკნელი ტიპის ოთხსაქანიანი ხელსაწყო, რომელიც შეიცავს შტატივის ორი ხუფით და დასადგმელით, ოთხ საქანს, მთვლელს, ორ საქანს-თარაზოს, ორ თერმომეტრს მასივურ ბედეში, ვერცხლისწყლიან მანომეტრს და ჰაერის ტუმბოს.

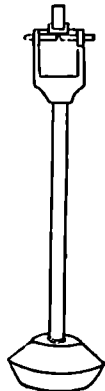
შტატივის ფუძეს წარმოადგენს თითბრის მასივური დისკო დიამეტრით 35 სმ, რომელსაც გააჩნია სამა დასადგმელი ხრახნი. დისკოს ცენტრში ამართული მასივური სვეტის ზედა თავზე

დამაგრებულია მრგვალი  $CD$  ფირფიტა ოთხი გამომწერილი კრონშტეინით; ამ ფირფიტის კრილი, რომელიც მის ცენტრზე და ორ კრონშტეინზე გადის, მოცემულია ნახაზ 16-ზე. სვეტს მისი სიგრძის გასწვრივ ერთმანეთისაგან თანაბარ მანძილზე მიყვება ოთხი წიბო ფირფიტების სახით, რომლებიც ხელსაწყოს შინაგან სივრცეს ყოფენ ოთხ განყოფილებად. ხსენებული ოთხი კრონშტეინიდან თითოეულ ამ განყოფილებას ზემოდან გადმოყურებს თითო კრონშტეინი, რომელზედაც შესაბამისად დაიკიდება თითო საქანი; გამოდის, რომ ოთხივე საქანი რხევის დროსაც უზრუნველყოფილია ერთმანეთისაგან საკმაოდ იზოლირებულ სივრცით. საქანების დასაკიდად ყოველ კრონშტეინში ჩაკრილია ზემოდან ბრტყლად მოშლიფული აქატის ბალიში, მათი მოშლიფული ზედაპირები ერთ სიბრტყეზე უნდა იყოს განლაგებული. ნახ. 16-ზე ეს ბალიშები აღნიშნულია  $n$  და  $m$  ასოებით. კრონშტეინები და აქატის



ნახ. 16.

ბალიშები ისეა განლაგებული, რომ ერთმანეთის საწინააღმდეგოდ დაკიდებული წვეილი საქანების რხევათა სიბრტყეები ერთმანეთს თანხედებიან. ცენტრალური სვეტი მთელი მის სიგრძეზე შუა ადგილას გამოღრუტნულია, სადაც ჩასმულია  $F$  ღერო; ამ ღეროს ხრახნიანი ზედა ბოლო შედის  $AB$  წრისებურ ფირფიტაში, რომელიც იმყოფება უშუალოდ აქატის ბალიშიან  $CD$  ფირფიტის ზემოთ.  $AB$  ფირფიტა თითქმის მთლიანად ფარავს ფირფიტას კრონშტეინებიდან, მხოლოდ ამ უკანასკნელთა ზემოთ ის ამოკრილია ისე, რომ დაუფარავი რჩება აქატის ბალიშები, რაც  $AB$  ფირფიტის დაწვე-აწვეისას შესაძლებლად ხდის მათზე საქანების დაშვება-აღებას.  $S$  კბილანისა და  $R$  ღეროს შემწვობით შეიძლება  $F$  ღეროს ტრიალი, რაც იწვევს  $AB$  ფირფიტის აწვე-დაწვევას და ამით საქანების აწვე-დაწვევასაც. საქანის დაწვევა წარმოებს საკმარისად ნელა, მაგ., 1—2 მილიმეტრით ერთ მი-ნუტში.



ნახ. 17.

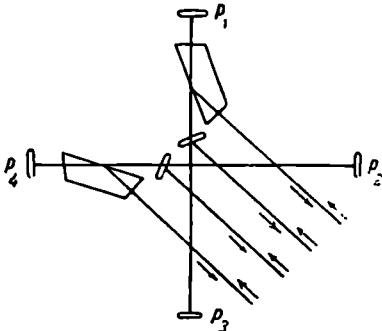
რა თქმა უნდა, ხელსაწყოს გააჩნია მრავალი სხვა დეტალი, რომლებიც უზრუნველყოფენ აღწერილი ძირითადი ნაწილების სათანადოდ რეგულირებას, რომ მათი მოქმედება იყოს სავსებით გამართული. მაგრამ ჩვენ ამ დეტალებზე ვერ შევჩერდებით როგორც აქ, ისე წიგნის სხვა ადგილას.

საქანის თითქმის უცვლელად აქვს შერჩენილი ის ფორმა, რომელიც მას მისცეს მისმა პირველმა ავტორებმა (ნახ. 17). საქანის ქვედა ნაწილი დარჩა ისეთი, როგორც შტერნეის ხელსაწყოშია, სახელდობრ, ის წარმოადგენს ლითონის ღეროს, რომლის ქვედა ბოლოზე ჩახრახნილია და ყრულ ჩარჩილულია ლითონის სხეული; ამ უკანასკნელს აქვს ორი მოკვეთილი კონუსის ფორმა, რომლებიც ერთმანეთთან შეერთებულია უფართესი ფუძეებით. საქანის ზედა ნაწილს აქვს უზანგისებური ფორმა, რომლის შიგნით ჩაქედინულია აქატის პრიზმი; ამ უკანასკნელის ბოლოები გადის უზანგის კრილის გარეთ და წარმოადგენს დამხმარე ნაწილს საქანების დასაკიდებლად. პრიზმებს ზემოთ საქანს გააჩნია ორი სარკე, რომელთა შორის მოქცეულია რგოლი საქანის დასაკიდებლად, რაც ხორციელდება სათანადო კავის შემწვობით. ნახაზე მეორე სარკე და რგოლი არ ჩანს, რადგანაც ისინი იფარება წინა სარკით. საქანები გაკეთებულია თითბრისაგან ან ინვარისაგან.

ყოველი საქანი ირხევა სიბრტყეში, რომელიც, თუ მას სათანადოდ გავრძელებულად წარმოვიდგინო, შტატივის შუაზე ჰქრის. ამავე სიბრტყეში ირხევა მეორე საქანიც, რომელიც დაკიდებულია შტატივის დიამეტრალურად საწინააღმდეგო მხარეზე. გამოდის, რომ საქანთა რხევის სიბრტყეები წვეილ-წვეილად თანხედება ერთმანეთს, რაც, როგორც ზემოთაც იყო აღნიშნული, ერთ-ერთ დიდ უპირატესობათაგანია ოთხსაქანიანი ხელსაწყოსი. იმისათვის, რომ შესაძლებელი იყოს ვაწარმოოთ ოთხივე საქანის რხევა ერთ ადგილიდან,  $AB$  ფირფიტაზე გამართულია ეგრეთ წოდებული ოპტიკური ხიდი, რომელიც შედგება ვერტიკალურად დაყენებული ორი სარკისა და ორი პრიზმისაგან. სათანადოდ სქემა წარმოდგენილია ნახ. 18-ზე, სადაც გარდა ამისა,  $P_1, P_2, P_3$

და  $P_4$ -ით აღნიშნულია სარკეები ოთხივე საქანისა, რომლებიც ნაგულისხმებია დაკიდებულ მდგომარეობაში. პრიზმები და სარკეები მოქცეულია ბუდეებში, რომელთა შემოტრიალება შეიძლება როგორც ჰორიზონტალური, ისე ვერტიკალური ღერძების გარშემო, რაც შესაძლებლად ხდის მათ სათანადოდ რეგულირებას.

ხელსაწყოს გააჩნია ორი ეგრეთ წოდებული საქანი-თარაზო, რომელთა შემწვობით ხდება აქატის ბალიშის ჰორიზონტალურ მდგომარეობაში მოყვანა. ეს თარაზოები წარმოადგენენ განსაკუთრებული ფორმის საქანებს, რომლებსაც ზეწოდან გააჩნიათ თარაზო სარეგულირებო ხრახნებით. ამ საქანი-თარაზოების დაკიდება შეიძლება საქანების ადგილას, რადგანაც მათ მოეპოვებათ საამისო აქატის პრიზმები.



ნახ. 18.

ხელსაწყოს შტატივის ორივე მხარეზე მოთავსებულია ორი თერმომეტრი (ნახ. 16). თერმომეტრი საგანგებოდ მოქცეულია მასიური ლითონის ბუდეში, რომელიც ძლიერ წააგავს საქანს, რათა თერმომეტრის გათბობის პირობები უახლოვდებოდეს საქანის ასეთივე პირობებს. ერთი ამ თერმომეტრთაგანი არის სამალაზიო, რომელიც ტემპერატურის ფენობრივობის შემთხვევაში აჩვენებს საშუალო ტემპერატურას სიმაღლის მიხედვით, რის შესახებ ქვემოთ იქნება ლაპარაკი.

საქანების მოძრაობაში მოსაყვანად თითოეულ მათგანს შტატივის

ქვედა დისკოსთან აქვს ბერკეტი, რომელთა მოქმედებაში მოყვანა ხდება ხელსაწყოს გარედან, სათანადო ტარით.

აღწერილ საქანიან ხელსაწყოს ზემოდან ეხურება თითბრის ხუფი, რომელსაც აქვს სამი ფანჯარა: ერთი ზემოთ - საქანთა რხევაზე დაკვირვებისათვის, ხოლო ორი — თერმომეტრთა ასათვლელად. ხუფი ჰაერზეუვალა, რაც გულისხმობს, რომ ის მკიდროდ ეხება ქვედა დისკოს, რომელიც აგრეთვე ჰაერზეუვალაა.

გარდა ამ მძიმე ხუფისა ხელსაწყოს გააჩნია აგრეთვე მსუბუქი ალუმინიუმის ხუფი, რომელსაც იყენებენ დაკვირვებისათვის ჩვეულებრივ ატმოსფერულ პირობებში.

ხელსაწყო იღვმის ქვესადგამზე, რომელიც ჩამოსხმულია თითბრისაგან და რომელსაც აქვს წაკვეთილი კონუსის ფორმა. ყუთში მოთავსებული შტატივი ხუფით იწონის 80—100 კილოგრამს, ხოლო ხელსაწყოს საერთო წონა აღწევს 200 კილოგრამამდე, რაც დიდ სიძნელეებს ქმნის გადატანისათვის, განსაკუთრებით მთიან, ჰაობიან და სხვა ძნელად მისაწვდომ ადგილებში.

ამიტომ სსრ კავშირში, სახელდობრ, შტერნბერგის სახელობის სახელმწიფო ასტრონომიულ ინსტიტუტში, აგებულ იქნა მსუბუქი ტიპის შტატივი, რომელიც სავსებით უზრუნველყოფს სათანადო სიზუსტეს. ამ ხელსაწყოს საერთო წონა ყუთში დაახლოებით 30 კილოგრამია, ე. ი. სამჯერ ნაკლებია, ვიდრე წონა ზემოაღწერილი შტიუკრატის ხელსაწყოსი. აქედან ცხადია, თუ რამდენად გააადვილა ამ ხელსაწყომ საბჭოთა კავშირის თვალუწყვედნელ ტერიტორიაზე, განსაკუთრებით მის მცვარდნილ ადგილებზე, გრავიმეტრიულ განსაზღვრათა წარმოება.

ეს ხელსაწყო თავისი სიმსუბუქისა და მცირე მოცულობის გამო ადვილად გადაიტანება რკინიგზის სამგზავრო ვაგონში, რომელიც უფრო უზრუნველყოფს მის დაუზიანებლად გადატანას, ვიდრე საბაგაჟო ვაგონი.

აქვე უნდა აღენიშნოთ, რომ ლენინგრადის ასტრონომიულ ინსტიტუტში პაპანიჩის ექსპედიციის სამუშაოთათვის აგებულ იქნა ოთხ საქანიანი ხელსაწყო მინიმალური საქანებით.

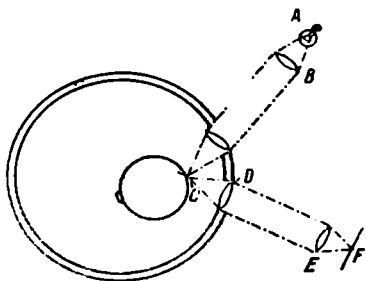
### § 3. მთვლელები

სიმძიმის ძალის შეფარდებითი განსაზღვრისათვის ძირითად სიდიდეს წარმოადგენს საქანის რხევათა პერიოდი  $T$ ; ამიტომ ეს უკანასკნელი, როგორც ვიცით, უნდა გაიზომოს სათანადო სიზუსტით.  $T$  პერიოდის განსაზღვრა, როგორც ზემოთ (III § 6) იყო აღწერილი, ხდება თანხვედნათა მეთოდით, რისთვისაც იყენებენ საათის საქანს, რომლის რხევასთან სათანადოდ დაკავშირებულია ელექტრომაგნიტური მწკვერტის მოქმედება. უფრო გვიან, აღნიშნული მიზნისათვის, ელექტრომაგნიტური მწკვერტის მაგიერ, მოხერხდა საათის საქანზე დამაგრებული სარკის გამოყენებაც, რაც ფაქტიურად წარმოადგენდა ოპტიკური მთვლელის განხორციელებას.

ამჟამად ოპტიკური მთვლელის მოსაწყობად იყენებენ თითქმის მხოლოდ ქრონომეტრს, რისთვისაც მის ბალანსირზე ამაგრებენ მცირე სარკეს ან მოვერცხლავენ მასზე მყოფ ერთ-ერთ ხრახნს. ეს ხერხები პირველად განახორციელეს საბჭოთა მეცნიერებმა—ფონგოლოვიჩმა და სოროკინმა შესაბამისად. აღსანიშნავია, რომ სსრ კავშირში ასეთი მთვლელი პირველად იქნა გამოყენებული ორლოვის მიერ.

ქრონომეტრის ბალანსირზე ერთ-ერთი ხრახნის მოვერცხლვა ამჟამად არ წარმოადგენს სიძნელეს, რის გამო ოპტიკურ მთვლელად შეიძლება ყოველგვარი ნორმალურად მომუშავე ქრონომეტრის გამოყენება. ნახ. 19-ზე მოცემულია სათანადოდ გადაკეთებული ქრონომეტრის სქემა, სადაც  $A$  ნათურიდან გამოსული სინათლე გადის  $B$  ლინზაში, ხოლო აქედან პარალელური კონის სახით გადის იმ ლინზაში, რომელიც ჩასმულია თვით ქრონომეტრის კორპუსში; რადგანაც ამ უკანასკნელი ლინზის ფოკუსი თანხვედება  $C$  ხრახნის ზედაპირს ბალანსირზე, როდესაც ის წონასწორობის მდგომარეობაშია, ამიტომ სინათლის პარალელური კონა მის ზედაპირზე შეიკრიბება ერთ წერტილში, საიდანაც არეკლვისა და  $D$  ლინზაში გადის შემდეგ, რომელიც ქრონომეტრ-

რის კორპუსშია ჩასმული, პარალელური კონის სახით მიემართება  $E$  ლინზისაკენ, რომელიც მას თავს უყრის მის ფოკუსში  $I'$  ხერხელთან; ხერხელში გაეღის შემდეგ სინათლე ეცემა საქანის სარკეზე და აქედან არეკლვის შემდეგ მიემართება მთვლელის ქოგარში. ბალანსირზე მოიპოვება აგრეთვე მეორე ხრახნიც, რომლის თავი უნდა გაშავებულ იქნას, რათა არეკლვით არ შექმნას დამატებითი ელვარება.



ნახ. 19.

აგრეთვე ქოგარის მხედველობის არეს და დაკვირვების ეუზნალს. როგორც ნახ. 21-ზეა ნაჩვენები, სინათლე ხსენებული ნათურიდან ეცემა ქვევით  $A$  პრიზმისაკენ, გადის ქრონომეტრის კორპუსში ჩასმულ  $C$  ლინზას, აირეკლება ხრახნის ზედაპირიდან, გადის ქრონომეტრის მეორე  $K$  ლინზას, აირეკლება  $D$  სარკიდან, გადის  $E$  ლინზას და მიემართება  $F$  ხერხელში. ქოგარს გააჩნია მარეგულირებელი მოწყობილობა მის სათანადოდ დასაყენებლად.

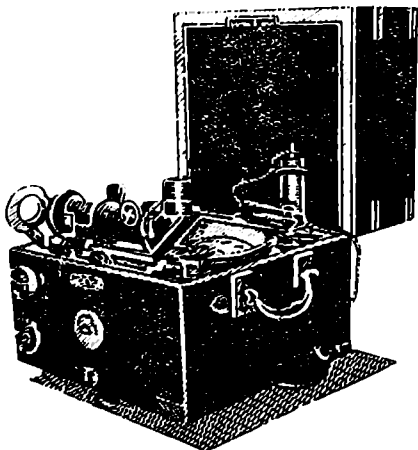
მთვლელის ყუთის კედელზე, უშუალოდ ქოგარის ქვემოთ, მოთავსებულია სკალა საქანთა ამ პლიტუდების განსაზღვრისათვის; ეს სკალა დატანილია რძისფერ მინაზე და განათებულია მის უკან, მთვლელის ყუთში მოთავსებული ორი ნათურით

ქრონომეტრის ბალანსირის სრული რხვეის პერიოდი 0,5 სეკ.

ტოლია, რის გამო ოპტიკურ მთვლელში ელვარებათა რიცხვი გაორკეცებულია, ე. ი. აღწევს ოთხს ერთი სეკუნდის განმავლობაში. ამიტომ დაკვირვე-

საერთო ხედი ზემოაღწერილისამებრ აგებული მთვლელისა წარმოდგენილია ნახ. 20-ზე. 21 ნახაზი წარმოადგენს მთვლელის პორიზონტალურ განკვეთას ქრონომეტრის ბალანსირის დონეზე, ხოლო 22 ნახაზი — ვერტიკალური განკვეთაა იმავე ხელსაწყოში, რომელიც გადის ქოგარის ოპტიკურ ლერძზე. მთვლელი მოთავსებულია იმავე გადაკეთებული ქრონომეტრის ყუთში.

ნათურა, რომელიც აგზავნის სინათლეს ბალანსირის მივერცხლილ ხრახნზე, მოთავსებულია ზემოთ; იგი ამავე დროს ანათებს თვით ქრონომეტრს,

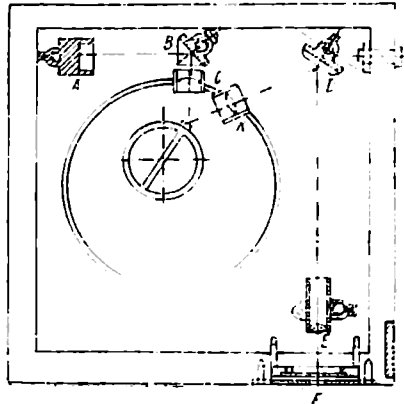


ნახ. 20.

ბას ორჯერ ნაკლები დრო სჭირდება, ყველა აქედან გამომდინარე შედეგებით.

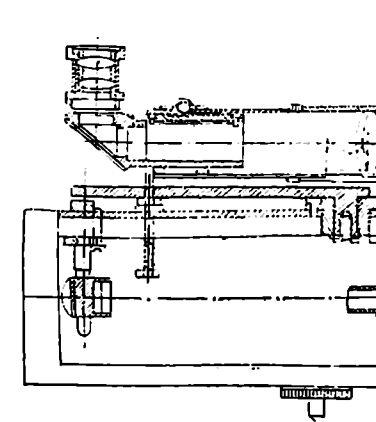
მთვლელი ისე უნდა იყოს დაყენებული, რომ მის კოგრაში მოჩანდეს მთვლელის სკალის გამოხატულება, რომელიც არეკლილია საქანის სარკიდან.

ჩვეულებრივად სკალას აქვს სამსამი მილიმეტრიანი 30 დანაყოფი. სკალის ნულ-პუნქტს შეესაბამება მისი შუა დანაყოფი. როდესაც საქანი უძრავ მდგომარეობაშია, სკალის შუა შტრიხი, ე. ი. ნულოვანი შტრიხი, თანხედება კოგრის მხედველობის არეში ხილულ ჰორიზონტულ ძაფს. თუ საქანი ირხევა, მაშინ სკალის გამოხატულებაც ირხევა ზევით და ქვევით. კოგრის სათანადო რეგულირებით შეიძლება მიღწეულ იქნას მთვლელის ისეთი მდგომარეობა, როდესაც სკალის გამოხატულება რხევის დროს სიმეტრიულად იქნება კოგრის ჰორიზონტული ძაფის მიმართ. რხევის ამპლიტუდა შეესაბამება ანათვალთა სხვაობას სკალის უკიდურეს მდებარეობათა შორის.



ნახ. 21.

ასევე, სკალის გამოხატულებანი მოჩანდეს კოგრის მხედველობის



ნახ. 22.

არეში ერთმანეთის გვერდით, ამასთან ამ გამოხატულებათა ნულ-შტრიხები უნდა ემთხვეოდეს კოგრის მხედველობის არის ჰორიზონტულ ძაფს, როცა საქანები დაკიდებულია ვერტიკალურად და უძრავ მდგომარეობაშია.

მსჯელობის გასაადვილებლად დაეუშვათ, რომ საათის საქანი სინათლის კვესვას აწარმოებს ყოველ სექუნდში, როდესაც ის გადის წონასწორობის მდგომარეობას. ჩვენ ვიცით აგრეთვე, რომ, როდესაც ხელ-

საწყოს საქანი იმყოფება უძრაობის მდგომარეობაში, მაშინ მთვლელის მიერ გამოკვესილი სინათლე ან ბლიკი უნდა გამოჩნდეს მისი კოგრის ჰორიზონტულ ძაფზე.

ენახოთ ეხლა, რა სურათს მივიღებთ, როდესაც ხელსაწყოს საქანი ირხევა. ვთქვათ, ჩვენ შევანჩნიეთ, რომ პირველი ბლიკი თანხვედება ჰოგრის ჰორიზონტულ ძაფს. ეს იმას ნიშნავს, რომ ამ მომენტში საათისა და ხელსაწყოს საქანები ორივე ერთდროულად იყო ვერტიკალურ მდგომარეობაში, ე. ი. როგორც საათის საქანი, ისე ხელსაწყოს საქანი გადიოდა წონასწორობის მდგომარეობას, რის გამოც მათი რხევათა ფაზის სხვაობა იყო ნული ან  $\pi$ . რა თქმა უნდა, ეს სხვაობა ნულია, თუ საქანები თანხვედნილ მიმართულებით გაივლის აღნიშნული წონასწორობის მდგომარეობას, წინააღმდეგ შემთხვევაში ეს სხვაობა  $\pi$  იქნება. შემდეგი ბლიკი იქნება ზუსტად 1 სეკუნდის შემდეგ, როდესაც საათის საქანი გადის წონასწორობის მდგომარეობას, ხოლო ხელსაწყოს საქანი კი არ იქნება მეორეჯერ კიდევ მისული წონასწორობის მდგომარეობამდე. მართლაც, როგორც ვიცით, ხელსაწყოს საქანის პერიოდი ოდნავ განსხვავდება 0,5 სეკუნდიდან; ამასთან ეს განსხვავება შეიძლება იყოს როგორც დადებითი, ისე უარყოფითი; გარკვეულობისათვის დავუშვათ, რომ ეს განსხვავება დადებითია და ხელსაწყოს საქანის პერიოდი  $T \sim 0,5083$  სეკ. ამიტომ, რადგანაც  $0,5083 \text{ სეკ.} \times 2 = 1,0166 \text{ სეკ.}$ , საქანს წონასწორობის მდგომარეობის მიღწევამდე სჭირდება კიდევ 0,0166 სეკ. უნდა გვახსოვდეს, რომ ხელსაწყოს საქანი 1,0166 სეკ. განმავლობაში ასრულებს ერთ სრულ რხევას. გამომდინარე, რომ ბლიკი ასწრებს ხელსაწყოს საქანს 0,0166 სეკუნდით წონასწორობის მიღწევამდე, რის გამოც ბლიკი ნ.ჩანს მალში ძაფის ზემოთ (ქვემოთ) გარკვეულ მანძილზე. კიდევ ერთი სეკუნდის შემდეგ ბლიკი აღმოჩნდება უფრო ზემოთ (ქვემოთ), რადგანაც ჩამორჩენა საათის ჩვენების მიმართ შეადგენს  $0,0166 \times 2 \approx 0,033$  სეკ. და ა. შ. 15 სეკუნდის შემდეგ, როდესაც ეს ჩამორჩენა  $0,0166 \times 15 \approx 0,25$  სეკ. მიაღწევს, ბლიკი აღმოჩნდება უშორეს მანძილზე ზემოთ (ქვემოთ), რადგანაც ამ დროს ხელსაწყოს საქანი სწორედ მაქსიმალურად იქნება გადახრილი წონასწორობის მდგომარეობიდან. ამის შემდეგ ბლიკი იწყებს კვლავ დაბლა დაშვებას (ან მაღლა სვლას), რის შედეგად დაკვირვების დაწყებიდან 30 სეკუნდის შემდეგ აღმოჩნდება ჰოგრის ძაფზე. აქ ფაზათა სხვაობა საქანთა შორის აღწევს 0,5 სეკუნდს. როდესაც ბლიკი არ დაემთხვევა ჰოგრის ძაფს, მაშინ მიმართავენ ინტერპოლაციის ხერხს მანძილის მიხედვით, დროის მონაკვეთის მაგიერ, ანალოგიურად იმისა, როგორც ამას აკეთებენ მაგნიტის რხევის დროს. მართლაც, ვთქვათ, 30 ბლიკი მოექცა ძაფს ზემოდან, ხოლო 31—ქვემოდან; მაშინ, თუ დავუშვებთ, რომ ბლიკი მოძრაობს თანაბრად და შეუწყვეტლევ, ორ ბლიკთა შორის მანძილის ინტერპოლაციით გამოვიანგარიშებთ დროის იმ მომენტს, როდესაც ბლიკს უნდა გაველო ძაფზე, რაც საჭიროა გაკეთდეს 0,1 სეკუნდის სიზუსტით.

სეკუნდიანი საათის საქანი  $c$  სეკუნდის განმავლობაში, ცხადია, გააკეთებს  $c$  რხევას, სადაც  $c$  არის სეკუნდთა ის რიცხვი, რომელსაც უდრის შუალედი საათისა და ხელსაწყოს საქანების მომდევნო თანხვედნათა შორის. მეორე მხრივ, რადგანაც ხელსაწყოს საქანის რხევის პერიოდი  $T = 0,5083$  სეკ., ე. ი. ცოტათი მეტია 0,5 სეკუნდზე, ეს საქანი იმავე  $c$  სეკუნდის განმავლობაში შეასრულებს  $2c - 1$  რხევას. აქედან დაიწერება ტოლობა

$$(2c - 1)T = c$$



$$, T = \frac{c}{2c-1} . \quad (4.4)$$

იმ შემთხვევისათვის, თუ ხელსაწყოს საქანის რბევის პერიოდი  $T < 0,5$  სეკ., მაშინ გვექნება:

$$T = \frac{c}{2c+1} , \quad (4.4')$$

ან ორივე ტოლობის გაერთიანებით:

$$T = \frac{c}{2c \pm 1} . \quad (4.4'')$$

ეს ტოლობები ჩვენ გვკონდა მიღებული III თავის § 6-ის (28) და (28') ფორმულების სახით.

გამოვარკვეით ახლა, თუ რა  $\Delta c$  შეცდომა დასაშვებია  $c$  სიდიდის განსაზღვრაში, რომ  $T$  პერიოდის მნიშვნელობა მოინახოს  $1 \cdot 10^{-7}$  სეკუნდის სიზუსტით. (4) ტოლობის გადიფერენციალებით და დიფერენციალების სასრულო სხვაობებით შენაკულების შემდეგ გვექნება:

$$\Delta T = - \frac{\Delta c}{(2c-1)^2} .$$

ამეამად ხმარებულ საქანთა პერიოდები ჩვეულებრივად ისეთია, რომ მათთვის  $c$  მოქცეულია 30—60 სეკ. დიაპაზონში. ჩავსვათ ზემოთაწერილ დამოკიდებულებაში ამ სიდიდის უმცირესი მნიშვნელობა  $c=30$ , ხოლო  $\Delta T$  მივიჩნიოთ  $1 \cdot 10^{-7}$  სეკ. ტოლად; მაშინ გვექნება:

$$|\Delta c| \approx 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ სეკ.}$$

ჩვენ ვიცით, რომ  $c$  სიდიდის ზრდასთან დაკავშირებით  $\Delta T$  ცდომილება ძლიერ ეცემა  $\Delta c$  შეცდომის ერთიადიმავე მნიშვნელობისათვის, როგორც ეს ნაჩვენებია იყო III-ს § 6-ში. ამიტომაც  $c$  სიდიდის მნიშვნელობის გადიდებისას დასაშვები შეცდომა  $\Delta c$  შეიძლება იყოს მეტიც, ვიდრე  $3,5 \cdot 10^{-4}$  სეკ.

საქანიან ხელსაწყოთი მუშაობისას საჭიროა რბევაზე დაკვირვების სათანადო სიზუსტით ჩატარება უმოკლესი დროის განმავლობაში, ვთქვათ, ერთი საათის ფარგლებში.  $T$  და  $c$  სიდიდეებისათვის ზემოაღნიშნულ სიზუსტეთა მისაღებად ჩვეულებრივად მიმართავენ დაკვირვების შემდეგ ხერხს. საქანის რბევის დაწყებიდან დაკვირვებას მოახდენენ 8—12 თანხედენაზე, ე. ი. ბლიკის გავლაზე ჰოგრის ძაფზე, 0,1 სეკუნდის სიზუსტით. შემდეგ დატოვებენ დაკვირვების გარეშე ბლიკის ყველა გავლას ჰოგრის ძაფზე 100-მდე ჩათვლით; დაკვირვებას განაახლებენ 101 გავლიდან და გააკეთებენ კვლავ 8—12 დაკვირვებას, რის შედეგად მიიღებენ სათანადო მომენტებს 0,1 სეკ. სიზუსტით. ამის შემდეგ შეადგენენ სხვაობას იმ მომენტთა შორის, რომლებიც შეესაბამება 101 და 1; 102 და 2; 103 და 3 და ა. შ. ეს სხვაობა დაახლოებით,

რა თქმა უნდა, ერთ და იმავე რიგის იქნება რამდენიმე 0,1 სექუნდის ფარგლებში. ცხადია, რომ თითოეული ამ სხვაობათაგანი 100  $\epsilon$  სიდიდის ტოლია. ამ სიდიდის განსაზღვრის სიზუსტე იქნება  $0,1 \cdot \sqrt{2} = 0,14$  სექ. გარდა ამისა, 100 $\epsilon$  სიდიდისათვის ჩვენ გვაქვს 8—12 მნიშვნელობა, რის გამო საშუალო მნიშვნელობის სიზუსტე იქნება:

$$\pm \frac{0,14}{\sqrt{8}} - \pm \frac{0,14}{\sqrt{12}},$$

რაც მოგვცემს 0,05—0,04 სექ. ახლა  $\epsilon$  სიდიდის მნიშვნელობის მისაღებად საჭიროა 100-ზე გაყოფა საშუალო 100 $C$  სიდიდისა, რის გამო  $\epsilon$  სიდიდის განსაზღვრის სიზუსტე მიაღწევს 0,0004—0,0005 სექუნდს; ეს სიზუსტე კი იმავე რიგისაა, რომელიც ზემოთ იყო გარჩეული.

---

## თ ა ვ ი V

### შესწორებაში საძიანად ხელსაწყოთი წარმოებულ დაკვირვებათათვის და მათი თეორია

#### § 1. შესწორება ამპლიტუდაზე

მათემატიკური საქანის  $T$  რხევის პერიოდისათვის მიღებული ფორმულა (3.10) შეიცავს რხევათა  $\alpha$  ამპლიტუდას, რის გამო ამ ფორმულის პრაქტიკულად გამოყენებისათვის საჭიროა მის მარჯვენა ნაწილში დაეკმაყოფილდეთ წევრების რაღაც სასრული რიცხვით. თეორია და პრაქტიკა ამტკიცებს, რომ სიმძიმის ძალის შეფარდებითი განსაზღვრისათვის საკმარისია დაეკმაყოფილდეთ პირველი ორი წევრით, თუ ამპლიტუდა  $\alpha$  არ აღემატება  $1^\circ$  რკალს და  $T$  პერიოდის განსაზღვრის სიზუსტე  $1 \cdot 10^{-7}$  სეკუნდის რიგისაა. მაშინ ეს ფორმულა მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$T' = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left( 1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right),$$

ანდა, თუ  $\alpha$  სიდიდის სიმცირის გამო  $\sin \frac{\alpha}{2}$ -ს მივიჩნევთ  $\frac{\alpha}{2}$  სიდიდის ტოლად:

$$T' = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left( 1 + \frac{1}{16} \alpha^2 \right);$$

აქ  $T'$  დანაკვირვები პერიოდია; იყოს  $T$  უსასრულოდ მცირე ამპლიტუდაზე დაყვანილი პერიოდი. მაშინ წინა ფორმულა ასე გადაიწერება:

$$T' = T + \frac{1}{16} \alpha^2 T$$

ან თუ სხვაობას შევადგენთ:

$$T - T' = -\frac{1}{16} \alpha^2 T$$

ანუ

$$\Delta T_{\alpha} = -\frac{1}{16} \alpha^2 T. \quad (5.1)$$

აქ მარჯვენა ნაწილში იგულისხმება პერიოდის ნებისმიერი მიახლოებითი მნიშვნელობა, კერძოდ დანაკვირვები  $T'$ .

აქედან ცხადია, რომ დაკვირვებით მიღებულ  $T'$  პერიოდს ალგებრულად უნდა დაემატოს ეს შესწორება; გამოდის, რომ უსასრულოდ მცირე ამპლიტუდაზე დაყვანილი პერიოდი  $T$ , საერთოდ, ნაკლებია ჩვეულებრივ დაკვირვებით მიღებულ  $T'$  პერიოდზე.

შესწორების გამოსაანგარიშებლად საჭიროა ვიცოდეთ  $\alpha$ , რომელსაც ჩვეულებრივად იმ ამპლიტუდების საშუალო არითმეტიკულის ტოლად თვლიან, რომლებსაც ადგილი აქვს დაკვირვების დაწყებისას და მის ბოლოს. თუ ეს ამპლიტუდები მცირედ განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან, მაშინ შედეგი საკმაოდ ზუსტი გამოდის. მაგრამ ეს ყოველთვის ასე როდია. რხევაზე დაკვირვება გრძელდება ერთ საათამდე, რომლის განმავლობაში საქანის რხევის ამპლიტუდა კლებულობს თანდათან და ამასთან დროის არაპროპორციულად. თეორია ამტკიცებს, რომ რხევათა მიმდევრობითი ამპლიტუდების წყება წარმოადგენს გეომეტრიულ პროგრესიას შეფარდების  $q$  მნიშვნელით, რომელიც მცირეა ერთზე, მაგრამ ძლიერ ახლოსაა მასთან. ჩვენ არ შეგზრდებით აქ ამ საკითხის თეორიულ განხილვაზე მით უმეტეს, რომ ეს თეორია არ გვაძლევს უნაკლო მონაცემებს. მართლაც, პრიზმის წიბოს, რომელზედაც ირხევა საქანი, არასდროს არ აქვს სრულყოფილი ფორმა, რის გამო საქანის რხევა უფრო რთული სახისაა, ვიდრე ამის გათვალისწინება ხერხდება თეორიაში. პრიზმის წიბოს ფორმის ცოდნის გარეშე შეუძლებელია უსასრულოდ მცირე ამპლიტუდაზე დაყვანა, მაგრამ შესაძლებელია მივალწიოთ იმას, რომ აქედან წარმოშობილი შეცდომა იყოს ერთნაირი; მაშინ ეს შეცდომა გავლენას ვერ მოახდენს სიმძიმის ძალის განსაზღვრაზე, რადგანაც ის წარმოებს შეფარდებითი მეთოდით.

## § 2. შესწორება ტემპერატურაზე

საქანის რხევაზე დაკვირვებისათვის საჭიროა დროის გარკვეული შუალედი, რომლის განმავლობაში ტემპერატურა შეიძლება განიცდიდეს ცვალებადობას, რაც იწვევს საქანის სიგრძის შესაბამის ცვალებადობას და, რა თქმა უნდა, მისი რხევის პერიოდის ცვლილებასაც. დაკვირვებით მიღებული შედეგები რომ ერთგვაროვანი იყოს, საჭიროა მათი ერთ ტემპერატურაზე მიყვანა, მაგალ.,  $0^{\circ}$ -ზე.

დავამტკიცოთ, რომ საქანის დაყვანილი სიგრძე ტემპერატურის გავლენით იცვლება ისე, როგორც იმავე მასალიდან გაკეთებული ლეროს სიგრძე. საქანის დაყვანილი სიგრძე (3.16) ფორმულით გამოიხატება, რომელიც ასე დაიწერება:

$$l = \frac{K}{\alpha M} = \frac{\int r^2 dm}{\alpha M},$$

სადაც აღნიშვნები შენარჩუნებულია ხსენებული ფორმულის მიხედვით. საქანის ყოველ წვეთს წერტილთა შორის  $\rho_0$  მანძილი  $l$  ტემპერატურის დროს, თუ მისი შემადგენელი მასალა ერთგვაროვანია, იქნება:

$$\rho_t = \rho_0(1 + \beta t),$$

სადაც  $\beta$  საქანის მასალის ხაზოვანი გაფართოების კოეფიციენტია. მაშინ  $r$  და  $\alpha$  სიდიდეებისათვის ამ ფორმულის გამოყენებით დაწერთ:

$$l = \frac{\int r_0^2 (1 + \beta l)^2 dm}{a_0 (1 + \beta l) M} = \frac{\int r_0^2 dm}{a_0 M} (1 + \beta l) = l_0 (1 + \beta l), \quad (5.2)$$

სადაც

$$l_0 = \frac{\int r_0^2 dm}{a_0 M}$$

საქანის დაყვანილი სიგრძეა, როდესაც  $l = 0^\circ$ . აქედან ნათლად ჩანს, რომ საქანის დაყვანილი სიგრძე იცვლება ტემპერატურაზე დამოკიდებით ისე, როგორც იმავე მასალიდან გაკეთებული ღეროს სიგრძე.

დაწეროთ ცნობილი დამოკიდებულება:

$$\Delta l = \beta l (\theta - \theta_0), \quad (5.2')$$

სადაც  $\Delta l$  საქანის  $l$  სიგრძის ნამატია ტემპერატურის  $\theta_0$  გრადუსიდან  $\theta$  გრადუსამდე ცვლილებისას. საქანის რხევის პერიოდის ძირითადი ფორმულა (11.3), თუ  $g$  სიდიდეს უცვლელად ჩავთვლით, გალოგარიტმებისა და გადიფერენციალების შემდეგ, როცა დიფერენციალებს სასრული სხვაობებით შევცვლით, მოგვცემს:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{2} \frac{\Delta l}{l}. \quad (5.3)$$

თუ აქედან  $\Delta l$  სიდიდის მნიშვნელობას (2') ტოლობაში ჩავსვამთ, მივიღებთ:

$$\Delta T = \frac{T}{2} \beta (\theta - \theta_0) = \alpha (\theta - \theta_0). \quad (5.4)$$

როდესაც  $\theta > \theta_0$ , საქანის სიგრძე მატულობს, რის გამო მისი რხევის  $T$  პერიოდიც მოიმატებს. ამიტომ (4) ფორმულაში განსახილველ შემთხვევისათვის გვექნება:

$$\Delta T \approx -\frac{T}{2} \beta (\theta - \theta_0) = -\alpha (\theta - \theta_0), \quad (5.4')$$

სადაც ინდექსი  $\theta$  ტემპერატურას აღნიშნავს.

ამ ფორმულაში შემავალ სიდიდეს

$$\frac{T\beta}{2}$$

ეწოდება საქანის ტემპერატურული კოეფიციენტი, რომელიც ადვილი გამოსანგარიშებელია, თუ  $\beta$  ცნობილია. ცხადია,  $\alpha$  არის პერიოდის ცვლილების სიდიდე, რომელიც შეესაბამება  $1^\circ C$ ; აშკარაა აგრეთვე, რომ  $\Delta T \approx$  შესწორების მიმატებას დაკვირვებით მიღებულ პერიოდზე ეს უქანასკნელი დაყავს  $0^\circ$

ტემპერატურაზე. ჩვენი შემთხვევისათვის ეს შესწორება იქნება უარყოფითი, რის შესახებ ზემოთაც იყო ნათქვამი. ბრინჯაოს საქანებისათვის  $\approx 48.10^{-7}$  სეკუნდს, საიდანაც ჩანს, რომ ტემპერატურის ცოდნა საჭიროა  $\pm 0^{\circ},02C$  სიზუსტით, თუ გვინდა, რომ  $T$  განისაზღვროს  $1.10^{-7}$  სეკ. სიზუსტით.

როგორც ცნობილია, ტემპერატურის საგრძნობი ცვალებადობისას საჭიროა გათვალისწინება იმ გარემოებისა, რომ ხაზოვანი გაფართოების  $\beta$  კოეფიციენტი დამოკიდებულია ტემპერატურაზე. ამიტომაც ჩვენი ფორმულა (4') ასე უნდა დაიწეროს:

$$\Delta T_{\theta} = -\alpha(\theta - \theta_0) - \alpha_1(\theta - \theta_0)^2. \quad (5.5)$$

უნდა გვახსოვდეს, რომ  $\alpha$  კოეფიციენტები (4) და (5) ფორმულებში სხვადასხვაა, რაზედაც აქ არ შეეხერხებოდა. უნდა ითქვას, რომ ინვარიანტად დამზადებულ საქანისათვის კვადრატული წვერის მნიშვნელობა იმდენად მცირეა, რომ (4') ფორმულის გამოყენებაც კი საკმარისია.

თერმომეტრსა და საქანს არ გააჩნიათ ტოლი ტემპერატურული ინერცია, რის გამო თერმომეტრის ჩვენება არ თანხვდება საქანის ნამდვილ ტემპერატურას. ეს განსხვავება, ცხადია, მით უფრო მეტი იქნება, რაც უფრო ჩქარა იცვლება ტემპერატურა ხელსაწყოს ირგვლივ. ამ გავლენის რამდენიმედ მაინც გასათვალისწინებლად საჭიროდაა მიჩნეულ (5) ფორმულას დამატოს კიდევ ერთი წევრი, რის შემდეგ გვექნება:

$$\Delta T_{\theta} = -\alpha(\theta - \theta_0) - \alpha_1(\theta - \theta_0)^2 \pm \alpha_2 \frac{d\theta}{dt}, \quad (5.6)$$

სადაც  $\frac{d\theta}{dt}$  ტემპერატურის ცვალებადობის სიჩქარეა, რომელიც  $\alpha_2$  კოეფიციენტს შეესაბამება.

$\alpha_1$  და  $\alpha_2$  კოეფიციენტების მონახვა შესაძლებელია გამოანგარიშებითაც, თუ ხაზოვანი გაფართოების კოეფიციენტი  $\beta$  ცნობილია.  $\alpha_2$  კოეფიციენტის მონახვა წარმოებს მხოლოდ სათანადოდ გამართული უშუალო დაკვირვებებით სხვადასხვა ტემპერატურულ პირობებში. აღსანიშნავია, რომ  $\alpha$  და  $\alpha_1$  კოეფიციენტების განსაზღვრაც უფრო ზუსტი და მარტივია საქანის რხევაზე დაკვირვებებით სხვადასხვა ტემპერატურის დროს.

$\alpha$ ,  $\alpha_1$  და  $\alpha_2$  სიდიდეებისათვის ხშირად იყენებენ შემდეგ სახელწოდებებს შესაბამისად: სტატიკური ტემპერატურული კოეფიციენტი, კვადრატული ტემპერატურული კოეფიციენტი, დინამიკური ტემპერატურული კოეფიციენტი.

ტემპერატურული ინერციის გათანაბრების მიზნით თანამედროვე ხელსაწყოებს გააჩნია თერმომეტრები, რომლებიც მოთავსებულია საქანისებური ფორმის მქონე ბუდეში. იმისათვის, რომ თერმომეტრის ბირთვი იყოს სრულყოფილ კონტაქტში ამ ბუდესთან, მის გარშემო ბუდის შიგნით ათავსებენ ლითონის ფოლგას.

ხელსაწყოს შიგნით, საქანის გარშემო, შესაძლებელია ტემპერატურა სიმალის მიხედვით არ იყოს თანაბარი, ე. ი., როგორც იტყვიან, ადგილი ჰქონდეს ტემპერატურულ ფენოვანობას. ასეთ შემთხვევაში საჭიროა საქანის ტემპერატურა გაიზომოს რამდენიმე წერტილში სიმალის მიხედვით ან გა-

მოყენებულ იქნას ეგრეთ წოდებული მალაზიასტური თერმომეტრი, რომლის რეზერვუარი წარმოადგენს მილს, სიგრძით—საქანის ტოლს.

$\alpha_1$  კოეფიციენტის მნიშვნელობა იმდენად მცირეა, რომ შეიძლება ზოგჯერ მისი უგულებელყოფა, რაც არ ითქმის  $\alpha_2$  კოეფიციენტის შესახებ, რომელიც, ტემპერატურის  $1^\circ$ -ით შეცვლისას ერთ საათის განმავლობაში, აღწევს  $15 \cdot 10^{-7}$  სეკუნდიდან  $35 \cdot 10^{-7}$  სეკუნდამდე.

იმისათვის, რომ ტემპერატურის გავლენა საქანზე მცირე იყოს, მას ხშირად ამზადებენ ისეთი მასალიდან, რომლის ტემპერატურული კოეფიციენტი უმნიშვნელოა, როგორცაა, მაგალითად, ინვარი, ე. ი. შენადლობი ფოლადისა და ნიკელის; მისი გაფართოების კოეფიციენტი  $20 - 25$ -ჯერ ნაკლებია, ვიდრე თითონისა. ასეთვე გამოსადგება ამ მიზნისათვის კვარცი. ასეთი საქანებისათვის საკმარისია ტემპერატურის  $0^\circ,1$  სიზუსტით ათვლა, ზოგჯერ ნაკლების სიზუსტითაც; არ არის აგრეთვე საჭირო დინამიკური ტემპერატურული კოეფიციენტის განსაზღვრა, თუ ტემპერატურა არ იცვლება ძლიერ სწრაფად.

### § 8. შესწორება ჰაერზე

ფიზიკური საქანის რხევა მიმდინარეობს ჰაერში, რომელიც მოქმედებს რხევის პროცესზე შემდეგი სახით.

ერთი რომ საქანი, არქიმედის კანონის მიხედვით, კარგავს თავის წონის ნაწილს, რის გამო სიმძიმის ძალა, რომელიც პროპორციულია საქანის წონისა, შესაბამისად დაიკლებს, იმ დროს როდესაც მისი მასა რჩება უცვლელი. გამოდის, რომ საქანის მასის ერთეულზე იმოქმედებს ნაკლები ძალა და ამიტომ საქანის რხევის პერიოდიც გაიზრდება. გამოკვლევა ამტკიცებს, როგორც მოსალოდნელიც იყო, რომ პერიოდის ცვლილება პროპორციულია ჰაერის სიმკვრივისა, ე. ი. საქანის წონის შემცირებისა. შესაბამის შესწორებას აეროსტატიკურს უწოდებენ.

მეორე ის, რომ საქანი რხევის დროს წაიტაცებს ჰაერის იმ ფენას, რომელიც უშუალოდ ეხება მის ზედაპირს და თითქოს მასზე მიწებებულია. გამოდის, რომ საქანის მასა იზრდება ისე, რომ მას წონა არ ემატება, რადგანაც გატაცებული ჰაერის მასას, რომელიც თანატოლი სიმკვრივის ჰაერშია მოქცეული, წონა არ გააჩნია. მაშასადამე, საქანის მასის ერთეულზე მოქმედი ძალა ამ შემთხვევაშიაც მცირდება ჰაერის სიმკვრივის პროპორციულად ისე, როგორც ეს იყო ზემოთ განხილულ შემთხვევაში.

მესამეც ის, რომ საქანი რხევის დროს განიცდის ხახუნს ჰაერის მხრით, რის შედეგად მისი რხევა თანდათან მიღვეადი ხდება, მით უმეტეს რომ საქანის მოძრაობა განიცდის აგრეთვე სხვა დაბრკოლებასაც.

თუ სამივე ზემოთაღწერილ გავლენას გავეთვითინებთ, შეიძლება საქანის რხევის პერიოდისათვის მივიღოთ შემდეგი შესწორება:

$$\Delta T_p = -AD - B\sqrt{D}, \quad (5.7)$$

სადაც  $D$  ჰაერის სიმკვრივეა,  $A$  და  $B$  კოეფიციენტებია, რომლებიც მოიპოვება ემპირიული გზით. ეს გზა იმაში მდგომარეობს, რომ საქანის რხევაზე დაკვირვებას აწარმოებენ სხვადასხვა წნევის პირობებში, რისთვისაც, როგორც

ვიციტო, შეიძლება ჰაერი სათანადოდ ამოიტუმბოს საქანიანი ხელსაწყოდან. ხანდახან კმაყოფილებიან მხოლოდ  $A$  კოეფიციენტის განსაზღვრით, რაც იმას ნიშნავს, რომ (7) ფორმულის მაგიერ იყენებენ შემოკლებულ ფორმულას:

$$\Delta T p = -AD, \quad (5.7')$$

სადაც  $A$  სიდიდის რიცხვითი მნიშვნელობა არ იქნება იგივე, რაც (7) ფორმულაში.

მოენახოთ ახლა მშრალი ჰაერის სიმკვრივე  $D$ . ცნობილია, რომ

$$P' = P - p, \quad (5.8)$$

სადაც  $P$  ატმოსფეროს წნევაა,  $P'$  მშრალი ჰაერის წნევაა და  $p$  ატმოსფეროში მოქცეული წყლის ორთქლის წნევაა რომელიმე გარკვეული დროის მომენტში. მშრალი ჰაერისათვის დავწეროთ დამოკიდებულება:

$$\frac{V_1 P'_1}{1 + \alpha t_1} = \frac{V_2 P'_2}{1 + \alpha t_2},$$

საიდანაც:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{P'_1(1 + \alpha t_2)}{P'_2(1 + \alpha t_1)},$$

სადაც  $\alpha = 0,00367$  გაზის მოცულობის თერმული კოეფიციენტი, ინდექსები 1 და 2 შეესაბამება გაზის მოცემული მასის ორ სხვადასხვა მდგომარეობას. დავუშვათ, რომ მდგომარეობა 2 ინდექსით შეესაბამება ნორმალურს, ე. ი.  $P'_2 = 760$  მმ,  $t_2 = 0^\circ$ . მაშინ, თუ გავიხსენებთ, რომ

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{D_1}{D_2},$$

წინა ფორმულა მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{P'_1}{760(1 + \alpha t_1)},$$

საიდანაც, თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ  $D_2 = 1$ , როგორც მშრალი ჰაერის სიმკვრივე ნორმალურ პირობებში, გვექნება:

$$D_1 = \frac{P'_1}{760(1 + \alpha t_1)}.$$

გადავწეროთ ეს ფორმულა ასე:

$$D' = \frac{P'}{760(1 + 0,00367t)},$$

სადაც ინდექსი 1 გამოტოვებულია, რადგანაც ჩვენ საქმე გვაქვს გაზის მხოლოდ ერთ გარკვეულ მდგომარეობასთან. გარდა ამისა, ამ ფორმულაში  $D'$  აღნიშნავს მშრალი ჰაერის სიმკვრივეს.

წყლის ორთქლისათვის შესაბამისი ფორმულა ასეთია:



$$D'' = \frac{p}{760(1+0,00367t)},$$

სადაც სიმკვრივე  $D''$  გამოსახულია არა მშრალი ჰაერის სიმკვრივის ერთეულებში, არამედ წყლის ორთქლის სიმკვრივის ერთეულებში ნორმალური პირობებისათვის. იმისათვის, რომ  $D''$  გამოვსახოთ მშრალი ჰაერის სიმკვრივის ერთეულებში, საკმარისია მისი გამრავლება  $q$  სიდიდეზე, რომელიც წარმოადგენს წყლის ორთქლისა და მშრალი ჰაერის სიმკვრივეთა შეფარდებას ნორმალურ პირობებში. როგორც ცნობილია,

$$q = \frac{5}{8} = 0,625.$$

მაშინ:

$$D = D' + qD'' = \frac{P' + \frac{5}{8} p}{760(1+0,00367t)},$$

რომელიც (8) ტოლობის მიხედვით ასე დაიწერება:

$$D = \frac{P - \frac{3}{8} p}{760(1+0,00367t)}. \quad (5.9)$$

ამ ფორმულით  $D$  სიდიდის გამოთვლისას უნდა მივიღოთ მხედველობა ში, რომ  $P$  წნევა, გაზომილი ბარომეტრით, რა თქმა უნდა, არ საქიროებს ზღვის დონეზე დაყვანას, მაგრამ ის მიყვანილი უნდა იქნეს ვერცხლის წყლის  $0^{\circ}$ -ზე;  $t$  საქანის გარემომცველი ჰაერის ტემპერატურაა,  $P$ —ფსიქრომეტრიული მეთოდით განსაზღვრული წყლის ორთქლის წნევაა გამოსახული ვერცხლის წყლის სვეტის მილიმეტრებში.

გამოკვლევა ამტკიცებს, რომ (7') შემოკლებულ ფორმულაში  $A$  კოეფიციენტის მნიშვნელობა შტერნეის საქანისათვის  $650 \cdot 10^{-7}$  სეკ. რიგისაა. რადგანაც ნორმალური წნევა 760 მმ. ტოლია, ამიტომ ამ ფორმულიდან გამომდის, რომ წნევის 1 მილიმეტრით შეცვლას არც კი შეესაბამება შესწორებაში ერთი ერთეული მეშვიდე ნიშნისა, რის გამო ბარომეტრის ათვლა  $0,1$  მმ სიზუსტით საეხებით საკმარისია. რაც შეეხება ტემპერატურას, როგორც ვიცით,  $1^{\circ}$  ცვლილება შესწორებას ცვლის  $1/273$  ნაწილით, რაც  $A$  სიდიდის მიხედვით მოგვცემს დაახლოებით  $2,5$  ერთეულს მეშვიდე ნიშნისას, რის გამო ტემპერატურა საქიროა ათვალის  $0,1^{\circ}C$  სიზუსტით.

გავარჩიოთ ახლა ჰაერის წინააღმდეგობის გავლენა საქანის რხევაზე და ამასთან დაკავშირებულ მხოლოდ ხახუნის მოქმედების განხილვით.

ჰაერის წინააღმდეგობა შეიძლება ჩაითვალოს სიჩქარის პირდაპირ პროპორციულად, როდესაც საქანის მოძრაობას არ გააჩნია დიდი სიჩქარე. მაშინ საქანის მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებას ემატება შესაბამისი წევრი, რომელიც  $l \frac{dv}{dt}$  ხაზოვანი სიჩქარის პროპორციულია, რის შედეგად გვექნება მოძრაობის განტოლება:

$$l = \frac{d^2\psi}{dt^2} + 2\kappa l \frac{d\psi}{dt} + g \sin\psi = 0,$$

სადაც  $2\kappa$  პროპორციულობის კოეფიციენტია. თუ დავკმაყოფილებით შემთხვევით, როდესაც რხევის ამპლიტუდა საკმარისად მცირეა, როგორც ეს მართლაც უნდა იყოს, მაშინ ეს განტოლება ასე დაიწერება:

$$l \frac{d^2\psi}{dt^2} + 2\kappa l \frac{d\psi}{dt} + g\psi = 0. \quad (5.10)$$

ეს არის მეორე რიგის ერთგვაროვანი დიფერენციალური განტოლება. თავისუფალი წევრის გარეშე. როგორც ცნობილია, ასეთი განტოლება ამოიხსნება ჩასმის შემწეობით

$$\psi = e^{\lambda t},$$

საიდანაც:

$$\frac{d\psi}{dt} = \lambda e^{\lambda t}, \quad \frac{d^2\psi}{dt^2} = \lambda^2 e^{\lambda t}.$$

სათანადო ჩასმის შემდეგ ჩვენი განტოლება (10) ასეთ სახეს მიიღებს:

$$l e^{\lambda t} \left( \lambda^2 + 2\kappa\lambda + \frac{g}{l} \right) = 0,$$

საიდანაც დავწერთ:

$$\lambda = -\kappa \pm \sqrt{\kappa^2 - \frac{g}{l}}.$$

თუ

$$\kappa^2 - \frac{g}{l} > 0,$$

$\kappa$ , ე. ი. წინააღმდეგობა, დიდია, და  $\lambda$ -სათვის მივიღებთ ორ ნამდვილ მნიშვნელობას. გამოკვლევა ამტკიცებს, რომ ამ შემთხვევაში საქანის მოძრაობა იქნება აპერიოდული, ე. ი. საქანი, რომელიც განთავისუფლებულ იქნა უკიდურესი დაშორების მდგომარეობაში, დაბრუნდება ვერტიკალურ მდგომარეობაში იმდენად დამუხრუჭებული, რომ იქვე დარჩება უძრავ მდგომარეობაში. ეს შემთხვევა არ არის ჩვენითვის ხელსაყრელი და ამიტომ მივმართოთ მეორე შემთხვევას, როდესაც

$$\kappa^2 - \frac{g}{l} < 0$$

ანუ

$$\mu^2 = \frac{g}{l} - \kappa^2 > 0, \quad (5.11)$$

მაშინ  $\lambda$ -სათვის მივიღებთ ორ შეუღლებულ წარმოსახვით ძირს, სახელდობრ:

$$\lambda_1 = -\kappa + i\mu \quad \text{და} \quad \lambda_2 = -\kappa - i\mu,$$

სადაც  $i$  წარმოსახვითი ერთეულია.

ამასთან (10) განტოლების ზოგადი ინტეგრალია:

$$\psi = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t} = e^{-\mu t}(Ae^{\mu t} + Be^{-\mu t}),$$

სადაც  $A$  და  $B$  ნებისმიერი მუდმივებია, რომლებიც საწყისი პირობებით ისაზღვრება.

შემოვიღოთ ტრიგონომეტრიული ფუნქციები, რისთვისაც მოვიგონოთ დამოკიდებულებები:

$$e^{\mu t} = \cos \mu t + i \sin \mu t,$$

$$e^{-\mu t} = \cos \mu t - i \sin \mu t,$$

რომელთა სათანადო ჩასმის შემდეგ გვექნება:

$$\psi = e^{-\mu t}[(A+B)\cos \mu t + i(A-B)\sin \mu t]. \quad (5.12)$$

ეთქვას,  $t=0$  საწყისი მომენტი, როდესაც საქანი გადახრილია  $\psi = \psi_0$  კუთხით და მას საწყისი სიჩქარე არ გააჩნია; ცხადია,

$$\frac{d\psi}{dt} = 0.$$

ჩავსვათ (12) ტოლობაში  $t=0$ ,  $\psi = \psi_0$ , რაც მოგვცემს:

$$A + B = \psi_0. \quad (5.13)$$

(12) ტოლობის  $t$ -თი გაწარმოება მოგვცემს:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{dt} = & -\mu e^{-\mu t}[(A+B)\cos \mu t + i(A-B)\sin \mu t] - \\ & - \mu e^{-\mu t}[(A+B)\sin \mu t - i(A-B)\cos \mu t]. \end{aligned} \quad (5.14)$$

დაეუშვათ, რომ  $t=0$  და  $\frac{d\psi}{dt} = 0$ ; მაშინ გამოვა:

$$-\mu(A+B) + \mu(A-B)i = 0,$$

საიდანაც, თუ მხედველობაში გვექნება (13) ტოლობა, ადვილად მივიღებთ:

$$i(A-B) = \frac{\mu}{\mu} \psi_0. \quad (5.15)$$

ჩავსვათ (12) და (14) განტოლებებში მუდმივთა მნიშვნელობები (13) და (15) ტოლობათა მიხედვით, რის შემდეგ დაიწერება:

$$\psi = \frac{\psi_0}{\mu} e^{-\mu t}(\mu \cos \mu t + \mu \sin \mu t), \quad (5.16)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = -\frac{\mu^2 + \mu^2}{\mu} \psi_0 e^{-\mu t} \sin \mu t.$$

აქედან ჩანს, რომ, როდესაც  $t=0$ ,  $\frac{\pi}{\mu}$ ,  $\frac{2\pi}{\mu}$  ...,  $\frac{d\psi}{dt}$  გახდება ნულის ტო-

ლი, რაც იმას ნიშნავს, რომ საქანმა მიაღწია უდიდეს გადახრას; გარდა ამისა,  $\psi$  ლებულობს მაქსიმუმს აბსოლუტური სიდიდით. ადვილი მისახვედრია, რომ  $\frac{\pi}{\mu}$  საქანის რხევის პერიოდია. ამპლიტუდის მისაღებად საქიროა (16)-ის პირველ ტოლობაში ჩაისვას  $t$ -სათვის მოცემული მნიშვნელობები. მაშინ საქანის მიმდევრო უდიდეს გადახრათა წყებისათვის გვექნება:

$$\psi_0, \psi_{0e} \quad \frac{x\pi}{\mu} \quad \frac{2x\pi}{\mu}$$

რადგანაც  $x$  და  $\mu$  არსებითად დადებითი რიცხვებია, ამიტომ

$$e^{-\frac{n\pi x}{\mu}} < 1$$

და, ცხადია, კლებულობს რხევათა  $n$  რიცხვის ზრდასთან ერთად. ირკვევა, რომ საქანის რხევები მიღევადია, ე. ი. მათი ამპლიტუდები კლებულობს გეომეტრიული პროგრესიის მიხედვით, რომლის მნიშვნელი

$$e^{-\frac{x\pi}{\mu}}$$

მუდმივი სიდიდეა; მას მიღევის (დაცხრომის) კოეფიციენტი ეწოდება. როდესაც  $x=0$ , ეს კოეფიციენტები ერთის ტოლი გახდება, რის გამო ამპლიტუდა  $\psi_0$  მუდმივი იქნება.

მიღევის კოეფიციენტის ჩვეულებრივ ლოგარითმს რხევათა ლოგარითმული დეკრემენტი ეწოდება. მაშინ:

$$\lambda = \lg e^{-\frac{x\pi}{\mu}} = \frac{x\pi}{\mu} \lg e = M\pi \frac{x}{\mu}, \quad (5.17)$$

სადაც, როგორც ცნობილია,  $M$  ჩვეულებრივი ლოგარითმების მოდულია.

საქანის რხევის  $T$  პერიოდისათვის, როდესაც მისი რხევისათვის არავითარი წინააღმდეგობა არ არსებობს, ჩვენ გვექნება ფორმულა, რომელიც კვადრატში აყვანის შემდეგ მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{g}{l} = \frac{\pi^2}{T^2},$$

რომლის (11) ტოლობაში შეტანა მოგვცემს:

$$\mu^2 = \frac{\pi^2}{T^2} - x^2;$$

მეორე მხრივ, (17) ტოლობა გვაძლევს გამოსახულებას:

$$x^2 = \frac{\mu^2 \lambda^2}{M^2 \pi^2},$$

რომლის წინა ტოლობაში შეტანის შემდეგ მივიღებთ:

$$\frac{\pi^2}{2} = T^2 \left( 1 + \frac{\lambda^2}{M^2 \pi^2} \right).$$

მაგრამ, როგორც ზემოთ იყო ნაჩვენები,  $\frac{\pi}{\mu}$  პერიოდია საქანისა, რომელიც ირხვევა წინააღმდეგობის პირობებში; იყოს ეს პერიოდი  $T'$ ; მაშინ:

$$\frac{\pi^2}{\mu^2} = (T')^2$$

და წინა ფორმულა, მეორე ხარისხის ფესვის ამოღების შემდეგ, ასე დაიწერება:

$$T' = T \sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{M^2 \pi^2}}$$

ანდა სათანადო რიცხვითი მნიშვნელობების ჩასმის შემდეგ:

$$T' = T \sqrt{1 + 0,537 \dots \lambda^2}.$$

აქედან ჩანს, რომ  $T' > T$ , რაც მოსალოდნელი იყო ისედაც. ამ ფორმულიდან შეიძლება დაიწეროს

$$T = \frac{T'}{\sqrt{1 + 0,537 \dots \lambda^2}}, \quad (5.18)$$

რაც შესაძლებლად ხდის გამოირიცხოს გარემოს წინააღმდეგობის გავლენა საქანის რხევის პერიოდზე.

არ უნდა დაგვავიწყდეს, რომ ჩვენი ფორმულა გამოყვანილია მხოლოდ ხახუნის გათვალისწინების საფუძველზე, რის გამო მისი გამოყენება არ შეიძლება საქანის პერიოდის უპაერო სივრცეზე დაყვანისათვის.

#### § 4. შესწორება საათის ხელაზე

სამუშაო საქანის რხევის  $T'$  პერიოდის განსაზღვრა, როგორც უკვე ვიცით, ხდება ნორმალური საათის საქანის რხევის მიხედვით; ამავე მიზნით საქანიანი ნორმალური საათის მაგიერ იყენებენ აგრეთვე ქრონომეტრსაც. პრაქტიკულად შეუძლებელია ისეთი საათის ან ქრონომეტრის გაკეთება, რომლის ჩვენება, ცოტად თუ ბევრად ხანგრძლივი დროის განმავლობაში, სავსებით ზუსტი იყოს. სხვანაირად რომ ვთქვათ, დროის გასაზომი ნორმალური ხელსაწყო სეკუნდი უცვლელი სიდიდე არ არის იმის გამო, რომ იგი განიცდის ტემპერატურის გავლენას, ზამბარაჟის ძაბვის ცვალებადობას, რაც დაკავშირებულია თვით ზამბარაჟის ნივთიერების სტრუქტურის ცვალებადობასთან; კიდევაც რომ მივალწიოთ ისეთ მდგომარეობას, რომ ჩვენი ქრონომეტრის სეკუნდი ნამდვილი ზუსტი სეკუნდი იყოს, მაშინაც რამდენიმე ხნის შემდეგ ჩვენ უნდა მოველოდეთ ამ მდგომარეობის შეცვლას. აი სწორედ ამიტომ ქრონომეტრის სვლას შემოწმება სჭირდება დროგამოშვებით. ჩვეულებრივად დღე-ღამეში ერთხელ მაინც. ეს შემოწმება ხდება სათანადო ასტრონომიულ დაკვირვებით ვარსკვლავებზე ან, უკიდურეს შემთხვევაში, მზეზეც.

ამგემად ნამდვილი დროის მიღება უფრო ადვილად შეიძლება რადიოგადაცემით რომელიმე სათანადოდ მოწყობილ პუნქტიდან: მოსკოვი, დეტსკოე სელო და სხვა. ცხადია, ამ პუნქტებიდან გადაცემული დრო ასტრონომიულად სწორი უნდა იყოს.

ვთქვათ ქრონომეტრის ჩვენება 15.IX.1932 წ. სრულ 12 საათზე იყო 12 ს. 5 მინ. და 33 სექ., ე. ი. ქრონომეტრი აჩვენებს 5. მინ. და 33 სექუნდით მეტს ნამდვილ დროზე; ამ ქრონომეტრის ჩვენება რომ შევასწოროთ, ამისათვის საჭიროა მის ჩვენებას გამოაკლდეს 5 მინ. და 33 სექ. ე. ი. შესწორება უარყოფითია და უდრის—(5 მინ. და 33 სექ.). ვთქვათ მეორე დღეს 16.IX სრულ 12 საათზე ქრონომეტრის ჩვენება შემოწმების დროს აღმოჩნდა 5 მინ. და 37 სექუნდით მეტი, ე. ი. მისი შესწორება—(5 მინ. 37 სექ.) უდრის. მაშასადამე, ქრონომეტრის სვლა 24 საათის განმავლობაში შეიცვალა —(5 მინ. 37 სექ.)—(—5 მინ. 33 სექ.)=—4 სექუნდით. ეს უარყოფითი 4 სექუნდი არის ჩვენი ქრონომეტრის დღელამითი სვლა. სვლას აქვს ნიშანი მინუსი, როდესაც ქრონომეტრი წინ მიდის, როგორც ამას ზემომოყვანილ მაგალითში ჰქონდა ადგილი. პირიქით, როდესაც ქრონომეტრი უკან რჩება, ე. ი. აჩვენებს ნაკლებ დროს, ვიდრე ნამდვილად უნდა იყოს, მაშინ მისი სვლა დადებითია.

საქანის რხევის პერიოდი ისაზღვრება, როგორც ვიცით, საათის ან ქრონომეტრის შემწვობით. თუ ამ ქრონომეტრს რაღაც გარკვეული სვლა გააჩნია, როგორც ეს მუდამ ხდება, მაშინ, ცხადია, საქანის რხევის პერიოდს არ იქნება ნამდვილი და საჭიროა შესწორდეს სათანადოდ. როდესაც ქრონომეტრი ჩამორჩება, ე. ი. მისი შესწორება დადებითია. საქანის პერიოდს მივიღებთ შემცირებულს, რის გამო ამ უკანასკნელის შესწორებაც, ცხადია, დადებითი იქნება. შებრუნებით, როდესაც ქრონომეტრი წინ მიდის, ე. ი. მისი სვლა უარყოფითია, საქანის პერიოდს მივიღებთ გაზრდილს, რის გამო შესაბამისი შესწორებაც იქნება უარყოფითი. გაჰოდის, რომ სამუშაო საქანის რხევის პერიოდზე შესწორების ნიშანი სულ მუდამ თანხვედება იმ ქრონომეტრის სვლის ნიშანს, რომლითაც ამ საქანის პერიოდი ისაზღვრება. თუ ქრონომეტრის სვლა დღელამის განმავლობაში  $s$  სექუნდს უდრის, მაშინ საქანის ერთი რხევის განმავლობაში ეს სვლა ტოლი იქნება გამოსახულების:

$$\Delta T = \frac{s}{86400} T = 115,6 T \cdot 10^{-7} \text{ სექ.}, \quad (6.19)$$

სადაც ინდექსი „დ“ ნიშნავს დროს.

ეს გამოსახულება სწორია როგორც საშუალო დროის, ისე ვარსკვლავთმზიერი დროის ქრონომეტრისათვის, როდესაც მათი სვლაც გამოხატულია შესაბამისი დროის მიხედვით.

თუ  $T = 0,508$  სექ., მაშინ (19)-დან მივიღებთ:

$$\Delta T = 58,7 s \cdot 10^{-7} \text{ სექუნდს.}$$

საიდანაც ჩანს, რომ  $s = 1$  სექ. შემთხვევისათვის შესწორება  $59 \cdot 10^{-7}$  სექუნდამდე აღწევს. გამოდის, რომ  $1 \cdot 10^{-7}$  სექ. სიზუსტის მისაღწევად საჭიროა დღელამური სვლა ვიყოფთ  $1/69 \approx 0,02$  სექ. სიზუსტით.

## § 5. შესწორება შტატივის რხევაზე

შტატივის, როგორც ხისტი მასალისაგანაც არ უნდა იყოს ის გაკეთებული, ყოველთვის გააჩნია დრეკადობა, რასაც ცოტად თუ ბევრად, ცხადია, არ არის მოკლებული ქვესაღვამი, რომელზედაც დადგმულია მთელი ხელსაწყო. ამიტომ საქანის წნევა, წარმოშობილი მისი რხევის დროს, საესებით საქმარისა იმისათვის, რომ შტატივმა და ქვესაღვამმა განიცადოს მკირე გადაადგილება, რომელსაც, როგორც გამოკვლევა ამტკიცებს, საგრძნობლად შეუძლია საქანის  $T$  რხევათა პერიოდის დამახინჯება. საქანი რხევის დროს შტატივზე-აწარმოებს წნევას, რომელიც წარმოადგენს ორი წნევის ჯამს: პირველი მათგანი გამოწვეულია საქანის წნევით, მეორე კი—ცენტრიდანი ძალით, რომელიც ვითარდება საქანის რხევისას. თუ საქანის რხევათა ამპლიტუდა არ არის იდი, მაშინ შეიძლება დაეუშვათ, რომ შტატივზე წნევის ვერტიკალური მდგენელი მუდმივია და მის მიერ გამოწვეული შტატივის ვერტიკალური გადაადგილებაც მუდმივია. არ არის ძნელი წარმოვიდგინოთ, რომ აღნიშნული წნევის ჰორიზონტული მდგენელი საქანის რხევის დროს იცვლება ნულიდან რალაც გარკვეულ მაქსიმუმამდე, რაც მოხდება შესაბამისად, როდესაც საქანი გადის წონასწორობის მდგომარეობას და იმყოფება უკიდურესი დაშორების მდგომარეობაში. ადვილი მისახვედრია ისიც, რომ ეს ჰორიზონტული მდგენელი მიმართულია საქანის გადახრის მხარეზე.

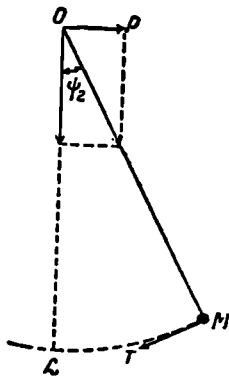
ზემონათქვამიდან ჩანს, რომ შტატივის თავი, სადაც ღერძზე დაკიდებულია საქანი, განიცდის ცვალებად ჰორიზონტულ წნევას, რის მეოხებით საქანის თავი და რხევათა ღერძი რამდენადმე გადაიადგილებენ იქით-აქეთ, რაც ნიშნავს მათ მოყვანას რხევით მოძრაობაში. ეს რხევა ამა თუ იმ სიძლიერით გადაეცემა შტატივს, ქვესაღვამს და ა. შ., რაც დამოკიდებულია მათ დრეკად თვისებებზე, გამართვაზე და ა. შ.

ცლა ამტკიცებს, რომ თანამედროვე ხელსაწყოებში ნახევარსეკუნდიანი საქანის რხევათა პერიოდის ცვლილება, გამოწვეული შტატივის რხევით, აღწევს საშუალოდ  $50 \cdot 10^{-7}$  სეკუნდამდე, ხოლო რხევათა ღერძის გადაადგილების ხაზოვანი სიდიდე კი  $0,04\mu$ .

სხვადასხვა დროს დამუშავებულ იქნა მრავალი ხერხი შტატივის რხევის სიდიდის განსაზღვრისათვის, რომელიც, როგორც ქვემოთ დავიხანხავთ, ზრდის რხევის პერიოდს. ამ ხერხთა შორის ყველაზე უფრო ფართე გამოყენება მოიპოვა იმ ხერხებმა, როცა მიმართავენ ორ საქანს, რომლებიც შტატივზე ერთდროულად ირხევიან ერთდამიპვე სიბრტყეში. აღნიშნული მიზნით მიმართავენ როგორც შეძლებისდაგვარად ერთნაირს, ისე არაერთნაირ საქანებს, როდესაც, მაგ., ერთი მძიმეა და მეორე მსუბუქი. ზოგი ხერხის მიხედვით მიმართავენ თითოეული საქანის რხევას რიგრიგობით, ზოგი ხერხის მიხედვით კი საქანების რხევა უნდა ხდებოდეს ერთდროულად.

ამ ხერხების ერთ-ერთ ვარიანტს წარმოადგენს ეგრეთ წოდებული რეზონანსის ხერხი, ან უკეთ რომ ვთქვათ, რეზონანსის მეთოდი ჩვენი შემთხვევისათვის მდგომარეობს იმაში, რომ ორი საქანიდან, რომლებიც დაშვებულია სამუშაო პრიზმებზე, ერთს ტოვებენ უძრავ მდგომარეობაში, მეორე კი დროის

გარკვეულ მომენტში მოყავთ რხევით მოძრაობაში შესაძლებელ მაქსიმალურ ამპლიტუდით. ცხადია, მეორე საქანის გაღვნით შტატივი თვითონ იწყებს რხევას, რომელიც გადაეცემა პირველ საქანს და, რადგანაც ორივე საქანის რხევის პერიოდები ტოლია, პირველი საქანიც თანდათან იწყებს რხევას. რა თქმა უნდა, პირველი საქანის გარკვეული დროის განმავლობაში ამოძრავების ხარისხი წარმოადგენს ერთგვარ საზომს თვით შტატივის რხევისათვის, რაც შესაძლებლად ხდის სათანადო შესწორების განსაზღვრას.



ნახ. 23.

დაეუშვათ, რომ 23 ნახაზზე წარმოდგენილია მეორე საქანი რხევის მდგომარეობაში, როდესაც ის წონასწორობის მდგომარეობიდან გადახრილია  $\psi_2$  კუთხით. იყოს  $l_2$  მისი დაყვანილი სიგრძე,  $\alpha_2$  ამპლიტუდა.  $\frac{d\psi_2}{dt}$  იყოს კუთხური სიჩქარე, რომლითაც მეორე საქანი მოძრაობს დაკიდების ღერძის გარშემო მოცემულ მომენტში. ცხადია, რომ საქანის რეაქცია დაკიდების ღერძზე, ე. ი. საყრდენზე, წარმოადგენს ორი ძალის ჯამს, რომლიდანაც ერთი არის საქანის წონა, მეორე კი ცენტრიდანული ძალა. ძნელი არ არის დაერწმუნდეთ, რომ საქანის წონის მდგენელი, რომელიც საქანის  $OM$  ღეროს მიმართულებას ემთხვევა, იქნება:

$$m_2 g \cos \psi_2,$$

სადაც  $m_2$  საქანის მასაა. რაც შეეხება ცენტრიდანულ ძალას, რომელიც იმავე  $OM$  მიმართულებას ემთხვევა, ის ასე გამოისახება:

$$m_2 l_2 \left( \frac{d\psi_2}{dt} \right)^2$$

გამოდის, რომ საყრდენზე მოქმედი სრული რეაქცია  $Q$ , რომელიც  $OM$  მიმართულებას ემთხვევა, ასე დაიწერება:

$$Q = m_2 g \cos \psi_2 + m_2 l_2 \left( \frac{d\psi_2}{dt} \right)^2 \quad \left( \frac{d\psi}{dt} \right)^2 = \frac{2g}{l} (\cos \psi - \cos \psi_0)$$

ჩვენ გვქონდა განტოლება (3.5), რომელიც ჩვენი შემთხვევისათვის ასე დაიწერება:

$$l_2 \left( \frac{d\psi_2}{dt} \right)^2 = 2g(\cos \psi_2 - \cos \alpha_2),$$

რომლის წინა ტოლობაში ჩასმა მოგვცემს:

$$Q = m_2 g (3 \cos \psi_2 - 2 \cos \alpha_2).$$

დავშალოთ ეს ძალა ორ მდგენელად: ერთი იყოს მიმართული ვერტიკალურად, მეორე კი ჰორიზონტალურად. ვერტიკალური მდგენელი არ აწარ-



მოებს შტატივის გვერდით ძერას, რის გამო ჩვენი მიზნისათვის გამოსადეგი არ არის. რაც შეეხება პორიზონტალურ მდგენელს, რომელიც სწორედ მიზეზია შტატივის რხევისა, ის ასე დაიწერება:

$$P = m_2 g (3 \cos \psi_2 - 2 \cos \alpha_2) \sin \psi_2.$$

ჩვენ გვქონდა ტოლობა (3.3), რომელიც ამ შემთხვევისათვის შეიძლება ასე დაიწეროს:

$$g \sin \psi_2 = -l_2 \frac{d^2 \psi_2}{dt^2},$$

რომლის წინა ტოლობაში ჩასმის შემდეგ, გვექნება:

$$P = -m_2 l_2 \frac{d^2 \psi_2}{dt^2} (3 \cos \psi_2 - 2 \cos \alpha_2).$$

როდესაც აქ რხევის ამპლიტუდა  $\alpha_2$  მცირეა, მაშინ  $\cos \alpha_2$  შეიძლება ერთეულის ტოლად მივიჩნიოთ, რაც მართებული იქნება აგრეთვე  $\cos \psi_2$  სიდიდის მიმართაც, რადგან პირობის თანახმად  $|\psi_2| \ll |\alpha_2|$ . მაშინ:

$$P = -m_2 l_2 \frac{d^2 \psi_2}{dt^2}.$$

ეს ძალა მიმართულია საქანის გადახრის მხარეზე და იწვევს შტატივის პორიზონტულ ძერას აჩქარებით, რომელიც პროპორციულია ამ ძალისა, რაც ასე დაიწერება:

$$-e l_2 \frac{d^2 \psi_2}{dt^2}, \quad (5.21)$$

სადაც  $e$  არის რაღაც მცირე მამრაველი, რომელიც დამოკიდებულია საქანის დრეკად თვისებებზე. ამ აჩქარების პროექცია  $MT$  მხების მიმართულეებაზე იქნება:

$$e l_2 \frac{d^2 \psi_2}{dt^2} \cos \psi_2, \quad (5.22)$$

გამოდის, რომ აჩქარება, რომელიც მოცემულია (22) გამოსახულებით, უნდა მიემართოს იმ აჩქარებას, რომელსაც წარმოშობს სიმძიმის ძალა და რომელსაც გამოსახავს (3.3) განტოლება. მაშინ ეს უკანასკნელი განტოლება ასე დაიწერება:

$$l_2 \frac{d^2 \psi_2}{dt^2} + e l_2 \frac{d^3 \psi_2}{dt^3} \cos \psi_2 + g \sin \psi_2 = 0 \quad (5.23)$$

შევცვალოთ აქ  $\cos \psi_2$  კუთხის სიმცირის გამო  $\psi_2$  კუთხით, რის შემდეგ ეს განტოლება წილებს მარტივ სახეს:

$$I_2(1+\varepsilon) \frac{d^2\psi_2}{dt^2} + g\sin\psi = 0. \quad (5.24)$$

მაგრამ ეს ხომ იმ საქანის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებაა, რომლის სიგრძე ტოლია  $I_2(1+\varepsilon)$  გამოსახულების. აქედან შესაბამისი  $T_2$ -პერიოდისათვის მივიღებთ:

$$T_2 = \pi \sqrt{\frac{I_2}{g} (1 + \varepsilon)}. \quad (5.25)$$

აქედან ჩანს, რომ საქანი რხევად საყრდენზე ირხევა უფრო ნელა, ვიდრე უძრავ საყრდენზე.

უადგილობის გამო ჩვენ აქ არ გავაგრძელებთ ზემოთ მოყვანილი თეორიის განვითარებას, რის შედეგად შეიძლება მიღებულ იქნეს ბორასის ფორმულა, რომელსაც საკმაოდ ფართე გამოყენება აქვს საქანიან ხელსაწყოებით წარმოებულ თანამედროვე დაკვირვებებში. არ უნდა ვიფიქროთ, რომ ბორასის ფორმულით გამოსახული შესწორება თავისუფალია შეცდომიდან, რომელიც უმეტეს შემთხვევაში  $1.10^{-7}$  სეკ. აღემატება.

გადავიდეთ ორი საქანის ერთდროული რხევის მეთოდზე, როდესაც ეს რხევა ხდება ერთ და იმავე სიბრტყეში. ცხადია, ასეთ რხევისათვის უფრო მობრუნებულია ოთხსაქანიანი ხელსაწყო, სადაც მოიპოვება ორი წყვილი ასეთი საქანებისა, თუმცა ამავე მიზნით შეიძლება სამსაქანიანი შტიუკრატის ხელსაწყოს გამოყენებაც, სადაც მხოლოდ ორი საქანი ირხევა ერთ ვერტიკალურ სიბრტყეში.

ამ მეთოდის განხორციელებისას საჭიროა სათანადოდ იზოლირება რხევით მდგომარეობაში მყოფ საქანებისა, რომ ჰაერის მოძრაობა, რომელსაც იწვევს ერთი მათგანი, არ წვდეს მეორეს. ეს მეთოდი მოითხოვს, რომ რხევად მდგომარეობაში მოყვანილ იქნეს ორი ერთნაირი ფორმის. სიგრძისა და მასის საქანი, რომლებიც ირხევა ერთ და იმავე სიბრტყეში თანაბარ ამპლიტუდებით, მაგრამ საწინააღმდეგო ფაზებით, ე. ი. მათი ფაზები ერთმანეთისაგან განსხვავდება  $\pi$  სიდიდით. თუ ეს პირობები ყველა შესრულებულია, მაშინ თითოეული საქანი შტატივზე ახუნის თანაბარ, მაგრამ საწინააღმდეგოდ მიმართულ წნევას, რის გამო შტატივი რჩება უძრავი, რაც იმას ნიშნავს, რომ საქანის რხევის პერიოდული არავითარი შესწორება არაა შესაძლებელი. როდესაც რომელიმე ზემოთ ჩამოთვლილი პირობებიდან არ სრულდება, რაც სწორედ ასეა პრაქტიკაში, მაშინ შტატივი, ცხადია, განიცდის რაღაც გადაადგილებას, რომელიც, რა თქმა უნდა, საგრძნობლად მცირეა თითოეული საქანის მიერ ცალ-ცალკე გამოწვეულ გადაადგილებაზე. რასაკვირველია, ასეთ მცირე გავლენაზე შესწორების მონახევა უფრო ზუსტად შეიძლება.

ამჟამად ზემოთ დასმული საკითხი წყდება ორი სხვადასხვა გზით. ერთი მათგანი მდგომარეობს იმაში, რომ შტატივის რხევის გავლენა არ ისაზღვრება, არამედ გამოირიცხება დაკვირვებებიდან იმ ხერხით, რომელიც დამუშავებულია ვენინგ მენინსის მიერ. ამ ხერხს იყენებენ უმთავრესად ზღვაზე სიმძიმის ძალის განსაზღვრისათვის, რის შესახებ ქვემოთ იქნება საუბარი. ამ ხერ-

ხის განხორციელებისათვის საჭიროა ამავე მიზნისათვის ხსენებული ავტორის მიერ აგებული ხელსაწყო გაოქოვდება. ეს ხელსაწყო ისეა აგებული, რომ სხივი, რომელიც აირეკლება პირველი საქანის სარკიდან, დაეცემა მეორე საქანის სარკეს, საიდანაც არეკლის შემდეგ ჩაიწერება ფოტოქალაქზე. გამოდის, რომ ჩვენ საქმე გვაქვს ორი საქანის რალაც კომბინაციასთან, რომელსაც ფიქტიური საქანი ეწოდება. თურმე ხელსაწყო ასეთნაირად მოწყობის შედეგად გამოირიცხება შტატივის ყველა პორიზონტული აჩქარება, მათ შორის მისი რხევებიც, რომლებიც გამოწვეულია თვით საქანების რხევით.

ჩვეულებრივი ხელსაწყოსათვისაც შესაძლებელია დაკვირვებათა ისეთი დამუშავება, რომელიც შექმნის ფიქტიურ საქანს, მ.გ.რამ დაკვირვებათა ასეთი დამუშავება რთულია, რის გამო მას პრაქტიკულად არ იყენებენ.

უფრო მოხერხებულია, როდესაც შტატივის დარჩენილი მცირე თანარხების გავლენის გამოსაანგარიშებლად იყენებენ სათანადო ფორმულებს, რომლებიც შედგენილია სხვადასხვა ავტორის მიერ, რაზედაც ჩვენ აქ არ შევჩერდებით.

---

## თ ა ზ ი VI

### სიჩქარის ძალის განსაზღვრა ზღვაზე

ზღვაზე დაკვირვებისათვის ჩვეულებრივად იყენებენ გემს ან წყალქვეშა ნავს, რომელთა მოძრაობა, ცხადია, იწვევს საქანის რხევათა შემოფოთებას. ყველაზე საგრძნობია ის დამახინჯება, რომელსაც საქანის რხევა განიცდის ჰორიზონტული აჩქარების გავლენით. ამასთან საქანის რხევაზე გავლენას ახდენს ჰორიზონტული აჩქარების ის მდგენელი, რომელიც ეპერპენდიკულარება პრიზმის წიბოს, ე. ი. როცა ეს მდგენელი საქანის რხევის სიბრტყეშია; რაც შეეხება მეორე მდგენელს, რომელიც ემთხვევა პრიზმის წიბოს, ის საქანის რხევაზე არ ახდენს გავლენას, რადგანაც ისპობა წიბოს ხახუნით აქატის ფირფიტაზე. როგორც თეორია და პრაქტიკა ამტკიცებს, ძირითადად შეიძლება გამოირიცხოს პირველი მდგენელის გავლენაც, თუ მიემართავთ ორი საქანის საერთო სადგამზე ერთდროულად და ერთ და იმავე სიბრტყეში რხევის ხერხს.

ამ საქანების მოძრაობის შესაბამისი დიფერენციალური განტოლებანი, როდესაც ისინი განიცდიან დამატებით ჰორიზონტულ აჩქარებას, რომელიც მიმართულია რხევის სიბრტყის თანხედენილად, ასე დაიწერება:

$$l_1 \frac{d^2 \psi_1}{dt^2} + g \psi_1 + \frac{d^2 y}{dt^2} = 0 \quad (6.1)$$

$$l_2 \frac{d^2 \psi_2}{dt^2} + g \psi_2 + \frac{d^2 y}{dt^2} = 0,$$

სადაც  $\psi_1$  და  $\psi_2$  საქანების გადახრის კუთხეებია წონასწორობის მდგომარეობიდან, რომლებსაც აგრეთვე ელონგაციის კუთხეებს უწოდებენ,  $l_1$  და  $l_2$  — დაყვანილი სიგრძეებია 1 და 2 საქანისა, ხოლო  $y''$  — ჰორიზონტული აჩქარების მდგენელია საქანების რხევის სიბრტყეში და ა. შ.

ზემოდაწერილი ორი განტოლებიდან სხვაობის შედგენით, თუ დავუშვებთ, რომ  $l_1 = l_2 = l$ , ადვილად გამოირიცხება  $\frac{d^2 y}{dt^2}$  შემდეგის მიხედვით:

$$l \left( \frac{d^2 \psi_1}{dt^2} - \frac{d^2 \psi_2}{dt^2} \right) + g(\psi_1 - \psi_2) = 0, \quad (6.2)$$

ანდა, თუ დავუშვებთ, რომ

$$\psi_1 - \psi_2 = \phi,$$

მაშინ დავწერთ:

$$l \frac{d^2 \phi}{dt^2} + g \phi = 0. \quad (6.2')$$

ეს არის  $l$  სიგრძის მქონე საქანის აუშფოთებელი მოძრაობის განტოლება; ვერტიკალიდან მისი გადახრის კუთხეა  $\psi_1 - \psi_2 = \phi$ . ასეთ საქანს ფიქტიური ეწოდება. გამოდის, რომ ფიქტიური საქანის რხევის პერიოდი თავისუფალია ჰორიზონტული აჩქარების გავლენიდან, როდესაც სამუშაო (ფაქტიური) საქანები იზოქრონულია.

როდესაც სამუშაო საქანები არაიზოქრონულია, მაშინ ფიქტიური საქანის  $T$  პერიოდი, როგორც ამ საკითხის თეორია ამტკიცებს, შეიძლება მოინახოს შემდეგი განტოლებებიდან:

$$T = T_1 + \Delta T, \quad (6.3)$$

$$\Delta T = (T_1 - T_2) \frac{\alpha_2}{\alpha} \cos(\psi_2 - \psi), \quad (6.4)$$

სადაც  $T_1 - T_2$  სხვაობაა ფაქტიურ საქანთა პერიოდებს შორის,  $\alpha_2$  და  $\alpha$  ფაქტიურ და ფიქტიურ საქანთა ამპლიტუდებია შესაბამისად, ხოლო  $\psi_2$  და  $\psi$  მათივე შესაბამისი ფაზებია.

უკანასკნელ ფორმულაში ცხადი სახით შედის ფიქტიური საქანის  $\alpha$  ამპლიტუდა და  $\psi$  ფაზა, რომელთა განსაზღვრა სათანადო გაზომვებისა და გამოანგარიშების საფუძველზე სავსებით შესაძლებელია, თუ ცნობილია  $\alpha_1$ ,  $\psi_1$ ,  $\alpha_2$  და  $\psi_2$ . მაგრამ ეს არც ისე საკიროა, რადგანაც ვენინგ მენინგის ხელსაწყო ისეა მოწყობილი, რომ ჩაწერს ფიქტიური საქანის ამპლიტუდასა და გადახრის კუთხეს, რაც მისი პერიოდის განსაზღვრის საშუალებას იძლევა.  $\Delta T$  შესწორების გამოსაანგარიშებლად ხსენებულ ხელსაწყოზე წარმოებს აგრეთვე ერთ-ერთი ფაქტიური საქანის რხევათა ჩაწერა. რადგანაც ეს საქანი განიკდის ჰორიზონტული შემფოთებას, ამიტომ მისი ჩანაწერი ძალზე დამახინჯებულია.

ჩვენ ვხედავთ, რომ უკანასკნელი ორი ფორმულა საშუალებას იძლევა გამოანგარიშებულ იქნას ფაქტიური საქანის  $T_1$  პერიოდი დაკვირვებებიდან განსაზღვრული ფიქტიურის საქანის  $T$  პერიოდის მიხედვით.

გარდა ჰორიზონტული აჩქარებისა, საქანიანი ხელსაწყო გემის რხევათა გამო განიკდის ვერტიკალურ აჩქარებასაც. ეს უკანასკნელი ხშირად იცვლის ნიშანს, რის გამო, მაგალითად, ნახევარი საათის დაკვირვების განმავლობაში ეს გავლენა შეიძლება კომპენსირებულად ჩაითვალოს.

განვიხილოთ ახლა საქანიან ხელსაწყოზე ბრუნვითი მოძრაობებიდან წარმოშობილ აჩქარებათა გავლენა ზღვაზე დაკვირვების დროს.

ხელსაწყოს გადახრა საქანის პრიზმის წიბოს პარალელური ღერძის გარშემო, ცხადია, არ გამოიწვევს საქანის ვერტიკალიდან გადახრას, მაგრამ თვით ხელსაწყოს მიმართ ეს გადახრა შესამჩნევი იქნება. ფიქტიური საქანი-სათვის ხელსაწყოს მიმართაც არ მოხდება არაერთგვაროვანი გადახრა. ამიტომ გან-

ენილოთ გადახრა იმ ღერძის გარშემო, რომელიც ეპერპენდიკულარება საქანის წიბოებს. მაშინ, ცხადია, საქანი ირხევა სიბრტყეში, რომელიც ვერტიკალურ მიმართულებასთან ქმნის რაღაც გარკვეულ  $\beta$  კუთხეს, რის გამო წონასწორობის მდგომარეობაში საქანზე მოქმედებს ძალა  $g \cos \beta$ . ცხადია გაზომილ სიდიდეს უნდა მიემატოს შესწორება:

$$\delta g = g - g \cos \beta = g(1 - \cos \beta) = 2g \sin^2 \frac{\beta}{2} ;$$

რადგანაც ხელსაწყო კარდანის საკიდზეა გამართული, ამიტომ  $\beta$  კუთხე მცირეა და ამიტომ შეიძლება დაიწეროს:

$$\delta g = g \frac{\beta^2}{2} . \quad (6.5)$$

ამ შესწორების  $g$  სიდიდეში შეტანის მაგიერ შეიძლება სათანადო შესწორება მივცეთ ფიქტიური საქანის პერიოდს; ამისათვის დავეწროთ ლოგარითმული წარმომებული საქანის რხევის პერიოდისათვის:

$$\frac{dT}{T} = - \frac{1}{2} \frac{dg}{g} ,$$

საიდანაც გვექნება, რომ

$$dT = - \frac{1}{2} T \frac{dg}{g} ;$$

აქედან (5) ფორმულის მიხედვით დავეწეროთ:

$$dT = - \frac{1}{4} T \beta^2 . \quad (6.6)$$

საქანის პერიოდისათვის შესაბამისი შესწორება იქნება

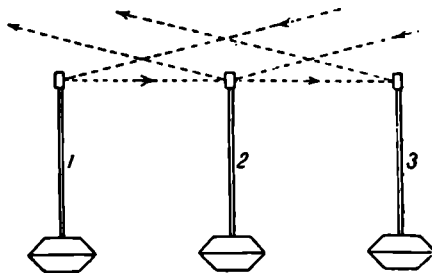
$$\Delta T = - \frac{1}{4} T [\beta^2] , \quad (6.6')$$

სადაც  $[\beta^2]$  საშუალო მნიშვნელობაა  $\beta^2$  სიდიდისა დაკვირვების განმავლობაში. ამ შესწორების უგულვებელყოფა არ შეიძლება და ამიტომ საზღვაო ხელსაწყო ისეა მოწყობილი, რომ მთელი დაკვირვების განმავლობაში წარმოებდეს რეგისტრაცია ხელსაწყოს  $\beta$  კუთხით დახრისა, რომელიც არ უნდა აღემატებოდეს  $1^\circ$ .

ჩვენ აქ არ შევჩერდებით სხვა შესწორებების განხილვაზე. აღვნიშნავთ მხოლოდ, რომ შტატივის რხევაზე შესწორების შეტანა ჩვეულებრივი გაგებით სრულიად არაა საჭირო, რადგანაც ზემოთ განხილული მეთოდი სწორედ იმაში მდგომარეობს, რომ გამორიცხულ იქნას შტატივის რხევის გავლენა.

გადავიდეთ ვენინგ მეინესის ხელსაწყოს მოკლე აღწერაზე. ხელსაწყოს შტატივზე დაკიდებულია ერთმანეთისაგან 13 სანტიმეტრის დაშორებით სამი საქანი, რომლებიც ერთ სიბრტყეში ირხევა, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 24-ზე, სადაც მოცემულია აგრეთვე სქემა სხივთა სელისა. ამ სამივე საქანის, რომლებიც აღნიშნულია სათანადოდ 1, 2 და 3, რხევათა ღერძები ურთიერთ-

პარალელურია და ძვეს ერთ ჰორიზონტულ სიბრტყეში. როგორც ნახაზიდან ჩანს, სინათლის სხივის კონა ეცემა 1 საქანის სარკეზე, არეკლის შემდეგ მიემართება 2 საქანის სარკისაკენ და ამ უკანასკნელიდან არეკლის შემდეგ გაივლის შემკრებ ლინზაში და ამ უკანასკნელის მიერ დაფოკუსირებული DC-მა ფოტოლენტზე, რომელზედაც ხდება სათანადო ჩაწერა, რის შედეგად მიიღება ფიქტიური საქანის რხევათა ჩანაწერი  $\psi_1 - \psi_2$  ელონგაციით. საკონტაქტო ქრონომეტრის შემწეობით ამავე დროს განხორციელებულია აგრეთვე წერის ყოველსეკუნდიანი შეწყვეტანი.



ნახ. 24.

როგორც ნახაზიდან ჩანს, 2 და 3 საქანთა წველის შემწეობით განხორციელებულია მეორე ფიქტიური

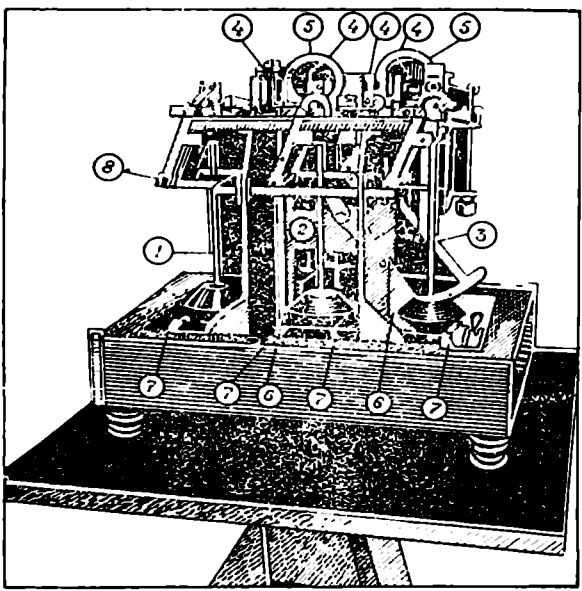
საქანი. გარდა ამისა ფოტოლენტზე ცალკე უნდა ჩაიწეროს 2 ნიშანის მქონე საქანის რხევა, რადგანაც ფიქტიური საქანის პერიოდის (4) ფორმულის შემწეობით რედუქციისათვის საჭიროა ვიცოდეთ ცალკე ერთ-ერთი საქანის ამპლიტუდა და ფაზა. უნდა ვიქონიოთ მხედველობაში, რომ მეორე საქანის ფაზის მისაღებად საჭიროა გადახრის  $\psi_2$  კუთხე ლენტზე ათვლილ იქნეს ვერტიკალის მდებარეობიდან და არა იმ მიმართულებიდან, რომელიც ხელსაწყოსთან ერთად რხევას განიცდის. ამ დაბრკოლების დასაძლევად ხელსაწყოს გააჩნია დამხმარე საქანი, რომელიც ირხევა ძირითადი სამი საქანის რხევათა სიბრტყის პარალელურ სიბრტყეში და რომელსაც აქვს იმდენად ძლიერი დაცხრობა, რომ ის პრაქტიკულად არც კი ირხევა და აძიტომ დაკვირვების მთელი დროის განმავლობაში ინარჩუნებს მუდმივ ვერტიკალურ მდგომარეობას. ეს საქანი, თუ ძირითად სამ საქანს მივიღებთ მხედველობაში, მეოთხე იქნება.

გარდა ამისა, ფოტოლენტზე იწერება საქანთა რხევის სიბრტყის გადახრა, რომელიც  $\beta$ -ით იყო ზემოთ აღნიშნული; ეს ჩაწერა ხორციელდება მეორე დამხმარე საქანის შემწეობით, რომელიც პირველი დამხმარე საქანის ანალოგიურადაა მოწყობილი, მაგრამ ირხევა ძირითად საქანთა რხევის სიბრტყის პერპენდიკულარულად. ეს საქანი მეხუთე იქნება.

ხელსაწყოს გააჩნია აგრეთვე ლითონის თერმომეტრი, რომლის ჩვენებათა იწერება ფოტოლენტზე საქანების რხევასთან ერთდროულად.

ნახ. 25-ზე წარმოდგენილია ვენინგ შეინესის ხელსაწყო ღია სახით, სადაც ძირითადი სამი საქანი აღნიშნულია სათანადოდ 1, 2 და 3, 4-ით — ოპტიკური სისტემის ოთხი პრიზმი, 5-ით — ორი ობიექტივი, 6-ით — ბერკეტები საქანებისათვის ამპლიტუდების მისაცემად, 7-ით — საგანგებო დრეკადი მოშკერები, რომლებსაც მტკიცედ უკავიათ საქანები, ასე რომ ხელსაწყოში მათი

დატოვება შეიძლება დაკვირვების გარეშე შუალედებში, 8-ით კი—ბერკეტები საქანთა არეტორებისათვის.



ნახ. 25.

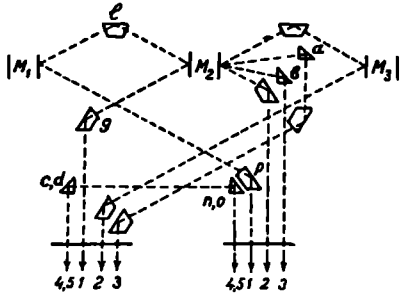
ნახ. 26-ზე მოცემულია ხელსაწყოს ოპტიკური სისტემის სქემა, რომელიც, როგორც ვხედავთ, საკმაოდ რთულია. ამ სქემაზე გზა სინათლის იმ კონისა, რომელიც კმნის პირველ ფიქტიურ საქანს, აღნიშნულია 1-ით, ხოლო მეორე საქანისათვის—2-ით, გავარჩიოთ მაგალითისათვის გზა სინათლის პირველი კონისა; ის შედის მარჯვენა ლინზაში, ეცემა უძრავ  $P$  პრიზმაზე, შემდეგ პირველი საქანის  $M_1$  სარკეზე, შემდგომ კვლავ  $l$  უძრავ პრიზმაზე და მეორე საქანის  $M_2$  სარკეზე, რის შემდეგ აირეკლება  $g$  პრიზმა-

დან და გამოდის ხელსაყოდან მარცხენა ლინზით.

ჩვენს ნახაზზე 3-ით აღნიშნულია სინათლის კონით წარმოებს დაკვირვება ხელსაწყოს მეორე საქანის რხევაზე; პრიზმები  $a$  და  $b$  მიმაგრებულია პირველ დამხმარე საქანზე, ე. ი. მეოთხე საქანზე, რომლის შესახებ უკვე ზემოთ იყო ნათქვამი.

4-ითა და 5-ით აღნიშნულია სინათლის ორი კონა, რომელთა პორიზონტული პროექციები ერთმანეთს თანხედება, რადგანაც პრიზმები  $n$  და  $o$ ,  $c$  და  $d$  ერთი მეორის ზემოთენაა მოქცეული. ერთი მათგანი  $n$  უძრავ პრიზმიდან არეკლის შემდეგ ეცემა  $c$  პრიზმაზე, რომელიც მიმაგრებულია ბიგეტალურ ფირფიტაზე; ეს უკანასკნელი ტემპერატურის ცვლილების გამო

კონა, რომლის შემწე-



ნახ. 26.



განიცდის სათანადო დეფორმაციას, რაც იწვევს 4 კონის მიმართულების შესაბამის ცვლილებას და ამით ახორციელებს ხელსაწყოში ტემპერატურის ცვლილების რეგისტრაციას. მეორე კონა  $O$  მუდმივი პრიზმიდან არეკლის შემდეგ ეცემა მეორე დამხმარე საქანზე მიმაგრებულ  $d$  პრიზმზე და შემდეგ მარცხენა ლინზით გადის გარეთ ხელსაწყოდან.

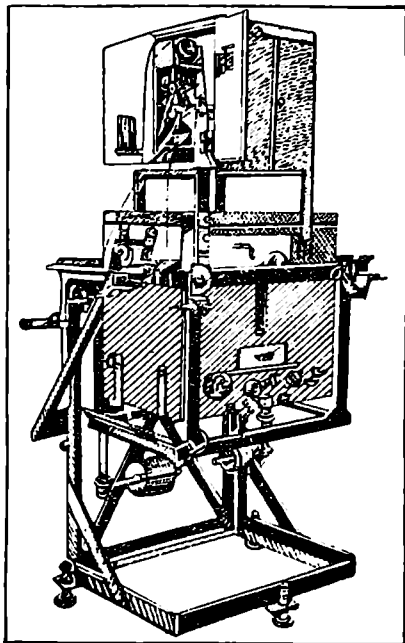
მარცხენა ლინზის ფოკალური მანძილი 111 სანტიმეტრის ტოლია; აღნიშნულ მანძილზე ათავსებენ დოლს ფოტოქაღალდით, რომელზედაც წარმოებს ყველა ზემონაჩვენები ჩაწერა.

თვითონ ამ ხელსაწყოს აქვს ორი ერთმანეთზე დადგმული მართკუთხიანი ყუთის სახე, როგორც ეს ნახ. 27-ზეა წარმოდგენილი. საქანები მოთავსებულია ქვედა, უფრო მოზრილ, ყუთში, ხოლო ზემო, უფრო მცირე, ყუთში მოთავსებულია საათის მექანიზმი, რომლითაც წარმოებს ფოტოქაღალდის მოძრაობა, ელექტრული ნათურა, ლინზებისა და ოპტიკური პრიზმების ნაწილი. სხვა დეტალებზე ჩვენ აქ არ შევჩერდებით.

დაკვირვებანი ხელსაწყოს შემწეობით გრძელდება ნახევარი საათის განმავლობაში. პირველი ხუთი წუთისა და ბოლო ხუთი წუთის განმავლობაში ფოტოლენტი მოძრაობს დიდი სიჩქარით, დაახლოებით 5 სმ/წუთში, რაც საშუალებას იძლევა საქანთა ცალკეული რხევა ჩაწერილ იქნეს გარკვევით, რათა ჩანაწერების ამ ნაწილების გამოყენება შესაძლებელი იყოს პერიოდის, ამპლიტუდისა და საქანთა ფაზების განსაზღვრისათვის. დანარჩენ დროის შუალედში ფოტოლენტის მოძრაობა შენელებულია სამჯერ, რადგანაც შესაბამისი ჩანაწერის მიხედვით ისაზღვრება მხოლოდ სხვადასხვა შესწორება და წარმოებს კონტროლი ტემპერატურაზე და ხელსაწყოს საერთო მუშაობაზე.

ჩვენ აქ არ შევჩერდებით დაკვირვებათა დამუშავების ხერხებზე, მაგრამ საჭიროდ მიგვაჩნია შევხოთ რედუქციების თავისებურებას ზღვაზე გაზომილ სიძიმის ძალის მნიშვნელობისათვის.

თუ დაკვირვებები ხდება წყალქვეშა ნაგზე, რომელიც ჩასულია წყალში, მაშინ რედუქცია თავისუფალ ჰაერისათვის, ცხადია, იქნება უარყოფითი და



ნახ. 27.

ჟღერის  $-0,308 P$ , სადაც  $P$  ხელსაწყო ს მდებარეობის სიღრმეა წყალში, მეტრებით გამოსახული.

ნავის ზემოთ, რა თქმა უნდა, იმყოფება გარკვეული სისქის წყლის ფენა, რომლის მიერ გამოწვეული მიზიდება მიმართულია ზევით, რაც იწვევს გაზომილი სიმაძიის ძალის მნიშვნელობის შემცირებას  $\Delta g$  სიდიდით. იქვე ზღვის ზედაპირზე წყლის იმავე სისქის ფენა გამოიწვევს თანატოლ მიზიდებას, რომელიც, პირიქით, მიმართული იქნება ქვევით. გამოდის, რომ განსახილველი შესწორება ტოლი იქნება  $+2\Delta g$  სიდიდისა, ან, თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ  $\Delta g = 0,0418 HD$ , სადაც  $D = 1,03$  ზღვის წყლის სიმკვრივეა,  $H = P$  ხელსაწყო ს მდებარეობის სიღრმეა, გვექნება:

$$\Delta g = 0,043P;$$

აქედან

$$2\Delta g = +0,086P \text{ გალს.} \quad (6.7)$$

გამოვიანგარიშოთ ახლა შესწორება, ეგრეთ წოდებულ, ეტევის ეფექტზე. დავუშვათ, რომ დაკვირვება წარმოებს მოძრაე გემზე და მსჯელობის გასაადვილებლად მივიღოთ, რომ ის მოძრაობს რომელიმე პარალელის გასწვრივ დასავლეთიდან აღმოსავლეთისაკენ  $v$  სიჩქარით. იყოს ამ პარალელის განედი  $\varphi$ , მისი შესაბამისი რადიუსი  $r$ , ხაზოვანი სიჩქარე ამ პარალელზე მდებარე მატერიალურ წერტილისა  $V$ , დედამიწის ბრუნვის კუთხური სიჩქარე  $\omega$ . მაშინ დედამიწის ბრუნვით გამოწვეული ცენტრიდანი ძალის აჩქარება ტოლია:

$$\frac{V^2}{r}$$

რადგანაც გემის მოძრაობის მიმართულება თანხედება დედამიწის ბრუნვის მიმართულებას, ამიტომ ცენტრიდანი ძალის აჩქარებისათვის გემზე გვექნება:

$$\frac{(V+v)^2}{r}.$$

ამ ორ სიდიდეთა შორის სხვაობისათვის დავწერთ:

$$\Delta F = \frac{(V+v)^2}{r} - \frac{V^2}{r} = \frac{2Vv+v^2}{r}$$

ან, რადგანაც გემის სიჩქარე  $v$  უმნიშვნელოა  $V$ -სთან შედარებით, გვექნება:

$$\Delta F = \frac{2Vv}{r}.$$

ცენტრიდანი ძალა, ცხადია, მიმართულია პარალელის რადიუსის თანხედენილად, რომელიც დედამიწის ცენტრისაკენ მიმართულებასთან ქმნის  $\varphi$  კუთხეს; რა თქმა უნდა, ცენტრიდანი ძალის  $\Delta F$  ცვლილებაც მიმართულია ასევე, და ამიტომ  $\Delta F$ -ის პროექცია აღნიშნულ მიმართულებაზე მოგვცემს:

$$\Delta F \cos \varphi = \frac{2Vv}{r} \cos \varphi = 2\omega v \cos \varphi. \quad (6.8)$$

ეს არის სწორედ საძიებელი შესწორება, რომელიც უნდა მიემატოს დაკვირვებით მიღებულ სიმძიმის ძალას. როგორც ვიცი

$$\omega = \frac{2\pi}{86164}$$

სადაც მნიშვნელი წარმოადგენს ვარსკვლავთმიერ დღელამეს, რომელიც გამოხატულია საშუალო სეკუნდებში. თუ ამ სიდიდეს შევითანთ (8) ფორმულაში, მივიღებთ საძიებელ შესწორებას გალებში, როცა  $\psi$  იქნება მოცემული CGS-ის ერთეულებში, ე. ი. სანტიმეტრებით სეკუნდში. მაგრამ გემის სიჩქარეს ჩვეულებრივად გამოსახავენ კილომეტრებით საათში, და ამიტომ საჭირო იქნება შემოვიღოთ მამრავლი:

$$\frac{100000}{3600} = \frac{1000}{36}$$

მაშინ ფორმულა (8) შეიძლება ასე დაიწეროს:

$$\Delta F' \cos \varphi = \frac{4\pi}{86164} \cdot \frac{1000}{36} v \cos \varphi = 0,00405 v \cos \varphi.$$

ეს შესწორება დადებითია, როდესაც გემი მოძრაობს დასავლეთიდან აღმოსავლეთისაკენ და, რა თქმა უნდა, უარყოფითია, როდესაც გემი მოძრაობს აღმოსავლეთიდან დასავლეთისაკენ. ცხადია, ნებისმიერი მიმართულებისათვის ეს შესწორება რჩება ძალაში, თუ  $\psi$  სიჩქარის მდგენელია დასავლეთიდან აღმოსავლეთისაკენ მიმართული.

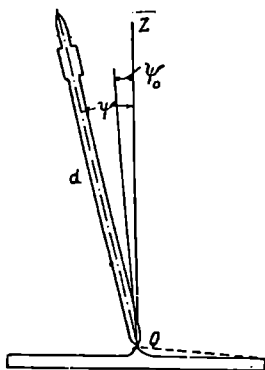
პირველი საზღვაო დაკვირვებები ვენინგ შეინესმა ჩაატარა 1923 წელს ჩვეულებრივი ოთხსაქანიანი ხელსაწყოთა შემწვობით, რადგანაც ზემოაღწერილი ხელსაწყოთა კონსტრუქცია ავტორის მიერ დამუშავებულ იქნა მხოლოდ შემდეგ წელს; სათანადო დაკვირვებათა ჩატარება ახალი ხელსაწყოთა ავტორმა მოახერხა მხოლოდ 1925 წლის შემოდგომიდან.

სსრ კავშირში საზღვაო დაკვირვებების წარმოება ვენინგ შეინესის მეთოდით დაიწყო 1930 წელს იმ სამუშაოებით, რომლებიც ჩაატარა პროფ. სოროკინმა შავ ზღვაზე. სოროკინის განკარგულებაში იყო ჩვეულებრივი ოთხსაქანიანი ხელსაწყო, რომელიც მის მიერ საგრძნობლად იქნა გადაკეთებული, რათა ხელსაწყო მაქსიმალურად შეხამებული ყოფილიყო საზღვაო პირობებთან, რასაც მან წარმატებით მიაღწია. ჩვენ აქ არ შევჩერდებით სოროკინის მიერ ჩატარებულ სამუშაოებზე; აღვნიშნავთ მხოლოდ, რომ მის მიერ მიღწეული სიზუსტე არაფრით არ ჩამოუვარდება იმ სიზუსტეს, რომელიც მიღწეული იყო ვენინგ შეინესის მიერ. 1937 წელს ამავე ხელსაწყოთა შემწვობით სოროკინის მიერ ჩატარებულ იქნა სიმძიმის ძალის განსაზღვრა იაპონიისა და ოხოტის ზღვებზე, სადაც დაკვირვებები მიმდინარეობდა წყალქვეშა ნავზე; ამავე ავტორის მიერ დაკვირვებები ჩატარებულ იქნა კასპიის ზღვაზეც 1930 წელს კარკაპზე. შემდგომი დაკვირვებები ამავე ზღვაზე სოროკინის სამსაქანიანი ხელსაწყოთა შემწვობით 1935 – 1936 წლებში კარკაპზე ჩაატარა ფედინსკიმ, ამ მიმართულებით წარმოებულ დანარჩენ სამუშაოებზე ჩვენ აქ არ შევჩერდებით.

## თ ა ზ ი VII

### ღკეკალი საქანი

ღრეკად საქანიან ხელსაწყოს ძირითად ნაწილს წარმოადგენს კვარცის ვერტიკალური  $d$  ღერო, რომელიც ქვემოთ მიმაგრებულია ელინვარისაგან გაკეთებული ღრეკადი  $O$  ფირფიტის შემწეობით. ამ ფირფიტას უნდა გააჩნდეს სათანადო ღრეკადობა, რომ  $d$  ღეროს შეეძლოს ვერტიკალურ მდგომარეობაში დაბრუნება, როდესაც მას გადახრიან მცირე კუთხით; გარდა ამისა, ხელსაწყოს ჩვენებათა სისწორისათვის საჭიროა, რომ ფირფიტა იყოს გაკეთებული ისეთი მასალისაგან, რომელსაც ახასიათებს ღრეკად თვისებათა მუდმივობა. ელინვარს, რომელიც ფოლადის, ნიკელისა და ქრომის შენადნობს წარმოადგენს, სწორედ გააჩნია ასეთი თვისება ტემპერატურის ცვალებადობის ფართე საზღვრებში.



ნახ. 28.

წონასწორობის მდგომარეობიდან მცირე  $\psi$  კუთხით საქანის გადახრა გამოიწვევს ფირფიტის ღრეკადი ძალის მოქმედებას, რომელიც  $c\psi$  ნამრავლით გამოისახება, სადაც  $c$  ფირფიტის ღრეკადობის კოეფიციენტია; ეს ძალა მიისწრაფვის დააბრუნოს საქანი მის წონასწორობის მდგომარეობაში. ამავე ღროს საქანზე მოქმედებას იწყებს

სიმძიმის ძალის მდგენელი, რომელიც, ტოლია რა  $mg \sin \psi$  გამოსახულებსა, მიისწრაფვის დააშოროს საქანი მის წონასწორობის მდგომარეობას. მაშინ ჩვენი საქანის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება,  $\psi$  კუთხის სიმცირის გათვალისწინებით, დაიწერება შემდეგი სახით:

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + \left( \frac{c}{m} - \frac{g}{l} \right) \psi = 0, \quad (7.1)$$

რომელიც ადვილად მიიღება (3.3) განტოლებიდან, სადაც  $g$  უნდა შენაცვლებულ იქნას გამოსახულებით:

$$\frac{cl}{m} - g$$

$$\frac{cl}{m} = \frac{cl}{m} - g \quad (7.2)$$

ანდა, თუ მხედველობაში მივიღებთ აღნიშვნას:

$$\frac{dl}{m} = h,$$

(2) ასე დაიწერება:

$$h-g.$$

ახლა (1) განტოლება დაიწერება ასე:

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + \left(\frac{h-g}{l}\right)\psi = 0, \quad (7.1')$$

საიდანაც მისი რხევის  $T$  პერიოდისათვის გვექნება:

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{h-g}}. \quad (7.3)$$

ასეთ სისტემას, რომელიც წონასწორობის მდგომარეობიდან მცირე გადახრების დროს იმოყვება ორი ერთმანეთის საწინააღმდეგო ძალის მოქმედების ქვეშ, ასტაზირებული ეწოდება. ამრიგად, ღრეკადი საქანი ასტაზირებულ სისტემას წარმოადგენს.

(3) განტოლებიდან ჩანს, რომ ღრეკადი საქანის რხევის პერიოდი ისაზღვრება არა  $g$  სიმძიმის ძალის სრული სიდიდით, არამედ სხვაობით რომელიც  $h$  მუდმივსა და  $g$  სიმძიმის ძალას შორის. ამიტომ გასაგებია, რომ შესაბამისი პერიოდი უფრო დიდი იქნება, რის გამოც მისი გაზომვა შეიძლება შესრულებულ იქნას გაცილებით უფრო ნაკლებ სიზუსტით, ვიდრე ეს საქიროა ჩვეულებრივ საქანთა პერიოდისათვის.

ლექემ თავის ხელსაწყოთაათვის, რომელიც მან ააგო ჰოლვეკთან ერთად, მიღწია  $T=3$  სექუნდს  $l=6$  სანტიმეტრის სიგრძის მქონე საქანისათვის. ამ მონაცემების საფუძველზე (3) ფორმულიდან მივიღებთ:

$$h-g = \frac{6}{T^2},$$

საიდანაც

$$h-g = 6,6 \text{ ვალმ.}$$

გამოვითვალოთ, როგორია  $g$  სიდიდის განსაზღვრის შეცდომა, თუ ღრეკადი საქანის რხევაზე დაკვირვება გრძელდება 10 წინდით, ხოლო განზღვრობაში  $\pm 0,1$  სეკუნდით. შეიძლება საქანი ვაკუუმში 200 რხევას; ამასთან დაეუშვათ, რომ დაკვირვების საწყისი და ბოლო მომენტების აღნიშვნა ხდება  $\pm 0,1$  სექუნდის სიზუსტით. ცხადია, რომ ამ პირობებში 200 ინტერვალის განზღვრვა ძლივობა განისაზღვრება  $\pm 0,1 \sqrt{2}$  სექუნდის სიზუსტით, ხოლო ერთი პერიოდის ხანგრძლივობის განსაზღვრის სიზუსტე იქნება 200-ჯერ ~~მანძილზე~~  $\pm 0,1$  შეცდომა იქნება:

$$dT = \frac{\pm \sqrt{2}}{2000} \text{ სექუნდით.}$$

ლოგარითმული წარმოებულ (3) ფორმულისა გვაძლევს:

$$\frac{dT}{T} = -\frac{1}{2} \frac{dg}{h-g}.$$

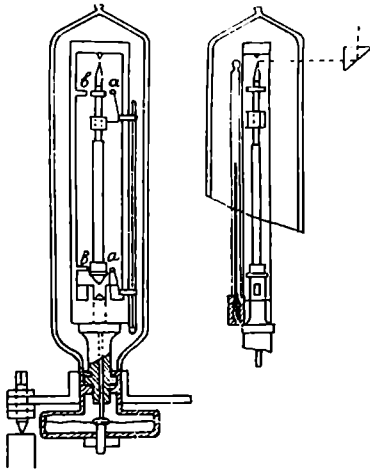
(7.4)

ამ ფორმულაში ზემოდაწერილ მნიშვნელობათა ჩასმა მოგვცემს

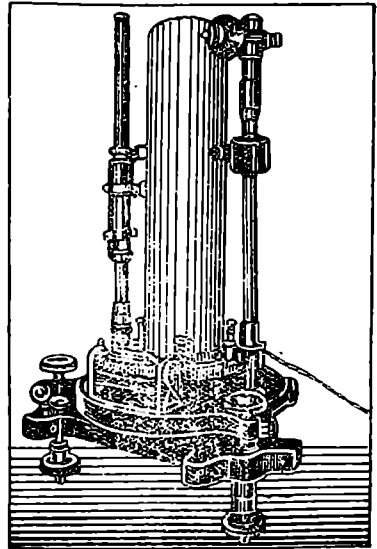
$$dg = \pm 3 \text{ მილიგალს.}$$

დროის გაზომვაში ზემონაჩვენები სიზუსტის შილწევა საესეებით შესაძლებელია კარგი სეკუნდშომის შემწეობით.

ხელსაწყოს შინაგანი მოწყობილობა ჩანს ნახ. 29-ზე. საქანი *aa* არეტირიაანად მოქცეულია მინის მთლიან



ნახ. 29.



ნახ. 30.

ქურქელში, სიდანაც ჰაერი განდევნილია; არეტირის მოქმედება ხორციელდება *aa* ბერკეტების შემწეობით საქანის *bb* შვერებზე მიქერით; *aa* საარეტირო ბერკეტების მოძრაობის გამოსაწვევად ქურქლის ქვემო ნაწილზე მიჩრჩილულია დრეკადი ფირფიტა; რომლითაც შეიძლება ხსენებულ ბერკეტებზე მოქმედება. საქანის რხევაზე დაკვირვებები წარმოებს მიკროსკოპის შემწეობით, რომელიც ნახაზის მართობულადაა დაყენებული, საქანის რხევათა სიბრტყე კი თანხედება ნახაზის სიბრტყეს; მიკროსკოპის მხედველობის არეში მოჩანს საქანის ზედა ბოლო წვეტი და სკალა ვერტიკალური დანაყოფებით. ხელსაწყოს საერთო ხედი წარმოდგენილია ნახ. 30-ზე. მინის ქურქელი საქანით დახურულია ცილინდრული ბუდით. ქვემოთ მოჩანს თარაზო, რომელიც დაყენებულია საქანის რხევათა სიბრტყის მართობულად. რადგანაც ხელსაწყო ფრიად მკრძნობიარეა, მისი ზუსტი საბოლოო ნიველირება აღნიშნული მიმართულებით წარმოებს თარაზოს შემწეობით კი არა, არამედ თვით საქანის

მდებარეობის მიხედვით, რისთვისაც უნდა მიღწეულ იქნეს არეტირიდან განთავისუფლებული საქანის გარკვეული მდებარეობა იმ წვეტის მიმართ, რომელიც ზემოთაა მიმაგრებული ჩარჩოზე, რაც ნაჩვენებია ნახ. 29-ის მარჯვენა ნახევარზე. ნახ. 30-ზე ცლინდრული ბუდის გვერდით ერთ მხარეზე გამართულია მიკროსკოპი, ხოლო მეორე მხარეზე კი მოწყობილია სისტემა, რომელიც უზრუნველყოფს მხედველობის არის განათებასა და იერმომეტრის ათვლას; უკანასკნელი მოთავსებულია მინის კურკლის შიგნით საქანის გვერდით.

ტემპერატურა ვერ ახდენს არსებით გავლენას ამ ხელსაწყოზე, რის გამოც საქმარისია მისი გაზომვა გრადუსის რამდენიმე მეათედის სიზუსტით.

დრეკად საქანს გააჩნია ზოგიერთი ნაკლი. გამოკვლევა ამტკიცებს, რომ  $T$  პერიოდი დამოკიდებულია რხევათა  $\phi$  ამპლიტუდაზე და ხელსაწყოს  $\phi_0$  დახრლობაზე უფრო საგრძნობლად, ვიდრე ეს იყო ჩვეულებრივი საქანის შემთხვევაში.

დრეკადი საქანი ცხრება ჩვეულებრივზე გაცილებით უფრო სწრაფად, რის გამოც ის მოთავსებულ იქნა უჰაერო სივრცეში, მაგრამ ამ პირობებშიაც აღნიშნული ნაკლი საკმაოდ მძლავრად იგრძნობა.

დრეკადი საქანის რხევა გამოწვეულია სიმძიმისა და დრეკადობის ძალებით; ეს უკანასკნელი კი დროთა განმავლობაში იცვლება, რის გამოც იცვლება აგრეთვე საქანის რხევის  $T$  პერიოდი; განსაკუთრებით სწრაფად იგი იცვლება საქანის დამზადების პირველ ხანებში.

დაეუბრუნდეთ (3) ფორმულას, რომლიდანაც ადვილად მივიღებთ:

$$g = h - \frac{\pi^2 l}{T^2} = h - \frac{C}{T^2}, \quad (7.5)$$

სადაც  $T$  შესწორებული პერიოდია,  $h$  და  $C$  მუდმივებია, რომელთა განსაზღვრისათვის საჭიროა დაკვირვება ჩატარდეს ორ პუნქტზე, სადაც სიმძიმის ძალის აჩქარება წინასწარ ცნობილია; მათი მონახვა შეიძლება აგრეთვე ერთ პუნქტზეც, რაზედაც აქ არ შეეჩერდებით.

დრეკად საქანიან ხელსაწყოს გადატანა უნდა ხდებოდეს დიდი სიფრთხილით. დაკვირვებები საბჭოთა კავშირში ანალოგიურ ხელსაწყოთა შემწეობით განახორციელა რუდაკოვსკიმ 1938 წ.

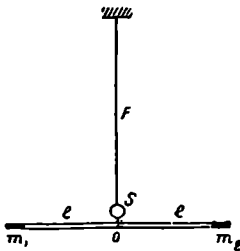
## თ ა ვ ი VIII

### გ რ ა ვ ი ტ ა ც ი უ ლ ი ვ ა რ ი ო მ ე ტ რ ი

#### § 1. გ რ ა ვ ი ტ ა ც ი უ ლ ი ვ ა რ ი ო მ ე ტ რ ი ს მოქმედების პრინციპი

ა რ ს ე ბ ო ბ ს ო რ ი გ ვ ა რ ი ს გ რ ა ვ ი ტ ა ც ი უ ლ ი ვ ა რ ი ო მ ე ტ რ ი, რომლის მოქმედ ნაწილს წარმოადგენს ფიზიკის კურსიდან კარგად ცნობილი გრეხითი სასწო- რი, ჩვენი შემთხვევისათვის გრეხით სისტემად წოდებული.

პირველი გვარის ვარიომეტრის გრეხითი სისტემა განხორციელებულია ფრიად წვრილ  $F$  ძაფზე პორიზონტულად დაკიდებული მსუბუქი ლითონის  $l$

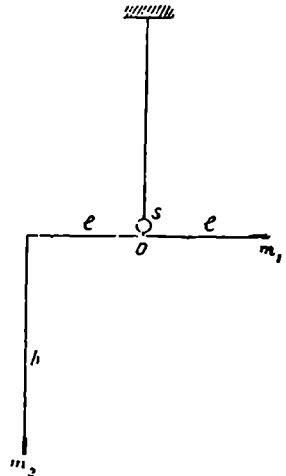


ნახ. 31.

2*l* სიგრძე ღეროსი, რომელსაც უღელი ეწოდებ- ბა, მერყეობს 20—40 სმ ფარგლებში;  $m_1 = m_2 = 2G - 30$  გრამს. სარკე  $s$  უძრავად მიმაგრებუ- ლია ვერტიკალურ ღეროზე, რათა მისი შემწეო- ბით შესაძლებელი იყოს წონასწორობის მდებ- არეობის ჩაწერა.

მეორე გვარის ვარიომეტრის გრეხითი სის- ტემა წარმოდგენილია ნახ. 32-ზე, საიდანაც ჩანს, რომ ერთ-ერთი ტვირთი, სახელდობრ  $m_2$ , დაშვებულია დაბლა  $h$  სან- ტიმეტრით, რისთვისაც ეს ტვირთი დაკიდებულია ძაფზე უღლის იმავე ბო- ლოზე, იმ დროს როდესაც მეორე ტვირთი, სახელდობრ  $m_1$ , კვლავინდებუ- რად რჩება უღლის ერთ-ერთ ბოლოზე, როგორც პირველი გვარის ვარიო- მეტრში.

ღეროს სახით, რომ- ლის ბოლოებზე და- მაგრებულია მძიმე ლი- თონისაგან გაკეთებუ- ლი  $m_1$  და  $m_2$  ტვირთე- ბი, როგორც ეს ილუ- სტრირებულია ნახ. 31-ით.  $F$  ძაფის სიგრ- ძე მერყეობს 25—60 სმ. ფარგლებში, მისი დიამეტრი კი დაახლო- ებით 40 მიკრონია;



ნახ. 32.



ვთქვათ, გრეხითი სისტემა მოქცეულია ერთგვაროვან გრავიტაციულ ველში; მაშინ მისი წონასწორობის მდებარეობას საზღვრავს  $F$  საკიდი ძაფის განგრეხილი მდგომარეობა, სხეანაირად რომ ვთქვათ, გრეხითი სისტემის უღელი დგება აზიმუტში, რომელიც შეესაბამება ძაფის განგრეხილ მდგომარეობას, რის გამოც ეს მისი მდებარეობა რჩება მუდმივი სისტემის ნებისმიერ აზიმუტში ორიენტირებისას. თუ ჩვენ ხელსაწყოში მოთავსებულ გრეხითი სისტემის დასახსიათებლად მივმართავთ იმ კუთხეს, რომელსაც უღელი კმნის მისი გარემომცველ ოთხკუთხიან კოლოფის კედელთან, მაშინ ეს კუთხე, რომელიც  $\varphi_0$  უდრის, მუდმივი იქნება.

განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც ხელსაწყო არაერთგვაროვან გრავიტაციულ ველში იმყოფება, რის გამოც მისი გრეხითი სისტემის სხვადასხვა წერტილებზე მოქმედებს სხვადასხვა სიდიდისა და მიმართულების გრავიტაციული ძალები; ცხადია, გრეხითი სისტემა წონასწორობის მდებარეობის მისაღებად შემოტრიალდება გარკვეულ  $\varphi$  კუთხით, რომელიც საერთოდ არ იქნება  $\varphi_0$  კუთხის ტოლი და, გარდა ამისა, სისტემის ნებისმიერ აზიმუტში ორიენტირებისას ის განიცდის სათანადო ცვალებადობას; ამრიგად, ყოველ აზიმუტისათვის გვექნება გარკვეული წონასწორობის მდებარეობა, რომელიც ისაზღვრება  $\varphi$ ; კუთხით, ხოლო დაგრეხის შესაბამისი  $\varphi$ ; კუთხე მიიღება შემდეგის მიხედვით:

$$\varphi_i = \varphi_i - \varphi_0 \quad (8.1)$$

ქვემოთ ნაჩვენებია იქნება, რომ  $\varphi_i$  წარმოადგენს  $2W_{xy}$ ,  $W'_x$ ,  $W''_x$  და  $W'''_x$  მეორე წარმოებულთა ფუნქციას, და, რა თქმა უნდა, შებრუნებითაც, რომ ეს წარმოებულები ფუნქციებია  $\varphi_i$  სიდიდეებისა. მაშინ, თუ გვეცოდინება  $\varphi_i$  სიდიდეები რამდენიმე აზიმუტისათვის, მოხერხდება ხსენებულ მეორე წარმოებულთა განსაზღვრა.

## § 2. გრავიტაციული ვარიომეტრის თეორია

წინა პარაგრაფიდან ცხადია, რომ როგორც პირველი, ისე მეორე გვარის ვარიომეტრების შემწვობით შეიძლება გაიზომოს გრეხითი სისტემის შემობრუნების კუთხე  $F$  ძაფის გარშემო, ე. ი. უღლის აზიმუტის ცვალებადობა. მაგრამ ცხადია ისიც, რომ უღლის ასეთი შემობრუნებისათვის საჭიროა ჰორიზონტულად მიმართულ ძალთა წყვილის არსებობაც, რაც შეუძლებელია ერთგვაროვან გრავიტაციულ ველში.

მსჯელობის გასაადვილებლად დავუშვათ, რომ გრავიტაციული ვარიომეტრის გრეხით სისტემაში, რომელიც ნახ. 31-ზეა წარმოდგენილი, წონა გააჩნია მხოლოდ  $m_1$  და  $m_2$  ტვირთებს; მაშინ, ცხადია, ამ სისტემის სიმძიმის ცენტრი იქნება  $m_1, m_2$  მანძილის შუაში, ე. ი.  $O$  წერტილში.

სიმძიმის ძალა, რომელიც მიყენებულია  $m_1$  და  $m_2$  ტვირთებზე წარმოვიდგინოთ ვექტორების სახით. თუ ეს ვექტორები ერთმანეთის ტოლი და პარალელურია, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ  $O$  წერტილზე გამავალი დონებრივი ზედაპირი ბრტყელია, მაშინ მათი შენაცვლება შეიძლება  $O$  წერტილზედვე მიყენებული ერთი ძალით, რაც მოისპობა  $F$  ძაფის წინააღმდეგობით; მაშინ,

რა თქმა უნდა, გრების სისტემის შემოტრიალებას ისე, რომ  $F$  ძაფი დაიგრი-  
ხოს, ადგილი არ ექნება. ასეთივე მდგომარეობა იქნება მაშინაც, როდესაც  
 $m_1$  და  $m_2$  ტვირთებზე მიყენებული ვექტორები ერთმანეთის ტოლია, ერთ  
სიბრტყეში არიან მოქცეული, მაგრამ ერთმანეთის პარალელური არ არიან,  
რაც შეესაბამება იმ შემთხვევას, როდესაც დონებრივ ზედაპირს აქვს სფეროს  
ფორმა, რომლის ყველა ნორმალი, როგორც ცნობილია, მიემართება მისი  
ცენტრისაკენ. საერთოდ ცნობილია, რომ  $m_1$  და  $m_2$ -ზე მიყენებული ძალები  
მაშინ არიან ერთ სიბრტყეში მოქცეული, როდესაც  $m_1, m_2$  მიმართულება თან-  
ხვედბა დონებრივი ზედაპირის ერთ-ერთ მთავარ განკვეთაგანს. არის ისეთი შემ-  
თხვევა, როდესაც  $m_1$  და  $m_2$ -ზე მიყენებული ვექტორები ერთ სიბრტყეშია,  
მაგრამ ერთმანეთის ტოლი არ არიან, რაც. ცხადია, გამოიწვევს მხოლოდ  
უღლის სათანადო დახრას ჰორიზონტის მიმართ და არა აზიმუტის ცვლილე-  
ბას; ჩვენ კი, როგორც ზემოთ იყო ნაჩვენები, მხოლოდ აზიმუტზე ვახერხებთ  
გრაეიტაციული ვარიომეტრით დაკვირვებას.

განვიხილოთ ახლა ისეთი შემთხვევა, როდესაც  $m_1$  და  $m_2$ -ზე მიყენებუ-  
ლი ძალები არ არიან მოქცეული ერთ სიბრტყეში. მაშინ, როგორც მექანი-  
კიდან ცნობილია, მათი შენაცვლება შეიძლება ძალით, რომელიც მიყენებუ-  
ლია  $O$  წერტილზე და ძალთა წყვილით, რომელიც მოქმედებს  $F$  ლერ-  
დის მიმართ. რა თქმა უნდა, ეს წყვილი გამოიწვევს გრების სისტემის შე-  
მოტრიალებას გარკვეული კუთხით, ვიდრე წონასწორობა არ დამყარდება  
ძაფის გრების ძალასა და ძალთა წყვილის მოქმედებას შორის.

გავარჩიოთ უფრო დეტალურად ეს შემთხვევა. სივრცე, რომელშიც გრე-  
ხითი სისტემა მოქმედებს, საკმაოდ მცირეა, რის გამო შეიძლება დაეუშვათ,  
რომ მის ფარგლებში სიმძიმის ძალა იცვლება ხაზოვნად. მაშინ,  $m_1$  და  $m_2$ -ზე  
მიყენებული ძალების უტოლობის გამო, ისინი იმ ძალასთან შედარებით, რო-  
მელიც მიყენებულია  $O$ -ზე, ლეზულობენ რაღაც გარკვეულ დამატებებს, რომ-  
ლებიც ერთმანეთის ტოლი უნდა იყვნენ სიდიდით, მაგრამ საწინააღმდეგო  
მიმართულების. თითოეული ამ დამატებითი ძალებიდან დაეშალოთ სამ-სამ  
მდგენელად შემდეგი მიმართულებით: 1) ვერტიკალის თანხედენილად, 2) უღ-  
ლის თანხედენილად, 3) პირველ ორ მიმართულებათა მართობულად, ე. ი.  
ჰორიზონტულად. ამრიგად, მივიღებთ სამ წყვილ მდგენელს დამატებითი ძალებ-  
ისათვის. როგორც ზემოთ დავინახეთ, პირველი წყვილი, ან შეიძლება შენაც-  
ვლებული იქნეს ძალით, რომელიც მიყენებული იქნება  $O$  წერტილში, ან გა-  
მოიწვევს უღლის იმ ღერძზე შემოტრიალებას, რომელიც მასვე ეპერპენდიკუ-  
ლარება, მაგრამ ეს შემოტრიალება ფრიალ მცირეა და ჩვენი ხელასწყოთი არ  
გაიზომება; მეორე წყვილის მოქმედება მოისპობა უღლის წინააღმდეგობით.  
დარჩება მესამე წყვილი, სახელდობრ, ძალთა წყვილი, რომელიც ზემოთ იყო  
ნახსენები. ძალთა ეს წყვილი შემოატრიალებს უღელს ისეთი სიდიდის კუ-  
თხით, რომელსაც მივიღებთ, როდესაც მისი მომენტი და გრებით  $F$  ძაფში  
წარმოშობილი დრეკადი ძალების მომენტი ერთმანეთს გააბათილებენ.  $\downarrow$

გამოვიყვანოთ ახლა პირველი გვარის გრაეიტაციული ვარიომეტრის  
გრებითი სისტემის წონასწორობის განტოლება, რომელსაც გრაეიტაციული  
ვარიომეტრის ძირითადი განტოლება ეწოდება. ავილოთ კოორდინატული

ლერძები ისე, რომ მათი სათავე ემთხვეოდეს ნახ. 31-ის  $O$  წერტილს,  $z$  ღერძი მიემართოთ ვერტიკალურად ქვევით, ე. ი. ის თანხედება  $F$  გრძნითი ძაფის მიმართულების გაგრძელებას,  $x$  და  $y$  ღერძები მიემართოთ შესაბამისად ჩრდილოეთისაკენ და აღმოსავლეთისაკენ. საკიდ სისტემის ყოველი ელემენტი  $dm$  მასით, რომლის კოორდინატებია  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , განიცდის  $gdm$  სიმძიმის ძალის მოქმედებას, სადაც  $g$  შესაბამისი სიმძიმის ძალის აჩქარებაა, რომლის მდგენელები კოორდინატთა ღერძის გასწვრივ იქნება  $g_x$ ,  $g_y$  და  $g_z$ . როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, გრავიტაციული ვარიომეტრით ისაზღვრება მხოლოდ ის კუთხე, რომლითაც უღელი შემოტრიალდება ვერტიკალური ღერძის გარშემო, ე. ი.  $z$  ღერძის გარშემო. ამიტომ  $g_x$ , რომელსაც არ შეუძლია უღლის  $z$  ღერძის გარშემო შემოტრიალება, უგულებელყოფილი უნდა იქნეს. პირველი ორი მდგენელი კი შექმნის  $dM$  ელემენტარულ ბრუნვის მომენტს, რომელიც როგორც მექანიკიდან ცნობილია, ასე დაიწერება:

$$dM = xg_y - yg_x,$$

832

სადაც მიჩნეულია, რომ ბრუნვა  $x$  ღერძიდან  $y$  ღერძისაკენ დადებითია. ამ გამოსახულების საკიდი სისტემის მთელ მასაზე ინტეგრება მოგვცემს:

$$M = \int (xg_y - yg_x) dm.$$

833

თუ გავიხსენებთ დაშვებას, რომ სიმძიმის ძალა საკიდ სისტემის მოქმედების სივრცეში ხაზოვნად იცვლება, ჩვენ შეგვიძლია დავწეროთ:

$$g_x = (g_x)_0 + \left(\frac{\partial g_x}{\partial x}\right)_0 x + \left(\frac{\partial g_x}{\partial y}\right)_0 y + \left(\frac{\partial g_x}{\partial z}\right)_0 z,$$

$$g_y = (g_y)_0 + \left(\frac{\partial g_y}{\partial x}\right)_0 x + \left(\frac{\partial g_y}{\partial y}\right)_0 y + \left(\frac{\partial g_y}{\partial z}\right)_0 z,$$

834

სადაც ნული ინდექსით აღნიშნულა-კოორდინატთა სათავეის შესაბამისი სიდიდეები. რადგანაც  $z$  ღერძი ვერტიკალურია, ე. ი. თანხედება  $g$  ძალას  $O$  წერტილში, ჩვენ გვექნება:

$$(g_x)_0 = (g_y)_0 = 0.$$

შემოვიღოთ სიმძიმის ძალის  $W$  პოტენციალური ფუნქცია, რომლის მიხედვით, როგორც ვიცით, დაიწერება:

$$g_x = \frac{\partial W}{\partial x}, \quad g_y = \frac{\partial W}{\partial y}, \quad g_z = \frac{\partial W}{\partial z},$$

საიდანაც ადვილად მივიღებთ:

$$\frac{\partial g_x}{\partial x} = \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial g_x}{\partial y} = \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y}, \quad \frac{\partial g_x}{\partial z} = \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z},$$

$$\frac{\partial g_y}{\partial x} = \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y}, \quad \frac{\partial g_y}{\partial y} = \frac{\partial^2 W}{\partial y^2}, \quad \frac{\partial g_y}{\partial z} = \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z},$$

$$\frac{\partial g_x}{\partial x} = \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial z}, \quad \frac{\partial g_y}{\partial y} = \frac{\partial^2 V}{\partial y \partial z}, \quad \frac{\partial g_z}{\partial z} = \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}.$$

ამის შეტანა (4) განტოლებაში მოგვცემს:

$$\begin{aligned} g_x &= \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right)_0 x + \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} \right)_0 y + \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial z} \right)_0 z \\ g_y &= \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} \right)_0 x + \left( \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right)_0 y + \left( \frac{\partial^2 V}{\partial y \partial z} \right)_0 z. \end{aligned} \quad (8.5)$$

აქ ჩვენ, როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, უღლის შვირე სრდიდის გამო ვკმაყოფილებით პირველი რიგის წევრებით  $x$ ,  $y$ ,  $z$  კოორდინატების მიმართ.

შევიტანოთ ახლა ეს გამოსახულებანი (3) განტოლებაში, რაც ზოგიერთ მარტივი გარდაქმნის შემდეგ მოგვცემს:

$$\begin{aligned} M &= \left( \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right)_0 \int xy dm + \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} \right)_0 \int (x^2 - y^2) dm + \\ &+ \left( \frac{\partial^2 V}{\partial y \partial z} \right)_0 \int xz dm - \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial z} \right)_0 \int yz dm. \end{aligned} \quad (8.6)$$

როგორც ვხედავთ, აქ პოტენციალური ფუნქციის მეორე წარმოებულე-ბი გატანილია ინტეგრალთა ნიშნის გარეთ, რადგანაც ისინი ეკუთვნიან  $O$  წერტილის და ამიტომ მუდმივებია. ინტეგრალები, რომლებიც (6) განტოლებაში შედიან, დამოკიდებულია ხელსაწყო სულის ფორმასა და სიდიდეზე და ზგრეთვე მის მდებარეობაზე სივრცეში. ამ ინტეგრალთა გამოანგარიშების გასამარტივებლად გადავიდეთ  $\xi$ ,  $\eta$  და  $\zeta$  კოორდინატთა ახალ ღერძებზე, რომლებიც უძრავად დაკავშირებულია უღელთან და რომლებსაც ამიტომ მასთან ერთად შეუძლიან  $z$  ღერძის გარშემო ტრიალი. კოორდინატთა ახალი ღერძების სათავე და  $z$  ღერძი იყოს იგივე, რაც კოორდინატთა ძველ სისტემაში იყო, ღერძები  $\xi$  და  $\eta$  იყოს შესაბამისად უღლის თანხვედნილი და მისი მართობული.  $\alpha$  იყოს კუთხე  $\xi$  და  $x$  ღერძებს შორის, ე. ი.  $\alpha$  უღლის ანიმუტია, რომელიც ათვლილი უნდა იქნეს ჩრდილოეთის წერტილიდან აღმოსავლეთისაკენ, როგორც გეოდეზიაშის მიღებული. მაშინ ახალ და ძველ კოორდინატთა შორის შემდეგ დამოკიდებულებებს მივიღებთ:

$$\begin{aligned} x &= \xi \cos \alpha - \eta \sin \alpha \\ y &= \xi \sin \alpha + \eta \cos \alpha \\ z &= \zeta. \end{aligned} \quad (8.7)$$

მივიღოთ აქედან პირველი ორი ფორმულის შემწვობით ნამრავლი  $xy$  და სხვაობა  $x^2 - y^2$ , რომლებიც შედის (6) გამოსახულებაში. პირველი ორი ფორმულის გამრავლება მოგვცემს:

$$xy = \frac{1}{2} (\xi^2 - \eta^2) \sin 2\alpha + \xi \eta \cos 2\alpha.$$

ამავე ფორმულებიდან გვექნება:

$$x^2 - y^2 = (\xi^2 - \eta^2) \cos 2\alpha - 2\xi\eta \sin 2\alpha.$$

ამ დამოკიდებულებათა შემწობით (6) ფორმულა ახალ კოორდინატებში ასე გამოისახება:

$$\begin{aligned} M = & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 IV}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 IV}{\partial x^2} \right)_0 \sin 2\alpha \int (\xi^2 - \eta^2) dm + \\ & + \left( \frac{\partial^2 IV}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 IV}{\partial x^2} \right)_0 \cos 2\alpha \int \xi \eta dm + \\ & + \left( \frac{\partial^2 IV}{\partial x \partial y} \right)_0 \cos 2\alpha \int (\xi^2 - \eta^2) dm - 2 \left( \frac{\partial^2 IV}{\partial x \partial y} \right)_0 \sin 2\alpha \int \xi \eta dm + \\ & + \left( \frac{\partial^2 IV}{\partial y \partial z} \right)_0 \cos \alpha \int \xi \zeta dm - \left( \frac{\partial^2 IV}{\partial y \partial z} \right)_0 \sin \alpha \int \eta \zeta dm - \\ & - \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} \right)_0 \sin \alpha \int \xi \zeta dm - \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} \right)_0 \cos \alpha \int \eta \zeta dm. \end{aligned} \quad (8.8)$$

რა თქმა უნდა, აქ  $\alpha$  კუთხის ფუნქციები გატანილია ინტეგრალის ნიშნის გარეთ, რადგანაც  $\alpha$  კუთხე მუდმივია ჩვენი სისტემის ყველა წერტილისათვის. დაეუშვათ, რომ საკიდი სისტემის უღელი თავისი ტვირთებით სიმეტრიულია როგორც  $\xi$ , ისე  $\eta$  სიბრტყის მიმართ. ეს იმას ნიშნავს, რომ როგორც  $\eta$ , ისე  $\xi$  კოორდინატთა მნიშვნელობებს, რომლებსაც აბსოლუტური სიდიდე ტოლი გააჩნიათ, ხოლო ნიშანი საწინააღმდეგო, შეესაბამებათ ტოლი მასის მქონე წერტილები. ამის გამო ინტეგრალთა ელემენტები:

$$\int \xi \eta dm, \quad \int \xi \zeta dm, \quad \int \eta \zeta dm$$

ერთმანეთს წყვილ-წყვილად გააბათილებენ, ხოლო თვით ინტეგრალები, რომლებიც ინერციის ნამრავლებს წარმოადგენენ, ნულებია.

გარდა ამისა, მოვიგონოთ, რომ

$$K = \int (\xi^2 + \eta^2) dm$$

საკიდი სისტემის ინერციის მომენტია  $\zeta$  ღერძის მიმართ. მაგრამ ეს ინერციის  $K$  მომენტი შეიძლება შენაცვლებულ იქნეს შემდეგის მიხედვით:

$$K = \int (\xi^2 - \eta^2) dm,$$

თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ აქედან წარმოშობილი შეცდომა ნაკლები იქნება  $0,1\%$ -სა. მართლაც ავიღოთ სხვაობა:

$$\int (\xi^2 + \eta^2) dm - \int (\xi^2 - \eta^2) dm = 2 \int \eta^2 dm,$$

სადაც  $\eta \approx 0,3$  სმ და  $\eta^2 \approx 0,09$  სმ<sup>2</sup>, რადგანაც ულლისა და ტვირთის განიეკვეთის დიამეტრი 0,6 სანტიმეტრის რიგისაა. მეორე მხრივ, თუ გავითვალისწინებთ, რომ ტვირთები ულლის ბოლოებზეა დამაგრებული,  $\xi$ -სათვის მივიღებთ სიგრძეს 20 სანტიმეტრის რიგისას, საიდანაც  $\xi^2 \approx 400$  სმ<sup>2</sup>, გამოდის, რომ ზემოდაწერილი სხვაობა  $K$ -სთან შედარებით არის მცირე 0,001 რიგისა. ჩვენ უნდა ვიქონიოთ მხედველობაში, რომ გრავიტაციული ვარიომეტრის შეფარდებითი სიზუსტე არ აღემატება ამ სიდიდეს, რის გამო სავესებით დასაშვებია შენაცვლება, რომელიც ზემოთ იყო ნაჩვენები. თუ ახლა ამ შენაცვლებას ჩავატარებთ და ინერციის ნამრავლებს ნულს გავუტოლებთ, მაშინ (8) გამოსახულება ასე დაიწერება:

$$M = \frac{K}{2} \left( \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) \sin 2\alpha + K \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \cos 2\alpha. \quad (8.9)$$

ჩვენ (4) გამოსახულებაში დავკმაყოფილდით პირველი რიგის წევრებით, რაც იმას ნიშნავს, რომ პოტენციალური ფუნქციის მეორე წარმოებულებს ჩვენ მუდმივად ვთვლით სისტემის ყველა წერტილისათვის. ამიტომ (9) განტოლებაში წარმოებულთა ინდექსები შეიძლება უგულებელყოფილ იქნეს.

ძალის მომენტი, რომელიც წარმოდგენილია (9) განტოლებით, გამოიწვევს გრებიითი სისტემის შემოტრიალებას გარკვეულ  $\varphi$  კუთხით, რომელიც პროპორციული იქნება  $M$  მომენტისა და ამიტომ შეიძლება დაიწეროს:

$$M = \tau \varphi, \quad (8.10)$$

სადაც  $\tau$  გრების მოდულია ძაფისა, რომელზედაც უღელი ჰკიდია. უკანასკნელ ორ განტოლებათა საფუძველზე დაიწერება:

$$\varphi = \frac{K}{2\tau} \left( \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) \sin 2\alpha + \frac{K}{\tau} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \cos 2\alpha. \quad (8.11)$$

კუთხე  $\varphi$ , (1)-ის მიხედვით, უდრის შემდეგ სხვაობას:

$$\varphi = \varphi_0 - \varphi_1, \quad (8.12)$$

სადაც  $\varphi_0$  შეესაბამება საკიდი სისტემის  $F$  ძაფის დაუგრებავ, თავისუფალ მდებარეობას, რომელიც ჩვენთვის უცნობია იმდენად, რამდენადაც უცნობია ის გრავიტაციული ველი, სადაც მოთავსებულია ჩვენი ხელსაწყო; აქედან გამომდის, რომ  $\varphi_0$  შეესაბამება რომელიღაც უცნობ გამოსასვლელ მდებარეობას, ასე ვთქვათ, ნულოვან მდებარეობას, ხოლო  $\varphi_1$  - დაკვირვებებიდან მიღებული კუთხეა.

(12)-ის მიხედვით (11) ასე დაიწერება:

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{K}{2\tau} \left( \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) \sin 2\alpha + \frac{K}{\tau} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \cos 2\alpha. \quad (8.13)$$

ამ განტოლებაში მხოლოდ სამი უცნობია, სახელდობრ:

$$\Phi_0, \left( \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right), \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y}.$$

ცხადია, რომ ამათი განსაზღვრისათვის საჭიროა გვექონდეს ამდენივე, ე. ი. სამი განტოლება, რაც ადვილი განსახორციელებელია, თუ ყოველ პუნქტზე დაკვირვებას ჩავატარებთ არა ერთ რომელიმე აზიმუტში, არამედ სამ სხვადასხვა აზიმუტში. ამ მიზნის მისაღწევად თითო ხელსაწყო ისეა მოწყობილი, რომ ის ავტომატურად დგება სამ სხვადასხვა აზიმუტში. მაშინ, ცხადია, ყოველი აზიმუტისათვის დაიწერება ცალკე განტოლება.

ყოველი აზიმუტი ერთმანეთისაგან განსხვავდება ტოლი სადღით, რაც ჩვენი შემთხვევისათვის იქნება:  $360^{\circ}:3 = 120^{\circ}$ ; ამიტომაც პირველი, მეორე და მესამე აზიმუტისათვის  $\alpha$  ტოლი იქნება შესაბამისად:  $0^{\circ}, 120^{\circ}$  და  $240^{\circ}$ ; ცხადია, რომ  $0^{\circ}$  თანხვედრა  $360^{\circ}$ . აზიმუტების ერთმანეთისაგან ასეთი მნიშვნელოვანი განსხვავება უზრუნველყოფს უცნობთა უფრო ზუსტ განსაზღვრას.

### § 3. მეორე გვარის ვარიომეტრის თეორია

მეორე გვარის ვარიომეტრის შესახებ ჩვენ უკვე ზემოთ § 1-ში გვექონდა ლაპარაკი. ამ ხელსაწყოს უპირატესობა პირველი გვარის ვარიომეტრის წინაშე ისაა, რომ მის შემწეობით, გარდა იმ წარმოებულებისა, რომლებიც ისაზღვრება პირველი გვარის ვარიომეტრით, ისაზღვრება აგრეთვე წარმოებულები:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} \text{ და } \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z}.$$

მეორე გვარის ვარიომეტრის თეორიის განვითარება შესაძლებელია (8) განტოლების საფუძველზე. საკიდი სისტემის სიმეტრია, როგორც ნახ. 32-დან ჩანს, დარღვეულია მხოლოდ  $\eta$  სიბრტყის მიმართ, ვინაიდან ულლის ორივე ბოლო არაა ერთნაირი, რამდენადაც ერთ მათგანზე ტვირთი დაშვებულია დაბლა. ამიტომ  $\int \xi \zeta dm$  არ უდრის ნულს, რის გამო საჭიროა გამოვიანგარიშოთ მისი მნიშვნელობა, რომელიც შემდეგ უნდა ჩაისვას (8) განტოლებაში.

ცხადია, რომ  $\int \xi \zeta dm$ -ის ის ნაწილი, რომელიც მოდის უღელზე  $m_1$  ტვირთის ჩათვლით, კვლავინდებურად ნულის ტოლია, რადგანაც საკიდი სისტემის ეს ნაწილი სიმეტრიულია  $\xi \eta$  სიბრტყის მიმართ; ამის გამო  $\zeta$  კოორდინატის ნიშნის შეცვლისას მიღებული იქნება წერტილები თანატოლი მასებით.

თუ  $h$  ძაფის მასას უგულვებელყოფთ, დაგვრჩება მხოლოდ ქვედა  $m_2$  ტვირთი, რომლისათვის საბოლოოა  $\int \xi \zeta dm$ . დაუშვათ, რომ  $m_2$  ტვირთის მასა კონცენტრირებულია მისი სიმძიმის ცენტრში, რომლის კოორდინატებია:  $\xi = l, \eta = 0, \zeta = h$ . ჩავსვათ ისინი ინტეგრალში, რაც მოგვეცემს:

$$\int \xi \zeta dm = lh \int dm = lhm.$$

ჩავსვათ ეს მნიშვნელობა (8) განტოლებაში, სადაც კვლავინდებურად უგულებელვყოთ ნული ინდექსები. მაშინ გვექნება:

$$\begin{aligned} M = & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) \sin 2\alpha \int (\xi^2 - \eta^2) dm + \\ & + \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \cos 2\alpha \int (\xi^2 - \eta^2) dm + \\ & + \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} lhm \cos \alpha - \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} lhm \sin \alpha. \end{aligned} \quad (8.14)$$

მოვიქცეთ ისე, როგორც პირველი გვარის ვარიომეტრის შემთხვევაში და წინა განტოლებაში ჩავსვათ  $\int (\xi^2 - \eta^2) dm$ -ის მაგიერ  $K$ , რაც სავსებით გამართლებულია, ვინაიდან საკილი სისტემა მეორე გვარის ვარიომეტრშიც ბრტყელი რჩება  $\eta$  კოორდინატის სიმცირის გამო. გარდა ამისა, თუ მივიღებთ მხედველობაში (12) ფორმულას, (14) განტოლება ასე დაიწერება:

$$\begin{aligned} \varphi = \varphi_0 + & \frac{K}{2\tau} \left( \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) \sin 2\alpha + \frac{K}{\tau} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \cos 2\alpha - \\ & - \frac{hlm}{\tau} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} \sin \alpha + \frac{hlm}{\tau} \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} \cos \alpha, \end{aligned} \quad (8.15)$$

რომელიც, როგორც ვიცი, შეიძლება ასედაც დაიწეროს:

$$\begin{aligned} \varphi = \varphi_0 + & \frac{K}{2\tau} W_{\Delta} \sin 2\alpha + \frac{K}{\tau} W_{xy} \cos 2\alpha - \\ & - \frac{hlm}{\tau} W_{xz} \sin \alpha + \frac{hlm}{\tau} W_{yz} \cos \alpha. \end{aligned} \quad (8.15')$$

ამ განტოლებებში ხუთი უცნობია, სახელდობრ:

$$\varphi_0, \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y}, \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z}, \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z},$$

რაც ასეც დაიწერება:

$$\varphi_0, W_{\Delta}, W_{xy}, W_{xz}, W_{yz}.$$

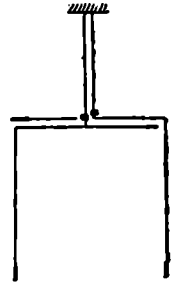
მათი განსაზღვრისათვის, როგორც ადვილი მისახვედრია, საჭიროა დაკვირვება ვაწარმოოთ ხუთ სხვადასხვა აზიმუტში, მაგალითად, როდესაც  $\alpha = 0^\circ, 72^\circ, 144^\circ, 216^\circ, 288^\circ$ , რაც გამომდინარეობს შემდეგი არითმეტიკული მოკმელებიდან:  $330^\circ : 5 = 72^\circ$ .

გრაფიტაციული ვარიომეტრის შემწეობით დაკვირვების წარმოება მოითხოვს საკმაოდ დიდ დროს, დაახლოებით ერთ საათამდე ყოველ აზიმუტში,



რადგანაც არეჩირიდან განთავისუფლების შემდეგ უღელი იწყებს მძლავრ ჩხეევებს, რის გამო საჭიროა მოცდა, სანამ იგი საკმაოდ არ დამშვიდდება. ამიტომ ახლანდელ ხელსაწყოებში გამოყენებულია ორი უღელი, რომლებიც დაკიდებულია ერთმანეთის პარალელურად და რომლებიც ურთიერთის მიმართ შემობრუნებულია  $180^\circ$ -ით, როგორც ეს ნახ. 33-ზეა ნაჩვენები. მაშინ ზემოთ ჩამოთვლილ ხუთ უცნობს დაემატება კიდევ ერთი უცნობი  $\varphi_5$ , რომელიც იგივეა მეორე უღლისათვის, რაც  $\varphi_1$  პირველისათვის. ცხადია, ამ ექვსი უცნობის განსაზღვრისათვის საკმარისი იქნება დაკვირვების ჩატარება მხოლოდ სამ აზიმუტში, რადგანაც ყოველ აზიმუტში, შესაბამისად ორი უღლისა, ჩატარებული იქნება ორ-ორი დაკვირვება, ე. ი. სულ 6 დაკვირვება. პირველი უღლისათვის ეს აზიმუტები, როგორც ვიცით, იქნებიან  $\alpha = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ , სიდანაც მეორე უღლისათვის მივიღებთ რიცხვებს  $180^\circ$ -ით განსხვავებულს, ე. ი.  $\alpha' = 180^\circ, 300^\circ, 60^\circ$ .

მეორე გვარის ვარიომეტრის განტოლებას, როგორც დავინახეთ, გააჩნია ორი დამატებითი წევრი, რომლებიც შეიცავენ  $\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial x}$  და  $\frac{\partial^2 V}{\partial y \partial y}$ , რაც გასაგებია,



ნახ. 33.

თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ მეორე გვარის ვარიომეტრისათვის  $z = h$ , პირველი გვარისათვის კი ნულს. მართლაც, (4) ფორმულიდან ჩანს, რომ როდესაც  $z = 0$ , მაშინ ძაფის გრების გამოშვებები სიძიმის ძალის მდგენელში  $\alpha$  და  $\alpha$  ლერძებზე არ არიან დამოკიდებული ზემოთდაწერილ წარმოებულებზე; მეორე გვარის ხელსაწყოში კი ქვედა ტვირთისათვის  $z = h$ , რაც იწყევს ამ წარმოებულთა გაჩენას.

იმ მიზნით, რომ (15) განტოლებაში ყველა წარმოებული ისაზღვრებოდეს ერთნაირი სიზუსტით, საჭიროა კოეფიციენტი  $\frac{lhm}{\tau}$  ახლო იყოს  $\frac{K}{\tau}$  კოეფიციენტთან, რომელიც, როგორც ზემოთ ვნახეთ, დაახლოებით  $2l^3 m$  სიდიდის ტოლია. აქედან ჩანს, რომ  $h$  ახლოს უნდა იყოს  $2l$ -თან, ე. ი. თანამედროვე ხელსაწყოებში ტოლი უნდა იყოს დაახლოებით 40—60 სანტიმეტრისა. გრავიტაციული ვარიომეტრის მგრძნობიარობა მით უფრო მეტია, რაც

უფრო მეტია შეფარდება  $\frac{K}{\tau}$ , სადაც მრიცხველი, როგორც ვიცით, დამოკიდებულია უღლის სიგრძეზე და ტვირთების მასაზე, ხოლო მნიშვნელი მით უფრო მცირეა, რაც უფრო გრძელი და წვრილია ძაფი. გამოვიანგარიშოთ  $K = 2l^3 m$ , როდესაც საშუალოდ  $l = 20$  სმ,  $m = 20$  გრ, რაც მოგვცემს  $2.20^3 \cdot 20 = 16000$ ; რადგანაც ძაფის გრების მოდული აბსოლუტურ ერთეულებში დაახლოებით  $0,4$  შეადგენს, მივიღებთ  $\frac{K}{\tau} = 40000$ . მ კუთხის გაზომვის

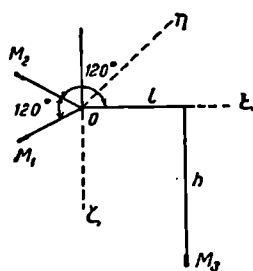
სიზუსტე არაა  $10''$ -ზე დაბალი, რაც შეადგენს რადიანის  $1/20000$  ნაწილს დაახლოებით, თუ გავიხსენებთ, რომ რადიანი  $= 57^\circ 17' 44''$ ,  $0 = 206265''$ . თუ

ჩვენ ახლა მ კუთხეს  $1/20000$  რადიანის ტოლ ერთეულებში გამოვხატავთ, მაშინ (13) განტოლების მარჯვენა ნაწილში კოეფიციენტები იქნებიან  $10^9$  რიგის სიდიდეები, ხოლო წარმოებულთა სიდიდეები შეიძლება მივიღოთ სიზუსტით დაახლოებით  $10^{-9}$  აბსოლუტურ ერთეულსა.

როგორც ვიცით,  $11'$  პოტენციალური ფუნქციის პირველი წარმოებულე-ბი იძლევიან აჩქარებას, რომლის განზომილებაა  $\frac{\text{სიგრძე}}{(\text{დრო})^2}$ ; ამ უკანასკნელის

სიგრძით გაწარმოება მოგვცემს  $\frac{1}{(\text{დრო})^2}$  ან  $\frac{1}{\text{სეკ}^2} = \text{სეკ.}^{-2}$  აბსოლუტურ ერ-თეულებში; ეს არის  $11'$  სიდიდის მეორე წარმოებულთა განზომილება, ხოლო მისი  $10^{-9}$  იქნება ეტვეში. ზემონათქვამიდან გამოდის, რომ გრავიტაციული ვარიომეტრის სიზუსტე ერთი ეტვეშის რიგისაა.

გრავიტაციული ვარიომეტრის ერთ-ერთ სახეს, ასე ვთქვათ. მესამე სა-ხეს წარმოადგენს ეგრეთ წოდებული გრადიომეტრი. ამ ხელსაწყოს საკიდი



ნახ. 34.

სისტემა სქემატურად წარმოდგენილია ნახ. 34-ზე. სამი ერთმანეთის ტოლი ტვირთი  $M_1, M_2, M_3$  სიმეტრიულად, ე. ი. ერთმანეთისაგან  $120^\circ$ -ით დაშორებულად, განლაგებულია ბრუნვის ღერძის გარშემო, ამასთან  $M_1$  და  $M_2$  ტვირთებს აქვთ ერთი და იგივე სიმაღლე  $\zeta = 0$ ,  $M_3$  ტვირთი კი მოთავსებულია მაღლა  $\zeta = -h$  სიმაღლეზე (ნახაზ-ზე ის მოცემულია ქვევით დაშვებულად  $\zeta = h$  სი-დიდით, რასაც საქმისათვის არა აქვს არსებითი მნიშვნელობა). მიემართოთ  $\xi$  ღერძი ისე, რომ იგი გადიოდეს  $M_3$  ტვირთის პროექციაზე  $\eta$  სიბრტ-ყეზე, როგორც ეს ნახაზზეა ნაჩვენები. მაშინ ტვირ-თების ცენტრთა კოორდინატები იქნება:

$$\xi = -l \cos 60^\circ = -\frac{1}{2} l, \quad \xi_2 = -l \cos 60^\circ = -\frac{1}{2} l, \quad \xi_3 = l,$$

$$\eta_1 = -l \sin 60^\circ = -\frac{\sqrt{3}}{2} l, \quad \eta_2 = l \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} l, \quad \eta_3 = 0,$$

$$\zeta_1 = 0, \quad \zeta_2 = 0, \quad \zeta_3 = h,$$

სადაც  $l$  ტვირთების მანძილია  $\zeta$  ღერძიდან.

მოვნახოთ (8) ფორმულაში შემავალი ინტეგრალების სიდიდეები. და-ვუშვათ, რომ ტვირთების მასა კონცენტრირებულია მათი სიმძიმის ცენტრებ-ში. ის მთავარი ნაწილი  $\int (\xi^2 - \eta^2) dm$  ინტეგრალისა, რომელიც წარმოშობი-ლია ტვირთების მასებით, იქნება:

$$(\xi_1^2 - \eta_1^2) m_1 + (\xi_2^2 - \eta_2^2) m_2 + (\xi_3^2 - \eta_3^2) m_3.$$

ჩავსვით აქ კოორდინატების ზემოდაწერილი მნიშვნელობები იმ დაშვებით, რომ  $m_1 = m_2 = m_3 = m$ , რის შემდეგ გვექნება:

$$\left(\frac{1}{4} l^2 - \frac{3}{4}\right) m + \left(\frac{1}{4} l^2 - \frac{3}{4} l^2\right) m + l^2 m = 0.$$

ინტეგრალის ნაწილი, რომელიც  $M_1, M_2, M_3$  ტვირთების შესაბამისი ალუმინის მსუბუქ ღეროებითაა წარმოშობილი, ნულის ტოლი იქნება, თუ ეს ღეროები ერთნაირია. მართლაც, ამ ღეროებისათვის შესაძლებელია შედგეს ისეთივე გამოსახულებები, როგორც ზემოთ მივიღეთ, რაზედაც აქ არ შევჩერდებით. ამრიგად მივიღებთ, რომ  $\int (\xi^2 - \eta^2) dm = 0$  მთლიანად.

გარდა ამისა, ჩვენი სისტემა სიმეტრიული რჩება წესიბრტყის მიმართ, რის გამოც კვლავინდებურად გვექნება:

$$\int \xi \eta dm = \int \eta \xi dm = 0.$$

რაც შეეხება  $\int \xi \xi dm$  ინტეგრალს, მისი ნაწილი, რომელიც წარმოიშობა  $M_1$  და  $M_2$  ტვირთებით და ღეროებით, რომლებიც სიმეტრიულია წესიბრტყის მიმართ, ისევე ნულის ტოლი იქნება, როგორც წინათ.  $M_3$  ტვირთიდან წარმოშობილი ნაწილი ისევე, როგორც წინათ, მოგვცემს:

$$\xi_3 \xi_3 m = lhm.$$

ჩავატაროთ სათანადო ჩანსა (8) განტოლებაში და ამ უკანასკნელის მარცხენა ნაწილი გამოვსახოთ ისე, როგორც იქ; მაშინ გვექნება:

$$\Phi = \Phi_0 - \frac{lhm}{\tau} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} \sin \alpha + \frac{lhm}{\tau} \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} \cos \alpha. \quad (8.16)$$

ეს არის გრადიომეტრის ძირითადი განტოლება. როგორც ვხედავთ აქ ჩვენ საქმე გვაქვს სამ უცნობთან, სახელდობრ:

$$\Phi_0, \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} \text{ და } \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} \text{ თან,}$$

რომელთა განსაზღვრისათვის საჭიროა ჩატარდეს დაკვირვება სამ აზიმუტში.

#### § 4. გრავიტაციული ვარიომეტრის მოწყობილობა

გრავიტაციული ვარიომეტრის ზემოთ განხილული თეორიიდან ჩანს, რომ ამ ხელსაწყოს შემწობით დამკვირვებელმა უნდა მოახერხოს ულლის დაყენება ნებისმიერ აზიმუტში და ვერტიკალური ღერძის გარშემო მისი შემობრუნების კუთხის ათვლა.

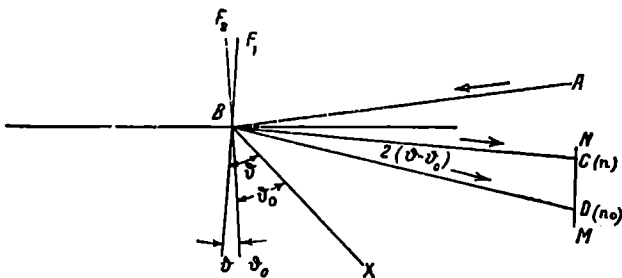
პირველი მოთხოვნის დასაკმაყოფილებლად გრავიტაციულ ვარიომეტრს გააჩნია ვერტიკალური ღერძი, რომლის გარშემო მას შეუძლია ბრუნვა. ეს ღერძი მიმაგრებულია სადგამზე, რომელსაც აქვს სამი აპწევი ზრახნი,

რათა შესაძლებელი იყოს ვერტიკალური ღერძის სათანადოდ დაყენება, რისთვისაც ვარიომეტრის გარეგან კორპუსზე ურთიერთ მართობულად დამაგრებულია ორი თარაზო. ამავე სადგამზე დამაგრებულია მაჩვენებლები, რომელთა მიხედვით წარმოებს ვარიომეტრის გარეგანი კორპუსის დაყენება გარკვეულ აზიმუტში.

რაც შეეხება მეორე მოთხოვნილებას, ე. ი. უღლის ვერტიკალური ღერძის გარშემო შემობრუნების კუთხის გაზომვას, პირველ ყოვლისა უნდა აღინიშნოს, რომ ასეთ კუთხედ მიჩნეულია ის ორწახნაგოვანი კუთხე, რომელიც მოქცეულია ორ ვერტიკალურ სიბრტყეს შორის, რომელთაგან ერთი თვით უღელზეა გატარებული, მეორე კი — უღლის შემცველი შინაგანი ფუტლარის შუა ხაზზე.

აზიმუტალური  $\psi_0$  და  $\psi$  კუთხეები, რა თქმა უნდა, შეიძლება აითვალოს არა მარტო ფუტლარის შუა ხაზიდან, არამედ აგრეთვე ნებისმიერ ჰორიზონტალურ ხაზიდანაც, რომელიც უცვლელად დაკავშირებულია ფუტლართან, მაგალითად,  $BX$  ხაზთან (ნახ. 35).

უღლის შემობრუნების კუთხის გაზომვა ხდება ჩვეულებრივი წესით, ე. ი. ან ვიზუალური ათვლით კოგრისა, სარკისა და სკალის შემწეობით, ან ფოტოგრაფიულ ფირფიტაზე ჩაწერის გზით.



ნახ. 35.

ნახ. 35-ზე უღლის ვერტიკალურ ღერძზე მიმაგრებული სარკის საწყისი მდებარეობა აღნიშნულია  $F_1$ -ით, ხოლო უღლის  $(\psi - \psi_0)$  კუთხით შემობრუნების შემდეგ მისი მდებარეობა  $-F_2$ -ით, ამასთან  $DB$  არის მიმართულება სხივისა, რომელიც აირეკლება სარკიდან მისი საწყისი  $F_1$  მდებარეობაში; ასევე  $BC$  მიმართულებაა იმ სხივისა, რომელიც აირეკლება სარკიდან მისი  $F_2$  მდებარეობაში, ე. ი. უღლის შემობრუნების შემდეგ; თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ დაცემის კუთხე ტოლია არეკლების კუთხისა, მაშინ გასაგებია, რომ კუთხე  $DBC = 2(\psi - \psi_0)$ . მანძილი  $DC$  შეიძლება აითვალოს  $MN$  სკალაზე, რაც მოგვცემს  $(\psi - \psi_0)$ ; მანძილი სარკიდან სკალამდე შეიძლება აგრეთვე გაიზომოს და, ვთქვათ, ის არის  $D$ . მაშინ  $BD$ ,  $BC$  და  $BN$  მანძილების სიახლოვის გამო გვექნება:

$$\lg 2(\Phi - \Phi_0) = \frac{n - n_0}{D}$$

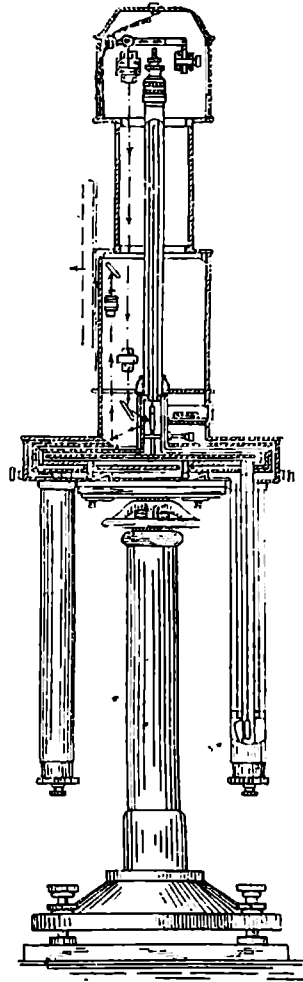
ანუ, რადგანაც  $(\Phi - \Phi_0)$  კუთხე მცირეა,

$$\Phi - \Phi_0 = \frac{n - n_0}{2D} \quad (8.17)$$

გარდა ზემოთ გარჩეული ორი მოთხოვნილებებისა, გრავიტაციული ვარიომეტრი უნდა აკმაყოფილებდეს რიგ სხვა მოთხოვნილებებსაც. სათანადო მგრძნობიარობასთან ერთად ხელსაწყოს უნდა ახასიათებდეს აგრეთვე ჩვენებათა უცვლელობა საჭირო სიზუსტის ფარგლებში; ამავე დროს ხელსაწყო უნდა იყოს, რაც შეიძლება, ნაკლებად მგრძნობიარე ისეთი გარეგანი გავლენებისადმი, როგორცაა, ტემპერატურული, ელექტროსტატიკური, მაგნიტური პირობები და სხვა. რა თქმა უნდა, ისე, როგორც სხვა ხელსაწყოს შემთხვევაში, სასურველია, რომ ეს ხელსაწყო იყოს პორტატიული, გადაზიდვის ამტანი, გამძლე, მოხმარებისათვის სადა და ისეთი, რომ მისი შემწეობით დაკვირვებათა ჩატარება ხერხდებოდეს შესაძლებელი უმოკლესი დროის განმავლობაში.

გადავიდეთ ახლა ხელსაწყოს აღწერაზე. არსებობს მრავალი სხვადასხვა კონსტრუქციის გრავიტაციული ვარიომეტრი, რომელთა ძირითადი ტიპური სახე შეიძლება შემოიფარგლოს 3—5 ერთეულით. ნახაზ 36-ზე წარმოდგენილია მეორე გვარის ვარიომეტრის ვერტიკალური ჰრილი, ნახაზ 37-ზე კი მისი გარეგანი ხედი.

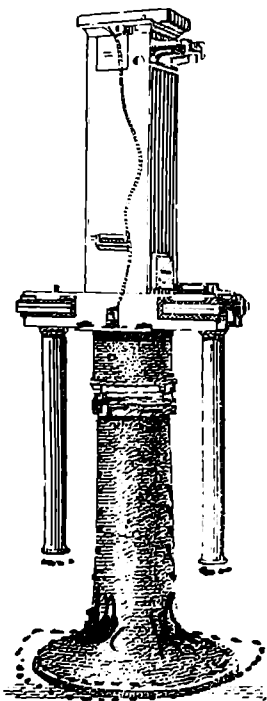
ხელსაწყოს ყველაზე საპასუხისმგებლო ნაწილს წარმოადგენს გრეხადი ძაფი, რომელსაც ამზადებენ ლითონის სხვადასხვა შენადნობისაგან. ხშირად მას ამზადებდნენ პლატინისა და ირიდიუმის შენადნობიდან (80% პლატინა და 20% ირიდიუმი) 40 მიკრონი განივკრილის დიამეტრით. ძაფის ძირითადი დანიშნულება ისაა, რომ შენახულ იქნეს უღლის წონასწორობის მდებარეობის უცვლელობა, რისთვისაც თვით ძაფი უნდა იყოს უცვლელი დრეკადი თვისებების მატარებელი. ამ მიზნის მისაღწევად საჭიროა აგრეთვე ძაფის, ასე ვთქვათ,



ნახ. 36.

დაძველება, რაც შეიძლება იქნეს მიღწეული მასზე დაკიდებული ტვირთის ხანგრძლივი, რამდენიმე კვირისა და თვის ფარგლებში მოქმედებით ან კიდევ ელექტროდენის შემწობით მისი თერმული დამუშავებით, რაც, ცხადია, გაცილებით უფრო ნაკლებ დროს მოითხოვს. ფართო გამოყენება მოიპოვა ვოლფრამის ძაფმა მისი კარგი თვისებებისა და სიიარვის გამო.

ჩვენ ვიცით, რომ ძაფის გრების მუდმივი  $\tau$  შედის (13) და (15) განტოლებათა მნიშვნელობა, რის გამოც, რაც უფრო მცირეა  $\tau$  მით უფრო მგრძობიარეა ვარიომეტრი. მეორე მხრივ ფიზიკიდან



ნახ. 37.

ვიცით, რომ  $\tau$  პროპორციულია ძაფის განივიკვეთის დიამეტრის მეოთხე ხარისხისა და უკუპროპორციულია მისი სიგრძისა; გამოდის, რომ მგრძობიარობის გადიდება მოითხოვს აღნიშული დიამეტრის სათანადოდ შემცირებას, რაც, უნდა ვიფიქროთ, შესაძლებელია გარკვეულ ფარგლებში, რის შეუდეგ მოსალოდნელია ძაფის გაწყვეტა, მაგალითად, ხელსაწყოს ბრუნვისას, როდესაც ის გადადის ერთი აზიმუტიდან მეორეში.

ძაფის სიგრძე სხვადასხვა სისტემის ხელსაწყოში მერყეობს 25—60 სმ ფარგლებში. მისი ზედა ბოლო დამაგრებულია საგანგებო გრებით ბუნიკში, რომელსაც გააჩნია მოწყობილობა როგორც ვერტიკალური ღერძის გარშემო ბრუნვისათვის, ისე მისი აწევ დაწევისათვის და აგრეთვე ყოველი მიმართულებით მოძრაობისათვის ჰორიზონტულ სიბრტყეში (ნახ. 38). თითოეული ულლისათვის ხელსაწყოში გათვალისწინებულია ცალკე ბუნიკი.

უღელი, სიგრძით 20—40 სმ, ჩვეულებრივად წარმოადგენს მსუბუქ ღრუ ღეროს, გაკეთებულს უფრო ხშირად ალუმინისაგან; მის ბოლოებზე მიმაგრებულ ტვირთებს წინათ ამზადებდნენ ოქროსაგან, ამჟამად კი სიიარვისათვის იყენებენ სხვა ლითონებსაც, მაგ., ტყვიას, რომელიც გარდნად მოიქცეობებულია. უღელი უნდა იქოს არამაგნიტური, რადგანაც წინააღმდეგ შემთხვევაში ხშირად მაგნიტურ ძალებს ეძლევა გადამწყვეტი გავ-

ლენა ძალზე სუსტ გრავიტაციულ ძალებთან შედარებით, უღლის შუა ადგილას მიმაგრებულია მოკლე ვერტიკალური ღერო, რომელზედაც დამაგრებულია მცირე ზომის სარკე, რომელსაც გააჩნია სარეგულაციო ხრახნები.

ხელსაწყოში ჩვეულებრივად დაკიდებულია ორი, ერთმანეთის საწინააღმდეგო ბოლოებით მიმართული, უღელი; თითოეული მათგანი მოქცეულია ლითონის სამმაგ ფუტლარში, ამასთან გარეგანი ფუტლარი ჩვეულებრივად საერთოა ორივე უღლისათვის. შინაგან ფუტლარს, რომელიც უღლის ფორმისაა, აკეთებენ სითბოს კარგად გამტარი მასალისაგან, მაგ., წითელი სპი

ლენძისაგან ან თითბრისაგან, გარეგანს კი—ალუმინისაგან ან სხვა რომელიმე მსუბუქი შენაჯნობისაგან. ფუტლარებს შორის ჰაერის ფენაა და მხოლოდ ზოგიერთ ავტილას მოთავსებულია მათ შორის სითბომიზოლირებელი მასალისაგან გაკეთებული ფენა.

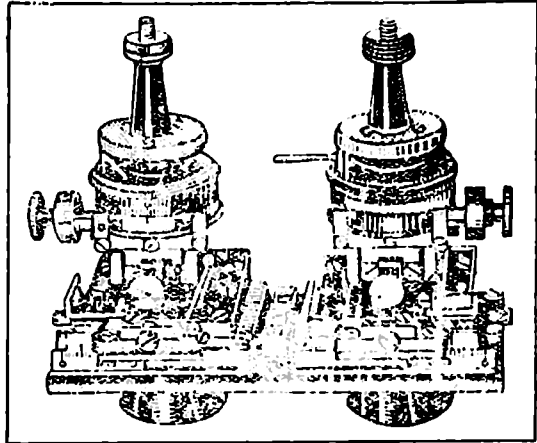
გარეგან ფუტლარზე დამაგრებულია ან დროებითაა მოთავსებული კომპასი, რომლის შემწეობით ხდება ხელსაწყო დაყენება მაგნიტური ზერილიანის მიხედვით.

გარეგანი ფუტლარი ან უშუალოდაა მიმაგრებული ვერტიკალურ ლერძზე, ანდა იდგმება ფირფიტაზე, რომელსაც თვითონ აქვს ვერტიკალური ლერძი. გარეგანი ფუტლარის ზედა ბოლოზეა სწორედ მოთავსებული გრებიით ბუნიკები, რომელზედაც ზემოთ იყო ლაპარაკი.

შინაგან ფუტლარში უშუალოდ უღლის ქვეშ მოთავსებულია საარეტირო მოწყობილობა, რომელიც სხვადასხვა სისტემის ხელსაწყოში სხვადასხვანაირადაა განხორციელებული.

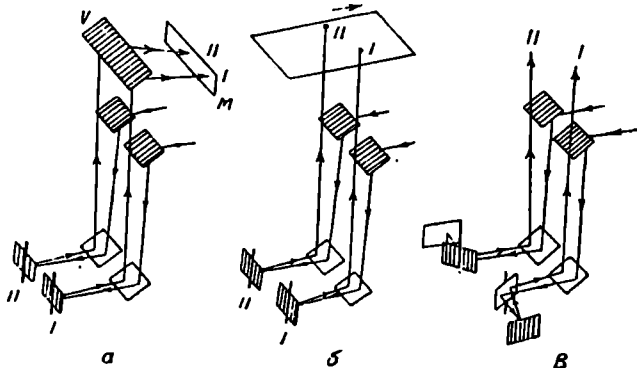
უღლის შემობრუნების კუთხეზე დაკვირვების წარმოება შეიძლება როგორც ვიზუალურად, ისე ფოტოგრაფიულად. ამ კუთხის ათვლის მოწყობის სხვადასხვა სქემა მოცემულია ნახაზ 39-ზე, სადაც *a* წარმოადგენს ვიზუალური ათვლის სქემას, *ბ*—ფოტოგრაფიული ჩაწერის სქემას და *გ*—სქემას დამატებითი სარკით, რომლის შემწეობით ხდება ოპტიკური ბერკეტის სივრცის გადიდება; I და II აღნიშვნები შეესაბამება პირველ და მეორე უღელს.

ფოტოგრაფიული რეგისტრაცია მარტივად შეიძლება განხორციელდეს შემდეგნაირად. ელექტრული ნათურიდან წამოსული სინათლე ვიწრო ხერხეში გავლის შემდეგ ეცემა ლინზაზე. საიდანაც ის გამოდის როგორც სხივთა პარალელური კონა, რომელიც უღლის სარკიდან არეკვლის შემდეგ გადის ობიექტივში და ეს უკანასკნელი კი ამ სხივებს აფოკუსებს ფოტოგრაფიულ ფირფიტაზე. ფირფიტა, რომელიც ზომით დაახლოებით  $6 \times 9$  სმ-ია, საათის მექანიზმის შემწეობით გადაიტანება  $1-1,5$  სმ/საათი სიჩქარით. ფირფიტაზე ჩაიწერება ანარეკლი როგორც უღელზე მიმაგრებული სარკიდან, ისე უძრავი სარკიდანაც, რომელიც მიმაგრებულია ხელსაწყო ფუტლარზე და რომელიც ფირფიტაზე ჩაწერს სწორ ხაზს; იმავე ფირფიტაზე იწერება ლითონის თერ-



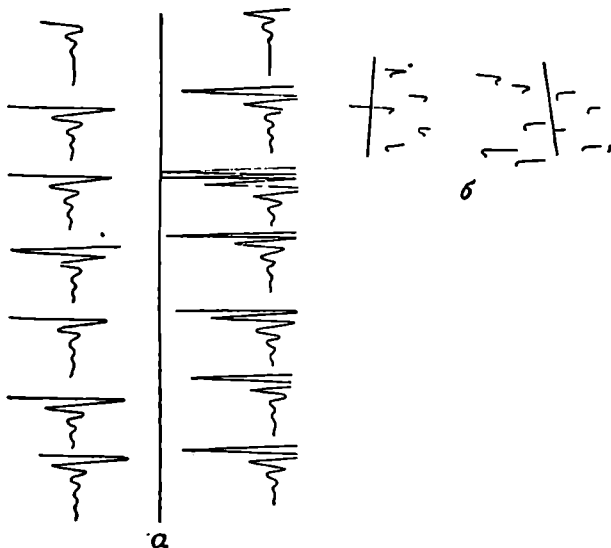
ნახ. 38.

მომეტრის ჩვენებანიც. ნათურა შეიძლება ანთებული იყოს მთელი დაკვირვების განმავლობაში ან ავტომატურად აინთოს ყოველ აზიმუტში 20—40 მინუტის



ნახ. 39.

შემდეგ, როდესაც უღლის რხევა უკვე დამცხრალია პირველ შემთხვევაში ჩანაწერი ასახავს უღლის საკუთარ რხევას, რის გამო მას ექნება ზიგზაგისებ-



ნახ. 40.

რი მრუდის სახე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახაზ 40ა-ზე; მეორე შემთხვევის



შესაბამისი წერტილისებური ჩანაწერი მოცემულია ნახაზ 11-ზე; ო ნახაზი წარმოადგენს ძლიერ მიღევად რხევათა ჩანაწერს. ზოგიერთ ხელსაწყოში ხდება სკალის გამოაბატულების ვერტიკალურ ხაზიანად ფოტოგრაფირება, რის გამო, ფირფიტის გაზომვის მაგიერ, საკმარისია სკალაზე სათანადო ანათელის აღება, როგორც ეს ნახაზ 41-ზეა ნაჩვენები, სადაც ჩაწერილია ორივე ულლის მდებარეობა შვიდ აზიმუტში.

დაკვირვების როგორც ვიზუალურ, ისე ფოტოგრაფიულ მეთოდებს აქვთ როგორც დადებითი თვისებანი, ისე ნაკლოვანებანიც, რაზედაც აქ არ შევჩერდებით. შევნიშნავთ მხოლოდ, რომ ვიზუალური დაკვირვებისას, შესაძლებელია დამკვირვებლის მასის გავლენა ხელსაწყოზე, თუ დაკვირვება სწრაფად არ იქნა ჩატარებული.

მართლაც, დავუშვათ, რომ ხელსაწყოსთან მდგომი დამკვირვებლის მასა 70 კილოგრამია, ხოლო მისი დაშორება პირველი და მეორე ტვირთებიდან 50 და 60 სანტიმეტრია შესაბამისად. მაშინ აჩქარება, რომელსაც დამკვირვებლის მასა პირველ ტვირთში გამოიწვევს, იქნება:

$$f \frac{M}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-8} \frac{70000}{50^2} = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ გალს.}$$

იგივე მეორე ტვირთისათვის იქნება:

$$6,67 \cdot 10^{-8} \frac{70000}{60^2} = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ გალს;}$$

მათი სხვაობა შეადგენს  $0,6 \cdot 10^{-6}$  გალს  $60-50 = 10$  სმ მანძილზე, ანუ  $6 \cdot 10^{-8}$  გალს 1 სანტიმეტრზე, რაც შეადგენს 60 ეტვეზს. გამოდის, რომ გავლენა ფრიალ დიდი, რადგანაც, როგორც ვიცით, ხელსაწყოს მგრძნობიარობა ერთი ეტვეზის რივისაა. ასეთი დიდი გავლენა, მართალია, სინამდვილეში არ იქნება, რადგანაც დამკვირვებლის მასის მნიშვნელოვანი ნაწილი ან უფრო შორს იქნება ან კიდევ ქმნის უმნიშვნელო სიდიდის პორიზონტულ მდგენელს, რომელიც მხოლოდ მოქმედებს ხელსაწყოზე. გარდა ამისა, ულლის საგრძნობი ინერციის გამო დამკვირვებლის მასა არც ისე ჩქარა გამოიწვევს მის გადახრას, რისთვისაც საჭიროა რამდენიმე მინუტი. ამიტომ დამკვირვებელი უნდა ეცადოს სწრაფად მორჩეს დაკვირვებას, სანამ მისი მიახლოება ჯერ კიდევ ვერ მოასწრებს გავლენის მოხდენას.

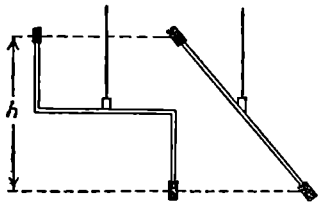
კუბრუნდებით რა კვლავ ხელსაწყოს მოწყობილობას, პირველ ყოვლისა აღსანიშნავია, რომ მთელი ხელსაწყო გამართულია სვეტისებურ სადგამზე და შეუძლია ბრუნვა ვერტიკალური ღერძის გარშემო როგორც ადამიანის ხელის მეშვეობით, ისე მოტორის ან საათის მექანიზმის ზამბარის შემწეობითაც; ეს უკანასკნელი მოქმედებს ავტომატურად დროის განსაზღვრული შუალედების გავლის შემდეგ, მაგ., 1 საათის შემდეგ, და მოაბრუნებს ხელსაწყოს გარკვეული კუთხით საამისო მოწყობილობის სათანადოდ დაყენების შედეგად.



ნახ. 41.

დღემდე სხვადასხვა დროს აგებულია ოცდაათამდე სხვადასხვა ტიპის გრავიტაციული ვარიომეტრი, რომლებიდან მხოლოდ ზოგიერთმა მოიპოვა ფართე გავრცელება, როგორც, მაგალითად,  $L$ ,  $Z$  და  $S$  ტიპის ვარიომეტრებმა.

$L$  ტიპის ვარიომეტრები არსებითად იგივე მეორე გვარის ვარიომეტრებია, მხოლოდ ისინი უფრო მაღალ ტექნიკურ დონეზეა გაფორმებული. ამ



ნახ. 42.

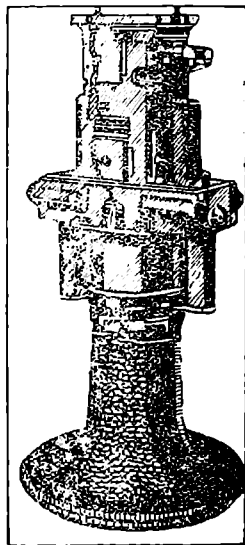
ტიპის ხელსაწყოს გააჩნია ორი უღელი და მოწყობილობა მათი მდებარეობის როგორც ვიზუალური ათელისათვის, ისე ფოტოგრაფიული ჩაწერისათვის. ხელსაწყოს სიდიდის შემცირებისა და მისი სიზუსტის გადიდების მიზნით ასათვლელი და ჩამწერი მოწყობილობა მას გაკეთებული აქვს გრუნის ბუნიკების ზემოთ. მას გააჩნია აგრეთვე სხვა უპირატესობანი, რომლებზედაც საერთოდ უკვე გვქონდა ლაპარაკი, მაგალითად, უღლის რხევის უფრო სწრაფი დაცხრომა, რხევის

რეგისტრაციის შესაძლებლობა როგორც დაკვირვების მთელი შუალედის განმავლობაში, ისე მხოლოდ მისი დაცხრომის შემდეგ ყოველი საათის ბოლოს, რისთვისაც გამოყენებულია წერტილოვანი სახის რეგისტრაცია და სხვა, რაზედაც ჩვენ აქ არ შეეჩერდებით.

$Z$  და  $S$  ტიპის ვარიომეტრების უღლის სახეები მოცემულია ნახაზ 42-ზე, საიდანაც ჩანს, რომ  $Z$  ვარიომეტრის უღელს აქვს დაწოლილი  $Z$ -ის ფორმა, და, რა თქმა უნდა, მთლიანად გაკეთებულია ლითონის ღრუ ღეროდან სათანადო ტვირთებით,  $S$  ვარიომეტრის უღელი კი წარმოადგენს ირიბად დაკიდებულ ლითონის ღრუ ღეროს ტვირთებით.

$Z$  ვარიომეტრის გარეგანი სახე და მისი სიგრძივი განკვეთა მოცემულია 43 და 44 ნახაზებზე. პირველ ყოვლისა აღსანიშნავია, რომ ამ ხელსაწყოს სიმაღლე შეადგენს 120 სმ, იმ დროს როდესაც  $L$  ვარიომეტრის სიმაღლე 180 სმ მეტია, სიმაღლე კი აღწევს 60 კგ.

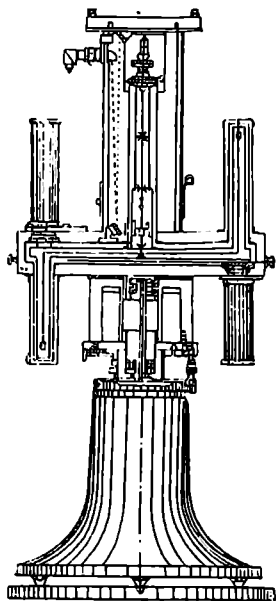
კიდევ უფრო მოხერხებულია  $S$  ვარიომეტრი, სადაც უღლის დაწყნარების დრო კიდევ უფრო მცირეა, ვიდრე  $Z$  ვარიომეტრში, რადგან ის 20 მინუტის ტოლია (ნახ. 45). მისი წონაც საკმაოდ შემცირდა  $Z$  ტიპის ვარიომეტრთან შედარებით და შეადგენს მხოლოდ 20 კგ. ამასთანავე მისი მგრძნობიარობა რამ-



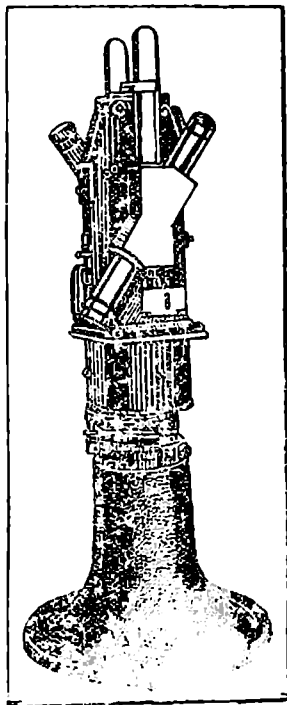
ნახ. 43.

დენიმედ მცირეა  $Z$  ვარიომეტრის მგრძობიარობაზე. საერთოდ უნდა აღინიშნოს, რომ არა ერთგზის ადგილის მქონე ცდას, რომ გრავიტაციული ვარიომეტრის სიდიდე შეემცირებინათ უღლისა და საკიდი ძაფების სიგრძეების შემცირების გზით, არასდროს არ მოყოლია საგრძობი წარმატება, ვინაიდან ამ დროს ან მცირდებოდა ხელსაწყოს მგრძობიარობა ანდა იზრდებოდა დაკვირვებისათვის საზიანო გავლენები, პირველ რიგში კი ტემპერატურისა და ადგილმდებარეობის უსწორმასწორობისა.

ჩვენ არ შევეუდგებით აქ სხვა ტიპების ხელსაწყოთა აღწერას, რაც ადვილად მოინა-



ნახ. 44.

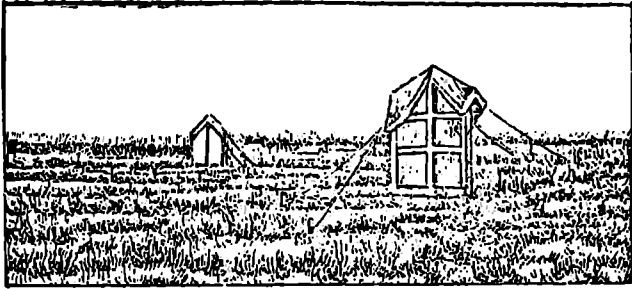


ნახ. 45.

ხება რუსულ ენაზე არსებულ ვრცელ სახელმძღვანელოებში, რომელთა სია დართული აქვს ამ წიგნს ბოლოში.

ტემპერატურის ცვალებადობა ძლიერ ამახინჯებს დაკვირვების შედეგს, რადგანაც ის იწვევს ჰაერის კონვექციური დენების წარმოშობას ხელსაწყოში, რომლებიც ამახინჯებენ უღლების კანონზომიერ გადახრებს. ანტიკომ ველზე დაკვირვებას აწარმოებენ სპეციალურ კარავში, სადაც იდგმის ხელსაწყო. უფრო ხელსაყრელი ტემპერატურული პირობების შესაქმნელად ზოგ-

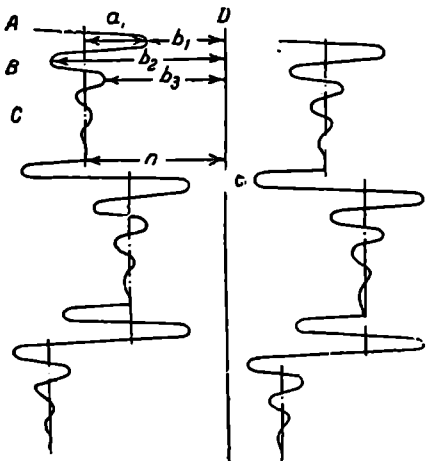
ჯერ დაკვირვებას აწარმოებენ ლამით, ან ლრუბლიან დღეებში; მიმართავენ აგრეთვე ტენტს, რომლის ქვეშ ათავსებენ კარავს ხელსაწყოთი.



ნახ. 46.

**§ 6. მეორე გვარის ვარიომეტრით წარმოებულ დაკვირვებათა დამუშავება**

ნახაზ 47-ზე მოცემულია ვარიომეტრის ფოტოგრაფიული ჩანაწერი, მიღებული ფირფიტაზე მთელი დაკვირვების განმავლობაში ერთ გარკვეულ აზიმუტში. უღელი საერთოდ ხელსაწყოს ახალ აზიმუტში დაყენებისთანავე იწყებს უწყსრიგო რხევას, ეხეთქება ფუტლარის კედელს ან საგანგებო საბ-



ნახ. 47.

ჯენებს (ჩანაწერის *A* ნაწილი), შემდეგ ის იწყებს ძლიერ მიღევად თავისუფალ რხევებს პერიოდით 10 მინუტის ფარგლებში (ჩანაწერის *B* ნაწილი), რომელთა დაცხრომის შემდეგ ჩანაწერი სწორ ხაზს წარმოადგენს (ნაწილი *C*). როგორც უკვე ვიცით, ერთდროულად წერს უძრავი საარკეც, რომლის მიერ ჩაწერილი სწორი *D* ხაზიდან იზომება გადახრები.

ფირფიტაზე გაზომვებს აწარმოებენ ლუპით სათანადო მინის პალეტის ან მიკროსკოპის შემწეობით, რომელიც მცირედ ადიდებს. ჩანაწერს *C* ნაწილი, რომელსაც შეესაბამება „მანძილი, შეიძლება ყოველთვის არც კი გააჩნდეს, როდესაც უღლის რხევა ნელა ცხრება, ან როდესაც

ხელსაწყო ახალ აზიმუტში გადაყავთ დაწესებულ შუალედზე აღრე; მაშინ „შეიძლება მიღებულ იქნეს შემდეგ მოსაზრებათა საფუძველზე.

ულლის რხევა გამოწვეულია ძაფის გრების ძალით, რომელიც, როგორც ცნობილია, პროპორციულია გადახრის კუთხისა წონასწორობის მდებარეობიდან. ასეთივე კანონით მოქმედებს სიპძიმის ძალა საქანზე, როდესაც მისი რხევის კუთხე მცირეა. გამოდის, რომ ორივე შემთხვევისათვის წინააღმდეგობა, უმთავრესად, ჰაერისა უნდა მივიჩნიოთ სიჩქარის პირველი ხარისხის პროპორციულად. მაგრამ საქანის შემთხვევისათვის ჩვენ ვიცით, რომ მისი რხევები ჰაერის წინააღმდეგობის გამო მიღვევადია, რის გამო რხევის ამპლიტუდა კლებულობს გეომეტრიული პროგრესიის მიხედვით (თავი V § 3). ზემონათქვამიდან ჩანს, რომ ულლის რხევაც ემორჩილება იმავე კანონს, რასაც საქანის რხევა.

თუ ავიღებთ ულლის რხევის სამ ერთმანეთზე მიმყოლ  $a_1, a_2, a_3$  ამპლიტუდას, მაშინ ზემონათქვამის მიხედვით გვექნება:

$$a_2 = a_1 c,$$

$$a_3 = a_2 c = a_1 c^2,$$

სადაც  $c$  მიღვევის კოეფიციენტი. მაშინ სამი გაზომილი  $b_1, b_2, b_3$  მანძილ-სათვის გვექნება:

$$b_1 = n + a_1,$$

ან

$$h_1 = n - a_1,$$

$$b_2 = n - a_1 c,$$

$$b_2 = n + a_1 c,$$

$$b_3 = n + a_1 c^2,$$

$$b_3 = n - a_1 c^2,$$

იმის და მიხედვით, თუ რომელ გადახრას, მარჯვნივს თუ მარცხნივს ჩავთვლით საწყის გადახრად. ამ განტოლებებიდან  $a_1$  და  $c$  სიდიდეთა გამორიცხვით, რომლებიც არ წარმოადგენენ ინტერესს, მივიღებთ საპოვნ  $n$  სიდიდეს:

$$n = \frac{b_1 b_3 - b_2^2}{b_1 + b_3 - 2b_2}.$$

თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ, ცდის თანახმად,  $c$  მოცემული ულლისა და ძაფისათვის უცვლელი რჩება, მაშინ ის შეიძლება წინასწარ განსაზღვრულ იქნას რომელიმე ერთ პუნქტზე, რის შემდეგ  $n$  შეიძლება მივიღოთ მხოლოდ ორი,  $b_1$  და  $b_2$ , მანძილის საფუძველზე, რაც, ცხადია, კიდევ უფრო შეამოკლებს ყოველ აზიმუტში ხელსაწყოს მუშაობას. მაშინ  $n$ -სათვის გვექნება:

$$n = \frac{b_1 c + b_2}{c + 1}.$$

მანძილი  $n$  ულლის წონასწორობის მდებარეობისა რომელიმე ცნებისმიერი წერტილიდან უნდა გადაყვანილ იქნას გადახრის კუთხეში, რისთვისაც საჭიროა ვიცოდეთ ეგრეთწოდებული „ობტიკური ბერკეტის“ სიგრძე, ე. ი. მანძილი  $d$  სარკიდან სკალამდე ან ობიექტივიდან ფოტოგრაფიულ ფირფიტამდე; ეს მანძილი უნდა გამოიხატოს სიგრძის იმ ერთეულებში, რომლებშიც  $n$  გამოიხატება, მაგ., მილიმეტრებში. მაშინ ამავე თავის (17) ფორმულის მიხედვით გვექნება:

$$\varphi = \frac{h}{2d}, \quad \varphi_0 = \frac{n_0}{2d}.$$

შევიტანოთ ეს აღნიშვნები (15) განტოლებაში და დაეწეროთ ის სამ-ჯერ, თითოეული ულლისათვის შესაბამისად სამ აზიმუტში წარმოებულ დაკვირვებათა მიხედვით. მაშინ, თუ წერის სიმოკლისათვის მივიჩნევთ, რომ

$$P = \frac{2Kd}{\tau}, \quad Q = \frac{2lhd}{\tau} \quad (8.18)$$

და  $W$  პოტენციალის მეორე წარმოებულათვის მივმართავთ შემოკლებულ აღნიშვნას, (15) განტოლება ასე დაიწერება:

$$\begin{aligned} 1) \quad n_1 &= n_0 + \frac{1}{2} PW_{\Delta} \sin 0^\circ + PW_{\pi} \cos 0^\circ - \\ &\quad - QW_{\pi} \sin 0^\circ + QW_{\pi} \cos 0^\circ \\ 2) \quad n_2 &= n_0 + \frac{1}{2} PW_{\Delta} \sin 240^\circ + PW_{\pi} \cos 240^\circ - \\ &\quad - QW_{\pi} \sin 120^\circ + QW_{\pi} \cos 120^\circ \\ 3) \quad n_3 &= n_0 + \frac{1}{2} PW_{\Delta} \sin 120^\circ + PW_{\pi} \cos 120^\circ - \\ &\quad - QW_{\pi} \sin 240^\circ + QW_{\pi} \cos 240^\circ \\ 4) \quad n'_1 &= n'_0 + \frac{1}{2} P'W_{\Delta} \sin 0^\circ + P'W_{\pi} \cos 0^\circ - \\ &\quad - Q'W_{\pi} \sin 180^\circ + Q'W_{\pi} \cos 180^\circ \\ 5) \quad n'_2 &= n'_0 + \frac{1}{2} P'W_{\Delta} \sin 240^\circ + P'W_{\pi} \cos 240^\circ - \\ &\quad - Q'W_{\pi} \sin 300^\circ + Q'W_{\pi} \cos 300^\circ \\ 6) \quad n'_3 &= n'_0 + \frac{1}{2} P'W_{\Delta} \sin 120^\circ + P'W_{\pi} \cos 120^\circ - \\ &\quad - Q'W_{\pi} \sin 60^\circ + Q'W_{\pi} \cos 60^\circ, \end{aligned} \quad (8.19)$$

სადაც ნიშანი' შეესაბამება სიდიდეებს, რომლებიც მეორე ულელს ეკუთვნის. თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ

$$\begin{aligned} \sin 0^\circ + \sin 120^\circ + \sin 240^\circ &= 0, \\ \sin 60^\circ + \sin 180^\circ + \sin 300^\circ &= 0, \\ \cos 0^\circ + \cos 120^\circ + \cos 240^\circ &= 0, \\ \cos 60^\circ + \cos 180^\circ + \cos 300^\circ &= 0, \end{aligned}$$

მაშინ (19)-ის პირველი საში განტოლების შეკრება და ასევე უკანასკნელი საში განტოლების შეჯამება მოგვცემს შესაბამისად:

$$n_1 + n_2 + n_3 = 3n_0,$$

$$n'_1 + n'_2 + n'_3 = 3n'_0,$$

საიდანაც მივიღებთ

$$n_0 = \frac{1}{3} (n_1 + n_2 + n_3),$$

$$n'_0 = \frac{1}{3} (n'_1 + n'_2 + n'_3).$$

ახლა შევუდგეთ  $W$  ფუნქციის მეორე წარმობებულთა განსაზღვრას (19) გამოსახულებაში მოქცეული ექვსი განტოლებიდან.

ამისათვის გავამრავლოთ

$$\begin{aligned} \text{მეორე განტოლება} & \quad Q' \text{-ზე,} \\ \text{მესამე განტოლება} & \quad -Q' \text{-ზე,} \\ \text{მეხუთე განტოლება} & \quad Q \text{-ზე,} \\ \text{მეექვსე განტოლება} & \quad -Q \text{-ზე;} \end{aligned}$$

მათი შეკრების შედეგი ასეთია:

$$Q'(n_2 - n_3) + Q(n'_2 - n'_3) = -(PQ' + P'Q)W_{\Delta} \sin 60^\circ. \quad (8.I)$$

ახლა გავამრავლოთ

$$\begin{aligned} \text{პირველი განტოლება} & \quad Q' \text{-ზე,} \\ \text{მეოთხე განტოლება} & \quad -Q \text{-ზე;} \end{aligned}$$

მათი შეკრება მოგვცემს:

$$Q'n_1 + Qn'_1 - Q'n_0 - Qn'_0 = (PQ' + P'Q)W_{\Delta} \cos 60^\circ. \quad (8.II)$$

გავამრავლოთ აგრეთვე

$$\begin{aligned} \text{მეორე განტოლება} & \quad P' \text{-ზე,} \\ \text{მესამე განტოლება} & \quad -P' \text{-ზე,} \\ \text{მეხუთე განტოლება} & \quad P \text{-ზე,} \\ \text{მეექვსე განტოლება} & \quad -P \text{-ზე;} \end{aligned}$$

მათი შეკრების შედეგი ასეთ სახეს ღებულობს:

$$P'(n_2 - n_3) + P(n'_2 - n'_3) = -2(PQ' + P'Q)W_{\Delta} \sin 60^\circ. \quad (8.III)$$

გავამრავლოთ, ბოლოს,

$$\begin{aligned} \text{პირველი განტოლება} & \quad P' \text{-ზე,} \\ \text{მეოთხე განტოლება} & \quad -P \text{-ზე;} \end{aligned}$$

მათი ჯამი იქნება:

$$P'n_1 - Pn'_1 - P'n_0 + Pn'_0 = (PQ' + P'Q)W_{\Delta} \cos 60^\circ. \quad (8.IV)$$

იყოს

$$R = PQ' + P'Q,$$

რომელიც წარმოადგენს ინსტრუმენტალურ მუდმივს ისე, როგორც  $\frac{Q'}{Q}$  და  $\frac{P'}{P}$  შეფარდებები, რომლებიც, უღელთა ერთნაირობის გამო, უმნიშვნელოდ განსხვავდებიან ერთი ერთეულიდან.

გარდა ამისა, დაეუშვათ, რომ

$$\begin{aligned} N_1 &= n_1 - n_0, & N'_1 &= n'_1 - n'_0, \\ N_2 &= n_2 - n_0, & N'_2 &= n'_2 - n'_0, \\ N_3 &= n_3 - n_0, & N'_3 &= n'_3 - n'_0. \end{aligned}$$

გავიხსენოთ, რომ

$$\sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

ჩავსვათ ეს აღნიშვნები I, II, III, IV განტოლებებში, რაც მოგვცემს:

$$\begin{aligned} W_{\Delta} &= -\frac{2Q}{R\sqrt{3}} \left[ \frac{Q'}{Q} (N_2 - N_3) + (N'_2 - N'_3) \right] \\ W_{xy} &= \frac{Q}{R} \left( \frac{Q'}{Q} N_1 - N'_1 \right) \\ W_{xz} &= -\frac{P}{R\sqrt{3}} \left[ \frac{P'}{P} (N_2 - N_3) - (N'_2 - N'_3) \right] \\ W_{yz} &= \frac{P}{R} \left( \frac{P'}{P} N_1 - N'_1 \right). \end{aligned} \tag{8.20}$$

როგორც ვხედავთ, ესაა ის განტოლებები, რომელთა შემწეობით ისაზღვრება საპოვნი წარმოებულები.

ანალოგიური ხერხით გამოიყენება სათანადო განტოლებები ერთ უღელზე ხუთ აზიმუტში დაკვირვებისათვის, პირველი ტიპის ვარიომეტრზე კი სამ აზიმუტში დაკვირვებისათვის და ა. შ., რაზედაც აქ არ შევჩერდებით.

(20) ფორმულებში შედის მუდმივები  $P, P', Q, Q', R$ , რომელთა განსაზღვრაზე აქ არ შევჩერდებით.



## თ ა ვ ი IX

### სტატისტიკური გრაფიკები

#### § 1. გრაფიკების ზოგადი დახასიათება

სიმძიმის ძალის *g* აჩქარების განსაზღვრის სტატისტიკური მეთოდები შედარებით უფრო მარტივი, სწრაფი და ზუსტია, ვიდრე საქანის რხევის ზემოთგანხილული დინამიკური მეთოდები. სტატისტიკური მეთოდების შესაბამისი ხელსაწყოები დაფუძნებულია სხეულის წონასწორობის შეცვლაზე, როცა მის წონას ათანაბრებს გაზის ან ზამბარის დრეკადი ძალა. ამის მიხედვით არჩევენ გაზიან და ზამბარიან ხელსაწყოებს, რომელთაც სტატისტიკურ გრაფიკურებს უწოდებენ. გრაფიკების შემწვობით იზომება სიმძიმის ძალის შეფარდებითი სიდიდე.

გაზიანი გრაფიკური წარმოადგენს დახშულ ქურქელს ვერცხლისწყლის სვეტით, რომელსაც ჰაერის ან გაზის გარკვეული მოცულობის დრეკადობა აწონასწორებს. სიმძიმის ძალის შეცვლისას სვეტის წონაც იცვლება და მივიღებთ სვეტის მიკროგადანაცვლებას, რაც, გაზის ან ჰაერის დრეკადობის მუდმივად შენარჩუნების შემთხვევაში, გამოდგება სიმძიმის ძალის აჩქარების გასაზომად. გაზიანი გრაფიკურის იდეა თავდაპირველად მიხეილ ლომონოსოვის ეკუთვნის და მანვე ააგო კიდევაც პირველი გრაფიკური 1756 წელს რუსეთში. ამ თავის ხელსაწყოს ლომონოსოვი დიფერენციალურ ბარომეტრს უწოდებდა. ამ ხელსაწყოს შემწვობით მას სურდა სიმძიმის ძალის პერიოდული ვარიაციის შესწავლა მზისა და მთვარის მიხილულობის გავლენით. ამით ლომონოსოვმა თავის ეპოქას გაუსწრო და ჩვენს საუკუნეში გადმოიხედა. ლომონოსოვის ხელსაწყოს იდეა თავის დროზე არ გამოქვეყნებულა და დაეწყებას მიეცა. ლომონოსოვისებური გრაფიკურის თანამედროვე მოდელები შეჰქმნეს ბრიგსმა—ამერიკაში, ჰალკმა—გერმანიაში, ნორგარდმა—დანიაში, მიხაილოვმა—საბჭოთა კავშირში და სხვა. მაგრამ საკვლევო მუშაობა ამ მიმართულებით მალე შენედა და ბოლოს შეწყდა კიდევაც, რადგან არენაზე გამოვიდნენ ზამბარიანი გრაფიკურები, რომელთაც მრავალი უპირატესობა აღმოაჩნდათ გაზიან ხელსაწყოებთან შედარებით ზომების, წონისა და სიზუსტის ნხრავ.

ზამბარიანი გრაფიკური წარმოადგენს ზამბარაზე დაკიდებულ ტვირთს, რომელიც წონასწორობაშია დრეკადობისა და სიმძიმის ძალის გავლენით. სიმძიმის ძალის შეცვლისას ტვირთის წონაც იცვლება და მივიღებთ მის მიკროგადანაცვლებას, რაც, ზამბარის დრეკადი თვისებების შეუცვლელობის

შემთხვევაში, გამოდგება სიმძიმის ძალის აჩქარების შეფარდებითი სიდიდის გასაზომად. ასეთი ხელსაწყო ვარგისობა მოითხოვს, სულ მცირე, შემდეგი სამი პირობის დაცვას: 1. მიკროკოდანაცვლებათა ზუსტად გაზომვას, 2. უმაღლესა ხარისხის ზამბარების გამოყენებას და 3. ტემპერატურული გავლენის თავიდან აცილებას თერმოსტატის შემწეობით ან კომპენსაციის გზით. ქვემოთ დაყენახვით, თუ როგორ არის მიღწეული და დაცული ეს სამი პირობა სხვადასხვა სისტემის გრავიმეტრში.

ზამბარიან გრავიმეტრებს შორის არჩევენ კვარცხანისა და ლითონისას იმის და მიხედვით, თუ რა მასალისაგან არის დამზადებული ზამბარა და ხელსაწყო სხვა მგრძობიარე ნაწილი. ზამბარა შეიძლება იყოს სპირალური ან ბრტყელი. ცნობილია ზამბარიანი გრავიმეტრების მრავალი სისტემა და სახესხეობა. მათ შორის ჩვენ გავეცნობით უმთავრესად საბჭოთა კავშირში დამზადებულ და გამოყენებულ გრავიმეტრებს.

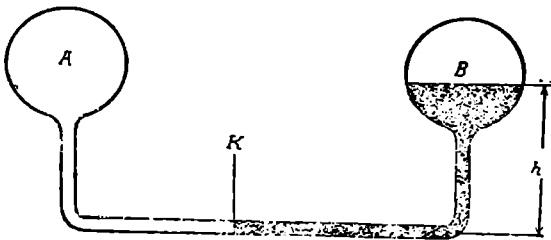
საბჭოთა და უცხოური ზამბარიანი გრავიმეტრების პარალელურად გამოყენება და შედარებითი შესწავლა მოწმობს, რომ ისინი ერთნაირად კარგ შედეგებს გვაძლევენ და უკანასკნელ ხანებში წარმატებით ცვლიან კიდევაც საქანთან აპარატსა და ნაწილობრივ გრავიტაციულ ვარიომეტრსაც სხვადასხვა სახის გრავიმეტრიული აგეგმვის დროს.

გავეცნოთ გაზიანი და ზამბარიანი გრავიმეტრების მოქმედების პრინციპსა და აღწერილობას, აგრეთვე ზოგიერთი მათგანის დაკვირვების მეთოდისა და პირობებს.

## § 2. ლომონოსოვის გრავიმეტრი

ლომონოსოვის გრავიმეტრის პრინციპული სქემა მოცემულია ნახ. 48-ზე. ხელსაწყო შედგება მინის ორი,  $A$  და  $B$  ბირთვისაგან, რომლებიც შეერთებულია ერთმანეთთან მინისავე წვრილი მოხრილი მილით. მილის პირველ ნახევარს და  $A$  ბირთვს ავსებენ ჰაერი ატმოსფერული წნევის ქვეშ, ხოლო მი-

ლის მეორე ნახევარში და  $B$  ბირთვის ქვედა ნაწილში ჩასხმულია ვერცხლის წყალი ისე, რომ  $B$ -ში ზევით დატოვებულია სიცარიე. ამ პირობებში  $h$  სიმაღლის ვერცხლის წყლის სვეტი თავისი წონით აწონასწორებს ჰაერის წნევას  $A$ -ში.



ნახ. 48.

სიმძიმის ძალის გადიდებისას ვერცხლისწყალიც მოიმატებს წონაში და ჰაერის წნევის გაწონასწორებისათვის საკმარისი იქნება უკვე  $h$ -ზე ნაკლები სვეტი. ამის გამო ვერცხლისწყლის დონე  $B$ -ში დაბლა დაიწევს და მისი  $K$  მენისკიც სათანადოდ  $B$ -დან  $A$ -კენ მარცხნივ გადაიწევს. სიმძიმის ძალის შემცირებისას აღგილი აქვს შებრუნებულ სურათს.

ტემპერატურული გავლენის თავიდან აცილების მიზნით ხელსაწყო თავსდება გალლობილ ყინულში.

ანათვალის აღება წარმოებს *K* მენისკის მიხედვით დანაყოფებიდან სახაზავზე, რომელიც მოთავსებულია წერილი მოხრილი მილის გასწვრივ. ხელსაწყოს სიზუსტე და ლომონოსოვის დაკვირვებათა შედეგები ჩვენთვის ცნობილი არ არის.

### § 2. თანამედროვე გაზიანი გრაფიმეტრები

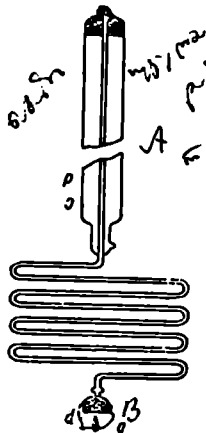
გავეცნოთ თანამედროვე გაზიანი გრაფიმეტრების ზოგიერთ სახეს.

ბრიგისის გრაფიმეტრის პრინციპული სქემა მოცემულია ნახ. 49-ზე.

ხელსაწყო შედგება ორი *A* და *B* ქურქლისა და მათი შემაერთებელი წერილი *C* მილისაგან, რომელიც სწორი ნაწილით გაყრილია *A*-ში, ხოლო ზიგზაგური ნაწილით უშუალოდ ებმის *B*-ს.

*A*-ს ცილინდრული ფორმა აქვს, მასში მოთავსებულია აზოტი ატმოსფერული წნევის ქვეშ. *B*-ს ზედა ნახევარში სიციბილეა შექმნილი, ხოლო მის ქვედა ნახევარში, შემაერთებელ *C* მილში და *A*-ს ქვედა ნაწილში ვერცხლისწყალია ჩასხმული. *B*-ს კედელზე შიგნიდან ვერტიკალურად მიმაგრებულია წაწვეტებული *P* ღერო ისე, რომ მისი წვერი მოლიოდეს დაახლოებით ბირთვის ცენტრში. ამასთან *C* მილის სიგრძე ისეა შერჩეული, რომ ვერცხლისწყლის სვეტის ზედაპირი აღწევდეს დაახლოებით *B* ბირთვის ცენტრამდე.

ტემპერატურული გავლენის თავიდან აცილების მიზნით ხელსაწყო ვერტიკალურ მდგომარეობაში იდგმის სპეციალურ ქურქელში, სადაც გალლობილი ყინულია მოთავსებული.



ნახ. 49.

ანათვალის აღება მიკრომეტრიულ ხრახნზე წარმოებს სამზერი ჯოგრის შემწეობით, როდესაც მიღწეულია *P* ღეროს წვერის შეთავსება *B* ბირთვის ვერცხლისწყლის დონესთან. ამისათვის *A* ქურქლის კედელთან. დამაგრებულია ვერტიკალური ღეროები სათანადო მცოცავეებით, რომელთა ვერტიკალურად გადაადგილება მიკრომეტრიული ხრახნით წარმოებს. მცოცავეებთან ერთად გადანაცვლებას განიცდის *B* ბირთვი და მასთან შეერთებული მილის ზიგზაგური ნაწილი.

ბრიგისმა საველე დაკვირვებები ამ თავის გრაფიმეტრით ჩაატარა ჩრდილოეთ ამერიკის სანაპიროებზე სან-ფრანცისკოდან ნიუ-იორკამდე, პანამის არხზე გავლით, და მიიღო მეტად ტლანქი შედეგები. ხელსაწყოს სიზუსტე შეადგენდა დაახლოებით  $\pm 20$  მილიგალს. ასეთი შედეგების გამო წამოიჭრა ხელსაწყოს შემდგომი გაუმჯობესების ამოცანა, რასაც გერმანელმა გეოფიზიკოსმა ჰალკმა მოჰკიდა ხელი.

ჰალკმა ბრიგისის გრაფიმეტრში გააუმჯობესა ათვლის სისტემა და განახორციელა ტემპერატურული გავლენის კომპენსაცია. ამან მნიშვნელოვნად გაზარდა გაზიანი გრაფიმეტრის სიზუსტე.

პალკის გრავიმეტრის პრინციპული სქემა მოცემულია ნახ. 50-ზე.

ხელსაწყო შედგება ორი ქურქლისაგან, რომლებიც შეერთებულია ერთმანეთთან  $u$ -ს მავვარი წვრილი მილით. ეს მილი ორ ადგილას არის გაფართოებული და ავსებულია ვერცხლისწყლით, რომელიც თავისი წონით აწონასწორებს არსებულ წნევათა სხვაობას ქურქლებს შორის. ასეთ პირობებში ტემპერატურული ვანდენის კოჰენსაციის მისაღწევად სავსებით საკმარისი იქნება გაზის მოცულობის შეცვლა ტემპერატურასთან ერთად ისეთნაირად, რომ გაზის დრეკადობა უცვლელი დარჩეს.

შემოვიღოთ აღნიშვნები:

$v$ ,  $p$  და  $v'$ ,  $p'$  იყოს გაზის მოცულობა და წნევა შესაბამისად ზედა და ქვედა ქურქელში,  $z$  და  $z'$ —ვერცხლისწყლის სვეტის სიმაღლე მილის ზედა და ქვედა მუხლში,  $\sigma$ —ვერცხლისწყლის სიმკვრივე და  $g$ —სიმძიმის ძალის აჩქარება; მაშინ გაზის წნევათა სხვაობისათვის შეიძლება დაიწეროს შემდეგი სახის გამოსახულება:

$$p' - p = (z - z')\sigma g \quad (IX.1)$$

სიმძიმის ძალის  $dg$  სიდიდით შეცვლისას შეიცვლება ვერცხლისწყლის სვეტის სიმაღლე ორივე მუხლში და გაზის წნევა ორივე ქურქელში. ამ ცვლებათა შორის დამოკიდებულებას გვაძლევს შემდეგი განტოლება:

$$dp' - dp = (dz - dz')\sigma g + (z - z')\sigma dg \quad (IX.2)$$

თუ ახლა ამ განტოლებაში ჩავსვამთ ბოილ-მარიოტის კანონიდან გამომდინარე დამოკიდებულებებს:

$$dp' = \frac{p'}{v'} dv', \quad dp = \frac{p}{v} dv;$$

და ამავე დროს დავუშვებთ:

$$dv = -F dz \quad \text{და} \quad dv' = -F dz',$$

სადაც  $F$  არის მილის განივკვეთის ფართობი, მაშინ მივიღებთ გაზიანი გრავიმეტრის ძირითად განტოლებას, რომელსაც შემდეგი სახე ექნება:

$$\frac{dg}{p' - p} \left[ dz \left( F \frac{p}{v} + \sigma g \right) - dz' \left( F \frac{p'}{v'} + \sigma g \right) \right] \quad (IX.3)$$

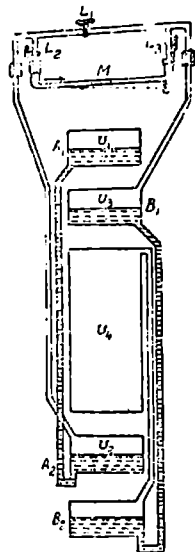
იმისათვის, რომ  $g$  განისაზღვროს ეზოთი მილიგალის სიზუსტით, საკმარაო ხელსაწყოში მანძილი ვერცხლისწყლის დონეთა შორის გაიზომოს მისი  $1 \cdot 10^{-6}$  ნაწილის სიზუსტით. ასეთი მაღალი სიზუსტის მისაღწევად წვრილ მილში ქურქლის მხრიდან და გაფართოებული ნაწილების ზედა ნახევარებში ჩასხმულია მსუბუქი სითხე—ტოლუოლი. ასეთ პირობებში ვერცხლისწყლის დონეთა გადასაცვლება გამოიწვევს ტოლუოლის სვეტის გაზვიადებულ გადაწევას  $C$ -სა და  $C'$ -ში იმდენჯერ, რამდენჯერაც გაფართოებული ნაწილის განივკვეთის ფართობი მეტია მილის განივკვეთის ფართობზე.

ჰალკის გრაფიმეტრის პირველი მოდელი (1930 წ.) ოთხი ასეთი ხელსაწყო-საგან შედგება, თავმოყრილია ისინი ერთ საერთო კაშვარში და, მიუხედავად ტემპერატურული კომპენსაციის არსებობისა, მოთავსებულია გალლობილ ყინულში. ამით გარანტირებული რჩება ერთნაირი ტემპერატურის დამყარება ხელსაწყოს ყველა ნაწილში გრადუსის 0,001 ფარგლებში.

ხელსაწყო იწონის დაახლოებით 350 კგ და გამართულია ავტომატურ-ნახე. ხელსაწყოს უპირატესობა იმაში მდგომარეობს, რომ მის შენეწობით დაკვირვებათა წარმოება შეიძლება არა მარტო ხმელეთზე, არამედ ზღვაზედაც. ჰალკმა ამ თავისი გრაფიმეტრით მრავალრიცხოვანი დაკვირვებები ჩატარა გერმანიაში და ბალტიის ზღვაზე, სადაც მის მიერ მიღწეული სიზუსტე შესაბამისად შეადგენდა  $\pm 1,5$  და  $\pm 5$  მილიგაღს.

ჰალკის გრაფიმეტრის მეორე მოდელი (ნახ. 50 ა) გამოშვებულ იქნა 1938 წ.

იგი ხელსაწყოს შემდგომ გაუმჯობესებას წარმოადგენს და შედგება შემდეგი მთავარი ნაწილებისაგან: აღებულია ვერცხლისწყლის ორი  $A_1A_2$  და  $B_1B_2$  მანომეტრი  $v_1, v_2, v_3, v_4$  და  $v_5$  ჭურჭლით, სადაც წნევა სხვადასხვანაირია:  $v_1$ -ში—ნულოვანი,  $v_2$ -სა და  $v_3$ -ში—76 სმ,  $v_4$ -სა და  $v_5$ -ში—152 სმ.  $v_4$  ჭურჭელი ტემპერატურული კომპენსატორის როლს ასრულებს და ამაშია ხელსაწყოს ერთი შემდგომი გაუმჯობესება. მეორე გაუმჯობესება შეეხება ათვლის სისტემას. წვრილ შემაერთებელ მილში სამ სხვადასხვა ადგილს მოწყობილია  $L_1, L_2$  და  $L_3$  ონკანები, აგრეთვე ტოლუოლის  $M$  წვეთი. ათვლა მიმდინარეობს სკალაზე  $M$  წვეთის მიხედვით, როდესაც სათანადო წესითა და თანმიმდევრობით ჩავატარებთ ონკანების გახსნას.



ნახ. 50ა.

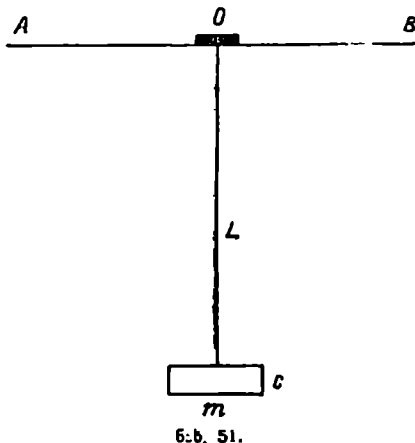
ხელსაწყოზე დაკვირვების მეთოდიც ასეთია: თავდაპირველად გავხსნით ყველა ონკანს, რომ მიღწეულ იქნას  $M$  წვეთის მდებარეობა წვრილი მილის შუაში. შემდეგ ჩაკეტავთ  $L_1$  ონკანს და ავლებთ ანაოვალს. სიმძიმის ძალის შემცირებისას, შემცირდება  $A_1A_2$ -სა და  $B_1B_2$ -ის სვეტების წონები და ვერცხლისწყალი იწყებს გადასვლას  $v_2$ -დან  $v_3$ -ში, ვიდრე არ გაუტოლდებიან ერთმანეთს გაზის წნევა და სვეტის წონა. ამის შედეგად  $M$  წვეთი, რომელიც მაჩვენებლის როლს ასრულებს, მარჯვნივ გადაინაცვლებს და საპირო ხდება ახალი ანათვალის აღება. სიმძიმის ძალის გადიდებისას ადგილი აქვს შებრუნებულ სურათს. ამრიგად, ჰალკის გრაფიმეტრში მსუბუქი სითხის გადანაცვლების სიდიდე შეადგენს სიმძიმის ძალის საზომს.

ჰალკის გრაფიმეტრის მეორე მოდელი შედგება ორი ერთნაირი ხელსაწყო-საგან; ზომითა და წონით იგი უფრო ნაკლებია, ვიდრე პირველი მოდელი, და დაკიდებულია სპეციალურ სამფეხზე კარდანიული წესით, რაც საშუალებას იძლევა გამოყენებულ იქნას იგი ზღვებზე დაკვირვებისათვისაც.

§ 4. ნორგარდისა და „ვირგ“-ის გრავიმეტრები

ჯერ ნორგარდმა და შემდეგ „ვირგ“ მა<sup>1</sup> ააგეს კვარცის ზამბარიანი გრავიმეტრები, რომელთაც ბევრი რამ აქვთ საერთო და მსგავსი. ამიტომ მათ აღწერას აქ ერთად ვათავსებთ.

ამ გრავიმეტრების მოქმედება შემდეგ პრინციპზეა დამყარებული (ნახ. 51). ავიღოთ დრეკადი  $AB$  ძაფი, გავკვიმოთ ჰორიზონტულად ორ  $A$  და  $B$  წერტილს შორის და შუა ნაწილში დავამაგროთ  $O$  სიგრძის  $OC$  ლერო, რომ-



ლის ბოლოში მოვათავსოთ  $m$  მასის მქონე ტვირთი. თუ ახლა  $AB$  ძაფს დაკვრებთ, მაშინ წარმოიშობა დრეკადი ძალა, რომელიც შეეცდება  $OC$  ლეროს შვეული მდებარეობიდან გამოყვანას. ეტქვეათ  $AB$  გადაიხარა  $\varphi$  კუთხით, ხოლო  $OC$ — $\alpha$  კუთხით, მაშინ ძაფის დაგრების კუთხე იქნება მათი სხვაობა  $\varphi - \alpha$ . ამის შემდეგ ძაფის დრეკადი ძალა შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც ნამრავლი  $h(\varphi - \alpha)$ , სადაც  $h$  არის მუდმივი სიღლიდე, დამოკიდებული ძაფის მასალის და ზომებისა.

გან. ეს ძალა ტოლია  $m$  ტვირთის მომენტისა:

$$h(\varphi - \alpha) = mgl \sin \alpha \quad (IX.4)$$

თუ ხელსაწყოს ისეთიანი რად მოვაწყობთ, რომ დაეცვათ ძაფის დაგრების კუთხის ( $\varphi - \alpha$ ) მუდმიუობა, მაშინ (IX.4) ტოლობა შეიძლება ასე გადაიწეროს:

$$mgl \sin \alpha = \text{const} \quad (IX.5)$$

ეს განტოლება იძლევა დამოკიდებულებას  $g$ -სა და  $\alpha$ -ს შორის ნებისმიერ პუნქტში.  $\alpha$  არის  $OC$  ლეროს შვეული მდებარეობიდან გადახრის კუთხე, რომელიც შეიძლება გამოვიყენოთ, როგორც  $g$ -ს საზომი.

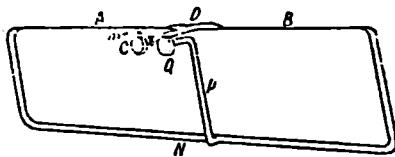
ხელსაწყოს კვარციანი მგრძნობიარე სისტემის პრინციპული სქემა მოცემულია ნახ. 52-ზე.

მგრძნობიარე სის სემა შედგება კვარცის  $AB$  ძაფისაგან, რომელიც დაგრებილია და ჰორიზონტულად დაჰაგრებულია კვარცის  $N$  ჩაჩოს ბოლოებს

<sup>1</sup> Всесоюзный Институт Радиационной Геофизики (ВИРГ)-ის შემოკლებული სახელწოდება.

შორის. ძაფის შუაში გამსხვილებულ ნაწილთან მიმაგრებულია კვარციანი  $CO$  ღერო, რომელიც დაახლოებით პორიზონტულად მდებარეობს. საქანის ბოლოში დამაგრებულია პლატინის  $m$  ტვირთი და ბრტყელი  $C$  სარკე. ამ მოძრავი სარკის გვერდით და პარალელურად დამაგრებულია მეორე უძრავი  $Q$  სარკე. ამ სარკეთა დანიშნულებაა ანათელის ალბა ოპტიკური წესით.

მგრძნობიარე კვარციანი სისტემა მოთავსებულია ლითონის კოლოფში, რომელსაც ფანჯარა აქვს დატოვებული სარკეების პირდაპირ ჰოვრით დამზერისთვის. კოლოფი საესეა სპეციალური ზეთით და გერმეტიულად არის დახურული, რათა მიღწეულ იქნას საწი რამ: 1. სისტემის სწრაფად დაწყნარება, 2. ბარომეტრიული ვალენის გამორიცხვა და 3. ტემპერატურული ვალენის კომპენსაცია. პირველი ორი თავისთავად ცხადია, ვნახოთ როგორ მოქმედებს ტემპერატურის კომპენსატორი. ხელსაწყოში ტემპერატურული კომპენსაცია საიმედოდ არის მიღწეული და დაცული მხოლოდ ერთ-ერთი გარკვეული ტემპერატურისათვის (მაგალითად,  $15^{\circ}$  ან  $25^{\circ}$ -თვის), დანარჩენ შემთხვევებში საჭიროა სათანადო შესწორების შეტანა ანათელაში. ტემპერატურის გადიდებისას ზეთი ფართოდება და, არქიმედის კანონის თანახმად, საქანი დაბლა დაიწევს; მაგრამ ამავე დროს იგივე საქანი იმავე ტემპერატურული მიზეზით მაღლა აიწევს ძაფის დრეკადობის გაზრდის გამო. საქანის ამ აწევა-დაწევის ტოლოპის ექსპერიმენტულად მისაღწევად საჭირო შეიქმნა მასზე პლატინის ტვირთის მორგება. კვარციანი სისტემა ხელსაწყოში ყოველთვის დეზარეტირებულ მდგომარეობაშია.



ნახ. 52.

ლითონის კოლოფი ჩამაგრებულია ცილინდრული ფორმის კორპუსში, რომელიც მოთავსებულია ჩარჩოში და დეზარეტირების შემდეგ ბრუნავს პორიზონტული ღერძის გარშემო. ბრუნვის კუთხე შეიძლება ვარიაციის იმავე ჩარჩოზე დამაგრებული მიკრომეტრიული ხრახნის შემწეობით. ანათელის ალბა წარმოებს სწორედ მაშინ, როცა მიკროსკოპში მოძრავი ანათელი შეუთავსდება უძრავს სათანადო წესით და მიკრომეტრიული ხრახნის მეშვეობით. ანათელი ჯერ მილიმეტრებსა და მის ნაწილებში გამოისახება, ხოლო შემდეგ გადაჰყავთ მილიგალებში სათანადო ცხრულებისა და გამოთულების გზით.

ნორგარდისა და „ვირჯ“-ის გრადიმეტრებს შორის განსხვავება შემდეგ მონაცემებშია:

1. პირველი იწონის 15-ს, ხოლო მეორე—22 კგ.;
2. პირველზე ანათელის ალბა ორი, მარცხენა და მარჯვენა, მიკრომეტრით ხდება, მეორეზე კი—ერთი მიკრომეტრისა და ერთი ამწევი ხრახნის შემწეობით წარმოებს;
3. პირველის გაზომვის დიაპაზონი დაახლოებით 1700 მილიგალს შეადგენს, ხოლო მეორისა—ცვალებადობს 40-დან 2000 მილიგალამდე, რისთვისაც

საქირა - სათანადო ფირფიტების ჩამატება ხელსაწყოს კორპუსსა და საყრდენს შორის;

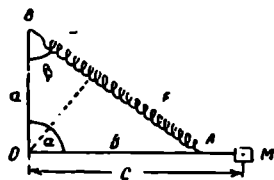
4. პირველი რეგულირებას მოითხოვს სხვადასხვა სიგანედზე სამუშაოდ, მეორე კი—ამას არ საჭიროებს;

5. პირველს თერმოსტატი არ ახლავს (მხოლოდ უკანასკნელ ეგზემპლარებში ვხვდებით სპეციალურ თერმოსტატს ხელსაწყოს ზომებისა და წონის შეუცვლელად), ხოლო მეორე მუშაობს ელექტრული თერმოსტატით, რაც საკმაოდ ზღუდავს მისი გამოყენების სფეროს.

ორივე ხელსაწყოს სიზუსტე თითქმის ერთნაირია და შეადგენს დაახლოებით  $\pm 0.3$  მგლ, საველე პუნქტზე დაკვირვების დრო 5—10 წუთია. ორივე გრაფიმეტრი ფართო გამოყენებით სარგებლობს საბჭოთა კავშირის ტერიტორიაზე.

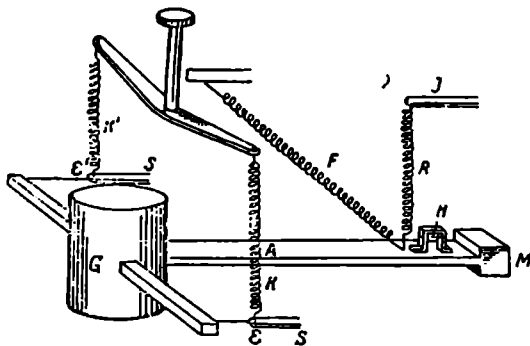
**§ 5. ჰეილანდისა და სხვა უცხოელი ავტორების გრაფიმეტრები**

ჰეილანდის გრაფიმეტრში გამოყენებულია რუსი სეისმოლოგის გოლიცინის იდეა ვერტიკალური სეისმოგრაფის შესახებ. მისი პრინციპული სქემა მოცემულია ნახ. 53, 54 და 55-ზე.

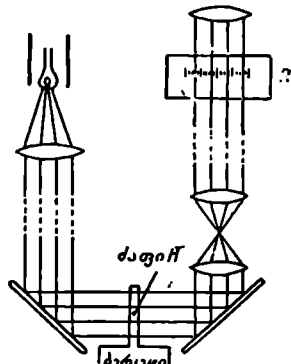


ნახ. 53.

ამ ხელსაწყოს მგრძობიარე სისტემის მთავარ ნაწილს „ნულოვანი სიგრძის“ ელინვარის სპირალური ზამბარა წარმოადგენს. ელინვარი არის რკინის, ნიკელისა და ქრომის სპეციალური შენადნობი, რომელიც ხასიათდება დრეკადობის ცვლის მეტად მცირე ტემპერატურული კოეფიციენტით. „ნულოვანი სიგრძის“ ზამბარა ეწოდება ისეთს, რომელიც დატვირთვის გარკვეული მომენტიდან განიციდის დაგრძელებას მო-



ნახ. 54.



ნახ. 55.

დებული ძალის პირდაპირ პროპორციულად.



როგორც ნახ. 53-დან ჩანს, „ნულოვანი სიგრძის“  $F$  ზამბარა დამაგრებულია დახრილად ჩარჩოს  $B$  წერტილში ჰორიზონტული  $A$  ბერკეტის ბრუნვის  $O$  ღერძის ზემოთ და იკავებს მას  $M$  ტვირთის მახლობლად. ხელსაწყო ისეთნაირად არის რეგულირებული, რომ სიმძიმის ძალის როგორც მომატება, ისე შეპცირება ბერკეტს ერთნაირად დაბლა ეწევა, მაგრამ ბერკეტი დამატებითი სუსტი ზამბარის შეწევათი მიიწევა განაგრძობს დაახლოებით ჰორიზონტულად დარჩენას.

ამრიგად. სიმძიმის ძალის შეცვლისას  $OA$  ბერკეტი ოდნე დაბლა დაიხრება და  $F$  ზამბარას დააგრძელებს. იმისათვის, რომ ზამბარას კვლავ დავუბრუნოთ პირენდელი სიგრძე და აღვადგინოთ დარღვეული წონასწორობა დრეკადობისა და სიმძიმის ძალებს შორის, საჭიროა  $O$  წერტილი სათანადოდ დაბლა დავწიოთ და გავზოპოთ  $BO$ -ს შესაბამისი დაკრძელება. ამაზეა სწორედ დამყარებული სიმძიმის ძალის შეფარდებითი სიდიდის განსაზღვრა ჰელიანდის გრავიმეტრის შემწეობით.

ნახ. 54 და 55-ზე სქემატურად ნაჩვენებია ჰელიანდის გრავიმეტრის დახარჩენი შემადგენელი ნაწილები:

$F$  არის „ნულოვანი სიგრძის“ ზამბარა;

$A$ —ალუმინის ბერკეტი  $M$  ტვირთით;

$G$ —ღრუ ცილინდრი, რომელიც მოთავსებულია ბერკეტის საწინააღმდეგო მხარეზე ბარომეტრიული კომპენსაციის მისაღწევად;

$EL'$ —ბერკეტის ბრუნვის ღერძი; რომელიც ერთმანეთთან აერთებს ბრტყელი  $ES$  და  $F'S'$  ზამბარების ბოლოებს; უკანასკნელთა აწევა-დაწევა ხდება სათანადოდ  $K$  და  $K'$  ზამბარების მოქერითა და მოშვებით;

$R$ — $g$ -ს გაზომვის დიაპაზონის რეგულატორი  $J$  ბერკეტის მეშვეობით; ხელსაწყო დიაპაზონი დაახლოებით 75 მილიგალს შეადგენს;

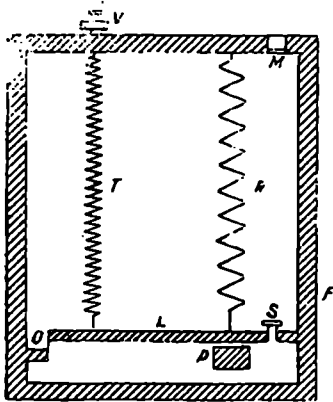
$H$ —ჰორიზონტულად დაქიმული ძაფი, რომელიც დამაგრებულია ბერკეტზე სპირალური  $F$  ზამბარის ბოლოსთან; მისი დანიშნულებაა კონტროლი გაწევის ბერკეტის მდებარეობას ოპტიკური მილის მხედველობის არეში სათანადო ანარეკლის მიხედვით  $P$  სკალაზე.

ჰელიანდის გრავიმეტრი ცილინდრული ფორმისაა, აღჭურვილია ელექტრული თერმოსტატით, იწონის დაახლოებით 16 კგ, მონტირებულია მსუბუქ ავტომანქანაზე, რაც ხელს უწყობს მის წარმადობას. ხელსაწყოთი დაკვირება მანქანიდანვე წარმოებს სამუხების მიწაზე დაშვების გზით. ხელსაწყო მანქანიდან გადმოტანის შემთხვევაში იგი იღვამის მიწაზე უსამუხებოდ ლითონის ბადროს შემწეობით. გრავიმეტრის სიზუსტე  $\pm 0.1$  მილიგალს შეადგენს, დაკვირვების დრო—5 წუთს.

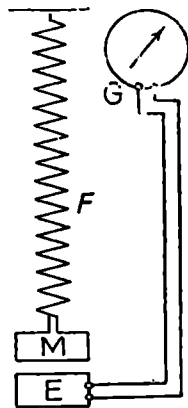
ნახ. 56, 57, 58, 59 და 60-ზე წარმოდგენილია სხვა უცხოელი ავტორების (პარტლეის, გრაფის, ლინდლანდ-მალმკვისტის, ისინგის და ტომაშეკ-შაფერნიხტის) გრავიმეტრების სქემები.

პარტლეის გრავიმეტრი (ნახ. 56) შედგება  $R$  ზამბარისაგან, რომელიც იკავებს  $P$  ტვირთსა და ჰორიზონტულ  $L$  ბერკეტს. ბერკეტი ბრუნავს  $O$  წერტილის გარშემო, აქვე მას იკავებს მეორე მეტად სუსტი  $T$  ზამბარა. ეს  $R$  და  $T$  ზამბარები ზედა ბოლოებით დამაგრებულია ხელსაწყოს  $F$  ჩარჩოზე.

*S* სარკე ემყარება ორ წვეროზე, ერთი მათგანი დამაგრებულია უძრავად ჩარჩოზე, ხოლო მეორე—მოძრავი ბერკეტის ბოლოზე. სინათლის სხივი ეცემა სარკეს და აქედან აირეკლება *M* სკალაზე. *P* ტვირთისა და *L* ბერკეტის წონის უმნიშვნელოდ შეცვლა გამოიწვევს სარკის მნიშვნელოვნად მოძრუნებას, რასაც თავის მხრივ მოყვება არეკლილი სხივის სკალაზე გადანაცვლება. მიკრომეტრული ხზარხნის შემწეობით შეცვლიან *T* ზამბარის დაკიმულობას და ამ გზით მიაღწევენ ანარეკლის შეთავსებას სკალის ნულბუნქთან. მიკრომეტრზე აღებული სათანადო ანათვლი შეადგენს სწორედ სიმძიმის ძალის შეფარდებითი სიდიდის საზომს.



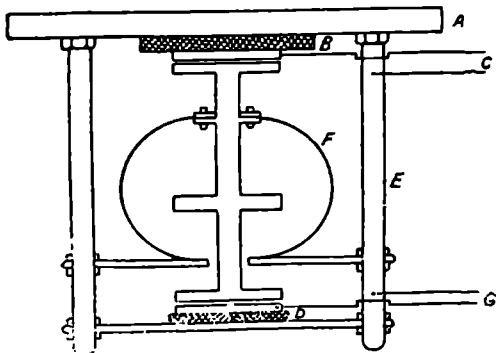
ნახ. 56.



ნახ. 57.

გრადუსის გრავიმეტრი (ნახ. 57) შედგება *F* ზამბარაზე თავისუფლად დაკიდებულ *M* ტვირთისაგან. ტვირთის ქვეშ მოთავსებულია ელექტროსტატიკური *E* კონდენსატორი.

*M*-სა და *E*-ს შორის მანძილის შეცვლით იცვლება კონდენსატორის ტევადობა, რაც *G* გალვანომეტრის შემწეობით იზომება. მგრძობიარე სისტემა მოთავსებულია გერამეტრულად დახურულ კურკელში მუდმივი წნევის ქვეშ. ტემპერატურის მუდმივობა მიღწეულია დაცული თერმოსტატის შემწეობით. ხელსაწყოს გაზომვის დიაპაზონი 1600 მილიგალს შეადგენს, იწონის 57 კგ, სიზუსტე  $\pm 0.1$  მილიგალია.



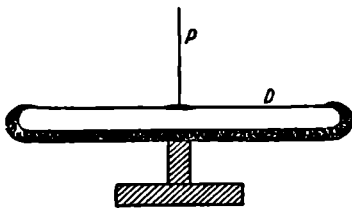
ნახ. 58.

ხელსაწყო გამართულია ავტომანქანაზე. დაკვირვების დრო (ხელსაწყოს დაშვება მანქანიდან შარაგზაზე, ნიველობა და ანათვლის აღება) 5 წუთს არ აღემატება. გრავიმეტრზე თვალსაჩინო გავლენას დედამიწის მაგნიტური ველი ახდენს, ამიტომ ზუსტი დაკვირვებების შემთხვევაში საჭირო ხდება სათანადო

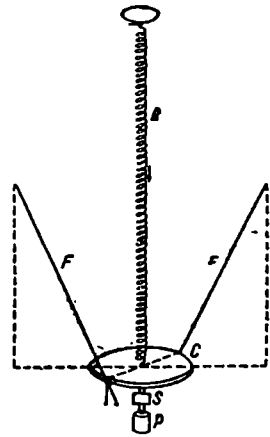
დო შესწორების გათვალისწინება. გრაფის გრაფიკურის უპირატესობა სხვა ხელსაწყოებთან შედარებით იმაშია, რომ მისი შემწობით შეიძლება ჩატარდეს არა მარტო სავსე დაკვირვებები ვიზუალური წესით, არამედ აგრეთვე სტაციონარული ხასიათის გაზომვები სიმძიმის ძალის პერიოდული ვარიაციისა მზისა და მთვარის მიზიდულობის გავლენით, რისთვისაც ხელსაწყოს სათანადო სარეგისტრაციო აპარატი გააჩნია.

ლინბლანდ-მალმკვისტის (ბოლიდენის ფირმის) გრაფიკური (ნახ. 58) პრინციპულად ისეთივე აგებულებისაა, როგორც გრაფის ხელსაწყო. გარკვეულ მასას იკავენს რკალისებური ორი ბრტყელი  $F'$  ზამბარა. მასის ზემოთ და ქვემოთ მიწყობილია  $B$  და  $D$  კონდენსატორები, რომელთა ფირფიტების ერთი წყვილი დამაგრებულია სათანადო იზოლატორებით ხელსაწყოს  $A$  ჩარჩოზე, ხოლო მეორე წყვილი—თვით მასაზე დამაგრებული. მანძილი კონდენსატორების ფირფიტებს შორის  $0,02$  მმ შეადგენს, სადაც ტვეადობა შეიძლება გაიზომოს  $0,0001$  მიკრონის სიზუსტით.

კონდენსატორებში პოტენციალის აღძვრა ბატარეის შემწობით ხდება. დატვირთვა მიმდინარეობს მანამდე, ვიდრე ზედა კონდენსატორი არ მიიღებს ტვეადობის მუდმივ მნიშვნელობას. პოტენციალის სიდიდე ამ ხელსაწყოში შეადგენს სიმძიმის ძალის საზომს. ხელსაწყოზე ათვლის მგრძობიარობა



ნახ. 59.



ნახ. 60.

შეადგენს  $0.1—0.05$  მილიგრამს. ბოლიდენის გრაფიკურში მიღწეულია ტემპერატურული კომპენსაცია. მაგრამ ამავე დროს მას თერმოსტატიც აქვს, რაც ტემპერატურის მუდმივობას გრადუსის ორი მეასედის ფარგლებში ინახავს. ხელსაწყოს წონა  $25$  კგ, სიზუსტე  $\pm 0.1—0.2$  მგლ, წარმადობა დღეში ავტომატურად მუშაობისას— $10—15$  პუნქტი.

ისინგის გრაფიკური (ნახ. 59) შედგება კვარცის წვრილი  $D$  ძაფისაგან, რომელთანაც ვერტიკალურად მიმაგრებულია  $P$  საქანი (სიგრძით  $2$  სმ და წონით დაახლოებით  $1$  მილიგრამი). საქანი თავის წონის გავლენით გადაიხრება ზედა მდებარეობიდან და გამოიწვევს ძაფის დაგრეხვას. ამ შემთხვევაში საქანის გადახრის კუთხე იქნება სიმძიმის ძალის საზომი. გადახრის კუთხეზე დაკვირვება ორივე მხარეზე წარმოებს, რაც ნულპუნქტის სელის გამორიცხვის

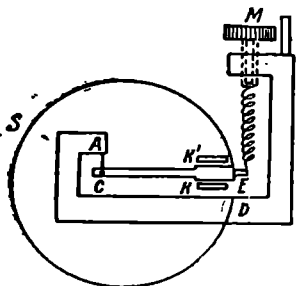
საშუალებას გვაძლევს. ტემპერატურული გავლენის თავიდან ასაცილებლად ხელსაწყო მოთავსებულია მდნობარე ყინულში, ხელსაწყოს წონა 30 კგ, სი-  
ზუსტე—0,5 მგლ რიგისაა.

ტომაშეკ-შაფერნიხტის ბიფილარული გრავიმეტრის (ნახ. 60) იდეა შემ-  
დეგში მდგომარეობს. აღებულია სპირალური  $R$  ზამბარა, რომლის ქვედა ბო-  
ლოზე დამაგრებულია  $P$  ტვირთი,  $S$  საოკე და  $C$  ბადრო. ბადროს ორ წერ-  
ტილში, რომლებიც დიამეტრალურად საწინააღმდეგო მხარეზეა განლაგებუ-  
ლი, დახრილად დამაგრებულია ორი  $FF'$  ძაფი. ზამბარა და ეს ძაფები ზედა  
ბოლოებით დამაგრებულია უძრავად. ზამბარის დაკვიმვას სიმძიმის ძალის  
შეცვლით თან სდევს ბადროსა და საოკის მობრუნება. მობრუნების კუთხე  
დამოკიდებულია ძაფების დახრისაგან. ეს კუთხე შეიძლება გავზარდოთ მნიშ-  
ვნელოვან სიდიდემდე და ამით ავამაღლოთ ხელსაწყოზე ათვლის სიზუსტე. ეს  
ხელსაწყო აკებული იყო სპეციალურად სიმძიმის ძალის იმ პერიოდული ვა-  
რიაციების შესასწავლად, რომლებიც მზისა და მთვარის მიზიდულობის გავ-  
ლენითაა გამოწვეული. ამ მიზნით იგი მოათავსეს სარდაფში 25 მ. სიღრმეზე,  
სადაც ტემპერატურის ცვლა დაკვირვებათა განმავლობაში არ აღემატებოდა  
გრადუსის 0.001-ს, ხელსაწყოს მგრძნობიარობა შეადგენდა 2 მმ—0.01 მგლ.

### § 6. მოლოდენსკისა და ლოზინსკიას გრავიმეტრები

პირველი საბჭოთა გრავიმეტრები მიხაილოვმა (1933 წ.) და მოლო-  
დენსკიმ ააგეს. მოლოდენსკის ხელსაწყო შედგება წარუღი ფორმის ელინგარის

ბრტყელი ზამბარისაგან. ცნობილია ასეთი  
გრავიმეტრის ორი მოდელი; ერთი ეკუთვნის  
მოლოდენსკის (1946 წ.), ხოლო მეორე—  
ლოზინსკიას (1950 წ.). მათი გრავიმეტრების  
მგრძნობიარე სისტემა წარმოადგენილია სქე-  
მატურად სათანადოდ ნახ. 61 და 62-ზე.



ნახ. 61.

მოლოდენსკის გრავიმეტრში (ნახ. 61)

$S$  ზამბარის ერთი  $E$  ბოლო იკავებს  $CE$   
ბერკეტს ტვირთის მხარეზე, ხოლო მეორე  
 $D$  ბოლო დამაგრებულია ხელსაწყოს ჩარჩო-  
ზე. მეორე ბოლოთი ბერკეტი დაკიდებულია  
ჩარჩოს  $A$  წერტილში ლითონის ორი ძაფით.  
ბერკეტის  $E$  ბოლო დაკავშირებულია მიკ-

რომეტრულ  $M$  ხრახნთან დამატებითი  $F$  ზამბარის შემწყობით. მიკრომეტ-  
რულს უწოდებენ ისეთ ხრახნს, რომლის თავზე ზუსტა გაზომვების მიზნით  
დანაყოფები ისეთნაირადაა დატანილი, რომ ხრახნის მობრუნება პროპორ-  
ციული იყოს მისი თავის მობრუნების კუთხისა.

ამ ხელსაწყოში ბერკეტის მიკროგადანაცვლებას, ზამბარის დრეკადი-  
თვისებების შეუცვლელობის შემთხვევაში, სიმძიმის ძალის შეცვლა განსაზ-  
ღვრავს. ამიტომ მიკროგადანაცვლება წარმოადგენს სიმძიმის ძალის შეფარ-  
დებით სიდიდის საზომს. გადანაცვლების გაზომვა წარმოებს ბერკეტის  
ტვირთის მდებარეობის მიკრომეტრული ხრახნის შემწყობით ათვლის გზით

ნათურიანი გენერატორის ზედა და ქვედა ( $K$  და  $K'$ ) კონდენსატორების მიმართ. თუ ვიცით მიკრომეტრული ხრახნის ერთი დანაყოფის ფასა მილიგალებში, მაშინ ორ წერტილში აღებული ანათვლების სხვაობის გამრავლება ამ ფასზე მოგვცემს მათ შორის სიმძიმის ძალის საძიებელ სხვაობას. ეს გრაფიკური საბოლოოდ დაამუშავეს ლოზინსკიამ და საეინამ (ნახ. 62).

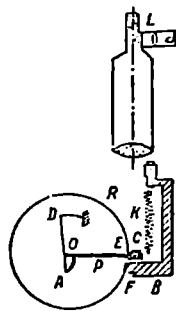
ხელსაწყოს აქვს ელექტრული თერმოსტატი, რომელიც ცილინდრული ფორმისა არის. თერმოსტატში ტემპერატურის მუდმივობის მისაღწევად მოწყობილია კონტაქტის თერმომეტრი, რომელიც წარმოადგენს ვერცხლისწყლის თერმომეტრს სათანადო კონტაქტებით. ეს კონტაქტები, თერმომეტრის ელექტროწრედში ჩართვისას, იწვევენ მის ჩაკეციან სწორედ მაშინ, როდესაც თერმოსტატში დამყარებულია საჭირო ტემპერატურა. ჩაკეტვისას ვერცხლისწყლის სვეტი შეეხება თერმომეტრის შიგნით სკალასთან მოთავსებულ ერთ გამტარს, ხოლო მეორე გამტარი თერმომეტრის რეზერვუარშია მოქცეული ქვემოდან.

ხელსაწყოს გააჩნია აგრეთვე ბარომეტრული კომპენსატორი და მაგნიტური ეკრანი. კომპენსატორი წარმოადგენს ლითონის ღრუ ცილინდრს, რომელიც მიმაგრებული აქვს ბერკეტს ტვირთის საწინააღმდეგო მხარეზე და იწვევს ატმოსფერული წნევის ცვლის კომპენსაციას. ეკრანი დამზადებულია მაღალი მაგნიტური შემთვისებლობის ლითონისაგან და გარს უფლის თერმოსტატს შიგნიდან სარტყლის სახით. იგი იცავს ხელსაწყოს დედამიწის მაგნიტური ველის გავლენისაგან განსაკუთრებით მაგნიტურად ანომალურ რაიონებში.

მოლოდენსკის გრაფიკური იწონის 25 კგ, გაზომის დიაპაზონი მცირე (80 მილიგალამდე) აქვს, სიზუსტე  $\pm 0.4 - 0.8$  მგლ, დაკვირვების ხანგრძლივობა 5—10 წუთი. დაკვირვებისას იღვმის მიწაზე ლითონის ბადროს მეშვეობით. ამ ხელსაწყოს ხშირად ეწოდება: მოლოდენსკის გრაფიკური წრიული.

ლოზინსკიას გრაფიკურში (ნახ. 62) გამოყენებულია ასტაზირების მოვლენა ათვლის სიზუსტის გაზრდის მიზნით. ასტაზირებისას ხელსაწყო ისე რეგულირებული, რომ მისი ბერკეტი არამდგრად მდგომარეობაშია და მიღწეულია მისი მნიშვნელოვანად გადასაცვლება წონის უმნიშვნელო შეცვლით. ასტაზირების მოვლენა გამოყენებულია აგრეთვე ვესსელოვი — ლუკაჟინკოს კვარციან გრაფიკურში, რომელიც კონსტრუქციით გოლიცინის ვერტიკალურ სეისმოგრაფს მოგვაგონებს და ხშირად ატარებს სახელწოდებას: კვარციანი გრაფიკური ასტაზირებული.

ლოზინსკიას გრაფიკური შედგება წრიული ფორმის ელინვარის ორი ბრტყელი ზამბარისაგან. ერთი მათგანი არის ძირითადი ( $R$ ), ხოლო მეორე განკუთვნილია ასტაზირებისათვის ( $DN$ ). ეს ზამბარები ერთი ბოლოთი დამაგრებულია ხელსაწყოს ჩარჩოზე  $F$  და  $N$  წერტილებში.  $OC$  ბერკეტი დაკავშირებულია როგორც ძირითად ზამბარასთან ( $E$  ბოლოთი), ისე აგრეთვე ასტაზირების ზამბარასთან ჯერ  $OA$  ღეროთი, ხოლო შემდეგ ასტაზირების



ნახ. 62.

AD ძაფით, რომელიც დამზადებულია აგრეთვე ელინვარისაგან. იქ, სადაც ასტაზირების ძაფი უკავშირდება ზამბარას, გამართულია ხელსაწყოს იუსტირების მოწყობილობა, რომელიც საშუალებას გვაძლევს ნებისმიერად ვცვალოთ ძაფის სიგრძე და ზამბარის დაქიშვლობა. მგრძნობიარე სისტემა მოთავსებულია ორმაგ ელექტრულ თერმოსტატში, რომელიც მუშაობს ტემპერატურაზე:  $-27^{\circ}$ ,  $+37^{\circ}$  და  $+47^{\circ}$  საკიროების მიხედვით.

ხელსაწყოს OC ბერკეტი ცილინდრული ფორმის არის, დამზადებულია ნადნობი კვარცისაგან და ზემოდან დაფარულია ლითონის ფენით. ბერკეტის ბრუნვის ღერძი O წერტილში გადის. მისი ტვირთის ადგილას მოწყობილია ორი, ერთი მეორის პარალელური, მოძრავი და უძრავი სარკე, რომელიც ოპტიკური ათვლის საშუალებას იძლევა (ამის ნაცვლად მოლოდენსკის ხელსაწყოში გამოყენებული იყო ნათურიანი გენერატორი). ტვირთის საწინააღმდეგო მხარეს ბერკეტზე მოთავსებულია ბარომეტრული კომპენსატორი.

გარდა ძირითადი და ასტაზირების ზამბარებისა, ხელსაწყოში მოქმედებს კიდევ ორი ზამბარა. ერთი მათგანი გამოყენებულია მიკრომეტრით ათვლისათვის, ხოლო მეორე—დიპაზონის რეგულირებისათვის. ლოზინსკაიას გრავიმეტრის გაზომვის სრული დიპაზონი 2500 მგლ შეადგენს. ეს გრავიმეტრი ცილინდრული ფორმისაა, იწონის 13 კგრ, სიზუსტე  $\pm 0.3$  მგლ შეადგენს, დაკვირვების დრო 2—3 წუთია; დაკვირვებისას იღგმის მიწაზე ლითონის ბადროს მეშვეობით. ამ ხელსაწყოს ხშირად ეწოდება: გრავიმეტრი წრიული ასტაზირებული. ფედინსკის წინადადებით ლოზინსკაია-საჟინას გრავიმეტრს იყენებენ აგრეთვე როგორც სპალლის მზომს, რისთვისაც მას სათანადო დრეკადი სისტემა ახლავს (გრავიმეტრი-სიმაღლისმზომი).

გრავიმეტრების კალიბრებისათვის გამოყენებული მეთოდებიდან ძირითადია ორი:

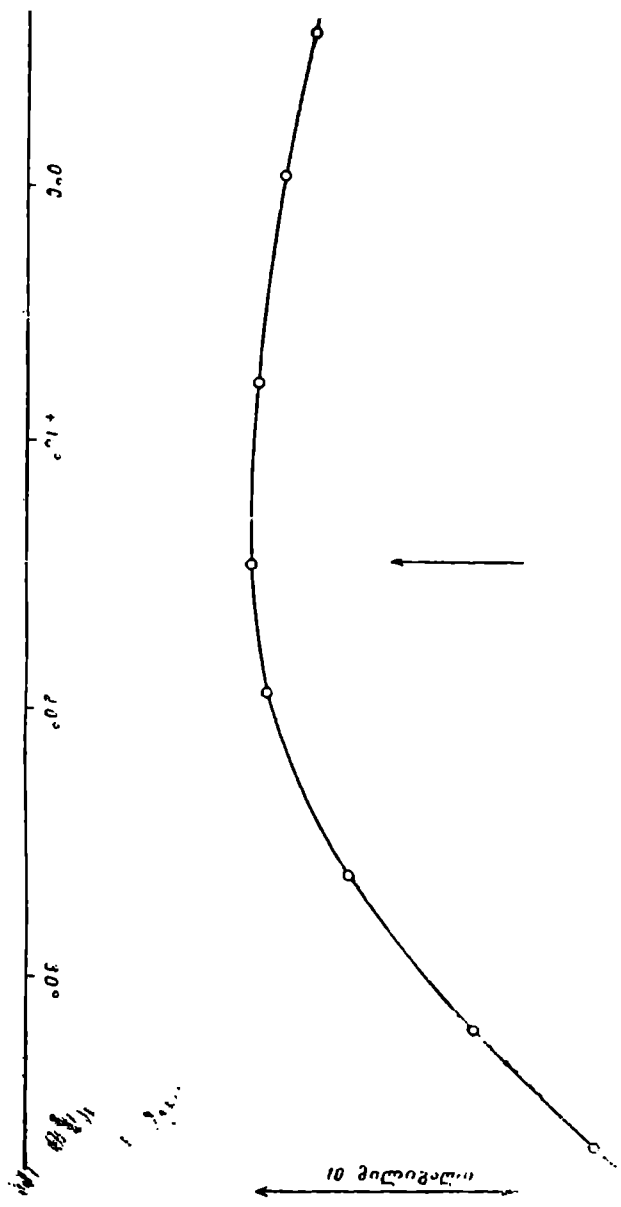
1. გრავიმეტრით გაზომვების მრავალგზის ჩატარება ორ სხვადასხვა პუნქტში, სადაც სიმძიმის ძალის აჩქარება წინასწარ განსაზღვრულია საქანებით საქმაოდ მაღალი სიზუსტით;

2. ზამბარიანი გრავიმეტრის დახრის კუთხის ცვლა ისეთ პუნქტზე, სადაც სიმძიმის ძალის აჩქარება განსაზღვრულია საქანებით და ცნობილია გარკვეული მიახლოებით; ამ შემთხვევაში შევეული მდებარეობიდან გრავიმეტრის  $\alpha$  კუთხით დახრა გამოიწვევს სიმძიმის ძალის შეცვლას შემდეგი სიდიდით:

$$\Delta g = g(1 - \cos \alpha) \approx \frac{g\alpha^2}{2} \quad (\text{IX.6})$$

რაც შეეხება თერმოსტატირების საკითხს, უნდა ითქვას, რომ ნუღმივი ტემპერატურის დამყარება გრავიმეტრის მგრძნობიარე სისტემის გარშემო, როგორც დავინახეთ, მეტად ძნელი საქმეა და სხვადასხვა ხელსაწყოში მიღწეულია იგი მდნობარე ყინულის, კომპენსაციის ან ელექტრული თერმოსტატის შემწეობით. ცალკეულ შემთხვევებში მეტი გარანტიის მიზნით იყენებენ კომპენსაციასა და თერმოსტატს ერთდროულად. მაგრამ გრავიმეტრიული გაზომვების ტემპერატურული გავლენისაგან სრული გათავისუფლება, განსაკუთრებით კი მუშაობის საველე პირობებში, ტექნიკურად ჯერ კიდევ მიუღწეველი რჩება. ამიტომ გრავიმეტრიული ავეგმვის დროს სამუშაო ხელსაწყოს სათანადო ტემპერატურული რეჟიმის დაცვას უდიდესი მნიშვნელობა ენიჭება.

58h. 53



ზემოგანხილული და აღწერილი სტატეკური მეთოდების ხელსაწყოებიდან მოლოდენსკი—ლოზინსკიას და „ვირგ“-ის (პოდუნნი, სასსონოვი, სეროვი) ზამბარიანი გრავიმეტრები ლომონოსოვის დიფერენციალურ ბარომეტრთან ერთად ჰქმნიან ჯდავო პრიორიტეტს რუსეთისა და საბჭოთა მეცნიერებისათვის გრავიმეტრების კონსტრუქციის დარგში.

### § 7. გრავიმეტრიული ძიების ძირითადი პირობები და მეთოდიკა

გრავიმეტრიული ძიების ძირითადი პირობები და მეთოდიკა სხვადასხვა სისტემის ხელსაწყოებისთვის თითქმის ერთნაირია და ამიტომ ამ საკითხებს ერთად განვიხილავთ.

ყველა გრავიმეტრისთვის საერთოა დაკვირვებათა ჩატარების შემდეგი მეთოდიკა:

1. სამუშაო სეზონის განმავლობაში სწველ დაკვირვებათა წინ და ბოლოს, როგორც წესი, აუცილებელია სამუშაო ხელსაწყოთა მუდმივების განსაზღვრა ლაბორატორულ პირობებში. ასეთი მუდმივები ოთხია: მიკრომეტრის ერთი დანაყოფის ფასი. ბარომეტრიული, ტემპერატურული და მაგნიტური კოეფიციენტები. ნულპუნქტის სკლა ხელსაწყოთა მუდმივთა რიცხვში არ წედის და ისაზღვრება რეგულარულად საველ დაკვირვებათა პროცესში. ნახ. 63-ზე წარმოდგენილია ტემპერატურული შესწორების მრუდი ნორგარდის კვარციანი გრავიმეტრისთვის.

2. ველზე დაკვირვების პუნქტის შერჩევა და სათანადოდ აღწერა ადვილი საქმე არ არის. დაკვირვების პუნქტი ადვილად მისადგომი და საპოვნი უნდა იყოს არა მარტო სეზონის, არამედ წლების გასვლის შემდეგაც. ამისათვის სასურველია გრავიმეტრიული პუნქტების შეთავსება გეოდეზიურ პუნქტებთან, საკილომეტრაჟო სვეტებთან, ნაგებობებთან ან ბუნებრივ ორიენტირებთან, რომ ადვილი იყოს გაზომვის ადგილის მიგნება. საჭიროა ჩატარდეს თვით პუნქტის აღწერა გეოლოგიურად და დეტალურად სათანადო ჩანახატების თანდართვით და აგრეთვე ტოპოგრაფიულ საფუძველზე მათი გეოდეზიური წესით დატანით. პუნქტი უნდა შეირჩეს ისეთნაირად, რომ ხელსაწყო დაცული იყოს მზის სხივების პირდაპირი გათბობისაგან, ქარისაგან, აგრეთვე მექანიკური დაზიანებისაგან, თუ ხელსაწყოს თან არ ახლავს სათანადო სათარი დაკვირვებისათვის.

3. დაკვირვება იწყება და მთავრდება ერთსა და იმავე საკონტროლო პუნქტში, ანდა რამდენიმე ასეთში ნულპუნქტის ზუსტად განსაზღვრის მიზნით დროის გარკვეული შუალედისათვის და დაკვირვების განმავლობაში ტემპერატურული თუ სხვა პირობების შეცვლის შემთხვევაში დაკვირვებას რეისის ან მარშრუტის განმავლობაში აწარმოებს ერთი და იგივე პირი, ხოლო მეორე პირი ემზადება პირველს დაკვირვების დროს და კარნახით აკეთებს სათანადო ჩანაწერებს საველე წიგნაკში.

4. დაკვირვების ადგილას ხელსაწყო იდგმის სამუხების ან ლითონის ბადროს შემწეობით, მისი ნიველოზის შემდეგ კი წარმოებს მგარძნობიარე სისტემის დეზარეტირება. ანათვალის აღება მიკრომეტრულ ხრახნზე რამდენიმე სერიად ხდება, ამავე დროს აღინიშნება შესაბამისი ტემპერატურა და დრო. ამას-



თან ერთად დაკვირვების წიგნაკში უნდა გარკვევით ჩაიწეროს ადგილის ზუსტი დასახელება, დაკვირვების თარიღი და დამკვირვებლის გვარი და სახელი. დაკვირვების წიგნაკი არის მუშაობის ძირითადი დოკუმენტი, ამიტომ ის პუნქტუალურად და თანმიმდევრულად უნდა შეივსოს და ინახებოდეს პასუხისმგებელ დამკვირვებელთან ყოველდღიური მუშაობის დამთავრების შემდეგ. წიგნაკში შენიშვნის სახით უნდა ჩაიწეროს სხვა ღირსშესანიშნავი მოვლენები, დაკავშირებული დაკვირვების პროცესთან.

5. დაკვირვების წიგნაკში შეტანილი ჩანაწერების წინასწარი დამუშავება და სათანადო გამოთვლები ველზევე იწყება და წარმოებს რეისისა და მარშრუტის მიქდინარეობის კვალდაკვალ. ამისთვის საჭიროა წინასწარ მომზადდეს სათანადო ცხრილები და გრაფიკები საველე პირობებში გამოთვლების გასაადვილებლად. საველე დაკვირვებების პარალელურად წინასწარი გამოთვლების წარმოება ჩატარებულ დაკვირვებათა ხარისხის კონტროლის საუკეთესო საშუალებაა. ამასთან მიმართავენ კონტროლის სხვა საშუალებებსაც, მაგალითად, დაკვირვებათა დუბლირებას სხედასხვა შტრიხით ნორგარდის გრაფიმეტრზე, შერჩეული საკონტროლო პუნქტების ხშირად გამეორებას და სხვ. გრაფიმეტრით ძიება სწრაფია და მარტივი, საქანიან ხელსაწყოსთან და გრაფიტაციულ ვარიომეტრთან შედარებით, ამასთან შედეგიც საკმაოდ მაღალი სიზუსტისა გამოდის. მაგრამ ეს იმას არ ნიშნავს, რომ გრაფიმეტრზე დაკვირვება შემთხვევით პირს და გამოუცდელ დამკვირვებელს მიენდოს. მტკიცედ უნდა გვახსოვდეს, რომ სტატიკური გრაფიმეტრი მეტად რთული ფიზიკური ხელსაწყოა, მოითხოვს ფაქიზად მოვლას და კვალიფიციურ დამკვირვებელს. წინააღმდეგ შემთხვევაში არ უნდა ვაგვიჯრადეს, თუ ხელსაწყო სულ მალე და შეუმჩნეველად მწყობრიდან გამოვა და მექანიკურადაც დაზიანდება, დაკვირვებები დაბალ ხარისხის აღმოჩნდება და გაწეული შრომა და ხარჯები უქმად ჩაივლის. გამოცდილებით დამტკიცებულია, რომ ზუსტი ხელსაწყო მხოლოდ გამოცდილი, დაინტერესებული და ფრთხილი დამკვირვებლის ხელში ეწყება სამსახურს ყოველგვარი მოულოდნელობის გარეშე და დიდ ხანსაც ძლებს დაუზიანებლად.

იმისათვის, რომ საველე პირობებში მივალწოთ გრაფიმეტრით დაკვირვებათა სიზუსტისა და წარმადობის მაქსიმუმს, საჭიროა მტკიცედ დავიცვათ მისი მოვლის, ტრანსპორტირებისა და გაქოყნების შეპღევი პირობები:

1. გრაფიმეტრი არ უნდა გაიხსნას ღია ცის ქვეშ, რადგან ამ დროს სულ ადვილად შეიძლება მგრძნობიარე სისტემის განრეგულირება, დამტვერიანება, მეტნაკლებად გათბობა და მექანიკური დაზიანებაც. ხელსაწყოს გახსნა, თუ ეს აუცილებელია საველე პირობებში, უნდა მიენდოს კვალიფიციურ დამკვირვებელს, საამისოდ შერჩეულ მყდრო შენობაში, და თანაც დაკულ იქნას საქარხნო ინსტრუქციის მითითებანი, თუმცა აქვე უნდა შევნიშნოთ, რომ ყოველთვის არც მათი ბრმად მიყოლია ივარგებს, განსაკუთრებით როცა საქმე ეხება უცხოეთში დამზადებულ გრაფიმეტრებს.

2. გრაფიმეტრის ტარება-ზიდვა მცირე მანძილზე უნდა მიენდოს სათანადოდ ინსტრუქტირებულ და გამოცდილ მუშას, რომელიც მარჯვეა და გამ-

ძლე ველზე მუშაობაში. თუ ხელსაწყოთა გადატანა ხდება შორ მანძილზე ავტომატიკით, მატარებლით, გემით ან თვითმფრინავით, მაშინ საჭიროა მისთვის სათანადო მყუდრო ადგილის გამონახვა და იქ სათანადოდ მოწყობა, რომ იგი დაცულ იქნას მექანიკური ბიძგებისაგან.

3. ერთგვაროვნების დაცვა გრავიმეტრით დაკვირვების მეთოდითაა უველა საველე პუნქტისათვის რეისის, მარშრუტის ან მთელი აგეგმვის განმავლობაში ამოცანებისა და მიზანდასახულების შესაბამისად. ერთგვაროვნების დაცვა, პირველ რიგში, შეეხება ნულპუნქტის სელის განსაზღვრას. ნულპუნქტის ცვალებადობა, როგორც უდიდესი ნაკლი მეტ-ნაკლებად ყველა გრავიმეტრს ახასიათებს. მისი სიდიდე მექანიკური ბიძგებით, ტემპერატურული პირობების სწრაფი ცვლით და დროის ფაქტორით განისაზღვრება. ამის გამო საჭიროა გრავიმეტრიულ პუნქტებს შორის თანაბარი მანძილისა და დროის დაცვა, დაკვირვებათა წარმოება ერთნაირი ტემპერატურისა და პირობების დროს, აგრეთვე ძველი განსაზღვრების გამეორება, რაც ხშირად უხეში შეცდომების აღმოჩენისა და გამოსწორების საშუალებას გვაძლევს.

ამა თუ იმ რაიონის გრავიმეტრიული აგეგმვა, როგორც წესი, ცალკე ან სხვა გეოფიზიკურ გამოკვლევებთან ერთად კომპლექსში მიმდინარეობს. ორივე შემთხვევაში აუცილებელია წინასწარ ან პარალელურად ჩატარდეს გეოლოგიური, გეოდეზიური და დენსიტომეტრიული საძუშაოები, რომ ამით მოპოვებულ იქნას სათანადო მონაცემები აგეგმვის შედეგების შენდგომი დამუშავებისა და გეოლოგიურ-გეოდეზიური და გეოფიზიკური გამოყენების მიზნით. ეს მონაცემებია: აგეგმვის რაიონის ნამდვილი ან სავარაუდოდ სტრატოგრაფიული ქირილი და გეოლოგიური რუკა, დაკვირვების პუნქტების განედი, სიგრძედი და სიმაღლე ზღვის დონიდან, აგრეთვე რაიონში გავრცელებული ქანების სიმკვრივეთა მასობრივი განსაზღვრები ბუნებრივი გაშიშვლებებისა და კაბურღვილების საკერნე მასალის მიხედვით. გეოლოგიური და გეოდეზიური საძუშაოები, როგორც ცნობილია, სპეციალური ხასიათისაა და მათი მონაცემები, როგორც მზამზარეული, უნდა მიიღოს და გამოიყენოს თავის მიზნებისთვის გრავიმეტრიამ. რაც შეეხება დენსიტომეტრიულ განსაზღვრებს, ისინი მეტწილად დაკავშირებულია გრავიმეტრიულ ძიებასთან და განსაკუთრებულ სირთულესაც არ შეადგენენ, ამის გამო მათ აქვე ცალკე განვიხილავთ X თავში.

## თ ა ვ ი X

### ძანების სიმკვრივე

#### § 1. დენსიტომეტრიის ამოცანები

✓ მიწის ქერქი, როგორც ცნობილია, შედგება ქანებისაგან. დედამიწის ზედაპირზე და მის წიაღში სხვადასხვა სიღრმეზე გვხვდება ამონოხეული, დანალექი და მეტამორფიული ქანები, აგრეთვე სასარგებლო ნამარხები, ნაფთობი, ქვანახშირი, ქვამარილი, სხვა არალითონიანი და ლითონიანი მადნები. ეს ქანები და მადნები თავის მხრივ შედგებიან მინერალებისაგან, ხოლო მინერალები—ქიმიური ელემენტებისაგან. ✓

✓ ქანები და მინერალები ნივთიერებას შეიცავენ მეტ-ნაკლებად სამივე ფიზიკურ მდგომარეობაში: მყარ, თხიერ და გაზურ ფაზაში. ამიტომ მათი სიმკვრივისა და სხვა ფიზიკური თვისებების განსაზღვრა ადვილი საქმე არ არის და დაკავშირებულია სპეციალური მეთოდებისა და ხელსაწყოების გამოყენებასთან. ✓

✓ სიმკვრივე არის მასა, მოქცეული მოცულობის ერთეულში და ხასიათდება განზომილებით გრ/სმ<sup>3</sup>. ქანის ბუნებრივი სიმკვრივე არის მისი მყარი, თხიერი და გაზური ფაზების მასის შეფარდება მათ შეჯამებულ მოცულობასთან. ასეთ სიმკვრივეს სხვანაირად ბუნებრივ მოცულობით წონას ან უბრალოდ მოცულობით წონასაც უწოდებენ. ✓

სიმკვრივისაგან განსხვავებით, ქანის ხვედრითი წონა ეწოდება მისი მყარი ფაზის მასისა და მოცულობის ერთმანეთთან შეფარდებას. ამ სიდადეს სხვანაირად მინერალოგიურ ხვედრით წონას უწოდებენ.

✓ ქანების სიმკვრივისა და ~~ხვედრითი წონის~~ განზომილების საჭიროა განისაზღვროს აგრეთვე ფორიანობა და ტენიანობა. ქანის ფორიანობა არის თხიერი და გაზური ფაზების მოცულობის შეფარდება ყველა ფაზის მოცულობასთან. ტენიანობა ეწოდება ქანს ფორებში მოქცეულ წყალს პროცენტებში. არჩევენ ტენიანობის მოცულობითსა და წონითს კოეფიციენტებს, აგრეთვე სამთო ტენიანობას, რომელიც ახასიათებს ამა თუ იმ ქანს მისი მდებარეობის ბუნებრივ პირობებში. ✓

✓ ქანების სიმკვრივე, ხვედრითი წონა, ფორიანობა და ტენიანობა დიდ ფარგლებში იცვლება და ეს ცვლა დამოკიდებულია გეოლოგიური ფაქტორებისაგან. ✓ ამ ფაქტორებს შორის მთავარია: ქანის ქიმიურ-მინერალოგიური

შემადგენლობა, გენეზისი და წოლის პირობები, აგრეთვე ქანების მეტამორფიზმისა და გამოფიტვის ხარისხი და სხვა.

მიწის ზედაპირზე და მის წიაღში ქანების სიმკვრივეთა განაწილების შესწავლას ემსახურება გეოფიზიკის სპეციალური დარგი, რომელიც დენსიტომეტრიის სახელითაა ცნობილი და მკიდროდ არის დაკავშირებული გრავიმეტრიასთან (densitas ლათინური სიტყვაა და ნიშნავს სიმკვრივეს) ქანებისა და მადნების სიმკვრივეთა ცოდნას გამოყენება აქვს გეოლოგიასა და გრავიმეტრიაში. ქანებისა და მადნების სიმკვრივეთა საფუძველზე გეოლოგია არაკვევს მიწის ქერქის მეტამორფიზმისა და ტექტონიკური მოძრაობის ინტენსივობას ამა თუ იმ რაიონში, საძიებო საქმე კი იყენებს ამ ნონაცემებს და ავგებარებს სამთო სამუშაოებს, ანგარიშობს სასარგებლო ნამარხთა მარაგს მიწის წიაღში და სხვა.

დენსიტომეტრიული მონაცემების გარეშე გრავიმეტრიას არ შეუძლია ჩაატაროს სარედუქციო შესწორებათა გამოთვლა და სიმძიმის ძალის ანომალიების გეოლოგიური ინტერპრეტაცია, რადგან გეოლოგიური აგებულება გამოხატულებას პოულობს გრავიტაციულ ველში ქანების სიმკვრივეთა მუშევრებით. ეს მონაცემები აუცილებელია აგრეთვე იმის წინასწარ გასარკვევად, თუ რამდენად ეფექტური შეიძლება იყოს გრავიმეტრიული მეთოდებით ძიება ამა თუ იმ ობიექტზე. არ შეიძლება ერთ რაიონში დადგენილი ქანების სიმკვრივეთა გადატანა და გავრცელება სხვა, თუნდაც მეზობელ რაიონზე.

ამ მიზნებისა და ამოცანებისთვის საკმარისი არ არის ქანებისა და მადნების სიმკვრივეთა თითოერთობა, შემთხვევითი და სპორადული ხასიათის განსაზღვრები, არამედ საჭიროა მათი მასობრივად და სისტემატურად შესწავლა ამა თუ იმ რაიონში. ამიტომ გეოლოგიურ-საძიებო, საინჟინრო და ჰიდრო-გეოლოგიურ, გრავიმეტრიულ სამუშაოთა კომპლექსში დენსიტომეტრიულ განსაზღვრებს ახლა საპატიო ადგილი უკავიათ. ადრე კი ქანების სიმკვრივეთა და სხვა ფიზიკური თვისებების შესწავლას გადააწყვეტ ხანუგელობას არ ანიჭებდნენ. დენსიტომეტრიული განსაზღვრები წინ უსწრებენ გრავიმეტრიულ დაკვირვებებს ან, როგორც წესი, მათთან ერთად მიმდინარეობენ. გრავიმეტრიული მიზნებისთვის საესებით საკმარისია ამ განსაზღვრებებში მიღწეულ და დიდი იქნას სიზუსტე 1%-ს ფარგლებში. ქანების სიმკვრივეთა სისტემატური შესწავლა საბჭოთა კავშირში გრავიმეტრიულ დაკვირვებებთან დაკავშირებით 1931 წელს დაიწყო და პირველად დონეკის აუზში ჩატარდა (სამსონოვი, დონაბელოვი). ანალოგიური გამოკვლევები საქართველოში დაიწყო 1946 წელს (აბაკელია, ბალაძე) და დღესაც გრძელდება, უფრო ადრე კი სპორადული განსაზღვრები იყო ჩატარებული გრავიმეტრიული ძიების მიზნით.

## § 2 ქანის ნიმუშის აღება და სიმკვრივის განსაზღვრის მეთოდების ზოგადი დახასიათება

ქანის სიმკვრივისა და ხედიერთი წონის განსაზღვრის მრავალი მეთოდი და ხერხი არსებობს, მათ შორის ძირითადია:

1. წონისა და მოცულობის განსაზღვრა უშუალოდ;

2. წონის უშუალოდ განსაზღვრა, ხოლო მოცულობასა—ნიმუშის ჩაძირვით წყალში ან სხვა რომელიმე სითხეში;

3. პიკნომეტრიული ხერხი;

↳ 4. თეორიული გამოთვლის ხერხი მინერალოგიური შემადგენლობის საფუძველზე;

5. ნიმუშის აწონვა ჰაერში და წყალში ან სხვა სითხეში (ჰიდროსტატიკური აწონვის მეთოდი);

↳ 6. გრავიმეტრიული მეთოდი;

7. ვოლუმომეტრიული მეთოდი;

• 8. გრავიტომეტრიული მეთოდი;

• 9. დენსიტომეტრიული მეთოდი.

ეს მეთოდები ხასიათდებიან ქანების სიმკვრივეთა განსაზღვრის სხვადასხვა სიზუსტით ერთეულის მეთადიდან მეოთხე ნიშნამდე, ხოლო გრავიმეტრიის მიზნებისთვის კი, როგორც ზემოთ ვთქვით, სავსებით საკმარისია სიზუსტე მეორე ნიშნამდე.

ჩამოთვლილი მეთოდებიდან ქანების სიმკვრივის განსაზღვრის გრავიმეტრიული მეთოდია მხოლოდ დაკავშირებული საველე გაზომვებთან გრავიტაციული ვარიომეტრით ან სტატიკური გრავიმეტრით, და ამიტომ ის არ მოითხოვს ნიმუშების აღებას ბუნებრივი გაშიშვლებიდან ან ჰაბურღვილიდან. ასევე ნიმუშების აღებას არ საჭიროებს სიმკვრივის თეორიული გამოთვლის ხერხი. დანარჩენი მეთოდებით განსაზღვრები წარმოებს სხვადასხვა ზომისა და წონის ნიმუშებზე უმთავრესად ლაბორატორიულ პირობებში.

ქანის ნიმუშის აღება გარკვეული წესით ხდება. ნიმუშების აღება მიზანშეწონილია წინასწარ გეოლოგიურად შესწავლილ და დამახასიათებელ ქრილზე, სამთო გამონამუშევარში ან ჰაბურღვილში, თუ ასეთი მოიპოვება საკვლევ რაიონში. არ არის გამორიცხული აგრეთვე აღრე დაგროვილი კოლექციისა და საკერნე მასალის გამოყენება დენსიტომეტრიული მიზნით. ნიმუშების აღება და დახასიათება წარმოებს გეოლოგის მიერ, ხოლო მათი ფიზიკური თვისებების შესწავლა—ფიზიკოსის ან გეოფიზიკოსის მიერ.

ქანის ნიმუშის დახასიათებისას აღნიშნული უნდა იყოს შემდეგი მონაცემები: ქანის დასახელება, მისი ალების ადგილი და დრო, სტრატეგრაფიული დონე, ცნობები მინერალოგიური და ქიმიური ანალიზის შესახებ, ცხადია, თუ ეს ანალიზი გეოლოგიური აგეგმვისა და ძიების დროს ყოფილა ჩატარებული.

ნიმუშის ბუნებრივი ტენიანობის შენარჩუნების მიზნით საჭიროა მისი დამრგვალება და გამდნარ პარაფინში ამოვლება რამდენიმეჯერ, რომ დაფარულ და დაცულ იქნას იგი წყალგაუვალი საკმაოდ სქელი გარსით. გაშიშვლებიდან ნიმუშის აღებისას საჭიროა წინასწარ მოვაშოროთ გამოფიტული ზედაპირული შრე. ჰაბურღვილიდან აღებული კერნის ნიმუში ატარებს ბურღვის ინსტრუმენტისა და ხსნარის ზეგავლენას, რაც დაახლოებით 15%-ით ცვლის მის ფორიანობასა და ტენიანობას. ამის გამო მიზანშეწონილია გაშიშვლებიდან და ჰაბურღვილიდან აღებული ქანის ნიმუშის მაშინვე დამუშავება და მისი სიმკვრივისა და სხვა ფიზიკური თვისებების განსაზღვრა, მაგრამ ეს მეთდილად ასე როდი ხდება. ამიტომ ჩატარებული განსაზღვრები ყოველთვის

მიახლოებით წარმოდგენას გვაძლევენ სიმკვრივეთა განაწილების შესახებ. ქანების სიმკვრივეთა განსაზღვრების მიხედვით სათანადო ცხრილების შედგენისას ნაჩვენებები უნდა იყოს მიღებული სიდიდეების მაქსიმალური, მინიმალური და საშუალო მნიშვნელობანი, აგრეთვე განსაზღვრის რიცხვი, მეთოდი და დამკვირვებელი.

სხვადასხვა მეთოდები მოითხოვენ. სხვადასხვა წონისა და ზომის ნიმუშებს, ჩვეულებრივ მათი წონა იცვლება 50—250 გრ ფარგლებში, თუმცა ცალკეულ შემთხვევებში შესაძლოა ნიმუში უფრო მცირე ან უფრო დიდი იყოს.

აქ ჩამოთვლილი მეთოდებიდან 1<sup>4</sup>/<sub>6</sub>-მდე სიზუსტის ფარგლებში მასობრივი განსაზღვრების სწრაფაა და მარტივად ჩატარების საშუალებას საველე და ლაბორატორიულ პირობებში იძლევა დენსიტომეტრი, რომელიც საბჭოთა გეოფიზიკოსმა სამსონოვმა 1945 წელს ააგო. ეს ხელსაწყო შედარებით დიდი წარმადობით ხასიათდება და მრავალი უპირატესობით სარგებლობს. ამიტომ მას ფართო გამოყენება აქვს ჩვენში გრავიმეტრიული და დენსიტომეტრიული დაკვირვებების დროს.

### § 3. ჰიდროსტატიკური აწონვის მეთოდი

ქანის ნიმუშის სიმკვრივის განსაზღვრა ჰიდროსტატიკური აწონვის მეთოდით მოითხოვს ნიმუშის აწონვას ჯერ ჰაერში და შემდეგ წყალში. აწონვა წარწობს ანალიტიკურ ან ტექნიკურ სასწორზე. აწონვისას საჭიროა ხელთ გვექონდეს განდნარი სუფთა პარაფინი და გამოხდილი წყალი. თუ ნიმუში ფორიანია, მაშინ საჭიროა მისი წინასწარ ამოვლება განდნარ პარაფინში. ნიმუში წონით დაახლოებით 25—50 გრამს შეადგენს და წინასწარ დამრგვალებასაც მოითხოვს, რომ ამით შემცირდეს პარაფინის ხარჯი და მიღწეულ იქნას პარაფინის გარსის თანაბრად გადაკერა ნიმუშის მთელ ზედაპირზე. საჭიროა აგრეთვე წინასწარ განსაზღვროთ და ვიცოდეთ გამოყენებული პარაფინის სიმკვრივე. ამ მეთოდს შტუფურს უწოდებენ. შტუფურ მეთოდს მიეკუთვნება აგრეთვე სიმკვრივის განსაზღვრები გრავიტომეტრითა და დენსიტომეტრით, რაზედაც ქვემოთ იქნება თქმული.

ნიმუშის აწონვა ჰიდროსტატიკური მეთოდის დროს შემდეგი თანმიმდევრობით წარმოებს: ჯერ აწონით ნიმუშს ჰაერში და მის  $P_1$  წონას ჩაწერთ სათანადოდ ეტრნალში, შემდეგ ამოვავლებთ მას პარაფინში და ხელმეორედ აწონით ჰაერში; მიღებული წონა აღენიშნოთ  $P_2$ . სხვაობა  $P_2 - P_1$  შეადგენს პარაფინის წონას, რომელიც ჩვეულებრივ არ აღემატება 2—3 გრამს. ამის შემდეგ პარაფინირებულ ნიმუშს აწონით წყალში და მივიღებთ  $P_3$  წონას. ამ სამი წონისა და პარაფინის სიმკვრივის ( $\sigma_p$ ) შემწეობით გამოვითვლით ქანის ნიმუშის  $\sigma$  სიმკვრივეს შემდეგი ფორმულით:

$$\sigma = \frac{P_1}{P_2 - P_3 - \frac{P_2 - P_1}{\sigma_p}} \quad (X.1)$$

თუ პარაფინირება არ არის აუცილებელი, მაშინ  $P_2 = P_1$  და (X.1) ფორ-  
მულა მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\sigma = \frac{P}{P_1 - P_3} \quad \boxed{(X.2)}$$

მინერალოგიური სიმკვრივის განსაზღვრისას იყენებენ პიკნომეტრს და  
ასეთ მეთოდს—პიკნომეტრიულს უწოდებენ. აღებულ ნიმუშს წინასწარ გამო-  
აშრობენ და აქცევენ ფხვნილად. ამ შემთხვევაში უნდა ვიცოდეთ შემდეგი  
ოთხი წონა:  $m_1$ —გამოხდილი წყლით სავსე პიკნომეტრის წონა,  $m_2$ —პიკნო-  
მეტრის წონა წყლის მოკლების შემდეგ,  $m_3$ —პიკნომეტრის წონა ნაკლები  
წყლით და ნიმუშის გამომშრალი ფხვნილით და  $m_4$ —წყლით გავსებული პიკ-  
ნომეტრის წონა ფხვნილით. ამ წონების საფუძველზე ნიმუშის  $\sigma$  სიმკვრივე  
გამოითვლება ფორმულით:

$$\sigma = \frac{\sigma_1(m_3 - m_1)}{m_1 + m_3 - m_2 - m_4}, \quad \boxed{(X.3)}$$

სადაც  $\sigma_1$  არის სითხის, ამ შემთხვევაში გამოხდილი წყლის, სიმკვრივე. სიმ-  
კვრივის ერთი განსაზღვრა ამ მეთოდით მოითხოვს დაახლოებით 1 საათს.

#### § 4. სიმკვრივის გაზომვა ვოლუმომეტრითა და სხვა მეთოდებით

ქანებისა და მინერალების სიმკვრივის განსაზღვრის მიზნით 1940 წელს  
უკლონსკიმ გამოიყენა საკუთარი კონსტრუქციის  
წყლიანი (ნახ. 64) და ვერცხლისწყლიანი (ნახ. 65,  
66) ვოლუმომეტრები.

წყლიანი ვოლუმომეტრი (ნახ. 64) შედგება  
ნიმუშისთვის განკუთვნილი კიქისაგან, მოცულო-  
ბით 200 ან 100 სმ<sup>3</sup> და ბიურეტკისაგან. ნიმუშის  
კიქა შეერთებულია ბიურეტკასთან წყლის გადა-  
სახმელი მილით. ბიურეტკა შეიძლება იყოს მო-  
ცულობით 100 სმ<sup>3</sup> ან 50 სმ<sup>3</sup>; ამის მიხედვით მი-  
ვიღებთ სათანადოდ დიდსა და მცირე ვოლუმო-  
მეტრს. გასაზომი ნიმუშის მოცულობა არ უნდა  
აღემატებოდეს აღნიშნულ სიდიდეებს, წინააღ-  
მდეგ შემთხვევაში უნდა ვისარგებლოთ უშუალოდ  
შესაბამი მოცულობის მენზურით.

ნიმუში წინასწარ უნდა ავუონოთ და მისი  
წონა ჩავწეროთ სათანადო ჟურნალში. შემდეგ  
ზედა კიქაში ჩავასხათ წყალი, რომლის ნაწილი  
თავისთავად გადმოისხმება ბიურეტკაში. ბიურეტკი-  
დან წყლის ნაწილი შეიძლება გადმოვასხათ ქვედა  
კიქაში დონის დაწვევის მიზნით. ამის შემდეგ  
ავითვლით წყლის დონეს და ნიმუშს ჩაუშვებთ

ზედა კიქაში, საიდანაც ახლა ბიურეტკაში გადმოისხმება ნიმუშის მოცულო-

ბის მქონე წყალი, რაც ბიურეტკაზე აითვლება. ნიმუშის წონის შეფარდება მის მოცულობასთან მოგვეცემს საძიებელ სიმკვრივეს. აღებული ნიმუში არ უნდა იხსნებოდეს წყალში. თუ იგი ფორიანია, მაშინ უნდა გაიფიქნოს წყლით აწონვის შემდეგ. სიმკვრივის ერთი განსაზღვრა მოითხოვს 15—20 წუთს.

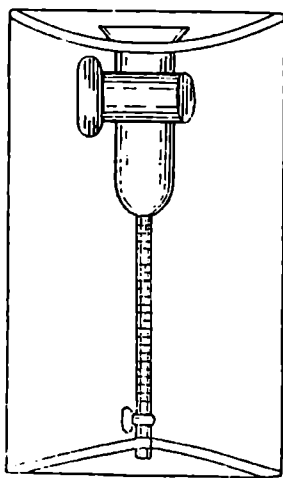
ვერცხლისწყლიანი ვოლუმომეტრი განკუთვნილია მეტად მცირე ზომის, მოცულობით 1—5 სმ<sup>3</sup>, ნიმუშებისთვის (ნახ. 65) და ქვიშის, შლიხის ან ფხენილისთვის (ნახ. 66). იგი შედგება შეერთებული ორი სხვადასხვა დიამეტრის მქონე მინის მილისაგან. დიდი დიამეტრის მილში თავსდება ნიმუში, ხოლო მცირე დიამეტრის მქონე დანაყოფებიანი მილით წარმოებს ათვლა. დიდი დიამეტრის მილი თავდება ძაბრით. ორივე მილის ბოლოებში მოწყობილია ონკანები.

გაზომვის წინ ხელსაწყოს გადმოაბრუნებენ საზომი მილით ქვევით, გადაკეტავენ რა წინასწარ მის ონკანს, ხოლო გახსნიან დიდი მილის ონკანს და ჩაასხამენ მასში სუფთა ვერცხლისწყალს. ჩასხმისას მხედველობაში უნდა გვექონდეს ის გარემოება, რომ საჭირო იქნება ნიმუშის მოთავსება ხელსაწყოში. დაკეტავენ დიდი მილის ონკანს, ხელსაწყოს გადმოაბრუნებენ და გახსნიან მცირე მილის ონკანს. შეანჯღრევენ ვერცხლისწყალს ჰაერისაგან მისი განთავისუფლების მიზნით. ამის შემდეგ დაიმახსოვრებენ ანათვალს საზომ მილზე. დაკეტავენ მცირე მილის ონკანს, გადმოაბრუნებენ ხელსაწყოს, გახსნიან დიდი მილის ონკანს და მილში მოათავსებენ წინასწარ უკვე აწონილ ნიმუშს, რომლის ზომები მეტი უნდა იყოს საზომი მილის დიამეტრზე (ნახ. 65). ხელახლა გადმოაბრუნებენ ხელსაწყოს აღნიშნული წესით და აიღებენ ანათვალს. მეორე და პირველი ანათვალის სხვაობა იძლევა ნიმუშის მოცულობას, ხოლო მასთან შეფარდებული წონა წარმოადგენს სიმკვრივის საძიებელ სიდიდეს. გაზომვები მოხრილ მილიან ვოლუმომეტრით ანალოგიურადვე ხდება (ნახ. 66). ერთი განსაზღვრა საჭიროებს 30—40 წუთს.

უკლონსკის აზრით, ვერცხლისწყლიანი ვოლუმომეტრი უმჯობესია პიკნომეტრზე და ზედმეტს ხდის მძიმე სითხეების გამოყენებას ქანების სიმკვრივისა და ხვედრითი წონის განსაზღვრის მიზნით ლაბორატორიულ პირობებში. აღებული ნიმუში არ უნდა იხსნებოდეს ვერცხლისწყალში.

ნიდაღისა და ფხვიერი ქანების სიმკვრივის საველე პირობებში განსაზღვრის მიზნით ხშირად შემდეგ მეთოდებს იყენებენ.

აკეთებენ ქანში წესიერი გეომეტრიული ფორმის, მაგალითად, პარალელოპიპედის ამონაჭერს და მისი მოცულობის გასაგებად გაზომავენ / სიგრძეს,  $a$  სი-



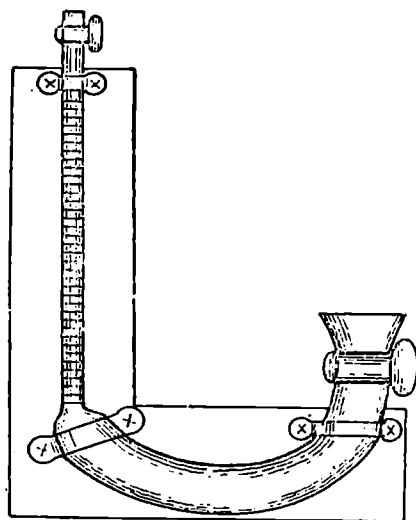
ნახ. 65.



განეს და  $h$  სიღრმეს. გამოღებული ქანის  $p$  წონა შეფარდებული მის მკვ უ-  
ლობასთან გვაძლევს საძიებელ სიმკვრივეს შემდეგი ფორმულის მიხედვით:

$$\sigma = \frac{p}{l \cdot a \cdot h} \quad \text{IX.4}$$

ეს ხერხი გამოიყენება აგრეთვე მადნის სიმკვრივის განსაზღვრისთვის  
საბადოს დასინჯვის დროს. ამ მეთოდში საჭიროა დავიცვათ შესაბამისობა  
წონისა და სიგრძის ერთეულებს შორის, სახელდობრ: 1 გრ—1 სმ, 1 კგ—  
—1 ღმ და ასე შემდეგ. ეს მეთოდი ცნობილია აგრეთვე საერთო სინჯის მე-  
თოდის (метод взаимных мер) სახელწოდებით.



ნახ. 66.

თუ ქანი ისე ფხვიერია, რომ  
მასში გამონაქერის გაკეთება კედ-  
ლების ჩამოცვენას იწვევს, მაშინ  
აიღებენ ცნობილი  $V$  მოცულობის  
ცილინდრული ფორმის რკინის  
ქურქელს, რომელსაც ერთი ბო-  
ლო ღია და მახვილპირიანი აქვს,  
ხოლო მეორე—დახურული და  
ნახვრეტებიანი ჰაერისათვის. ასე-  
თი ცილინდრით ნიჟუშის აღება  
წარმოებს ქანში მისი ჩაღრმავე-  
ბის გზით. ამის შემდეგ ქანი ცი-  
ლინდრთან ერთად უნდა ამოიქ-  
რას და აიწონოს. ვთქვათ  $P_1$   
არის ცილინდრის წონა ქანით,  
ხოლო  $P_2$  უქანოდ, მაშინ საძიებ-  
ელი სიმკვრივე ( $\sigma$ ) გამოითვლე-  
ბა ფორმულით:

$$\sigma = \frac{P_1 - P_2}{V} \quad \text{IX.5}$$

ერთი განსაზღვრა ამ მეთოდებით რამდენიმე საათს მოითხოვს.

### § 5. სიმკვრივის განსაზღვრა გრავიმეტრიული მეთოდით

გრავიმეტრიული მეთოდით ქანის სიმკვრივის განსაზღვრა არ არის და-  
კავშირებული ნიჟუშის აღებასთან, მაგრამ მოითხოვს მეტად შრომატევადი  
საველე დაკვირვებებისა და რთული გამოთვლების ჩატარებას. სამუშაო ხელ-  
საწყობდ იყენებენ როგორც გრავიტაციულ ვარიომეტრს, ისე სტატიკურ გრა-  
ვიმეტრსაც. რაც შეეხება შედეგს, უნდა ითქვას, რომ გრავიმეტრიული მეთო-  
დით განსაზღვრული სიმკვრივე შეადგენს სწორედ ყველაზე უფრო ნამდვილ  
სიდიდეს, რადგან ქანები ბუნებრივი წოლის პირობებში რჩებიან.

გრაფიტაციული ვარიომეტრით ქანის სიმკვრივე შეიძლება განისაზღვროს როგორც ხელოვნური, ისე აგრეთვე ბუნებრივი ღრმულის შემთხვევისათვის. ასეთ ღრმულად იყენებენ არსებულ შურფს ან ქას, ანდა კიდევ მიმართავენ მის გაქრას. ამრიგად, ეს მეთოდი უქანასქნელ შემთხვევაში დაკავშირებულია სამთო სამუშაოების ჩატარებასთან, რაც მეთოდს უფრო მეტად შრომატევადს ხდის. განვიხილოთ ეს ორი შემთხვევა ცალ-ცალკე.

ვარიომეტრით დაკვირვებისთვის სათანადო აღვილის შერჩევისა, დაკვირვებათა რამდენიმე წერტილში ჩატარებისა და ამ წერტილების ადგილზე დატანის შემდეგ, გათხრიან ღრმა შურფს და ამოღებულ ქანს გადაიტანენ შორს, რომ ამის შემდეგ გაიმეორონ დაკვირვებები იმავე წერტილებში. თუ გვინდა ვარიომეტრის შემუშობით ქანის სიმკვრივის ( $\sigma = 2.0$ ) განსაზღვრა  $0.05$  სიზუსტით, როცა გამოყენებულია ოთხ წერტილში ჩატარებული დაკვირვებები, მაშინ შურფით გამოწვეული ანომალია დაახლოებით  $40-50$  ეტვეშს უნდა შეადგენდეს. ამ შემთხვევაში სიმკვრივის გამოთვლა შემდეგი ფორმულით წარმოებს:

$$\sigma = \frac{G_2 - G_1}{G_0}, \quad \text{X.6.1}$$

სადაც  $G_1$  და  $G_2$  არის გრადიენტის ან სიმრუდის სიდიდე რომელიმე წერტილში შესაბამისად შურფის გათხრამდე და გათხრის შემდეგ, ხოლო  $G_0$  არის შურფიდან ამოღებული ქანის გავლენა, როცა მისი სიმკვრივე ერთის ტოლადაა მიჩნეული.

არსებული ღრმულის გამოყენებისას თავს იჩენს ახალი დამბკოლება, სახელდობრ, გეოლოგიური აგებულებისა და ღრმულის გავლენათა დანაწევრების სიძნელე. თუ ვარიომეტრით დაკვირვება ჩატარებულია ღრმულის ახლოს, ორ წერტილში, ინსტრუმენტის ორ სხვადასხვა სიმაღლეზე ისეთნაირად, რომ შეიძლებოდეს აღნიშნული დამბკოლების დაძლევა, ე. ი. გეოლოგიური აგებულების გავლენის უგულებელყოფა, მაშინ სიმკვრივე გამოითვლება ფორმულით:

$$\sigma = \frac{G'' - G'}{G'_1 - G'_2}, \quad \text{X.7}$$

სადაც  $G'$  და  $G''$  აღნიშნავს გრადიენტის ან სიმრუდის სიდიდეს შესაბამისად პირველსა და მეორე წერტილში, ხოლო  $G_0$  იგივეა, რაც (X.6) ში.

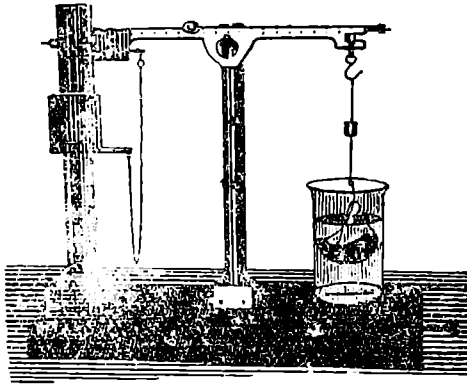
ეს მეთოდები იმდენად შრომატევადი, შედარებით უხეში და რთული აღმოჩნდა, რომ მათ აღარ იყენებენ დენსიტომეტრიული მიზნით.

სამაგიეროდ XX საუკუნის 40-იან წლებში დაიწყო ქანების სიმკვრივეთა შესწავლა სტატიკური გრაფიმეტრების შემუშობით. ამ მიზნით აირჩევენ უსწორმასწორო რელიეფზე გამავალ პროფილს, სიგრძით  $1-2$  კმ, და ატარებენ დაკვირვებებს შერჩეულ წერტილებში ყოველ  $100-200$  მ-ზე. ამავე მიზნით აწარმოებენ დაკვირვებებს ციკაბო კარნიზის ქვედა და ზედა წერტილებში. დაკვირვებების დამუშავება ქანის სიმკვრივის გამოთვლის მიზნით, პროფილის ან კარნიზის მიხედვით, ხდება სპეციალური წესით უსასრულო

ბრტყელი შუალედი შრის ფორმულის საფუძველზე. ქანის სიმკვრივის განსაზღვრა ვრავიმეტრიული მეთოდით საჭიროებს ოანდენიმე დღის მუშაობას ჯერ ველზე, ხოლო შემდეგ — დაკვირვებათა შრომატევადი გაზომვების დროს.

### § 6. ვრავიტომეტრიული მეთოდი

ამ მეთოდის სამუშაო ხელსაწყო (ნახ. 67) წარმოადგენს ვრავიტომეტრი, რომელიც აგებულია ძეწკვის ტიპის ანალიტიკური სასწორის პრინციპზე.



ნახ. 67.

იგი შედგება დაკბილული ბერკეტისაგან დანაყოფებით. ბერკეტზე თავსდება მოძრავი ტვირთი. ბერკეტის მარცხენა ბოლო ძეწკვის შემწეობით დაკავშირებულია ინდექსთან, რომელსაც შეუძლია გადაადგილება ვერტიკალურად ლითონის ლარტყაზე დანაყოფებით. ბერკეტის მგორე ბოლოზე წარმოებს ნიმუშის დაკიდება მინის სპეციალური საკილით, რომელიც საშუალებას გვაძლევს ჩავატაროთ აწონვა სათანადო თანმიმდევრობით ჰაერსა და წყალში.

ქანის ნიმუშის სიმკვრივის განსაზღვრისთვის საჭიროა ჩატარდეს მინის საკიდის ოთხგზის აწონვა და აღებულ იქნას ამდენივე ( $R_1, R_2, R_3, R_4$ ) ანათვალის სათანადო წესით აწონვისას:

- $R_1$ —ჰაერში,
- $R_2$ —ნიმუშით ჰაერში,
- $R_3$ —წყალში,
- $R_4$ —ნიმუშით წყალში.

წონები  $\frac{R_1 - R_2}{10}$  და  $\frac{R_3 - R_4}{10}$  შეადგენენ ნიმუშის წონებს სათანადოდ ჰაერსა და წყალში.

აღებულ ანათვალთა სხვაობების ერთმანეთთან შეფარდება გვაძლევს საძიებელ სიმკვრივეს შემდეგი ფორმულის მიხედვით:

$$\sigma = \frac{R_1 - R_2}{(R_1 - R_2) - (R_3 - R_4)} \quad (X.8)$$

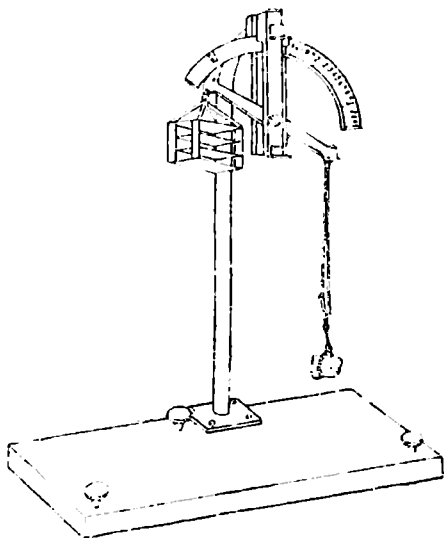
თუ აღებული ქანის ნიმუში იხსნება წყალში, მაშინ შეიძლება გამოვიყენოთ სხვა სითხე. ნიმუშის წონა ჩვეულებრივ 10—15 გრამს შეადგენს. ვრავიტომეტრიული მეთოდი ზუსტია, გვაძლევს ქანის ნიმუშის სიმკვრივეს მეთოთხე ნიშნამდე, მაგრამ, როგორც ვხედავთ, დაკავშირებულია ოთხგზის

დამოუკიდებელ აწონვასთან და საკმაოდ რთულ გამოთვლებთან. ამიტომ ეს მეთოდი უფრო საკონტროლოდ თუ გამოდგება, თორემ მასობრივი განსაზღვრებისთვის მეტად შრომატევადია. ერთი ნიმუშის სიმკვრივის განსაზღვრასთან დაკავშირებული აწონვები და გამოთვლები დაახლოებით 1 საათს საჭიროებს.

### § 7. დენსიტომეტრიული მეთოდი

ამ მეთოდის საფუძვალზე ხელსაწყოს დენსიტომეტრი წარმოადგენს. ეს ხელსაწყო ააგო ლენინგრადელმა გეოფიზიკოსმა სამსონოვმა 1945 წელს. იგი განკუთვნილია ქანების სიმკვრივეთა მასობრივი განსაზღვრებისთვის ბუნებრივი გაშიშვლებებიდან და კაბურღვილის საკერნე მასალიდან აღებულ ნიმუშებზე, რომელთა სიმკვრივე იცვლება 1.5—3.5 თარგლებში. გასაზომი ნიმუშის წონა შეადგენს დაახლოებით 100—200 გრამს. თუ ნიმუში ფორიანია, მაშინ, წყალში ჩაძვების წინ, მიმართავენ მის პარაფინირებას.

სამსონოვის დენსიტომეტრი (ნახ. 68) წარმოადგენს სპეციალური კონსტრუქციის სასწორს, რომელსაც გააჩნია ბერკეტი და დანაყოფებიანი რკალი. ბერკეტის ერთი ბოლო სათანადო ინდექსით განკუთვნილია სიმკვრივის სიდიდის უშუალო ათვლისთვის იმ მომენტში, როცა ბერკეტის მეორე ბოლოზე გასანთლული ძაფით ანუ „ლესკით“ დაკიდებული ნიმუში ჩაძირულია წყლიან ქიქაში. ხელსაწყოს გრადუირება დამაზადებელ ქარხანაშია ჩატარებული, ხოლო მისი რეგულირება და დაყენება ხდება გაზომვების წინ, სათანადო ინსტრუქციის მიხედვით. გაზომვები ტარდება როგორც ბუნებრივი ტენიანობის მქონე, ისე ხელოვნურად გამომშრალი ნიმუშებისთვის. გაზომვის სიზუსტე 0.01—0.02 შეადგენს.



ნახ. 68.

სამსონოვის დენსიტომეტრით ქანის სიმკვრივის განსაზღვრა დაკავშირებულია მხოლოდ ერთხელ აწონვასთან და სრულიად არ მოითხოვს გამოთვლებს. მის შემწეობით სიმკვრივის ათვლა უშუალოდ წარმოებს. გაზომვის მთელი ოპერაცია გრძელდება მხოლოდ 3—5 წუთს.

ქანების სიმკვრივეთა განსაზღვრის მეთოდებისა და ხელსაწყოების (ჰიდროსტატიკური აწონვა, გრავიტომეტრი, დენსიტომეტრი) შედარებითი შესწავლა და პარალელურად მათი გამოყენება იმას მოწოდებს, რომ სამსონოვის

დენსიტომეტრი მთელი რიგი უპირატესობით, როგორცაა პორტატულობა, დიდი წარმადობა, გაზომვის სიზუსტე, გამოთვლების ზედმეტობა, სარგებლობს დანარჩენ ხელსაწყოებთან და მეთოდებთან შედარებით. იგი წარმოადგენს შესანიშნავ ხელსაწყო სიმკვრივეთა მასობრივი განსაზღვრებისთვის და ამიტომ ფართოდაც არის გამოყენებული გრაიმეტრიული და დენსიტომეტრიული გამოკვლევების წარმოების დროს საბჭოთა კავშირის სხვადასხვა რაიონში.

### § 8. „ხვედრითი წონის თეორიული გამოთვლის“ მეთოდი

ზემოთ ჩვენ გავეცანით ქანისა და მადნის სიმკვრივისა და ხვედრითი წონის განსაზღვრის ძირითად მეთოდებსა და მათ სახესხვაობებს. ეს მეთოდებია: მთლიანი სინჯების მეთოდი, შტუფური და პიკნომეტრიული მეთოდები. პირველი მეთოდი გვაძლევს სიმკვრივის უფრო ნაკლებ სიდიდეს, ვიდრე მეორე, და მეორე კიდევ უფრო ნაკლებს, ვიდრე მესამე მეთოდი. ეს იმის გამო, რომ ფორიანობისა და ნაპარალიანობის გავლენა პირველად დიდია, შემდეგ უფრო ნაკლები და ბოლოს სრულიად ჰქრება. ამასთან პიკნომეტრიული ხვედრითი წონა შესაბამება ქანის ან მადნის აბსოლუტურად მკვრივ მდგომარეობას, რასაც ბუნებაში არ აქვს ადგილი.

გარდა ამ მეთოდებისა, ცნობილია კიდევ ხვედრითი წონის თეორიული გამოთვლის მეთოდი ქანის ან მადნის მინერალოგიური შემადგენლობის მიხედვით. ამ შემთხვევაში ხდება ქიმიური შემადგენლობის გადათვლა მინერალოგიურზე და შემდეგ ცალკეული მინერალების შეფარდებით: შემადგენლობისა და მათი ხვედრითი წონის საფუძველზე ქანის ან მადნის საშუალო მინერალოგიური ხვედრითი წონის გამოთვლა ფორიანობისა და ნაპარალიანობის გათვალისწინებლად. შესაბამ გამოსათვლელ ფორმულას აქვს შემდეგი სახე:

$$\sigma_{\text{საშ.}} = \frac{100}{\frac{v_1}{\sigma_1} + \frac{v_2}{\sigma_2} + \dots + \frac{v_n}{\sigma_n}}, \quad (\text{X.9})$$

სადაც  $\sigma$  საშ. არის საშუალო მინერალოგიური ხვედრითი წონა,  $v_1, v_2, \dots, v_n$  — ცალკეული მინერალების პროცენტული შემადგენლობა მადანში ან ქანში, ხოლო  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$  — ამავე მინერალების ხვედრითი წონები.

ამ ფორმულით გამოთვლის შედეგები თეორიულად უნდა ემთხვეოდეს პიკნომეტრულ განსაზღვრებს, მაგრამ პრაქტიკულად ეს ასე არ არის, რადგან ადგილი აქვს ცდომილებებს როგორც პიკნომეტრიული მეთოდით განსაზღვრის, ისე ქიმიური ანალიზის დროს. ამასთან ეს თეორიული და პიკნომეტრიული განსაზღვრები დიდ განსხვავებას იჩენენ საერთო სინჯის მეთოდისაგან, რადგან მათში არაა გათვალისწინებული ფორიანობისა და ნაპარალიანობის გავლენა. ამ გავლენის გათვალისწინებას იძლევა ლენინგრადელი მეცნიერი სოლოვიოვი (1935 წ.) მის მიერ მოწოდებულ მეთოდში „თეორიული ხვედრითი წონის“ შესახებ, რომელსაც იგი გამოითვლის მშრალი მადნისთვის შემდეგი ფორმულის მიხედვით:

$$\sigma_{\text{თოვ.}} = \frac{(100-P)\sigma_{\text{საშ.}}}{100 + P(\sigma_{\text{საშ.}} - 1)}, \quad (\text{X.10})$$

სადაც  $\sigma$  საშ. არის მინერალოგიური ან პიკნომეტრული ხვედრითი წონა, ხოლო  $P$ —წყლის (water) პროცენტული შემადგენლობა მადანსა თუ ქანში.

ამ ფორმულის სისწორის დასამტკიცებლად სოლოვიოვი შემდეგნაირად მსჯელობს: ავიღოთ ტენიანი მადნის 100 წონითი ნაწილი გრამებში. მაშინ 100 გრ მადანში  $P\%$  წყლის არსებობისას გვექნება: მყარი ფაზის წონა  $(100-P)$  გრ და წყლის წონა  $P$  გრ. წყლის მოცულობა უდრის  $\frac{P}{1} = P$ , ხოლო მყარი ფაზის მასა, მოქცეული 100 გრ მადანში, იქნება  $100-P$ .

აქედან ტენიანი მადნის თეორიული ხვედრითი წონა უდრის:

$$100 : \left( \frac{100-P}{\sigma_{\text{საშ.}}} + P \right). \quad (\text{X.11})$$

იმისთვის, რომ გადავიდეთ ტენიანი მადნის ხვედრითი წონიდან მშრალი მადნის ხვედრით წონაზე, როგორც ცნობილია, საჭიროა პირველი გავამრავლოთ შემდეგ სიდიდეზე:

$$\frac{100-P}{100} - P,$$

სადაც  $P$  არის წყლის პროცენტული შემადგენლობა მადანში.

ამ ფორმულით გამოთვლილი ხვედრითი წონა ახლოს დგას მთლიანი სინჯის მეთოდით განსაზღვრული ხვედრითი წონის ნამდვილ სიდიდესთან. ამიტომ სოლოვიოვი იძლევა ამ შრომატევადი და რთული მეთოდის შემდეგმ გაუმჯობესებას, რათა მიიღწიოს სამთო გამონამუშევარში ნამდვილი ხვედრითი წონის განსაზღვრას.

მოწოდებული მეთოდის მთავარი ოპერაციებია:

- 1) მადნის ფორებისა და სიცარიელეთა ხელოვნურად წყლით გაჯერება მისი სანგრევეში დასველებით;
- 2) წყლით გაჯერებული მადნის ადგილზე ლარული სინჯის (ნიჟიანობაჟაჟ პირიჟა) აღება, საიდანაც ორი ნაწილი გამოიყოფა: ერთი—სინჯი წყლიანობაზე და მეორე—სინჯი ხვედრითი წონის განსაზღვრაზე პიკნომეტრული ხერხით;
- 3) მშრალი მადნის თეორიული ხვედრითი წონის გამოთვლა (X.10) ფორმულით.

სოლოვიოვის ამ მეთოდს მნიშვნელობა აქვს უმთავრესად საძიებო საქმეში საბადოების მარაგის გამოთვლის დროს, მაგრამ მისი შედეგები შეიძლება გამოყენებულ იქნას აგრეთვე გრავიმეტრული მეთოდებით ძიების შემთხვევაშიც.

§ 9. შრენარის ხაშუალო ხიმკრივის გამოთვლის წეხი და ხიმკრივეთა განაწილება მიწის ქერქის ზედა ფენებში

სტრატეგრაფიული ერთეულის ლითოლოგიური შემადგენლობა ერთგვაროვანი არ არის და ფაქციალურად იცვლება ჰორიზონტული და ვერტიკალური მიმართულებით. გარდა ამისა იგი ყოველთვის ისეთ შრენარს წარმოადგენს,

რომელშიაც მორიგეობენ სხვადასხვა სისქის კირქვების, თიხების, ქვიშაქვებისა და სხვა დანალექი ქანების შრეები. არც ამონთხეული და მეტამორფული ქანებისაგან აგებული გეოლოგიური სხეულები იჩენენ ბუნებაში ერთგვაროვან შემადგენლობას და განიცდიან ფაქიალურ ცვლას სხვადასხვა მიმართულებით. ამასთან დაკავშირებით ბუნებრივია დაისვას კითხვა სტრატиграფიული ერთეულებისა და გეოლოგიური სხეულების საშუალო სიმკვრივის გამოთვლის წესის შესახებ, რადგან გრავიმეტრიას ყოველთვის საქმე აქვს გარკვეული გეოლოგიური აგებულების მქონე ტოპოგრაფიულ და სილრმისეულ მასებთან.

მას შემდეგ, რაც ჩატარებულია ამა თუ იმ რაიონში გავრცელებული ქანების სიმკვრივეთა მასობრივი განსაზღვრები, საქიროა შევედგეთ ცალკეული სტრატиграფიული ერთეულებისა და გეოლოგიური სხეულების საშუალო სიმკვრივეთა გამოთვლას. ამისთვის კი აუცილებელია დენსიტომეტრიული მონაცემების გვერდით ვიცოდეთ რაიონის გეოლოგიური აგებულება, სტრატиграფიული ერთეულების ნორმალური სიმძლავრე და ლითოლოგიური შემადგენლობა ცალკეული კომპონენტების მონაწილეობით პროცენტებში, რასაც რაიონის გეოლოგიური შესწავლა გვაძლევს.

✓ შრენარის საშუალო სიმკვრივე გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

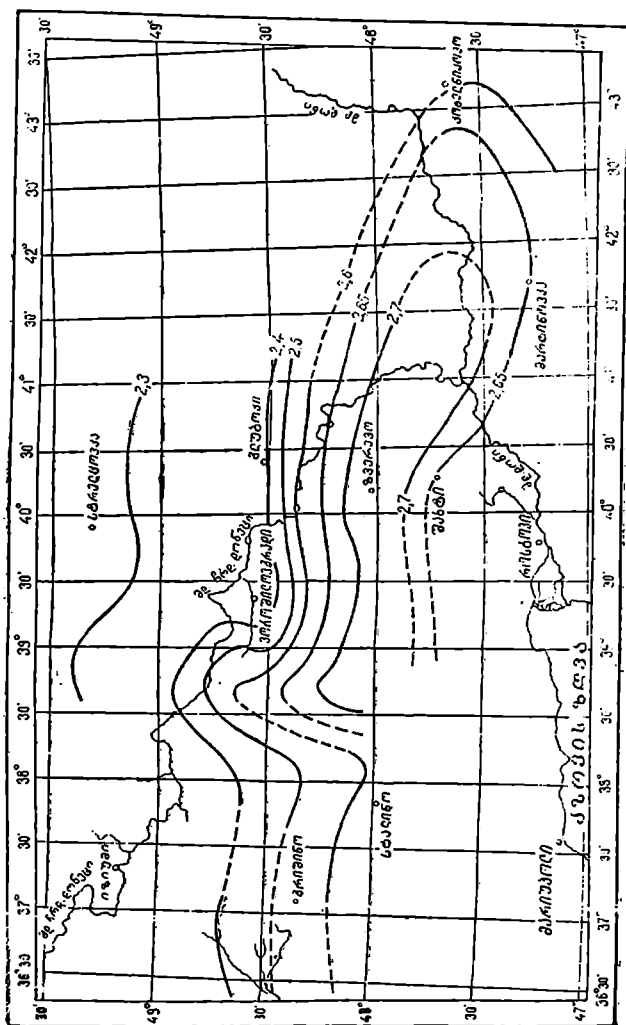
$$\sigma_{\text{შ.ა.}} = \frac{\sum \sigma_i h_i}{\sum h_i}, \quad (X.12)$$

სადაც  $\sigma_i$  არის ცალკეული შრის შემადგენელი ქანის სიმკვრივე, ხოლო  $h_i$ —მისი სიმძლავრე. ✓

✓ ერთი და იგივე შრენარისთვის ამ ან სხვა წესით გამოთვლილ საშუალო სიმკვრივეთა სიდიდეების დატანა ტოპოგრაფიულ საფუძველზე სხვადასხვა წერტილში და ერთნაირი სიდიდეების მქონე წერტილების ერთმანეთთან მრუდი ხაზით შეერთება გვაძლევს სიმკვრივეთა განაწილების რუკას. ✓ მაგალითისათვის ერთი ასეთი რუკა, შედგენილი დონეის აუზის კარბონული ნალექებისთვის, წარმოდგენილია ნახ. 69-ზე (დონაბედოვის მიხედვით).

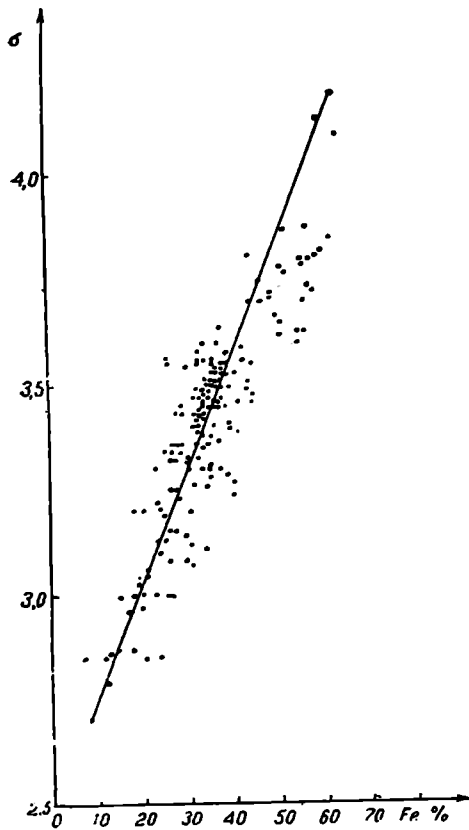
ამ რუკიდან კარგად ჩანს კარბონული ნალექების საშუალო სიმკვრივის ცვლის რეგიონული ხასიათი. დონეის აუზის ცენტრულ ნაწილში იგი მაქსიმალურია (უდრის 2,7), ხოლო პერიფერიებისაკენ მცირდება გარკვეული კანონზომიერებით და ჩრდილოეთით 2,3-ის ტოლი ხდება. საშუალო სიმკვრივის ასეთი განაწილების მთავარი მიზეზი უნდა ექციათ კარბონული ნალექების მეტამორფიზმში, რომელიც გამოწვეულია დანაოქებით.

საზოგადოდ გამორკვეულია, რომ ქანის სიმკვრივის სიდიდეს ძირითადად სამი ფაქტორი განსაზღვრავს: 1) ქიმიურ-მინერალოგიური შემადგენლობა, 2. ფორიანობა და 3. ტენიანობა. ამ თვალსაზრისით ქიმიურ-მინერალოგიური შემადგენლობა გადამწყვეტ როლს ასრულებს ამონთხეულ ქანებში, ხოლო ფორიანობა და ტენიანობა—დანალექსა და მეტამორფულ ქანებში. ქანის სტრუქტურული თავისებურებანი, აგრეთვე წარმოშობისა და წოლის გეოლოგიური პირობები ერთნაირად ანგარიშ გასაწევი და ნნიშენლოვანი სიმკვრივეთა განაწილების ასახსნელად მიწის ქერქის ზედა ფენებში. მეაეე და ფუძე მაგმის ამონთხეული ქანების სიმკვრივეთა დამოკიდებულება ქიმიურ-მინერალოგიური შემადგენლობისაგან მოცემულია აქ მოთავსებულ ცხრილში (რეიხის მიხედვით):





სიღრმის ქანები და მათი სიმკვრივე	ვეფუხიური ქანები და მათი სიმკვრივე		
	ძველი	ახალგაზრდა	ვულკანური მინა
1	2	3	4
გრანიტი—2,65	კვარცხორფირი—2,63	რიოლითი—2,50	მინებრივი რიოლითი—2,26
გაბრო—3,00	დიაბაზი—2,95	ბაზალტი—2,90	მინებრივი ბაზალტი—2,81



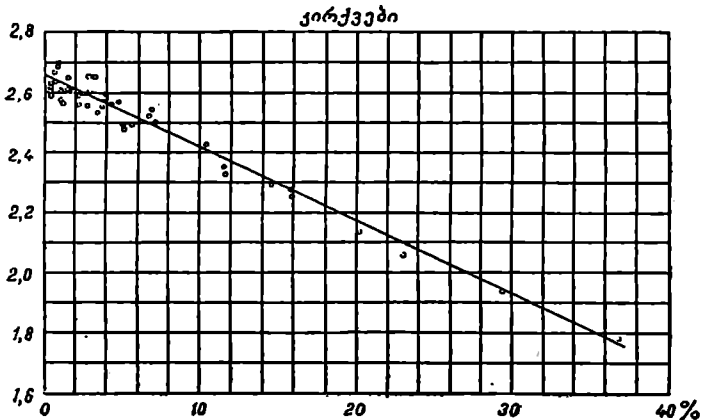
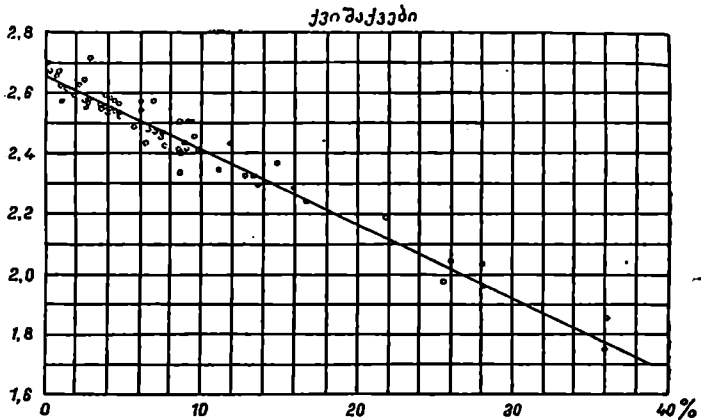
ნახ. 70.

კურსკის მაგნიტური ანომალიის რკინის მადნების, კვარციტებისა და ფიქლების სიმკვრივეთა დამოკიდებულება რკინის შემცველობისაგან მოცემულია ნახ. 70-ზე (ანდრეევის მიხედვით). დანალექი ქანების, კვიშაქვებისა და კირქვების, სიმკვრივის დამოკიდებულება ფორიანობისაგან მოცემულია ნახ. 71-ზე (ნესტეროვის მიხედვით).

მიწის ზედაპირზე ხმელეთს უკავია 29,2%, ხოლო ზღვას—70,8%. ხმელეთის საშუალო სიმაღლე შეადგენს 840 მ, ხოლო ზღვის საშუალო სიღრმე—3800 მ. ზღვის წყლის სიმკვრივე 1,03 უდრის, ხოლო მიწის ქერქის ზედა ფენების, დაახლოებით 16 კმ სიღრმემდე, საშუალო სიმკვრივე 2,67 ტოლად არის მიღებული. ამ მონაცემებისა და (X.12) ფორმულის საფუძველზე შეგვიძლია გამოვთვალოთ ხმელეთ-ზღვის საშუალო სიმკვრივე შემდეგნაირად:

$$\sigma = \frac{2,67 \times (840 + 3800) \times 0,292 + 1,03 \times 3800 \times 0,708}{4640 \times 0,292 + 3800 \times 0,708} = 1,579 \quad (X.13)$$

ხმელეთ-ზღვის საშუალო სიმკვრივის გამოთვლის აქ ნაჩვენები წესის ანალოგიურად შეიძლება ვიანგარიშოთ საშუალო სიმკვრივე მიწის ქერქის ნებისმიერი რაიონისთვის, თუ ხელთ გვაქვს გეოლოგიურ-ლითოლოგიური რუკა, რუკაზე წარმოდგენილი ქანების სიმკვრივე და სისქე, აგრეთვე მათი გავრცელების ფართობი და უკანასკნელის საშუალო სიმაღლე. ასეთი წესით



ნახ. 71.

გამოთვლილ საშუალო სიმკვრივეებს მიწის ქერქის ზედა ფენების (2.67), ხმელეთი-ზღვისა (1,579) და ცალკეული რაიონებისთვის დიდი მნიშვნელობა და გამოყენება აქვთ გრაფიმეტრიული დაკვირვებების დამუშავებისა და გეოლოგიური ინტერპრეტაციის დროს. მონაცემები სიმკვრივეთა განაწილების შესახებ ცალკეულ რაიონებში თავმოყრილია ქვემოთ მოთავსებულ ცხრილებში.

სიმკვრივითა განაწილება ღონეცის ქვანახშირის აუზში

გეოლოგიური ასაკი	ქანი	საშუალო სიმკვრივე	ნიმუშის აღების ადგილი
1	2	3	4
1. მესამეული	თიხები, ქვიშაქვები	$\left\{ \begin{array}{l} 1,3-1,7 \\ 1,6-2,0 \end{array} \right.$	ჩრდილოეთი პერიფერაა აღმოსავლეთი და დასავლეთი პერიფ.
2. ცარცული		$\left\{ \begin{array}{l} 1,5-1,7 \\ 1,6-2,0 \end{array} \right.$	ჩრდილოეთი პერიფერია სამხრეთ-აღმოსავლეთი პერიფერია
3. იურული		1,9-2,0	დასავლეთი ნაწილი
4. ტრიასული		2,32	ეოროზიოლოგარადისა და ვარჯაოვ-სკაიას ქაბურღეილები აკრუნების მიხედვით
5. კარბონული	$\left\{ \begin{array}{l} \text{ქვიშაქვები, ფიქლები} \\ \text{(შეადგენენ 95\%)} \\ \text{კირქვები} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2,72-2,75 \\ 2,35 \\ 2,6-2,7 \end{array} \right.$	ცენტრული და სამხრეთ-აღმოს. ნაწ. სადგ. გლუბოკაიასთან, აუზის ჩრდილ.
6. დევონური	კირქვები	2,58-2,74	სამხრეთ-დასავლეთი პერიფერია
7. კამბრიულის-წინა	$\left\{ \begin{array}{l} \text{გრანიტები, გნეისები,} \\ \text{გაბრო-ნორიტები,} \\ \text{ბაზალტები} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2,60-2,75 \\ 2,75-3,00 \end{array} \right.$	სამხრეთ-დასავლეთი ნაწილი

ამ ცხრილის მიხედვით გამოდის, რომ მაქსიმალური სიმკვრივით თითქმის ერთნაირად ხასიათდებიან კამბრიულისწინა, დევონური და კარბონული ქანები, ხოლო მინიმალური სიმკვრივით აგრეთვე თითქმის ერთნაირად — ტრიასული, იურული, ცარცული და მესამეული ქანები. ჭარბი სიმკვრივე პალეოზოურსა და მეზოზოურს შორის 0,7-მდე აღწევს. ამავე დროს, როგორც რუკიდან (ნახ. 69) ჩანს, კარბონულ ნალექებში სიმკვრივე იცვლება 0,4-ის ფარგლებში, თანდათანობით მცირდება რა ცენტრიდან ჩრდილოეთისაკენ. ამრიგად, ღონეცის აუზის გეოლოგიურ კრილში მკვეთრად გამოიყოფა ჭარბი სიმკვრივის მხოლოდ ერთი კონტაქტური ზედაპირი პალეოზოურისა და მეზოზოურის საზღვარზე. სიმკვრივის მხრივ კამბრიულისწინა ქანები და პალეოზოური ნალექები ერთ შრენარს შეადგენენ და მათი დანაწევრება გრავიმეტრიულად არ მოხერხდება. დენსიტომეტრიულად ასევე ერთ განუყოფელ შრენარს წარმოადგენენ სტრატოგრაფიულად მკვეთრად განსხვავებული იურული, ცარცული და მესამეული ნალექები.

(X.12) ფორმულის მიხედვით სამხრეთ კახეთში გავრცელებული ქანებისათვის გამოთვლილი საშუალო სიმკვრივეები მოცემულია აქ მოთავსებულ ცხრილში:

სტრატეგრაფიული ჰორიზონტი და ქანები	ჩ. მეტრებით	ჩ.	შ.სა.
I. აფშერონ-ალჩაგისი			2,32
1) კონგლომერატები .	420	2,54	
2) ქვიშაქვები .	320	2,10	
3) თიხები .	320	1,94	
II. შირაქის შრენარი (ქვედა ნაწილი) .			2,29
1) თიხები .	590	2,29	
2) ქვიშაქვები . . . . .	290	2,32	
III. ზედა სარმატი			2,29
1) თიხები .	215	2,25	
2) ქვიშაქვები .	70	2,53	

ამრიგად გამოდის, რომ აფშერონ-ალჩაგისი, შირაქის შრენარი და ზედა სარმატი ხასიათდებიან ერთნაირი საშუალო სიმკვრივით, თუმცა ცალკეული კომპონენტები—თიხები, ქვიშაქვები, კონგლომერატები—პირველი და მესამე სტრატეგრაფიული ჰორიზონტის შიგნით მკაფიოდ არის დიფერენცირებული სიმკვრივის მიხედვით, განსხვავება 0,2—0,6 ფარგლებშია. ამ მონაცემების საფუძველზე ტოპოგრაფიული და შტალედი მასების სიმკვრივე სამართ კახეთში 2,3 ტონალად უნდა მივიჩნიოთ იურული კირქვების იზოლირებული მასივების გამონაკლისით, რომელთა სიმკვრივე 2,67 შეადგენს. ცხრილში მოთავსებული მონაცემები ემყარება 1300-ზე მეტ დენსიტომეტრიულ განსახლებებს ცალკეული ქანების მიხედვით. მიღებული საშუალო სიმკვრივეები გამოყენებულია ქვემოთ მოთავსებულ ცხრილში, სადაც თავმოყრილია საშუალო სიმკვრივეთა მონაცემები აღმოსავლეთ საქართველოს ტერიტორიაზე წარმოდგენილი სტრატეგრაფიული ერთეულებისათვის.

✓ სიმკვრივეთა განაწილება აღმოსავლეთ საქართველოს ტერიტორიაზე

გეოლოგიური ასაკი	ქანი	სიმკვრევე	ნ.მუშის ალბის ადგილი
1	2	3	4
1. მეოთხეული ნაყარი	ქვიშები, თიხები	1,7—2,0	
2. აფშერონ-ალჩაგისი	თიხები, ქვიშაქვები, კონგლომერატები		
3. შირაქის შრენარი	"	2,3	კახეთი
4. ზედა სარმატული	"	2,3	"
5. დუშეთისა და ნაცხორის შრეები (ზედა სარმატული)	"	2,3	"
6. ეულკანური განფენი	ანდეზიტები, ბაზალტები	2,4	ქართლი
7. შიოცნური (ზედა სარმატისა და ზედა მაიკოპურის გამოკლებით)	თიხები, კირქვები, ქვიშაქვები, კონგლომერატები	2,5	ახალქალაქის ზეგანი
		2,4—2,5	ქართლი და კახეთი

1	2	3	4
8. მაიკოპური შრენარი	თიხები	2,1—2,2	ქართლი და კახეთი
9. პალეოგენი (ქვედა მაიკოპურის გამოკლებით)	თიხები, კვიშაქვები, კონგლომერატები, კირქვები	2,5—2,6	თრიალეთისა და კახეთის ქედები
10. მეზოზოური (ცარცული და იურული)	ფიქლები, კირქვები, კვიშაქვები	2,6—2,7	კავკასიონი და თრიალეთის ქედი
11. ძველი კრისტალური ქანები	გრანიტები და სხვა ქანები	2,7—2,8	დარიალის, ძირულისა და ხრამის მასივები

როგორც ამ ცხრილიდან ჩანს, მაქსიმალური სიმკვრივე ახასიათებთ გრანიტულ ქანებსა (2,7—2,8) და მეზოზოურის ნალექებს (2,6—2,7), მინიმალური—მაიკოპურის შრენარს. აღმოსავლეთ საქართველოს გეოლოგიურ კრილში მკვეთრად გამოიყოფა კარბი სიმკვრივის ორი კონტაქტური ზედაპირი: პირველი—მაიკოპურის ზედა საზღვარზე ზედა ნეოგენურ ნალექებთან და მეორე—იმავე მაიკოპურის ქვედა საზღვარზე ქვედა პალეოგენსა და მეზოზოურის ნალექებთან. ამ ორი საზღვრის სიმკვეთრე დამოკიდებულია მაიკოპური შრენარის სიმძლავრისაგან, რომელიც ალაგ-ალაგ აღემატება 1000 მ; რაც უფრო მძლავრია იგი, მით უფრო მკვეთრია სიმკვრივის გამოყოფილი კონტაქტები.

ამრიგად, მიწის ქერქის ზედა ფენებში ქანების სიმკვრივეთა განაწილება მეტად არათანაბარია როგორც ჰორიზონტული, ისე ვერტიკალური მიმართულებით. კარბი სიმკვრივის რამდენიმე კონტაქტური ზედაპირის არსებობა კრილში გამოწვეულია გეოლოგიური აგებულებით და ჩვეულებრივ მოვლენას წარმოადგენს. *ა. ჯ*

## თ ა შ ი X I

### იზოსტაზისის თეორია

#### § 1. აზოსტაზისის მოვლენა

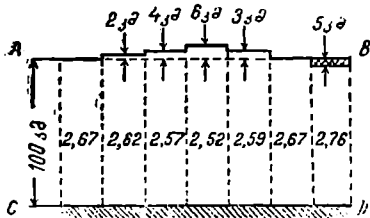
იზოსტაზისის თეორია მიწის ქერქის აგებულების შესახებ და სიმძიმის ძალის რედუქციების პრობლემა წარმოადგენენ გეოფიზიკისა და გრავიმეტრიის საკვანძო საკითხებს, რომელთაც ფუნდამენტალური მნიშვნელობა აქვთ გრავიმეტრიული მონაცემების გეოლოგიურ-გეოფიზიკური და გეოდენზიური ინტერპრეტაციისათვის. თითქმის ორი საუკუნეა, რაც ეს საკითხები ერთნაირად აინტერესებს და აწუხებს გამოჩენილ ასტრონომებს, ფიზიკოსებსა და მათემატიკოსებს, გეოდენზისტებს, გეოფიზიკოსებსა და გეოლოგებს, მაგრამ დღემდე ისინი დამაკმაყოფილებლად გადაწყვეტილი არ არის და აზრთა სხვადასხვაობას იწვევს, რადგან თვით კვლევის საგანი მეტად რთულია და მრავალფეროვანი, ხოლო კვლევის მეთოდები და ხერხები—შეზღუდული და მიახლოებითი და უმეტეს შემთხვევებში დამყარებულია ძნელად დასასაბუთებელ დებულებებზე და წინასწარი ხასიათის მოსაზრებებზე. მიუხედავად ამისა იზოსტაზისის თეორია და სიმძიმის ძალის რედუქციების სხვადასხვა ავტორის მიერ მოწოდებული მეთოდები შეადგენენ გრავიმეტრიული დაკვირვებების დამუშავებისა და პრაქტიკული გამოყენების თეორიულ საფუძვლებს. ამიტომ საჭიროა უფრო ახლოს გავეცნოთ ამ საფუძვლებს.

იზოსტაზისის მოვლენა მიწის ქერქის წონასწორობაში მდგომარეობს. ეს ტერმინი პირველად გეოლოგმა დეტონმა შემოიღო, ხოლო თვით მოვლენა ერთნახევარი საუკუნით ადრე იყო შენიღული ბუგესა და ლაკონდამინის მიერ, როცა 1740 წელს მათ ჩაატარეს შეეული ხაზის გადახრის განსაზღვრები პერუში მთა ჩიპბორასოს ორივე მხარეზე და მიღებული ანომალიების ასახსნელად დაუშვეს ამ მთის ქვეშ სიღრმეში სიციარიელის არსებობა. მაგრამ ეს ახსნა მივიწყებულ იქნა.

ამავე მოვლენას 1855 წელს წააწყდნენ გეოდენზისტები ტრიანგულაციის წარმოებისას ინდოეთში, რომელიც იქცა კიდევ იზოსტაზისის თეორიის სამშობლოდ. ამ ჯერად შეეული ხაზის გადახრის მიღებული ანომალიების ასახსნელად სამხრეთის პუნქტებში საკმარისი აღარ შეიქნა ჩრდილოეთით მდებარე ჰიმალაის მთების გამოთვლილი მიზიდულობა. ამასთან დაკავშირებით წარმოიშვა პრატის და ერის ჰიპოთეზები მიწის ქერქის აგებულების შესახებ.

### § 2. პრატის მოხაზრება

პრატის წარმოდგენით (ნახ. 72), მიწის ქერქში არსებობს იზოსტაზისის ან კომპენსაციის ისეთი ზედაპირი, რომლის ზევით მდებარე მასები ამ ზედაპირზე ყველგან ტოლ წნევას ახორციელებენ. ასეთი ზედაპირის არსებობა შესაძლებელია იმ შემთხვევაში, თუ მიწის ქერქის ერთნაირი კვეთის ნებისმიერი



ნახ. 72.

სვეტები ფიზიკურსა და იზოსტაზისურ ზედაპირებს შორის ერთნაირ მასებს შეიცავენ, რაც მოითხოვს სიმკვრივის ცვლის დაშვების აუცილებლობას პორიზონტული მიმართულებით სვეტის სიმალღესთან დაკავშირებით. პრატის სქემაში კომპენსაციის ზედაპირის სიღრმე მიღებულია 100 კმ ტოლად, ხოლო ზღვის დონის შესაბამის სვეტის საშუალო სიმკვრივე შეადგენს 2,67. დანარჩენი სვეტებისათვის საშუალო

სიმკვრივეთა გამოსათვლელად ვსარგებლობთ შემდეგი ფორმულებით, ხნელეთისა და ზღვისთვის ცალ-ცალკე:

ხნელეთისთვის:

$$\sigma(T+h) = \sigma_0 T \text{ ანუ } \sigma = \sigma_0 \frac{T}{T+h}, \quad (XI.1)$$

სადაც  $T$  არის იზოსტაზისის ზედაპირის სიღრმე,  $h$ —სიმალღე ზღვის დონიდან, ხოლო  $\sigma_0$  და  $\sigma$ —სათანადო სიმკვრივეები ცნობილ, ზღვის დონის შესაბამის, და საძიებელ სვეტებში.

ზღვისთვის:

$$1,03t + (T-t)\sigma = \sigma_0 T$$

ანუ

$$\sigma = \frac{\sigma_0 T - 1,03t}{T-t}, \quad (XI.2)$$

სადაც  $t$  არის ზღვის სიღრმე, ხოლო 1,03—ზღვის წყლის სიმკვრივე. ამრიგად, რაც უფრო მაღალია სვეტი, მით უფრო ნაკლებია მისი სიმკვრივე და, პირიქით, რაც უფრო დაბალია სვეტი, მით უფრო მეტია მისი სიმკვრივე.

### § 3. ერის მოხაზრება

ერის წარმოდგენით (ნახ. 73), მიწის ქერქი შედგება სხვადასხვა სისქის მსუბუქი ბელტებისაგან, რომლებიც ცურავენ უფრო მძიმე მაგმაზე ტივის მსგავსად. თავის შემადგენლობის მიხედვით მიწის ქერქი წარმოადგენს სიალს (სილიციუმი+ალუმინიუმი), ხოლო მაგმა—სიმას (სილიციუმი+მაგნიუმი). სიალი უფრო სქელია და ჩაძირული სიმაში მეთვის ადგილას, ვიდრე დაბლობებსა და ოკეანეებში. ამიტომ სათანადო სვეტებში კომპენსაციის მისაღწევად მაგმის დონე უფრო დაბალია პირველ შემთხვევაში, ვიდრე—მეორეში. ერის

სქემაში სიალის სიმკვრივე უდრის 2,67, სიძასი -3,27, ხოლო მისი სისქე ზღვის დონეზე მიღებულია 50 კმ ტოლად. სიალური ბელტების დაძირვის სიღრმის გამოსათვლელად შეიძლება ვისარგებლოთ შემდეგი ფორმულებით, ხმელეთისა და ზღვისთვის ცალ-ცალკე:

$$D = \frac{\sigma_0}{\sigma} H \text{ ანუ } H - D = \frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma} H, \quad (XI.3)$$

სადაც  $\sigma_0$  და  $\sigma$  - სიალისა და სიმის სიმკვრივეებია,  $H$  - ქერქის სისქე და  $D$  - ქერქის ჩაძირვის სიღრმე ნაგ-მაში.

ასე, მაგალითად,  $h = 6$  კმ სიმაღლის სიალური ბელტის ჩაძირვა სიმაში მიიღება (XI.3) ფორმულის საფუძველზე შემდეგი წესით:

$$50 \text{ კმ} + 6 \frac{2,67}{3,27 - 2,67} \text{ კმ} = 76,7 \text{ კმ}$$

ზღვისთვის:

$$1,03h + H_1 \sigma_0 = D_1 \sigma,$$

$$H \frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma} - h + D_1 = H_1$$

(XI.4)

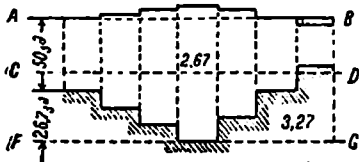
$$H_1 = \frac{H(\sigma - \sigma_0) - h(\sigma - 1,03)}{\sigma - \sigma_0}.$$

სადაც  $H_1$  არის ბელტის სისქე,  $D_1$  - მისი ჩაძირვის სიღრმე სიმაში და  $h$  - ზღვის სიღრმე. როცა  $h = 5$  კმ, (XI.4)-ით გამოთვლის შემდეგ მივიღებთ  $H_1 = 31,3$  კმ.

**§ 4. ვენინგ მეინესის და ჰეისკანენის მოხაზრებანი**

პრატისა და ერის ეს ჰიპოთეზები სქემატურია და უგულვებელყოფენ ქერქში არსებული ბმის ძალებს; აგრეთვე არ არის დაზუსტებული, თუ როგორ ხდება იზოსტაზისური კომპენსაცია: ლოკალური თუ რეგიონული წესით ამ ნაკლოვანებათა დასაძლევად ვენინგ მეინესმა წამოაყენა ახალი, მესამე ჰიპოთეზი, რომელიც პრინციპულად შემდეგში მდგომარეობს.

ბიწის ქერქი, ვენინგ მეინესის წარმოდგენით, ემსგავსება დრეკად ფირფიტას, რომელიც მაგმაზე ცურავს. დამატებითი დატვირთვის, მაგ., მთების ზეგაუღენით ფირფიტა ჩაილუნება ქვევით და აწარმოებს მაგმის გამოღენას მანამდე, ვიდრე არ დამყარდება ჰიდროსტატიკური წონასწორობა. ქერქის გაღლუნვის სიდიდე დამოკიდებულია მისი შემადგენელი ქანების დრეკად თვისებებზე, ქერქის სისქისა და დამატებით დატვირთვაზე და შეიძლება გამოითვალოს დრეკადობის თეორიის საფუძველზე. ვენინგ მეინესის აზრით, იზოსტა-



ნახ. 73.



ზისური კომპენსაცია მიწის ქერქში ხდება როგორც პრაქტის, ისე ერის ჰიპოთეზის შესაბამისად.

ჰეისკანენმა მოახდინა ცდა, რათა დაედგინა ქანების სიმკვრივეთა განაწილება იზოსტაზისური კომპენსაციის შესაბამისად მიწის ქერქსა და მაგმაში. უნდა ითქვას, რომ ეს ცდა მეტად ხელოვნური და პირობითი ხასიათის მატარებელია და ანიტომ სხვა მეთოდებით შემოწმებასა და დაზუსტებას მოითხოვს.

ამრიგად იზოსტაზისის თეორია მეტად მარტივად და პრიმიტიულად წარმოგვიდგენს მიწის ქერქის აგებულებას, მაგრამ სინამდვილეში ეს აგებულება გაცილებით უფრო რთული და დიდ სიღრმეებზე უშუალო დაკვირვებებისათვის მიუწვდომელი ჩანს. მიუხედავად ამისა ეს თეორია უკუგდებული არ არის და გრავიტაციული დაკვირვებების დამუშავების ერთ-ერთ მეთოდს უდევს საფუძვლად.

დღემდე იზოსტაზისის თეორიას ასე თუ ისე იყენებდნენ ან უარყოფდნენ. ახლად საკიროა მისი დამუშავება და დაზუსტება თანამედროვე სეისმოლოგიის მონაცემების საფუძველზე მიწის ქერქის მრავალფენობრივი აგებულების შესახებ.

---

## თ ა ზ ი XII

### სიმძიმის ძალის რედუქციები

#### § 1. რედუქციების ზოგადი დახასიათება

სიმძიმის ძალის  $g$  აჩქარების სიდიდე ერთი და იგივე პუნქტისთვის შეიძლება განსაზღვრულ იქნას ექსპერიმენტულად და თეორიულად. პირველ შემთხვევაში დაკვირვებებს დედამიწის ფიზიკურ ზედაპირზე აწარმოებენ ზუსტი ხელსაწყოების შემწეობით, ხოლო მეორე შემთხვევაში  $g$ -ს გამოთვლა გარკვეული მათემატიკური ზედაპირის, სფეროიდის მიხედვით ხდება. იზისათვის, რომ ერთმანეთს შევადაროთ სიმძიმის ძალის დაკვირვებული და გამოთვლილი სიდიდეები; საჭიროა მათი ერთსა და იმავე ზედაპირზე, სახელდობრ, გეოიდზე ან ზღვის დონეზე დაყვანა, რასაც რედუქციას უწოდებენ. ეს, ერთი შეხედვით, მარტივი ოპერაცია სიმძიმის ძალის რედუქციისა ფიზიკური ზედაპირიდან ზღვის დონეზე, სინამდვილეში შეტად რთულ პრობლემად გადაიქცევა და დღეისათვის ითვლის 15-მდე სხვადასხვა მეთოდს. ცნობილი რედუქციებიდან მხოლოდ ზოგიერთს აქვს პრაქტიკული მნიშვნელობა და გამოყენება გრავიმეტრიული დაკვირვებების დამუშავების დროს, ხოლო უმეტესი ნაწილი დღესაც არ გასცილებია თეორიულ ინტერესს. ამიტომ სიმძიმის ძალის რედუქციის პრობლემა იყო, არის და დარჩება გრავიმეტრიის ძირითად და აქტუალურ საკითხად.

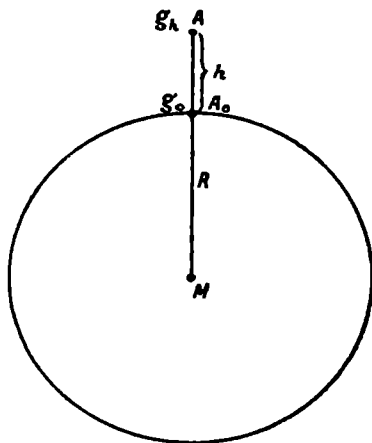
თანამედროვე გრავიმეტრიაში პრაქტიკული გამოყენებით სარგებლობენ ფაის, ტაპოგრაფიული, ბუგეს და იზოსტაზისური რედუქციები; ამიტომ გაცეცნოთ მათ ფიზიკურ შინაარსს.

#### § 2. რედუქცია სიმაღლეზე

ფაის ან ჰელმერტის რედუქცია წარმოადგენს დაკვირვებით მიღებულ  $g$ -ს შესწორებას  $h$  სიმაღლეზე ზღვის დონიდან. წარმოვიდგინოთ, რომ დედამიწა (ნახ. 74) არის  $R$  რადიუსისა და  $M$  მასის მქონე სფერო და უგულვებელყოფილია როგორც მასზე, ცენტრიდან დალის მოქმედება, ისე ატმოსფეროს მიზიდულობა. სიმძიმის ძალის აჩქარება დაკვირვების  $A$  წერტილში აღენიშნოთ  $g_0$ -ით, ხოლო დაყვანის  $A_0$  წერტილში —  $g_0$ -ით. უნდა ვიპოვოთ  $g_0 - g_h$  სხვაობა, რომელიც  $h$  სიმაღლეზე საძიებელ შესწორებას წარმოადგენს. ამისათვის მივმართოთ მე-74 ნახაზს და დაეწეროთ შემდეგი ტოლობანი:

$$g_0 = \frac{fM}{R^2} \text{ და } g_h = \frac{fM}{(R+h)^2},$$

სადაც  $f$  არის გრავიტაციული მუდმივი.



ნახ. 74.

აეილოთ სხვაობა:

$$\begin{aligned} g_0 - g_h &= \frac{fM}{R^2} \left[ 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{h}{R}\right)^2} \right] = \\ &= g_0 \left[ 1 - \left(1 + \frac{h}{R}\right)^{-2} \right] = \\ &= g_0 \left[ 1 - \left(1 - \frac{2h}{R} + \dots\right) \right] = \\ &= \frac{2g_0 h}{R} \quad (\text{XII.1}) \end{aligned}$$

გამოვივალოთ  $\frac{2g_0}{R}$  კოეფიციენ-

ტი, როცა  $g_0 = 980.6$  გალს და  $R = 6371200$  მ (საშუალო სიდიდეები). ამ კოეფიციენტს სიმძიმის ძალის ნორმული ვერტიკალური გრადიენტი ეწოდება.

რიცხობრივად უდრის  $0.0003086$  გალს ანუ  $0.3086$  მილიგალს. ამის შემდეგ (XII.1) ფორმულა შეიძლება ასე გადაიწეროს:

$$g_h = g_0 + 0.0003086 \times h \quad (\text{XII.2})$$

მიღებული შესწორება სიმაღლეზე ცნობილია ფაის ან ჰელმერტის რედუქციის სახელწოდებით და მიახლოებით სიდიდეს წარმოადგენს. როგორც ვიცით, მასვე უწოდებენ რედუქციის სიციარიელში ან „თავისუფალ ჰაერში“. ამ რედუქციის იყენებენ როგორც ცალკე, ისე სხვა შესწორებებთან ერთად. მის მიხედვით გამოდის, რომ სიმძიმის ძალის  $g$  აჩქარება ზღვის დონის ზევით მცირდება, ხოლო ქვევით—მატულობს ყოველ სამ მეტრზე თითქმის ერთი მილიგალით.

### § 3. ტოპოგრაფიული რედუქცია

ტოპოგრაფიული ზედაპირის უსწორმასწორობა გავლენას ახდენს სიმძიმის ძალაზე, ამიტომ სათანადო შესწორების საპოვნელად უნდა გაიკვეს, თუ როგორი სიდიდე ექნებოდა სიმძიმის ძალას დაკვირვების წერტილში, რომ მასზე გამავალი ზედაპირი სიბრტყე ყოფილიყო?

აეილოთ ცილინდრული რგოლი (ნახ. 75), რომელიც შედგენილაა შიგა  $r_1$  და გარე  $r_2$  რადიუსებით. გამოვთვალოთ ასეთი რგოლის მიზიდულობა ერთეულ მასაზე  $O$  წერტილში, რომელიც მის ღერძზე მდებარეობს. მასის  $dm$  ელემენტის მიზიდულობა  $O$  წერტილზე შეადგენს სიდიდეს:

$$\frac{f dm}{\rho^2} \quad (\text{XII.3})$$

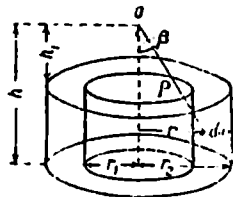
ამ სიდიდის ვერტიკალური მდგენელი იქნება:

$$f \frac{dm}{\rho^2} \cos \beta, \quad (\text{XII.4})$$

სადაც  $\beta$  არის  $O$  წერტილიდან მასის  $dm$  ელემენტზე მიმართულებით ვერტიკალთან შექმნილი კუთხე.

ავიღოთ მართკუთხა კოორდინატები  $x, y, z$  და შემოვიღოთ შემდეგი აღნიშვნები: რგოლის ნივთიერების სიმკვრივე იყოს  $\sigma$ , სოლო მანძილი ცილინდრის ღერძიდან მასის  $dm$  ელემენტამდე —  $r$ . მაშინ შეიძლება დაიწეროს ასეთი ტოლობა:

$$f \frac{dm}{\rho^2} \cos \beta = \frac{f \sigma dx dy dz}{(z^2 + r^2)^{3/2}} \cdot \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} \quad (\text{XII.5})$$



ნახ. 75.

ვიპოვოთ ცილინდრული რგოლის მიზიდულობის  $dg$  მდგენელი; ამისათვის მართკუთხა  $x, y, z$  კოორდინატები შევცვალოთ ცილინდრულით:  $r, \alpha, z$ -ით და ინტეგრირება გავავრცელოთ მთელ მოცულობაზე; მივიღებთ:

$$dg = \int_0^h \int_{r_1}^{r_2} \int_{h_1}^h f \sigma \frac{r z d\alpha dr dz}{(z^2 - r^2)^{3/2}}, \quad (\text{XII.6})$$

სადაც  $h_1$  და  $h$  არის ცილინდრული რგოლის ზედა და ქვედა ფუძეების დაშორება  $O$  წერტილიდან.

(XII.6)-ზე ინტეგრების ჩატარებით ჯერ  $\alpha$ -ს, ხოლო შემდეგ  $r$ -ს მიხედვით მივიღებთ:

$$dg = 2\pi f \sigma \int_{h_1}^h \left( \frac{z}{\sqrt{z^2 + r_1^2}} - \frac{z}{\sqrt{z^2 + r_2^2}} \right) dz. \quad (\text{XII.7})$$

დაბოლოს (XII.7)-ის ინტეგრება  $z$ -ის მიხედვით გვაძლევს:

$$dg = 2\pi f \sigma \left( \sqrt{h^2 + r_1^2} - \sqrt{h_1^2 + r_1^2} - \sqrt{h^2 + r_2^2} + \sqrt{h_1^2 + r_2^2} \right), \quad (\text{XII.8})$$

ხოლო  $h_1 = 0$  შემთხვევისთვის (XII.8) ფორმულა გადაიწერება ასე:

$$dg = 2\pi f \sigma \left( \sqrt{h^2 + r_1^2} - r_1 - \sqrt{h^2 + r_2^2} + r_2 \right). \quad (\text{XII.9})$$

თუ ცილინდრული რგოლი  $n$  ტოლ ნაწილებად არის დაყოფილი და  $dg, r_1$  და  $r_2$ -ის ნაცვლად ახალ აღნიშვნებს ( $g' - g$ ),  $r_m$  და  $r_{m+1}$  შემოვიტანთ, მაშინ (XII.9) გადაიწერება შემდეგნაირად:

$$(g' - g) = \frac{2}{n} \pi f \sigma \sum (r_{m+1} - r_m + \sqrt{h^2 + r_m^2} - \sqrt{h^2 + r_{m+1}^2}). \quad (\text{XII.10})$$

(XII.10) წარმოადგენს ტოპოგრაფიული რედუქციის ფორმულას, რომელსაც ზოგჯერ სხვა სახითაც წერენ. მის საფუძველზე შედგენილია ცხრილები და გრაფიკები რედუქციის გამოთვლების გაადვილების მიზნით. გამოთვლებისთვის საჭიროა სათანადო მასშტაბის ტოპოგრაფიული რუკები და თანაც ტოპოგრაფიული მასების საშუალო სიმკვრივეთა ცოდნა.

#### § 4. შუალედი შრის რედუქცია ბუგეს მიხედვით

შუალედი შრე დაკვირვებისა და დაყენის წერტილებს შორის შეიძლება იყოს ბრტყელი, სფერული ან სხვა სახის. ჩვენ განვიხილავთ პირველ ორ სახეს უსასრულო გავრცელების შემთხვევაში.

მუდმივი  $h$  სიმძლავრის ბრტყელი უსასრულო შრის რედუქციის მისაღებად საკმარისი იქნება (XII.8) ფორმულაში დაეუშვათ  $h_1=0$ ,  $r_1=0$  და  $r_2$  მივასწრაფოთ უსასრულობისაკენ; მივიღებთ:

$$dg = 2\pi f\sigma h \left( 1 - \frac{1}{h} \sqrt{h^2 + r_2^2} + \frac{r_2}{h} \right)_{r_2 \rightarrow \infty} = 2\pi f\sigma h. \quad (\text{XII.11})$$

ეს გამოსახულება შეესაბამება მიზიდულობას ცილინდრის ზედა ფუძის ცენტრისადმი და ამიტომ აღებულია დადებითი ნიშნით, კვედა ფუძის შემთხვევაში მივიღებდით იმავე გამოსახულებას უარყოფითი ნიშნით.

გამოვთვალოთ  $2\pi f$ -ს რიცხობრივი მნიშვნელობა, თუ

$$f = \frac{3}{4} \frac{g_0}{\pi \sigma_m R}, \quad (\text{XII.12})$$

სადაც  $g_0=980.6$  გალს,  $\sigma_m=5.52$  და  $R=6371200$  მ, მაშინ მივიღებთ:

$$2\pi f = 0.0000418. \quad (\text{XII.13})$$

(XII.13)-ის ჩასმით (XII.11) საბოლოოდ გვექნება:

$$dg = 0.0000418\sigma h, \quad (\text{XII.14})$$

სადაც  $h$  არის შუალედი შრის სიმძლავრე, ხოლო  $\sigma$ —მისი სიმკვრივე. (XII.14) წარმოადგენს ბრტყელი უსასრულო შრის რედუქციის საბოლოო ფორმულას ბუგეს მიხედვით. აქაც საჭიროა ვიცოდეთ შრის შემადგენელი ქანების საშუალო სიმკვრივე. რადგან ფორმულაში  $\sigma$ - $h$  ნამრავლთან გვაქვს საქმე, ამიტომ სიმკვრივის მცირე განსხვავებაც კი რედუქციის მნიშვნელოვან სიდიდეებს მოგვეცემს დიდი სიმძლავრის შემთხვევაში. ბუგეს შესწორება ზღვებზე ოდნავ განსხვავებულ ხასიათს ატარებს.

ახლა განვიხილოთ უსასრულო სფერული შრის შემთხვევა. ვთქვათ ასეთი შრე, რომლის სიმკვრივე და სიმძლავრე სათანადოდ არის  $\sigma$  და  $h$ , უწყვეტლავ გარს უვლის  $R$  რადიუსის მქონე დედამიწის სფეროს. ამ შრის  $m$  მასა, ცხადია, იქნება  $4\pi R^2 h \sigma$ , რადგან  $h$  გაცილებით მცირეა  $R$ -ზე. (2.6) ფორმულის მიხედვით ჩვენი შრის მიზიდულობა გარე წერტილზე იქნება:

$$\Delta g = 4\pi f\sigma h = 0.0000836\sigma h, \quad (\text{XII.15})$$

თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ (2.6) ფორმულაში  $\rho$  და  $F$  იგივეა, რაც  $R$  და  $\Delta g$  შესაბამისად.

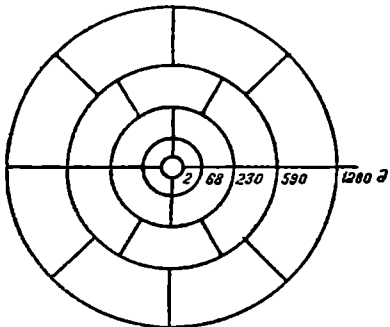
(XII.15)-ის შედარება (XII.14)-თან გვაძლევს, რომ სფერული შრიის მიზიდულობა ორჯერ მეტია ბრტყელ შრიისაზე.

### § 5. იზოსტაზისური რედუქცია

სიმძიმის ძალის იზოსტაზისური რედუქცია გულისხმობს სამ დამოუკიდებელ ოპერაციას:

1. დაკვირვებით მიღებულ სიმძიმის ძალას თავდაპირველად აკლებენ მთელ დედამიწაზე არსებული ტოპოგრაფიული მასების მიზიდულობის ვერტიკალურ მდგენელს, ე. წ. ტოპოგრაფიულ შესწორების სახით;
2. შემდეგ იმავე ტოპოგრაფიული მასების გავლენას უმატებენ სიმძიმის ძალას, რათა ამ გზით შეავსონ მიწის ქერქი მუდმივ სიმკვრივემდე ან მუდმივ სისქემდე სათანადოდ პრაქტისა და ერის ჰიპოთეზების მიხედვით, ე. წ. იზოსტაზისურ კომპენსაციაზე შესწორების სახით;
3. დაბოლოს, შეაქვთ შესწორება „თავისუფალ ჰაერში“, რათა დაკვირვებით მიღებული სიმძიმის ძალა დაიყვანონ ზღვის დონეზე.

პირველი ორი ოპერაცია და სათანადო შესწორებების გამოთვლა სპეციალური ცხრილების შემუშავებით ხდება. ცხრილის მონაცემები გამოთვლილია დედამიწის მთელი ზედაპირისათვის, რომელიც დანაწილებულია 33 ზონად. აქედან 15 ზონა ბრტყელია და აღნიშნულია ლათინური ასოებით A-დან O-მდე, ხოლო დანარჩენი 18 ზონა სფერულია და აღნიშნულია ციფრებით 18-დან 1-მდე ზონების რადიუსების გაზრდის მიხედვით. ბრტყელი ზონები დანაწილებულია სექტორებად, რათა გადავიღდეს გამოთვლები სხვადასხვა მასშტაბის ჰიფსომეტრიული რუკებით სარგებლობის დროს სინაღლეთა სხვაობის ასათვლელად დაკვირვების პუნქტსა და სათანადო ზონას შორის. საერთოდ იზოსტაზისური რედუქციის გამოთვლა რთულია და შრომატევადი. ზონებად და სექტორებად დაყოფის სქემა მოცემულია ნახ. 76-ზე.



ნახ. 76.

ფაის, ბუგეს და იზოსტაზისური რედუქციები შენდები ნიშნებით განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან: კომპენსაციის ზედაპირის სიღრმე პირველში ნულია, მეორეში—უსასრულობას უდრის, ხოლო მესამეში იცვლება რამდენიმე ათეულიდან ერთი ან ორი ასეული კილომეტრის ფარგლებში. გარდა ამისა, ისინი სხვადასხვანაირად ათავისუფლებენ შესაბამ ანომალიებს ხმელეთის სიმაღლისა და ოკეანეების სიღრმის მავნე გავლენისაგან. მაგალითად, კავკასიაში ეს გავლენა ნულის ტოლია იზოსტაზისური რედუქციის შემთხვევაში ერის ჰიპოთეზის მიხედვით, 1—2 ათეულ მილიგალს უდრის დადებით ნიშნით იმა-

ვე რედუქციაში პრატის ჰიპოთეზის მიხედვით, ხოლო ბუგესა და ფაის რედუქციებში სათანადოდ შეადგენს 40 და 60 მილივალს შესაბამისად უარყოფითი და დადებითი ნიშნით სიმაღლის ყოველ ათას მეტრზე. ამის გამო ასკენიან კიდევ, რომ იზოსტაზისური რედუქცია ერის ჰიპოთეზის მიხედვით უკეთეს შედეგებს გვაძლევს კავკასიაში და სხვა მთაგორიან რაიონებში, ვიდრე სხვა რედუქციები.

§ 6. გრავიტაციული ვარიომეტრით წარმოებულ დაკვირვებათა შესწორების შესახებ

ზემოთ განხილული რედუქციები შეეხებოდა სიმძიმის ძალის აჩქარების დაკვირვებებს საქანიანი ხელსაწყოებისა და სტატიკური გრავიმეტრების შემწობით ხმელეთსა და ზღვებზე. ახლა შეეხებოთ შესწორების საკითხს გრავიტაციული ვარიომეტრით დაკვირვებების დროს.

როგორც ცნობილია. გრავიტაციული ვარიომეტრით ისაზღვრება სიმძიმის ძალის პოტენციალის მეორე რიგის წარმოებულები:  $2W_{\text{ფ}}, W_{\Delta}, W_{\text{ფ}}$  და  $W_{\text{ფ}}$ . ამ სიდიდეებში შეაქვთ ორი სახის შესწორება: 1. გავლენა ნორმულ ცვლაზე და 2. გავლენა რელიეფზე, რომელიც მთავარია.

1. გავლენა ნორმულ ცვლაზე შეეხება  $W_{\text{ფ}}$  და  $W_{\Delta}$ -ს, ხოლო დანარჩენი სიდიდეებისთვის ისინი პრაქტიკულად ნულის ტოლია. სათანადო შესწორება ამ წარმოებულებისთვის ისე მცირედ იცვლება სიგანედის მიხედვით, რომ ის დიდი არეების ფარგლებში შეიძლება მუდმივ სიდიდედ ჩაითვალოს. ამას ნათლად მოწმობს აქ მოთავსებული ცხრილი:

$\varphi = 35^{\circ}$	$[W_{\text{ფ}}]_n = -7.6$ ეტვეს	$[W_{\Delta}]_n = 6.9$ ეტვეს
45°	.. -8.1	5.1
55°	-7.6	3.4
65° . . . . .	-6.2 " .	1.8 "

რაც შეეხება  $W_{\text{ფ}}$  ნორმული სიდიდის ცვლის საკითხს, უნდა აღინიშნოს შემდეგი.  $W_{\text{ფ}}$ -ის სიდიდე 40—50° სიგანედების ფარგლებში შეადგენს დაახლოებით 3086 ეტვეს და ამავე დროს მცირედ იცვლება, ოღონდ მისი ნორმული მნიშვნელობანი გაცილებით მეტია, ვიდრე  $W_{\text{ფ}}$  და  $W_{\Delta}$  სათანადო სიდიდეები.

2. გავლენა რელიეფზე გამოითვლება ტოპოგრაფიული და კარტოგრაფიული შესწორებების სახით. პირველი ითვალისწინებს მიწის ზედაპირის უსწორმასწორობას, რადიუსით 50—100 მეტრამდე, სპეციალური ნიველოზის ჩატარების გზით დაკვირვების პუნქტის ირგვლივ, ხოლო მეორე—უფრო მეტი რადიუსით სათანადო მასშტაბის ტოპოგრაფიული რუკების შემწობით. მაქსიმალური რადიუსის განსაზღვრა იმ ფართობისა, რომელზედაც უნდა გავრცელდეს შესწორებათა გამოთვლა, დამოკიდებულია. რელიეფის ხასიათსა და განსაზომ სიდიდეზე. თუ  $W_{\text{ფ}}$  და  $W_{\text{ფ}}$  სიდიდეებისთვის ეს რადიუსი რამდენიმე კილომეტრს არ აღემატება,  $W_{\Delta}$  და  $W_{\text{ფ}}$ -თვის შესაძლოა ის რამდე-

ნიმე ათეულ და ერთ ასეულ კილომეტრსაც კი უდრიდეს ცალკეული მთაგორიანი რაიონებისთვის.

რელიეფის შესწორებათა მათემატიკური საფუძვლები და ზუსტი გამოთვლების ხერხები დამუშავებული აქვთ ეტვეშს, შვიდარს, სამსონოვსა და სხვებს. არსებობენ გამოთვლების ანალიზური, გრაფიკული და მექანიკური ხერხები. ანალიზური ხერხი მდგომარეობს სტანდარტული სახის ინტეგრალების მნიშვნელობათა მიახლოებით გამოთვლაში და შესაბამის ცხრილების გამოყენებაში. ეს ხერხი ზუსტია. მაგრამ მეტად შრომატევადი, ამიტომ ბოლო დროს შეცვლილია გრაფიკული ხერხით, რომელიც სპეციალური პალეტების გამოყენებას გულისხმობს, არსებობს პალეტები ტოპოგრაფიული და კარტოგრაფიული შესწორებებისთვის ცალ-ცალკე. ამავე გამოთვლებისთვის ცალკეულ შემთხვევებში იყენებენ აგრეთვე საანგარიშო მიქანიზმებსა და სახაზავეებს. ასეთია, მაგალითად, სამსონოვის სპეციალური ლარტყა, ლეონტოვსკის გრაფიტახიმეტრი და სხვა, რომელთა განხილვას აქ არ გამოვეუდგებით.

---



## თ ა ვ ი X I I I

### ს ი მ ძ ი მ ი ს ქ ა ლ ი ს ბ ა ნ ა წ ი ლ ე ბ ა დ ე ლ ა მ ი წ ი ს ზ ე დ ა პ ი რ ზ ე დ ა მ ი ს შ ი გ ნ ი თ

#### § 1. ს ი მ ძ ი მ ი ს ქ ა ლ ი ს ნ ო რ მ უ ლ ი ს ი დ ი დ ე

სიმძიმის ძალის განაწილება დელამიწის ზედაპირზე და მის შიგნით შეისწავლება თეორიული გამოკვლევებისა და ექსპერიმენტული გაზომვების შემწვობით. ეს შესწავლა ორ ძირითად ამოცანას ისახავს მიზნად დელამიწის ზუსტი ფიგურისა და მიწის ქერქის აგებულების დადგენას. ერთი ამოცანა გეოდეზიურია, ხოლო მეორე—გეოფიზიკურ-გეოლოგიური. ამით აიხსნება სწორედ ის გარემოება, რომ გრავიმეტრიულ მონაცემებს აქვთ, საერთო გეოფიზიკური მნიშვნელობის გარდა, ფართო გამოყენება გეოდეზიასა და გეოლოგიაში.

სიმძიმის ძალა გეოიდის ზედაპირზე მუდმივი არ არის; ის მიმართულია ნორმალის გასწვრივ ხსენებული ზედაპირის ნებისმიერ წერტილში და ამით განსაზღვრავს დელამიწის ქეშმარიტ ფორმას. გეოიდის ზედაპირზე გ-ს ნორმული განაწილება განხილულია I თავის § 6-ში.

სიმძიმის ძალის ნორმული სიდიდე, დაკვირვებით მიღებულისაგან განსხვავებით, აღინიშნება  $\gamma_0$ -ით. ნულოვანი ინდექსი იმას ნიშნავს, რომ აღნიშნული სიდიდე გეოიდის ზედაპირს მიეკუთვნება.

1884—1952 წწ. სხვადასხვა ავტორის მიერ მოწოდებულ იქნა სიმძიმის ძალის ნორმული სიდიდის ( $\gamma_0$ ) საანგარიშო ფორმულები.

მათ შორის აღსანიშნავია:

ჰელმერტის (1901—1909 წწ.); კასინისისა (1930 წ.) და ეონგოლოვიჩის (1952 წ.) ფორმულები, რომლებიც ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან უმთავრესად  $g$ , და  $\beta$  მნიშვნელობებით.

ჰელმერტის ფორმულას აქვს შემდეგი სახე:

$$\gamma_0 = 978.030 (1 \pm 0.0053020 \sin^2 \varphi - 0.0000070 \sin^2 2\varphi) \quad (\text{XIII.1})$$

ეს საანგარიშო ფორმულა გამოყენებულია ძირითადად ჩვენში, ხოლო საზღვარგარეთ გავრცელებულია კასინისის ე. წ. „საერთაშორისო“ ფორმულა:

$$\gamma_0 = 978.049 (1 - 0.0052884 \sin^2 \varphi - 0.0000059 \sin^2 2\varphi). \quad (\text{XIII.2})$$

1952 წელს საბჭოთა მეცნიერმა ქონგოლოვიჩმა მსოფლიოს მრავალრიცხოვანი გრავიმეტრიული განსაზღვრების დამუშავების საფუძველზე მიიღო ახალი ფორმულა:

$$\gamma_0 = 978,0573 (1 + 0.0052837 \sin^2 \varphi - 0.0000059 \sin^4 \varphi). \quad (\text{XIII.3})$$

### § 2. სიმძიმის ძალის ანომალიები

სიმძიმის ძალის ექსპერიმენტულად გაზომილი სიდიდე  $g$  შეესაბამება რეალურ დედამიწას, რომელშიც მასები არათანაბრად არიან განაწილებული როგორც ჰორიზონტული, ისე ვერტიკალური მიმართულებით. აპიტომ  $g$  დამოკიდებულია დედამიწაში სიმკვრივეთა განაწილებისაგან, ზღვის დონიდან სიმაღლისა და გეოგრაფიული სივანედისაგან.

სიმძიმის ძალის ნორმული სიდიდე  $\gamma_0$  შეესაბამება ისეთ გეომეტრიულ ფიგურას, რომელიც თავისი ზომებით, გარეგანი ფორმითა და შინაგანი შემადგენლობით ახლოს დგას დედამიწასთან, მაგრამ მისი იგივე არ არის. ასეთ ფიგურად მიღებულია ბრუნვითი ელიპსოიდი, რომელიც მცირედ განსხვავდება გეოიდისაგან.

სხვათა შორის სიდიდის,  $g$ -სა და  $\gamma_0$ -ის, ერთმანეთთან შედარება საშუალებას გვაძლევს დავახასიათოთ რეალური დედამიწის გადახრები ნორმულიდან. ნორმულიდან გადახრას საზოგადოდ ანომალია ეწოდება. სიმძიმის ძალის ანომალია არის სხვაობა მის ექსპერიმენტულად გაზომილსა და თეორიულად გამოთვლილ ნორმულ სიდიდეს შორის, როცა ესინი ერთსა და იმავე ზედაპირზეა დაყვანილი და შესწორებულია სათანადოდ. ეს სხვაობა შეიძლება იყოს ნული, დადებითი ან უარყოფითი სიდიდე. ამ სხვაობის ნიშნისა და სიდიდის მიხედვით მსჯელობენ სიმკვრივის სიჭარბეზე და დანაკლისზე მიწის ქერქში დადებითი და უარყოფითი ანომალიების შესაბამისად. ორივე ნიშნის ანომალიების მაქსიმალური სიდიდე დედამიწის ზედაპირზე ალაგ-ალაგ 500—600 მილივალს შეადგენს.

იმის და მიხედვით, თუ რომელ შესწორებას გამოვიყენებთ  $g$ -სა და  $\gamma_0$ -ის შედარების დროს, განვასხვავებთ ფაის, ბუგეს და იზოსტახისურ ანომალიებს. გავრცელების ფართობის სიდიდისა და ხასიათის მიხედვით ეს ანომალიები არის მიკროლოკალური, ლოკალური, რეგიონული და მაკრორეგიონული.

იმ პუნქტს, სადაც გაზომილია სიმძიმის ძალა, ეწოდება გრავიმეტრიული პუნქტი. თუ გრავიმეტრიულ პუნქტებს შესაბამისი ანომალიებით დაეიტანთ ტოპოგრაფიულ საფუძველზე და ერთნაირი ანომალიების მქონე პუნქტებს შევეერთებთ ერთმანეთთან მრუდი ხაზებით, მივიღებთ იზოანომალთა გრავიმეტრიულ რუკას. გრავიმეტრიული რუკები სხვადასხვა რედუქციებში შედგენილია როგორც ცალკე ქვეყნებისათვის, ისე მთელი მსოფლიოსათვის. ეს რუკები შეადგენენ საფუძველს გრავიმეტრიული დაკვირვებების გეოდეზიური, გეოფიზიკური და გეოლოგიური ინტერპრეტაციისთვის.

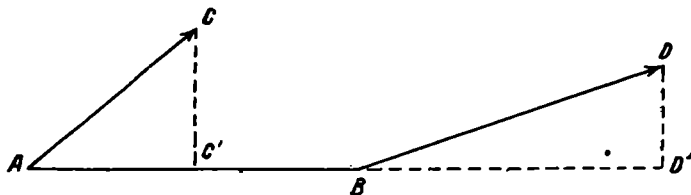
ანომალიური რაიონის ან პუნქტის სახელს ჩვეულებრივ გეოგრაფიული სახელწოდება განსაზღვრავს; ასე, მაგალითად, მოსკოვის ანომალია, ქიურდამირის ანომალია და სხვ. სტატისტიკური გრავიმეტრებით წარმოებული დაკვირვებების საფუძველზე იზოანომალების გრავიმეტრიული რუკების შედგენა

პრინციპულად არაფრით არ განსხვავდება საქანიანი დაკვირვებების მიხედვით მიღებული რუკებისაგან.)

მეორე რიგის წარმოებულების ანომალიური სიდიდეების მისაღებად საკიროა ვარიომეტრულ დაკვირვებებში სათანადო შესწორებების შეტანა ნორმულ ცვლაზე და ტოპოგრაფიაზე. ანომალიების სიდიდე ამ შემთხვევაში ჩვეულებრივ რამდენიმე ათეულ, იშვიათად რამდენიმე ასეულ ეტევეს არ აღემატება. დაკვირვების წერტილებს დავიტანთ ტოპოგრაფიულ საფუძველზე სათანადო სიდიდეებით:

$$\frac{\partial g}{\partial s} = \sqrt{W_{xy}^2 + W_{yz}^2} \text{ და } I g \alpha = \frac{W_{yz}}{W_{xx}}. \quad (\text{XIII.4})$$

ამის შემდეგ  $\Delta g$ -ს სხვაობას ავთვლით ყოველი წყვილი მეზობლად მდებარე წერტილისათვის ტრაპეციების ხერხით (ნახ. 77).  $AB$  მიმართულებაზე ვაგვგმარებთ  $\frac{\partial g}{\partial s}$ -ს სიდიდეებს დაკვირვების  $A$  და  $B$  წერტილებისათვის, ავიღებთ მათ ნახევარ ჯამს და ვამრავლებთ  $AB$  მანძილზე, როპელიც გამოხატულია სანტიმეტრებში. ამ წესით მიღებული  $\Delta g$ -ს სიდიდეების მიხედვით



ნახ. 77.

შეგვიძლია შევადგინოთ იზოანომალთა რუკა. იზოანომალების გავლებისას უნდა დავიცვათ გრადიენტების მართობულობის პირობა  $g$  იზოზაზების მიმართ. თუ გრაფიკაციული ვარიომეტრით ავგვმეის ფართობზე ორი წერტილი მაინც მოგვეპოვება ისეთი, სადაც განსაზღვრულია სიმძიმის ძალა საქანიანი აპარატით ან სტატიკური გრაფიმეტრით, მაშინ აღვიღია  $g$ -ს სიდიდეების გამოთვლა დაკვირვების დანარჩენი წერტილებისთვის და სათანადო რუკის შედგენაც.  $\Delta g$ -ს იზოანომალების რუკის კონტროლი შეიძლება ჩატარდეს ორი გზით: 1. სიმძიმის ძალის სხვაობა საქანიან ან გრაფიმეტრულ პუნქტებსა და რუკით მიღებულ სიდიდეებს შორის ყოველ 10 კმ-ზე არ უნდა აღემატებოდეს 1 მილიგალს; 2. ნებისმიერი ჩაკეტილი კონტურის მიხედვით  $\Delta g$ -თა ჯამი ნული უნდა იყოს.

### § 8. სიმძიმის ძალის განაწილება დედამიწის ზედაპირზე

სიმძიმის ძალა მინიმალურია დედამიწის ეკვატორზე და მაქსიმალური მის პოლუსებზე. ეკვატორზე მისი სიდიდე 978 გალს შეადგენს, ხოლო პოლუსებზე 983 გალს უდრის, 100—200 მილიგალის შიახლოებით. მიწის ზედა-

პირის დანარჩენ წერტილებში გ-ს სიდიდე 5000 მილიგალის ფარგლებში მერყეობს, იზრდება რა კანონზომიერად ეკვატორიდან პოლუსებისაკენ, ცალკეული ანომალიური პუნქტებისა და უბნების გამონაკლისით, სადაც, შესაძლოა, გაზომილი და სათანადოდ დაყვანილი სიდიდე ნორმულზე მეტი ან ნაკლები აღმოჩნდეს რამდენიმე ასეული მილიგალის ფარგლებში.

მსოფლიო არათანაბრად არის შესწავლილი სიმძიმის ძალის განაწილების თვალსაზრისით. მიწის ზედაპირზე საქანიანი აპარატის შეწყობით დღემდე განსაზღვრული პუნქტების საერთო რიცხვი 26 ათას აღემატება. პუნქტების უმეტესობა მოდის ჩრდილოეთ ნახევარსფეროზე, სადაც საბჭოთა კავშირის ტერიტორია ყველაზე უკეთ, ზუსტად და გეგმაშეწონილად არის შესწავლილი გრავიმეტრიული თვალსაზრისით. ამ გარემოებას სელი შეუწყო საბჭოთა მთავრობის 1932 წლის 20 სექტემბრის № 1170 დადგენილებამ სსრ კავშირის ტერიტორიაზე საერთო გრავიმეტრიული აგეგმვის ჩატარების შესახებ სიხშირით: ერთი პუნქტი ყოველ 1000 კმ<sup>2</sup>-ზე. ეს დადგენილება საბჭოთა გრავიმეტრისტებმა უკვე შეასრულეს როგორც რაოდენობრივი, ისე ხარისხობრივი მაჩვენებლების მიხედვით.

იგივე არ ითქმის უცხოეთის ქვეყნების შესახებ. სამხრეთ ამერიკის, აფრიკისა და ავსტრალიის ტერიტორიების უმეტეს ნაწილში სრულიად არ არის ჩატარებული სიმძიმის ძალის განსაზღვრები. გრავიმეტრიულად სრულიად უცნობია ანტარქტიკა, მაშინ როდესაც არქტიკა ჩრდილოეთ პოლუსამდე დასერილია გრავიმეტრიული მარშრუტებით. ოკეანეებზე ჯერ კიდევ ძლიერ მცირეა გრავიმეტრიული მარშრუტების რიცხვი.

მსოფლიოს გრავიმეტრიული კატალოგი, სადაც თავმოყრილია ყველა საქანიანი განსაზღვრები, პირველად გამოქვეყნდა 1911 წ. ცალკეული ქვეყნების მიხედვით შედგენილი კატალოგები გამოსულია უკანასკნელ ხანებში საბჭოთა კავშირში, ინდოეთში, ფინეთში და სხვ.

ჩვენში, როგორც ეს III თავის § 7-ში იყო ნათქვანი, არსებული ოთხი საყრდენი გრავიმეტრიული პუნქტი დაკავშირებულია პოტსდამთან და ერთმანეთთან მრავალგზის და საიმედოდ. ეს პუნქტებია: ნოსკოვი, პულკოვო, ყაზანი და პოლტავა.

მსოფლიოს პირველი გრავიმეტრიული რუკა პრეის რედუქციაში შეადგინა და გამოაქვეყნა ავსტრიელმა მეცნიერმა აკერლმა 1932 წელს. მან გამოიყენა ამ დროისთვის ცნობილი 4165 გრავიმეტრიული პუნქტი.

უფრო სრული და ზუსტი ანალოგიური რუკა 1952 წელს გამოაქვეყნა საბჭოთა მეცნიერმა ჟონგოლოვიჩმა. ჟონგოლოვიჩის რუკის შედგენისას გამოყენებულია 26 ათასზე მეტი გრავიმეტრიული პუნქტი. რუკა შედგენილია სიმაღლეზე რედუქციის მიხედვით (ნახ. 78 და 79), ჩრდილოეთისა და სამხრეთის ნახევარსფეროებისთვის ცალ-ცალკე. იზონანალთა ხაზები გატარებულია ყოველ 5 მილიგალზე. სიმძიმის ძალის ნორმული სიდიდე გამოთვლილია ჰელმერტის 1901—1909 წწ. ფორმულით.

ჟონგოლოვიჩის მსოფლიო გრავიმეტრიულ რუკაზე მკვეთრად გამოიყოფა სიმძიმის ძალის ხუთი მაქსიმუმი და ამდენივე მინიმუმი, რომელნიც მაკრორეგიონული ხასიათის არიან.

სიმძიმის ძალის მაქსიმუმები გამოიყოფა:

1) ჩრდილოეთის პოლუსზე (+37 მგლ), 2) აფრიკის დასავლეთით ატლანტიკურ ოკეანეში, ეკვატორთან (+64 მგლ), 3) ავსტრალიის ჩრდილო-აღმოსავლეთით წყნარ ოკეანეში, ეკვატორთან (+63 მგლ), 4) სამხრეთ ამერიკის დასავლეთით წყნარ ოკეანეში, ეკვატორთან (+37 მგლ) და 5) ჩრდილოეთ ამერიკის კონტინენტზე, მექსიკის უბესთან (+27 მგლ).

სიმძიმის ძალის მინიმუმები გამოიყოფა:

1) სამხრეთ პოლუსთან წყნარ ოკეანეში 65°-ზე ახალი ზელანდიის სამხრეთით (-3 მგლ), 2) ავსტრალიის დასავლეთით წყნარ ოკეანეში 35°-ზე (+7 მგლ), 3) ინდოეთის ოკეანეში, ეკვატორთან (-16 მგლ), 4) დიდი ანტილის კუნძულების აღმოსავლეთით ატლანტიკურ ოკეანეში (-3 მგლ) და 5) ჩრდილოეთ ამერიკის დასავლეთით წყნარ ოკეანეში 40°-ზე (+1 მგლ). ინდოეთის ოკეანის მინიმუმის ქიმი ჩრდილოეთით ბალხაშისა და ბაიკალის ტბებამდე აღწევს. ამიტომ მას ინდოეთ-საბჰოეთის გრავიმეტრიულ მინიმუმს ვუწოდებთ. ზოგიერთი წინასწარი ხასიათის მოსაზრება სიმძიმის ძალის მიწის ზედაპირზე ასეთი განაწილების კავშირის შესახებ გეოლოგიურ აგებულებასთან მოცემული იქნება XV თავში რეგიონული ანომალიების ინტერპრეტაციის დროს.

#### § 4. გეოიდის ფორმა

ნახ. 80-ზე წარმოდგენილია ჟანგოლოვიჩის მიერ 1952 წელს გრავიმეტრიული დაკვირვებების საფუძველზე შედგენილი სქემა გეოიდის სიმაღლეებისა სამღერძიანი ელიპსოიდის მიმართ. ერთნაირი სიმაღლეების ხაზები გაელებულია სქემაზე ყოველ 20 მეტრზე. ამ სქემაზე გამოიყოფა გეოიდის სიმაღლეთა ოთხი მაქსიმუმი და ამდენივე მინიმუმი გრავიმეტრიული მაქსიმუმებისა და მინიმუმების (შეადარეთ ნახ. 78 და 79) ადგილზე ან მათ მახლობლად.

გეოიდის სიმაღლეთა მაქსიმუმები გამოიყოფა:

1) ჩრდილოეთ პოლუსზე (+40 მ), 2) სამხრეთ ამერიკის დასავლეთით, წყნარ ოკეანეში 25°-ზე (+66 მ), 3) ავსტრალიის ჩრდილოეთით, კუნძულების არეში (+85 მ) და 4) სამხრეთ აფრიკაში (+55 მ).

გეოიდის სიმაღლეთა მინიმუმები გამოიყოფა:

1) სამხრეთ პოლუსთან, ახალ ზელანდიაში (-54 მ), 2) ინდოეთის ოკეანეში, არაბეთის ზღვაში (-77 მ), 3) სამხრეთ ამერიკის აღმოსავლეთით, სანაპიროებთან (-80 მ) და 4) ჩრდილოეთ ამერიკის დასავლეთით, წყნარ ოკეანეში 30°-ზე (-50 მ).

გეოიდის საშუალო სიმაღლე მეტრებში სამღერძიანი ელიპსოიდის მიმართ კონტინენტებზე და ოკეანეებზე (ფართობის პროცენტებში ჩვენებით) მოცემულია აქ მოთავსებულ ცხრილში:



გეოიდის მდებარეობა	კონტინენტებზე		ოკეანეებზე	
	მ	%	მ	%
1	2	3	4	5
ელისსოიდის ზევით	+23	14.5	+29	35
ელისსოიდის ქვევით	-25	14.5	-27	36
საშუალო	-1	29	+1	71

ამრიგად, გეოიდის მდებარეობა არ იჩენს დამოკიდებულებას ხილული მასების განაწილებასთან და ამიტომ უნდა დავეუშვათ, რომ რგი განისაზღვრება მიწის ქერქის სიღრმის გეოფიზიკური და გეოლოგიური აგებულებით, რაზედაც უფრო დაწვრილებით ქვემოთ გვექნება საუბარი, XV თავში.

კავკასიაში გეოიდის სიმაღლეთა ნულოვანი იზოხაზი ჟონგოლოვიჩის რუკაზე გადის თბილისის მერიდიანის მიხედვით: აღმოსავლეთით უარყოფითი ნიშნულები ( $-20$  მ კასპიის ზღვაში) გვაქვს, ხოლო დასავლეთით—დადებითი ნიშნულები ( $+20$  მ შავ ზღვაში). უფრო ადრე გეოიდის ფორმა საბჭოთა კავშირის ცენტრული ნაწილისა და კავკასიისათვის ააგეს შესაბამისად მოლოდენსკიმ (1945 წ.) და ვ. ჯიქიამ (1943 წ.).

#### § 5. სიმძიმის ძალა დედამიწის შიგნით

წარმოვიდგინოთ, რომ დედამიწა არის  $M$  მასისა და  $r$  რადიუსის სფერო და შედგება  $\sigma$  სიმკვრივის მქონე კონცენტრული შრეებისაგან. ასეთი სფეროს ზედაპირზე:

$$g = f \frac{M}{r^2}.$$

ახლა გამოვყოთ კონცენტრული შრე, სისქით  $dr$  და რადიუსით  $r$ . ასეთი შრის მასა შეადგენს  $4\pi r^2 dr$ , ხოლო დედამიწის მასა იქნება:

$$M = \int_0^r 4\pi r^2 dr,$$

$$g = f \frac{M}{r^2} = \frac{4\pi f}{r^2} \int_0^r r^2 dr.$$

თუ უკანასკნელ გამოსახულებაში ჩავსვანთ  $f$ -ს მნიშვნელობას, საბოლოოდ მივიღებთ:

$$g = \frac{3f_0}{\sigma_m k r^2} \int_0^r r^2 dr. \quad (\text{XIII.5})$$

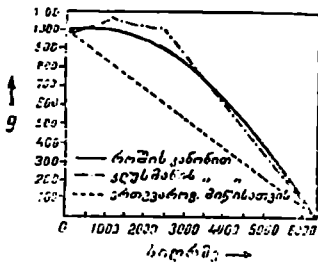
ინტეგრირებისას უნდა ვიციოდეთ  $\sigma$  სიმკვრივის ცვლის კანონი  $r$ -ის მიხედვით. ლეჟანდრი, რომში, ვიხერტი, ჰალკი და სხვ. იძლევიან ამ ცვლის სხვადასხვა კანონს. როშის მიხედვით, მაგალითად,

$$\sigma = \sigma_0 (1 - \beta r^2),$$

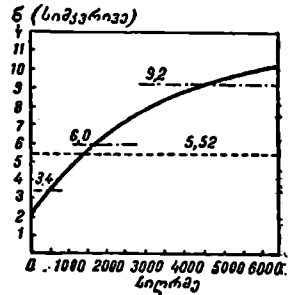
(XIII.6)

სადაც  $\sigma_0$  არის სიმკვრივე დედამიწის ცენტრში (უდრის 10.1),  $\beta = 0.764$ , ხოლო  $r$  გამოსახულია დედამიწის რადიუსის ნაწილებში.

(XIII.5—6) ფორმულების საფუძველზე  $g$ -სა და  $\sigma$ -ს განაწილება დედამიწის შიგნით მოცემულია შესაბამისად ნახ. 81 და 82-ზე. ამრიგად, არაერთგვაროვანი დედამი-



ნახ. 81.



ნახ. 82.

წის შიგნით (ქერკის სიმკვრივე უდრის 2.67, ხოლო დედამიწის საშუალო სიმკვრივე შეადგენს 5.52)  $g$ -ჯერ მატულობს და 1000 კმ სიღრმეზე ხდება მაქსიმალური, შემდეგ თანდათანობით კლებულობს და ცენტრში ნულს გაუტოლდება. დედამიწა რომ ერთგვაროვანი სფერო ყოფილიყო, მაშინ  $g$ -ს სიდიდე მაქსიმალური იქნებოდა მის ზედაპირზე და არა სიღრმეში.

#### § 6. დროის მიხედვით სიმძიმის ძალის ვარიაციის პრობლემა

ეს პრობლემა ორი ნაწილისაგან შედგება. ერთი ნაწილი შეეხება სიმძიმის ძალის პერიოდულ ვარიაციას დროის მიხედვით, ხოლო მეორე—საუკუნეობრივ არაპერიოდულ ვარიაციას. პერიოდული ვარიაცია მილიგალის რამდენიმე მეათედს შეადგენს და გამოწვეულია მიწის ქერკის ე. წ. მიმოქცევის გავლენითა და დედამიწის ბრუნვით თავის ღერძის გარშემო, როცა იცვლება დაკვირვების პუნქტის მდებარეობა მთვარისა და მზის, აგრეთვე პლანეტების მიმართ. სიმძიმის ძალის პერიოდული ვარიაცია ლომონოსოვის დროიდან შეიწყვეტა და დღეს შექმნილია სპეციალური ცხრილები და ნომოგრამები სათანადო შესწორების გამოსათვლელად სიმძიმის ძალის ვარიაციაზე მზისა და მთვარის მიზიდულობის გავლენით. ამ შესწორებას ითვალისწინებენ მხოლოდ მაშინ, როცა გრაფიკური დაკვირვებებისას მიღწეულია მილიგალის ერთი მეათედი ან უფრო მეტი სიზუსტე.

სიმძიმის ძალის საუკუნეობრივი ვარიაციის შესახებ პირველი წინასწარი ხასიათის მოსაზრებები J. X. საუკუნის დასაწყისში თითქმის ერთდროულად გამოთქვეს ფიშერმა, კოხმა და პავლოვმა. ისინი ემყარებოდნენ გამეორებული საქანიანი დაკვირვებების მონაცემებს ინდოეთში (1865—1893 წწ.), გერ-



მანიაში (1900—1904 წწ.) და კავკასიაში (1879—1907 წწ.). ცნობილია აგრეთვე, რომ რუსი სეისმოლოგი გოლიცინი ითვლისწინებდა სეისმურად აქტიურ რაიონებში ეტევის ვარიომეტრით სპეციალური ხასიათის დაკვირვებების ჩატარებას, რათა დაედგინა კავშირი დედამიწის გრავიტაციული ველის განაწილებასა და მიწისძვრების მოვლენებს შორის.

1936 წ. გამოთქმულ იქნა მოსაზრება (აბაკელია) სიმძიმის ძალის ვარიაციის შესახებ დროში დანაოქების გავლენით კავკასიის მაგალითზე. ამავე დროს წითითებულ იქნა, რომ მომავალში ზუსტი გრავიმეტრების მონაცემებზე დაყრდნობით შესაძლო იქნება მიწისძვრების პროგნოზი. ეს შეხედულება შემდეგში (1946 წ.) გაზიარებულ იქნა ამერიკელი გეოფიზიკოსის ჰეილანდის მიერ.

საბჭოთა კავშირში ახლაც მიმდინარეობს მეცნიერული დისკუსია სიმძიმის ძალის საუკუნეობრივი ვარიაციის საკითხებზე (აბაკელია, ბუღანაძე, პარიისკი, გორშკოვი, სოროკინი, ანდრეევი და სხვ.). გაირკვა, რომ სიმძიმის ძალის ვარიაციაზე გეოტექტონიკური ფაქტორების გავლენა თეორიულად სავსებით შესაძლებელია, მაგრამ გაზომვებით დამაჯერებლად ჯერ არსად შენიშნული არ არის, რადგან არ მოგვეპოვება საამისო საიმედო დაკვირვებები და არ ვიცით, დიდია თუ მცირე ეს ვარიაცია. ამიტომ დაწყებული გაზომვები და გამოკვლევები შემდეგშიც უნდა გაგრძელდეს.

**გრაფიკის პირდაპირი და შებენიანი ამოცანები**

**§ I. გრაფიკული მონაცემების ინტერპრეტაციის შესახებ**

გრაფიკულ დაკვირვებათა ჩატარების, სიმძიმის ძალის ანომალიების გამოთვლისა და ტოპოგრაფიულ საფუძველზე მათი სათანადოდ გამოსახვისა და გავრცელების გამოვლინების შემდეგ ისმის საკითხი ამ ანომალიების ინტერპრეტაციის შესახებ.

ინტერპრეტაცია ნიშნავს ანომალიის გეოფიზიკური ბუნებისა და გეოლოგიური მიზეზების გარკვევასა და ახსნას. ინტერპრეტაცია წარმოადგენს გრაფიკის პირდაპირი და შებენიანი ამოცანების ამოხსნას.

**პირდაპირი ამოცანა** გულისხმობს, რომ ცნობილია ანომალიური მასის წოდების ელემენტები მიწის წიაღში—სიღრმე, ფორმა, ზომები და მისი ფიზიკური თვისებები; უნდა განვსაზღვროთ ასეთი მასით მიწის ზედაპირზე გამოწვეული გრაფიკული გავლენა, ეფექტი. ზნებ ამოცანას ყოველთვის ცალსახა ამოხსნა შეესაბამება.

**შებენიანი ამოცანა** კი გულისხმობს ანომალიური მასის თვისობრივ და რაოდენობრივ დახასიათებას დაკვირვებით მიღებული ანომალიის მიხედვით. ამიტომ ამბობენ კიდევაც თვისობრივ და რაოდენობრივ ინტერპრეტაციაზე. შებენიანი ამოცანა ცალსახა აღარ არის და მას ამოხსნათა დიდი რიცხვი შეესაბამება. ამ რიცხვის შემცირება და მინიმუმამდე დაყვანა კი გრაფიკის შიგნით არ ხერხდება, მის ფარგლებს სცილდება და გეოლოგიისა და გეოფიზიკის სფეროში გადადის. ამიტომაც არის, რომ სიმძიმის ძალის ანომალიების ინტერპრეტაცია ყოველთვის მეტად თუ ნაკლებად კომპლექსურ ხასიათს ატარებს და საქმაოდ ძნელი და რთული საქმეა.

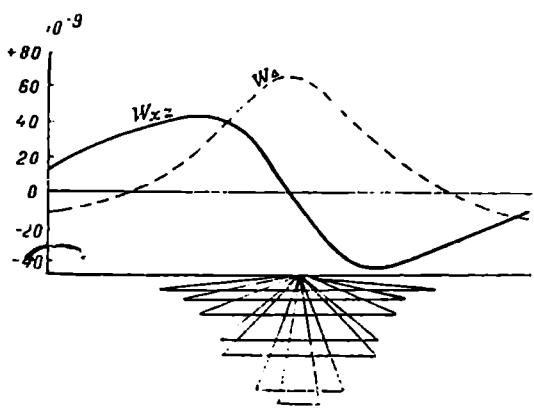
გრაფიკის შებენიანი ამოცანის ამოხსნის მრავალსახეობა ილუსტრირებულია ნახ. 83-ზე: აქ მოცემულია სიმძიმის ძალის გრადიენტისა ( $W_{gr}$ ) და სიმრუდის ვექტორის ( $IV_{\perp}$ ) მრუდები. ეს მრუდები გამოხატავენ სხვადასხვა სიმკვრივის მქონე უსასრულო სამკუთხე პრიზმების მიერ გამოწვეულ გრაფიკულ გავლენას.

გრაფიკული მონაცემების გეოფიზიკურ-გეოლოგიური ინტერპრეტაციის ზოგადი პრინციპული მხარე შემდეგში მდგომარეობს. საკვლევი რაიონში ჩატარებული გრაფიკული და გეოფიზიკურ-გეოლოგიური დაკვირვებების საფუძველზე შეიმუშავენ ამ რაიონის აგებულების წინასწარი ხასიათის სქე-

მას და თეორიულად გამოითვლიან გრავიტაციული ველის შესაბამე განაწილებას, რომელსაც ადარებენ შემდეგ დაკვირვებით მიღებულ მონაცემებს გარკვეული პროფილის მიხედვით.

გამოთვლილი და დაკვირვებული მონაცემების ერთმანეთთან შედარებისას მიღებული დამთხვევა ან თანხმობა ცდომილების ფარგლებში მომასწავებელია აგებულების შესახებ შერჩეული სქემის სისწორისა. ხშირად ასეთი თანხმობა მყარდება არა უცებ და ერთბაშად, არამედ შერჩეული სქემის რამოდენიმეჯერ გადაკეთების, შესწორების ან კიდევ შეცვლის გზით. ამრიგად, საინტერპრეტაციო გამოთვლების შინაარსი გრავიმეტრიაში მდგომარეობს  $\Delta g$ ,  $W_{\Sigma}$ ,  $W_{\Delta}$  და სხვა სიდიდეების დაკვირვებულ მრუდების მახასიათებელ ელემენტების განსაზღვრაში და თეორიულ მრუდებთან მათი თანხმობის პოვნის გზით ანომალიების გამომწვევი მასების თვისობრივ და რაოდენობრივ დახასიათებაში.

იმისათვის, რომ ადვილად და მართებულად მივალწიოთ საძიებო გრავიმეტრიის შებრუნებული ამოცანის დამაჯერებელ ცალსახა ამოხსნას, საჭიროა ამაზე ვიზრუნოთ უკვე ძიების დაყენებისთანავე და ამ დროს მტკიცედ დავიცვათ შემდეგი პრინციპი: ცნობილიდან და შემოწმებულიდან უცნობისაკენ გადასვლა თანდათანობითა და თანმიმდევრული გზით. ეს



ნახ. 83.

პრინციპი იმას გულისხმობს, რომ გრავიმეტრიული ძიება ჯერ გეოლოგიურად და გეოფიზიკურად კარგად შესწავლილ უბანში უნდა დაიწყოთ და ვცადოთ, ხოლო შემდეგ, სათანადო ეტალონის გამომუშავების საფუძველზე, გავავრცელოთ იგი საკვლევი რაიონის შედარებით სუსტად შესწავლილ და სრულიად უცნობ დაწარჩენ უბნებზე. ხშირად ეს პრინციპი დარღვეულია და უგულვებელყოფილი გეოფიზიკური ძიების პრაქტიკაში. ამას კი შედეგად შებრუნებული ამოცანის ამოხსნისათვის საინტერპრეტაციო ხასიათის დამატებითი სიძნელეები მოსდევს და გაწეულ დაკვირვებებს არსებითად გამოუყენებელსა ხდის, რა რიგ მაღალ მეცნიერულ დონეზე არ იყოს ჩატარებული ეს გრავიმეტრიული დაკვირვებები. ეს პრინციპი ერთნაირად შეეხება საძიებო გეოფიზიკის დანარჩენ მეთოდებსაც.

სასარგებლო ნამარხების და სხვა გეოლოგიური სხეულები მიწის წიაღში იშვიათად მოპოვებიან წესიერი გეომეტრიული ფორმით და ერთგვაროვანი

ფიზიკური თვისებით, ამიტომ აგ. II, III და სხვა სიდიდეების საანგარიშო ფორმულებს მიახლოებითი წნიშვნელობა ენიჭებათ. გრავიმეტრიაში ასეთი საანგარიშო ფორმულები გამოყენილია და შესაბამის ინტერპრეტაციის მეთოდები დამუშავებულია სფეროს, ცილინდრის, პარალელოპიპედისა და ირიბკუთხა სხეულებისთვის, აგრეთვე ვერტიკალური და დახრილი საფეხურებისა და შრენაუებისათვის სასრულო და უსასრულო შემთხვევებში.

აღნიშნული საანგარიშო ფორმულების გამოყენებისას საგრებლობენ სიმძიმის ძალის პოტენციალის თეორიის მეთოდებით, ხოლო გამოთვლებს აწარმოებენ როგორც ანალიზური, ისე გრაფიკული ხერხებით, აგრეთვე სპეციალური საანგარიშო მანქანებით.

### § 2. სფეროს გრავიტაციული ეფექტო

აქ მოცემულია აგ. IV, IV<sub>1</sub> და IV<sub>2</sub> სიდიდეების საანგარიშო ფორმულების გამოყენა, მაგალითის სახით, სფეროს ფორმის სხეულებისათვის, როცა მიწის ზედაპირი მიჩნეულია სიბრტყედ,  $x$  და  $y$  ღერძები მოთავსებულია ჰორიზონტულ სიბრტყეში,  $z$  ღერძი მიმართულია ვერტიკალურად ქვემოთ, ხოლო  $\sigma$  ამ ჯერად აღნიშნავს კარბ სიმკვრივეს. ერთეული მასის მქონე წერტილის კოორდინატები იყოს  $x_1, y_1, z_1$ , ხოლო მისი მიმზიდველი  $m$  მასის მქონე წერტილის კოორდინატები აღვნიშნოთ  $x, y, z$ .

I თავის § 1 და § 2-ს საფუძველზე მთლიანი განფენილობის სხეულისათვის სიმძიმის ძალის დაძაბულობის მდგენელები და პოტენციალური ფუნქცია ჩაიწერება ასე:

$$\left. \begin{aligned}
 g_x &= f \int \frac{x-x_1}{r^3} dm \\
 g_y &= f \int \frac{y-y_1}{r^3} dm \\
 g_z &= f \int \frac{z-z_1}{r^3} dm
 \end{aligned} \right\} \quad (XIV.1)$$

$$W = f \int \frac{dm}{r} = f \sigma \iiint \frac{dx dy dz}{r} \quad (XIV.2)$$

სადაც

$$r = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2}$$

და

$$dm = \sigma dx dy dz.$$

ინტეგრება ვრცელდება სხეულის მთელ მოცულებაზე.  $g_x$ -ს ანომალური მნიშვნელობანი აღინიშნება  $\Delta g$ -თი.

(XIV.1-2) გამოთქმებიდან შეიძლება მივიღოთ პოტენციალის წარმოებულთა ინტეგრალური გამოსახულებანი იმ სახით, როგორითაც გამოიყენებიან ისინი ჩვეულებრივ საძიებო გრავიმეტრიაში:  $\Delta g, W_x, W_y, W_z$  და

$2W_{xy}$  სიდიდეებისათვის.  $\Delta g = g_r$ -თვის სათანადო გამოსახულება მიიღება უშუალოდ, ხოლო მეორე რიგის წარმოებულთათვის საჭირო იქნება მოვახდინოთ  $W$  პოტენციალის გაწარმოება მიზიდვის წერტილის  $x_1, y_1$  და  $z_1$  კოორდინატების მიხედვით, მაგალითისთვის, შემდეგნაირად:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ f \int \frac{(z-z_1) dm}{r^3} \right] = \\ &= 3f \int \frac{(x-x_1)(z-z_1) dm}{r^5}. \end{aligned}$$

თუ ამავე დროს კოორდინატთა სათავეს მოვათავსებთ მიზიდვის წერტილში, ე. ი. დავუშვებთ, რომ

$$x_1 = y_1 = z_1 = 0,$$

მაშინ საბოლოოდ მივიღებთ შემდეგი სახის გამოთქმებს მართკუთხა კოორდინატების სისტემაში:

$$\begin{aligned} \Delta g &= f \int \frac{z dm}{r^3} = f \sigma \iiint \frac{z dx dy dz}{r^3} \\ W_{xx} &= 3f \int \frac{xz dm}{r^5} = 3f \sigma \iiint \frac{xz dx dy dz}{r^5} \\ W_{yy} &= 3f \int \frac{yz dm}{r^5} = 3f \sigma \iiint \frac{yz dx dy dz}{r^5} \\ W_{zz} &= 3f \int \frac{(y^2 - x^2) dm}{r^5} = 3f \sigma \iiint \frac{(y^2 - x^2) dx dy dz}{r^5} \\ 2W_{xy} &= 6f \int \frac{xy dm}{r^5} = 6f \sigma \iiint \frac{xy dx dy dz}{r^5}, \end{aligned} \quad (\text{XIV.3})$$

სადაც

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

ახლა ავიღოთ სფეროს ფორმის ერთგვაროვანი სხეული ჰარბი მასით  $M$ . მისი  $c$  ცენტრის მართკუთხა კოორდინატები აღვნიშნოთ შემდეგნაირად:

$$x_c = x$$

$$y_c = 0$$

$$z_c = h.$$

ვიპოვოთ ასეთი სფეროს გრავიტაციული ეფექტი მართკუთხა კოორდინატთა სათავეს მიმართ, სადაც  $x_0 = y_0 = z_0 = 0$ . ამისათვის მივმართოთ (XIV.3) ფორმულებს და ჩავსვათ  $x, y, z$ -ს ნაცვლად სფეროს ცენტრის კოორდინატთა სათანადო მნიშვნელობანი, ხოლო  $dm$ -ის ნაცვლად—სფეროს ჰარბი  $M$  მასა. კოორდინატთა სათავესათვის მივიღებთ:

$$\Delta g = f M \frac{h}{r^3}$$

$$W_{xx} = 3f M \frac{xh}{r^5}$$

$$W_{\Delta} = -3f M \frac{x^2}{r^5}$$

$$2W_{xy} = W_{yz} = 0,$$

(XIV.4)

სადაც

$$r = \sqrt{x^2 + h^2}$$

(XIV.5)

და  $h$  არის სფეროს ცენტრის სიღრმე.აღებული სფეროს  $M$  კარბი მასა მის კეშმარიტ  $M_1$  მასასთან შემდეგ დამოკიდებულებაში იმყოფება:

$$\sigma = \frac{M}{\sigma_1 - \sigma_0} = \frac{M_1}{\sigma_1}$$

$$M_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_0} M.$$

(XIV.6)

აქ  $\sigma = \frac{4}{3} \pi R^3$  არის სფეროს მოცულობა,  $\sigma_1$ —მისი სიმკვრივე, ხოლო  $\sigma_0$ —შემცველი ქანების სიმკვრივე და  $\sigma_1 - \sigma_0 = \sigma$ —კარბი სიმკვრივე.  $\frac{4}{3} \pi (\sigma_1 - \sigma_0) R^3$ 

სიდიდეს სფეროს მოჩვენებითი მასა ეწოდება.

 $\Delta g$ -ს,  $W_{xx}$ -სა და  $W_{\Delta}$  -ს მრუდების ხასიათი სფეროსათვის ნაჩვენებია მე-84 და მე-85 ნახაზებზე. გამოვიყვლით ამ მრუდების გეომეტრიული ხასიათი.

იმისათვის, რომ ვიპოვოთ მრუდების მაქსიმუმებისა და მინიმუმების კოორდინატები, საჭიროა განვისაზღვროთ შემდეგი განტოლებების ფესვები სათანადოდ:

$$\frac{d}{dx}(\Delta g) = 0, \quad \frac{d}{dx}(W_{xx}) = 0$$

და

$$\frac{d}{dx}(W_{\Delta}) = 0.$$

ვიპოვოთ ეს მნიშვნელობები. როცა  $x = \pm \infty$ , მაშინ  $\Delta g$ ,  $W_{xx}$  და  $W_{\Delta}$  ცალ-ცალკე იქცევიან ნულად, აგრეთვე ნულია ორი უკანასკნელი სიდიდე  $x=0$  ზეპტხვევაში.

ჯერ განვიხილოთ  $\Delta g$ -ს მრუდი, რომელიც მოცემულია ნახ. 84-ზე.

$$\frac{d}{dx}(\Delta g) = 0$$

პირობიდან ვლებულობთ, რომ  $x_{max} = 0$ , ე. ი. მრუდის მაქსიმუმი ძვეს სფერული სხეულის ეპიცენტრის ზევით. მისი მნიშვნელობა იქნება:

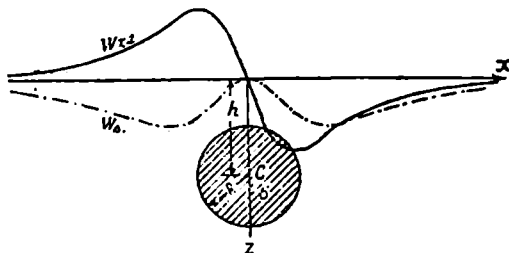
$$\Delta g_{max} = f \frac{M}{h^2} \quad (\text{XIV.7})$$

მოვნახოთ  $\Delta g$ -ს მრუდის აბსცისა, რომლისთვისაც  $\Delta g = \frac{1}{2} \Delta g_{max}$ ; აღნიშნ-

ვთ იგი  $x_{1/2}$ -ით. მისი მნიშვნელობა განისაზღვრება აღნიშნული პირობით, რომელიც (XIV.5—6—7), ფორმულების მხედველობაში მიღებით, შეიძლება გადაიწეროს შემდეგნაირად:

$$\begin{aligned} fM \frac{h}{[(x_{1/2})^2 + h^2]^{3/2}} &= \\ &= f \frac{M}{2h^2}, \end{aligned}$$

საიდანაც, გარდაკმნი-  
სა და შეკვეცის შემ-  
დეგ, მივიღებთ:



ნახ. 85.

$$x_{1/2} = h \sqrt{\sqrt[3]{\frac{3}{4} - 1} - 1} = 0,766h. \quad (\text{XIV.8})$$

თუ ვიცით  $\Delta g_{max}$  და  $x_{1/2}$ , მაშინ (XIV.7—8) ფორმულებით შეიძლება გან-  
ვსაზღვროთ  $h$  და  $M$ , ე. ი. ამოვხსნათ გრავიმეტრიული ძიების შებრუნებუ-  
ლი ამოცანა.

ახლა განვიხილოთ  $W_{\Sigma}$ -სა და  $W_{\Delta}$ -ს მრუდები, რომელნიც მოცემულია

ნახ. 85-ზე.  $\frac{d}{dx}(W_{\Sigma}) = 0$  პირობიდან ვლებულობთ:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx}(W_{\Sigma}) &= \frac{d}{dx} \left[ 3fM \frac{xh}{(x^2 + h^2)^{3/2}} \right] = \\ &= 3fMh \frac{h^2 - 4x^2}{(x^2 + h^2)^{3/2}} = 0. \end{aligned}$$

აქედან:

$$x_{\Sigma} = \pm \frac{h}{2} \quad (\text{XIV.9})$$

ან კიდევ  $h=L$ , სადაც  $L=x_{max}-x_{min}$  შეადგენს მანძილს  $W_{sz}$  მრუდის მაქსიმუმისა და მინიმუმის წერტილებს შორის.

დავუშვათ  $x = +\frac{h}{2}$ , მაშინ  $W_{sz}$ -ს მაქსიმალური მნიშვნელობა იქნება:

$$(W_{sz})_{max} = 3fM \frac{h^2}{2 \left( \frac{5h^2}{4} \right)^{1/2}} = 0,858 \frac{fM}{h^2} \quad (\text{XIV.10})$$

თუ ვიცით  $W_{sz}$  მრუდის მახასიათებელი ელემენტები  $x_m$ -სა და  $(W_{sz})_{max}$ -ს სახით, მაშინ (XIV.9—10) ფორმულების შემწვობით შეიძლება განვსაზღვროთ სფერული სხეულის  $M$  მასა და მისი ცენტრის მდებარეობის  $h$  სიღრმე, ე. ი. ამოვხსნათ გრავიმეტრიული ძიების შებრუნებული ამოცანა ამ შემთხვევაშიც.

$W_{sz}$ -ის ანალოგიურად  $W_{\Delta}$  -თვის მივიღებთ:

$$x_m = \pm h \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (\text{XIV.11})$$

$$(W_{\Delta})_{min} = -0,558 \frac{fM}{h^3}. \quad (\text{XIV.12})$$

მაქსიმუმის წერტილისათვის ამ შემთხვევაში გვექნება:

$$x_m = 0 \text{ და } (W_{\Delta})_{max} = 0.$$

(XIV.11) და (XIV.12) ფორმულების შემწვობით, თუ ვიცით  $x_{min}$  და  $(W_{\Delta})_{min}$ , შეიძლება ამოვხსნათ გრავიმეტრიული ძიების შებრუნებული ამოცანა ამ შემთხვევაშიც და განვსაზღვროთ სხეულის  $M$  და  $h$ .

პრინციპული თვალსაზრისით ანალოგიურადვე ხდება საანგარიშო ფორმულების მიღება და საინტერპრეტაციოდ გამოყენება ცილინდრისა და პარალელელოპიპედის ფორმის, ირიბკუთხა სხეულების, ვერტიკალური თუ დახრილი საფეხურებისა და შრენარებისათვის სასრულო და უსასრულო შემთხვევებში. მაგრამ ამ საკითხებს აქ არ შევხებით.



## თ ა ვ ი X V

### გ რ ა ვ ი მ ე ბ რ ი უ ლ ლ ა კ ვ ი რ ვ ა ბ ა თ ა გ ე ო ლ ო გ ი უ რ ი ი ნ ტ რ ა პ რ ე ა ტ ა ც ი ა

#### § 1. ზოგიერთი მონაზრება გეოლოგიური ინტერპრეტაციის შესახებ

თანამედროვე მეცნიერება დედამიწის შესახებ კვლევის მიზნების, ამოცანების ხასიათისა და მეთოდების მიხედვით იყოფა შემდეგ ძირითად დისციპლინებად: გეოგრაფია, გეოდეზია, გეოლოგია, გეოფიზიკა და გეოქიმია. მათი შესწავლის საგანი დედამიწის სხვადასხვა მხარე არის. როგორცაა: ზედაპირი, ფორმა, აგებულება, ფიზიკური და ქიმიური თვისებები. თითოეული დისციპლინა, ცალკე აღებული, თავის ჩარჩოებში ითვისებს მრავალ ისეთ დარგსა და მეთოდს, რომლებიც უკანასკნელ ხანებში ან უფრო ადრე დამოუკიდებელ მეცნიერებად ჩამოყალიბდნენ საკუთარი საგნით, მიზნებითა და კვლევის მეთოდებით.

დედამიწის შესახებ მეცნიერებათა შეპაღვენელი დარგების ასეთი დრფერენციაცია და სპეციალიზაცია დიდი ხანია დაიწყო, მაგრამ თავისი განვითარების უმაღლეს წერტილს XIX და XX საუკუნეების ნიჯნაზე მიაღწია და დღესაც გრძელდება.

თუ წინათ, უნივერსალური ცოდნის პერიოდში, ერთი და იგივე კვლევური შეიძლებოდა ყოფილიყო და იყო კიდევ, — მეცნიერებათა განვითარების შედარებით დაბალი დონის გამო, — ერთსა და იმავე დროს გეოლოგიკ, ფიზიკოსიკ, ქიმიკოსიკ, მათემატიკოსიკ და ასე შემდეგ. ახლა ასეთი რამ წარმოუდგენელია და შეუძლებელი მეცნიერებათა უსასრულო დიფერენციაციისა და ვიწრო სპეციალიზაციის გამო.

დღეს ძნელია, მაგალითად, მოიძებნოს ისეთი გეოლოგი, რომელიც თანაბრად ავტორიტეტული სპეციალისტი იყოს ტექტონიკაშიც და სტრატეგრაფიაშიც, ისეთი გეოფიზიკოსი, რომელიც თანაბარი წარჩატებებით მოღვაწეობდეს გრავემეტრიასა და სეისმოლოგიაში. მიუხედავად ამისა, მეცნიერების ერთი დარგი კი არ ენწყვეტება თავის ვიწრო ჩარჩოებში, არამედ სარგებლობს მონათესავე დარგების მზამზარეული მონაცემებით და თავის მხრივაც პოულობს გამოყენებას მთელ რიგ მეზობელ დისციპლინებში. ამის თვალსაჩინო მაგალითს გრავემეტრია წარმოადგენს. გრავემეტრიულ მონაცემებს თითქმის თანაბარი ინტერესით ეკიდებიან და იყენებენ გეოდეზიასა და ასტრონომიაში. გეოლოგიასა და გეოფიზიკაში და ა. შ. ასეთი გამოყენების შედეგად აღმოცენდნენ და უკანასკნელ ხანებში განვითარდნენ ახალი დარგები, რომელთაც ეწოდ-

ბათ: გეოდებიური გრავიმეტრია და გეოლოგიური გრავიმეტრია, რომელიც თავის შინაარსით გრავიმეტრიული დაკვირვებების გეოლოგიურ ინტერპრეტაციას წარმოადგენს.

როგორც ცნობილია, გეოლოგია ზეისწავლის მიწის ქერქის შედგენილობასა და აგებულებას, აგრეთვე მისი განვითარების ისტორიას. მაგრამ გეოლოგიურ დაკვირვებათა ჩაწვდომის სიღრმე საერთოდ მეტად უმნიშვნელოა და შეზღუდული ქერქის სისქესთან და თვით დედამიწის ზომებთან შედარებით.

გეოლოგიური აგებვა შეუძლებელია, როცა საკითხი ეხება ისეთი რაიონების აგებულების შესწავლას, რომლებიც დაფარულია თანამედროვე ნალექებითა და ზღვებით და მიუწვდომელი რჩება გეოლოგის უშუალო დაკვირვებებისათვის, როცა ძირითადი ქანები და სასარგებლო ნამარხები დაფარულია სქელი ნაყარით და სათანადო გაშიშვლებები სპორადულად და შეზღუდულად გვხვდება.

ასეთ პირობებში გეოლოგია იძულებულია დახმარებისათვის მიმართოს და თავის მიზნებისათვის ფართოდ გამოიყენოს ბურღვისა და სხვა სამთო სამუშაოების მონაცემები, აგრეთვე, განსაკუთრებით უკანასკნელ ხანებში, — გეოფიზიკური და გეოქიმიური გამოკვლევების შედეგები. მაგრამ ბურღვაც, ტექნიკური მიზეზების გამო, შეიძლება მხოლოდ გარკვეულ სიღრმემდე, 5—7 კმ, და თვით გეოფიზიკურ მეთოდებსაც კი ჩვევით თავისი საკუთარი, სპეციფიკური შეზღუდულობანი, რაც დაკავშირებულია უმთავრესად შედეგების გეოლოგიური ინტერპრეტაციის მრავალსახეობასთან.

აქედან გასაგები და მეცნიერულად სავსებით გამართლებული ჩანს გეოლოგიურ-აგეგმვითი, გეოფიზიკური და სამთო-ბურღვითი სამუშაოების გარკვეული თანმიმდევრობით ან პარალელურად წარმოება და მიღებული შედეგების კომპლექსურად განზოგადება.

ძიების გეოფიზიკური მეთოდები—გრავიმეტრია, სეისმოლოგია, მაგნიტოპეტრია, ელექტრომეტრია, გეოთერმია და სხვა—მართალია, უფრო ფართოდ და ღრმად წყდებიან მიწის ქერქს, ვიდრე გეოლოგიური აგებვა, სამთო სამუშაოები და ბურღვა, მაგრამ დიდი სიღრმეების შემთხვევაში ხშირად დაუდასტურებელი რჩებიან საინტერპრეტაციო სქემების შემოწმების თვალსაზრისით და შეზღუდულიც პრაქტიკული გამოყენების მხრივ, როცა ამა თუ იმ რაიონში სახეუ არ არის აუცილებელი განსხვავება საძიებო ობიექტისა და მისი შემცველი გარემოს ფიზიკურ თვისებებში და აქასთან იგი მოქცეულია მეტად რთულ გეოლოგიურ-ტოპოგრაფიულ პირობებში. ეს გარემოებაც ზედმეტად ადასტურებს გეოლოგიის, გეოფიზიკისა და სამთო საქმის კვლევის მეთოდების კომპლექსურად გამოყენებისა და მათი შედეგების კომპლექსურადვე განზოგადოების აუცილებლობას.

რეგიონული გრავიმეტრიული აგებვა საშუალებას გვაძლევს წარმატებით შევიცნოთ არა მარტო მიწის ქერქის საერთო აგებულება, არამედ შევარჩიოთ აგრეთვე ცალკეული რაიონები დეტალური ძებნა-ძიებისათვის. ამასვე ადასტურებენ სხვა გეოფიზიკური მეთოდებიც. ამ მხრივ აღსანიშნავია რეგიონული ხასიათის გეოფიზიკური ძიებანი დნებარ-ლონეცის აუზში, თურქ-

მენეთის დასავლეთ რაიონებში, ბაშკირეთში, პერმის, კიროვისა და სხვა ოლქებში. ურალ-ემბის რაიონში გრაფიმეტრიამ აღმოაჩინა მარილის გუმბათების სტრუქტურების დიდი რიცხვი, რომელნიც ნავთობის მატარებელი აღმოჩნდნენ. თურქმენეთში გეოფიზიკური მეთოდების კომპლექსურად განოყენებამ აღმოაჩინა გაზისა და ნავთობის ახალი საბადოები. ანალოგიური შედეგებია მიღებული გროზნოს ოლქში, აზერბაიჯანში და სხვა რაიონებში. მაგრამ იქ, სადაც გრაფიმეტრია გამოეთიშა გეოფიზიკის სხვა მეთოდებს, გეოლოგისა და სამთო საქმეს, მივიღეთ შეცდომები და ჩამორჩენა. მაგალითად ბაშკირეთში, როცა მხოლოდ გრაფიმეტრიული ავეჯმეის მონაცემების მიხედვით გაიყვანეს კაბურღილები, აღმოჩნდა, რომ გრაფიმეტრიული მაქსიმუმები მთელ რიგ შემთხვევებში უპასუხებენ სტრუქტურების არა თალურ ნაწილს, არამედ პერმის ასაკის ფერადი შრენარის სიმძლავრის გაზრდას. ასევე უარყოფითი შედეგები გამოიღო გეოფიზიკური და გეოლოგიური მონაცემების კომპლექსის დარღვევამ რომენის ნავთობის საბადოზე უკრაინაში და სხვაგან.

გეოფიზიკური ძიების, გეოლოგიური ავეჯმეისა და სამთო საქმის შედეგების განზოგადოებისას, მათი კომპლექსის დარღვევის შემთხვევაში, მოსალოდნელია უხეში შეცდომები გეოფიზიკური მონაცემების გეოლოგიურ ინტერპრეტაციაში, რაც ზიანს აყენებს გეოფიზიკური მეთოდების რეპუტაციას და საერთოდ მეცნიერების საქმეს. ამის მაგალითები მრავალია. საკმარისია მოვიგონოთ ცნობილი დისკუსია ჩვენი ქვეყნის გამოჩენილ გეოფიზიკოსებსა და გეოლოგებს შორის კრისტალური ფუნდამენტის მღებარეობის შესახებ მოსკოვის რაიონში.

ანომალიების ინტერპრეტაციის მიზნით სასარგებლოა წინასწარ მოვახდინოთ მათი კლასიფიკაცია სათანადო შესწორების ფიზიკური შინაარსისა და ანომალიების გეოფიზიკურ-გეოლოგიური ნიშნების მიხედვით. დაკვირვებით მიღებული სიმძიმის ძალის არსებული რედუქციები მათი ფიზიკური შინაარსის მიხედვით შეიძლება შემდგენიარად დავაჯგუფოთ: 1. რედუქციები სიმაღლეზე, 2. შესწორებები მასის სიმკვრავეზე და 3. რედუქციები სიმაღლეზე და სიმკვრივეზე ერთდროულად. აქედან გამომდინარეობს სიმძიმის ძალის შესწორებათა სათანადო ფიზიკური კლასიფიკაცია.

თუ დაკვირვებულ ანომალიათა კლასიფიკაციას საფუძვლად დავუდებთ სხვა კრიტერიუმს, სახელდობრ მათი ვაერტელების მასშტაბსა და ხასიათს, მაშინ შეიძლება ერთმანეთისაგან გამოიყოს მიკროლოკალური, ლოკალური, რეგიონული და მაკრორეგიონული ანომალიები. თუ კი ანომალიებს გეოლოგიური თვალსაზრისით განვიხილავთ, მაშინ სიმძიმის ძალის რეგიონული ანომალიები შეიძლება დაიყოს ბაქნურ და გეოსინკლინურ ანომალიებად. ისინი იჩენენ განსხვავებას ანომალიების ინტენსივობის, გრადიენტისა და ზონალური ვაერტელების მხრივ, აგრეთვე მათი გამომწვევი მასების სიღრმეში მღებარეობის მხრივ.

სიმძიმის ძალის შესწორებათა და ანომალიების კლასიფიკაციის სქემა აღნიშნული გეოფიზიკურ-გეოლოგიური ნიშნების მიხედვით მოცემულია აქ მოთავსებულ ცხრილში:

**სიმამის ძალის შესწორებათა და ანომალიების კლასიფიკაციის სქემა**

შესწორებათა და ანომალიების ჩამოთვლა მათი ფიზიკური შინაარსის მიხედვით	დადებითი და უარყოფითი ანომალიები	
	მათი გავრცელების მასშტაბისა და მთლიანი ხასიათის მიხედვით	სხვა გეოფიზიკური და გეოლოგიური ნიშნებით (ზონალობა, გრადიენტი და სიდიდით ანომალიები-სა, მათი გამოწვევი მასების მდებარეობა სიღრმეში)
1	2	3
<p><b>I. შესწორებები ხიმაღლეზე:</b></p> <p>1. აბსოლუტურ, 2. შეფარდებით, 3 მაქსიმალურ, 4. საშუალო და 5. გეოიდალურ სიმაღლეებზე ცალცალკე;</p> <p><b>II. შესწორებები ხიმკვრივეზე</b></p> <p>6. ახლო ადგილის რელიეფის, 7. მიწის ზედაპირის მთელი ტოპოგრაფიის, 8. შეუღედი, 9. იზოსტახისური, 10 ჰიდროსტატუური, 11. კონდენსაციისა და 12. ინვერსიის მასებისა ცალცალკე;</p> <p><b>III. ანომალიები შესწორებებით ხიმაღლეზე და ხიმკვრივეზე ერთდროულად</b></p> <p>13. თაის ანომალია (რელიეფზე შესწორებით და უიმი-სოდ),</p> <p>14. ბუგეს ანომალია (შესწორებებით სიმაღლეზე, შეუღედ შრეზე და ადგილის რელიეფზე და უკანასკნელის გარეშე),</p> <p>15. პუნჯარე-პრეის ანომალია (შესწორებებით სიმაღლეზე და გეოგრაფიულ შეუღედ შრეზე),</p> <p>16. იზოსტახისური ანომალიები (შესწორებებით სიმაღლეზე, ტოპოგრაფიულ და იზოსტახისურ მასებზე).</p>	<p>1. მიკროლოკალური (ნაკლები 1 კმ<sup>2</sup>)</p> <p>2. ლოკალური (მეტე 1 კმ<sup>2</sup> და ნაკლები 100 კმ<sup>2</sup>)</p> <p>3. რეგიონული (მეტე 100 კმ<sup>2</sup> და ნაკლები 1000000 კმ<sup>2</sup>)</p> <p>4. მაკრორეგიონული (მეტე 1000000 კმ<sup>2</sup>)</p>	<p>{ I. გეოსინკლინური</p> <p>{ II. ბაქნური</p>

მიწის წიაღში არსებული სასარგებლო ნაშენების გრავიმეტრიული მეთოდებით ძიებისას ყველაზე უფრო საინტერესოა ქანებისა და მადნების სიმკვრივეთა განაწილება მიწის ზედაპირის ახლოს, სადაც კი მიწვედება სამთომადნო საქმე. ხოლო დედამიწის ქერქის აგებულების ზოგადი საკითხების შესწავლისას პირველ პლანზე გამოდიან სიღრმის მასები.

ინტერესთა ასეთმა სხვადასხვაობამ დააყენა საკითხი დაკვირვებით მიღებული გრავიტაციული ეფექტის დანაწევრების შესახებ. ასეთი დანაწევრების ჩატარება ყოველთვის ადვილი საქმე როდია, და დამატებით ქმნის ზედმეტ ახალ მნიშვნელოვან დაბრკოლებას ინტერპრეტაციის დროს, განსაკუთრებით, როცა კვლევის ობიექტი რთულ გეოლოგიურ-ტოპოგრაფიულ პირობებშია მოქცეული.

დაკვირვებით მიღებული გრავიტაციული ეფექტი ძირითადად ორ ნაწილად იყოფა: ლოკალურ და რეგიონულ ანომალიებად. ლოკალურ ანომალიებს აპირობებს მცირე მასების ესა თუ ის განაწილება ზედაპირულ შრენარში. ლოკალური ანომალიები, როგორც ზემოთ ვნახეთ, შეიძლება თავის მხრივ გაიყოს ორ ჯგუფად: მიკროლოკალური და ლოკალური ანომალიები. ლოკალური ანომალიებისათვის დამახასიათებელია Δ $\rho$ -სა და გრადიენტის მკვეთრი ცვლა სიდიდის და ნიშნის მიხედვით მცირე მანძილების უარკლებში.

რეგიონულ ანომალიებს მიწვევენ მიწის ქერქში ღრმად მდებარე დიდი ზომებისა და გავრცელების მქონე ქარბი მასები: რეგიონული ანომალიებიც ცნობილია აგრეთვე საერთო გავლენის, გრავიტაციული ფონის ან სიღრმითი გეოლოგიის გავლენის სახელწოდებით. რეგიონული ანომალიები, თავის მხრივ, შეიძლება გაიყოს ორ ჯგუფად: რეგიონული და მაკრორეგიონული ანომალიები.

რეგიონული ანომალიებისათვის, ლოკალურთან შედარებით, დამახასიათებელია გამოვლინებისა და ცვლის სულ სხვა მასშტაბი და ბარისხი: Δ $\rho$ -ს სიდიდის მრუდები გაშლილი და ტალღობრივი ხასიათისაა.

აღნიშნული ნიშნებით ლოკალურისა და რეგიონული ანომალიების ერთმანეთისაგან გარჩევა შედარებით ადვილია, მაგრამ მათი რაოდენობრივი დიფერენცირება მეტად რთული და ზაძნელო საქმეა, ხშირად კი შეუძლებელიც.

ლოკალური ანომალიის დიფერენცირება რეგიონული ფონზე სხვადასხვა ხერხითა და წესით წარმოებს, მაგრამ არც ერთი მათგანი უნაკლო და საყოველთაოდ მიღებული არ არის. დიდი ზომის ანომალიები შეადგენენ საერთო ფონს უფრო მცირე ანომალიებისათვის შემდეგი თანმიმდევრობით: მაკრორეგიონული, რეგიონული, ლოკალური და მიკროლოკალური ანომალიები.

დაკვირვებათა ინტერპრეტაციის ქვეშ გულისხმობენ ანომალური მასების კონფიგურაციის, სიღრმეში მდებარეობისა და სიმკვრივის განსაზღვრას. არსებითად ეს ამოცანა განუსაზღვრელია, რადგან არსებობს მასების ან მათი განაწილების წესთა უსასრულოდ დიდი რიცხვი, რომელიც იძლევა ერთსა და იმავე გავლენას. მაგრამ პრაქტიკაში შესაძლებელია დაუადგინოთ საკმარისი ვიწრო ფარგლები ამოცანის მრავალსახა ამოხსნებისათვის, თუ მივმართავთ გეოლოგიურ და გეოფიზიკურ მოსაზრებებს, თუმცა, როგორც მიხილოვც აღნიშნავს, ძნელია მივუთითოთ გარკვეულ წესზე ან რიცეპტზე გრავიმეტრიულ დაკვირვებათა ინტერპრეტაციის დროს.

თუ განვიხილავთ მიწის ზედაპირზე რომელიმე წერტილს იზოლირებულად, მაშინ მასზე დაკვირვებული სიმძიმის ძალის ანომალია თანაბარი უფლებით შეიძლება მიეწეროს შორეული და დიდი ან ახლოდელი და მცირე მასის მოქმედებას. მაგრამ თუ ხელთ გვექნება სიმძიმის ძალის განაწილების სურათი გარკვეულ ფართობზე, მაშინ ანომალიების ნელი და სწრაფი ცვლა საშუალებას მოგვცემს გავერკვეთ შესაბამისად შორეულ და დიდ თუ ახლოდელ და მცირე მასებთან გვაქვს საქმე.

## § 2. გეოლოგია და გრავიმეტრია

ამ სათაურით 1933 წელს გამოქვეყნდა აკად. არხანგელსკის შესანიშნავი მონოგრაფია, სადაც ჩატარებულია გრავიმეტრიული მონაცემების გეოლოგიური ინტერპრეტაცია და არსებული საინტერპრეტაციო თეორიების დასაბუთებული კრიტიკა.

არხანგელსკის ძირითად დასკვნებს უპირისუპირად დიდი მნიშვნელობა აქვს არა მარტო საბჭოთა კავშირის ტერიტორიის გრავიმეტრიული აგეგმვის შედეგების მართებული განზოგადოებისათვის, არამედ 1952 წელს ფონგოლოვინის მიერ შედგენილი და გამოქვეყნებული მსოფლიოს გრავიმეტრიული რუკის საერთო გეოლოგიური მნიშვნელობის შესაფასებლადაც, რასაც ქვემოთ მომდევნო პარაგრაფში შევეხებით.

„სიმძიმის ძალის საქანიან განსაზღვრებში, წერდა 20 წლის წინათ აკად. არხანგელსკი, ჩვენ შეგვიძლია ვიგულვოთ მიწის ქერქის იმ ნაწილების შესწავლის მეტად ძვიოფასი ხერხი, რომლებიც მიუწვდომელია უშუალო გამოკვლევებისათვის. მაგრამ საჭიროა მთელის სიმკვეთრით ხაზი გაუსვას იმ მდგომარეობას, რომ კვლევის ამ მეთოდის დაუფლებისათვის გაკეთებულია ძლიერ ცოტა და მოგვეთხოვება ჯერ კიდევ დიდი თეორიული მუშაობა იმისათვის, რომ მივიღოთ შესაძლებლობა ადვილად და სწორად ავსნათ დაკვირვებები“.

ამავე პერიოდს ეკუთვნის მიხაილოვის ცნობილი წიგნის გამოსვლა, სათაურით: „გრავიმეტრიისა და დედამიწის ფიგურის თეორიის კურსი“, სადაც მართებულად არის აღნიშნული, რომ ...„გრავიმეტრიის გამოყენება გეოლოგიის დარგში მოითხოვს, უპირველეს ყოვლისა, გაშუქებას გეოლოგიური მხრით. გრავიმეტრიის გამოყენება საძიებო მიზნებით დაკავშირებული უნდა იყოს ღრმა გეოლოგიურ ანალიზთან, რომ ავიცილოთ სამუშაოთა ტექნიკის რეკეტული აღწერა და შემთხვევითი მაგალითების ჩამოთვლა“.

არხანგელსკის და მიხაილოვის ეს მითითებები შეადგენენ სახელმძღვანელო იდეებს უკანასკნელი ოცი წლის განმავლობაში საბჭოთა კავშირის ტერიტორიის საერთო გრავიმეტრიული აგეგმვის, იზოანომალების რუკების შედგენისა და გეოლოგიური ინტერპრეტაციის ცდების დროს ცალკეული საინტერესო რაიონების მიხედვით.

სიმძიმის ძალის ზუსტი გაზომვებისა და აგეგმვის მასშტაბების მხრივ გრავიმეტრიამ დიდ წარმატებებს მიაღწია, მაგრამ დაკვირვებების რედუქციისა და გეოლოგიური ინტერპრეტაციის თვალსაზრისით ის კვლავაც განაგრძობს ჩამორჩენას. გრავიმეტრისტები ჩვეულებრივ ამთავრებენ თავიანთ კვლევას ნახევარგზაზე იმით, რომ კმაყოფილდებიან მხოლოდ დაკვირვებებითა და ანომალიების გამოთვლებით და სხვადასხვა მოტივით ერიდებიან მიღებული შედეგების გეოლოგიურ ანსნას, რომელიც ყველაზე საინტერესო და საპასუხისმგებლო ეტაპია კვლევის ამ დარგში. ზოგი გეოფიზიკოსი იმასაც კი გვიმტკიცებს, რომ რედუქცია იგივე ინტერპრეტაცია არისო. მაგრამ ეს შემცდარი მტკიცებაა.

დაკვირვებით მიღებული სიმძიმის ძალის რედუქციები, მათ რიცხვში იზოსტაზისური რედუქციაც სხვადასხვა ვარიანტში, როგორც ზემოთ XI თავ-

ში დავინახეთ, მხოლოდ საველე დაკვირვებების დამუშავების მეთოდოლოგია და მეტი არაფერი, ხოლო ინტერპრეტაცია კი შემდგომი დასკვნითი ეტაპია და განზოგადოება, რომელიც მიღებულია მონაცემების გეოლოგიური, გეოფიზიკური თუ გეოდეზიური ხასიათის ანალიზით.

არ უნდა ვიფიქროთ, რომ სათანადოდ შემოწმებული გეოლოგიური საფუძელის, სახელდობრ, დასაბუთებული თეორიის ან სამუშაო ჰიპოთეზის გარეშე როდესმე შეგვეძლება მივალწიოთ სიმძიმის ძალის დაკვირვებით მიღებული ანომალიებისა და სხვა გეოფიზიკური მონაცემების ადვილსა და სწორ ინტერპრეტაციას არა მარტო დედამიწის მთელ ზედაპირზე, არამედ მიწის ქერქის ცალკეულ უბნებზეაც. ამის თვალსაჩინო მაგალითებს გვაძლევს მსოფლიოსა და საბჭოთა კავშირის გრაფიკური რუკების გეოლოგიური ინტერპრეტაცია, რასაც ქვემოთ შევხებით.

სიმძიმის ძალის დღემდე ცნობილი საინტერპრეტაციო თეორიები პირდაპირ ან მეშვეობით უკავშირდებიან იზოსტაზისის პრინციპს ან მიწის წიაღში არსებულ კონვექციურ დინებათა ჰიპოთეზს. არხანგელსკისა და ბელოუსოვის აზრით, დადებითი და უარყოფითი ანომალიები განისაზღვრებიან ქერქის ქვეშ მოქცეული ნივთიერების სათანადოდ შეკუმშვითა და გაფართოებით. ჰეისკანენისათვის ანომალიები წარმოადგენენ კრიტერიუმს იზოსტაზისური კომპენსაციის ხარისხის დასადგენად მიწის ზედაპირის სხვადასხვა უბნებზე. ვენინგ მენინსის აზრით, მძლავრი უარყოფითი ანომალიები ოსტინდოეთში უნდა აიხსნას მიწის ქერქის ფაღუნვით. გლენის შეხედულებით, დადებითი და უარყოფითი ანომალიები უკავშირდებიან მიწის ქერქის სათანადო უნდულაციას ზევითა და ქვევით. გრიგისა და პეკრისის მოსაზრებით, სხვადასხვა ნიშნის ანომალიები გამოწვეულია კონვექციური დინებებით კონტინენტების ადგილას—ზევით (უარყოფითი ანომალიები) და ოკეანეების ქვეშ—ქვევით (დადებითი ანომალიები).

ეს თეორიები შეეხებიან სიმძიმის ძალის რეგიონულ, უფრო სწორად, მაკრორეგიონულ ანომალიებს, რომელთაც ამ ჯერად კონტინენტური ან ოკეანური მასშტაბი ახასიათებთ. ასეთი მაკრორეგიონული ანომალიები მკვეთრად გამოიყოფიან ეონგოლოგიის მსოფლიო გრაფიკური რუკაზე. შევეცადოთ გავაყვით ამ რუკის გეოლოგიური ინტერპრეტაცია ბელოუსოვისა (1948 წ., 1952 წ.) და ჯანელიძის (1952 წ.) მიერ მოწოდებული ახალი თეორიების საფუძველზე მიწის ქერქის გეოლოგიური აგებულების შესახებ.

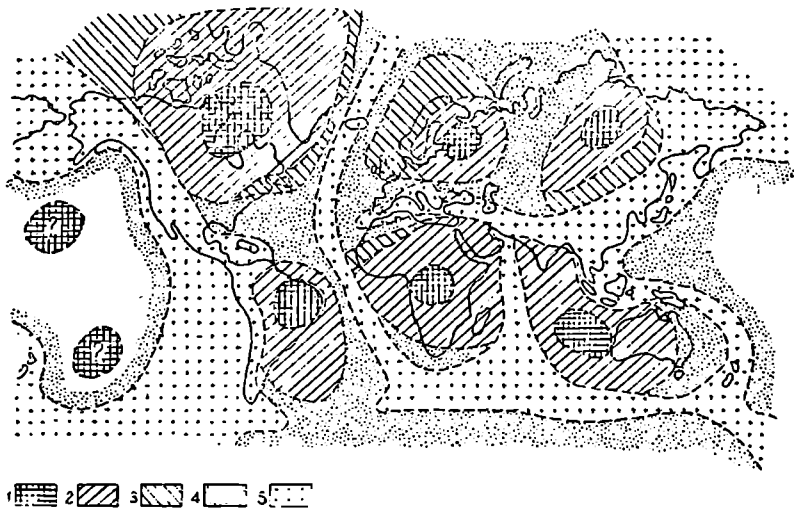
### § 3. მსოფლიო გრაფიკური რუკის გეოლოგიური ინტერპრეტაციის ცდა

გეოლოგიური მონაცემების მიხედვით, როგორც ცნობილია, მიწის ქერქში გამოიყოფა ერთმანეთისაგან მკვეთრად განსხვავებული ერთეულები. ეს ერთეულებია: ბაქნები და გესინკლინები.

ბაქნებისათვის დამახასიათებელია მცირე ამპლიტუდისა და ნელი ტემპით მიმდინარე აწევა-დაწევა, აგრეთვე შემადგენელი ქანების სიძველე, მეტამორფიზმი, სიმტკიცე და ამგვარ ფუნდამენტზე განლაგებული ნალექების მცირე სისქე, დიდი გავრცელება და მათში ხშირი ხარვეზები.

გეოსინკლინები, პირიქით, ხასიათდებიან დიდი ამპლიტუდისა და სისწრაფის ვერტიკალური რხევებითა და პორიზონტული მიგრაციით, აგრეთვე მეტად მძლავრი ნალექების უწყვეტი დაგროვებითა და ვიწრო ზოლური გავრცელებით დიდ მანძილებზე. აქედან გამომდის, რომ გეოსინკლინები—ლაბილურია. ხოლო ბაქნება—სტაბილური.

ბელოუსციის მოსახრებით, მიწის ზედაპირი ერთი მთლიანი გეოსინკლინით იყო დაფარული კამბრიულისწინა დროში. გეოლოგიურ დროთა ვითარებაში ამ პირვანდელ გეოსინკლინში აქა-იქ გაჩნდნენ პირველი ბაქნები, რომელნიც მალე გადაიქცნენ კიდეკაც მიწის ქერქის სტაბილიზაციის პირვანდელ კერებად (ცენტრებად). ეს კერები მდებარეობენ ეკვატორის ორივე მხარეზე ერთი მეორის მოპირდაპიოდ, თანაბარ მანძილებზე და სიმეტრიულად (ნახ. 86).



ნახ. 86.

სტაბილიზაციის პირვანდელი კერებია: ციმბირის, აღმოსავლეთ ევროპისა და ჩრდილოეთ ამერიკის ბაქნები—ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში; ინდოეთი-ავსტრალიის, აფრიკისა და სამხრეთ ამერიკის ბაქნები - სამხრეთ ნახევარსფეროში. გარდა ამისა, წინასწარი ვარაუდით ასეთი კერები არის აგრეთვე წყნარი ოკეანის ჩრდილოეთ და სამხრეთ ნაწილებში.

ამრიგად, ამ თეორიის მიხედვით, დედამიწის ზედაპირზე სტაბილიზაციის რვა კერა არის და მანძილები მათ შორის თითქმის თანაბარია. მიწის ქერქის ისტორიის განმავლობაში ბაქნების ფართობების ზრდას ადგილი ჰქონდა მეზობელი გეოსინკლინების ხარჯზე. ამით უნდა აიხსნას ის გარემოება, რომ ალპურ გეოსინკლანს უკავია უფრო მცირე ფართობი, ვიდრე ჰერ-



ცინულს, ხოლო ჰერცინჟულს შეესაბამება კიდევ უფრო ნაკლები თვითობი, ვიდრე კალედონიურს.

მიწის ღრმა წიაღში ზიმდინარე პროცესებიდან წამყვანი როლი მიეკუთვნება ნივთიერების დიფერენციაციას, რომელიც „მრავალსართულბრივია“ და ზედა „სართულბში“ უფრო სწრაფად ხდება. ვიდრე ქვედაში. ამ დროს „სართულების“ საზღვარზე ადგილი აქვს „სიმპკრივითა ინეგრისას“ და ამის შედეგად ჩნდება არამდგრადი მდგომარეობა, რაც ბლოკდება მძიმე და მსუბუქ ნივთიერებათა ერთდროული მოძრაობით შეასებდრი მიმართულებებით, სათანაოდ ზედა „სართულიდან“ ქვევით და ქვედა „სართულიდან“ ზევით. ასეთი დიფერენციაციის დროს ადგილი აქვს რადიოაქტიური ელემენტების გადაწარმოებას და მასთან დაკავშირებული თერაპიული რეჟიმის შეცვლას სიღრმეში. ნივთიერების დიფერენციაცია არათანაბრად და ჰეროდულად მიმდინარეობს, დაკავშირებულია ტემპერატურის პერიოდულად ცვლასთან დედამიწის შიგნით და საბოლოო ანგარიშში იწვევს ნივთიერების მოცულობისა და სიბლანტის შეცვლას.

ჯანელიძის აზრით, მიწის ქერქის სიალური ნაწილი წარმოშობილია ძირითადად სიმახ ხარჯზე კრისტალიზაციური დიფერენციაციის გზით და ოროგენეზისის შედეგად. იქ, სადაც ოროგენეზისი ადრე დაიწყო და ინტენსიურია, სიალიც უფრო დაწმენდილია და გასქელებული. ასეთ ადგილებს სწორედ კონტინენტები წარმოადგენენ. აზიტამ არის, რომ სიალის გავრელება ძირითადად კონტინენტებისას ემთხვევა, კონტინენტებისა კი—ოროგენეზისას. ატლანტიკური ოკეანის ფსკერზე სიალი თხელია, რადგან აქ ოროგენეზისი სუსტია და გვიან დაიწყო. წყნარი ოკეანის ფსკერზე, მის ცენტრულ ნაწილში, სიმა არის წარმოდგენილი, რადგან ოროგენეზისი მას ჯერ კიდევ არ შეხებია.

სიალი თავიდანვე წყვეტილი იყო, რადგან თვით ოროგენეზისი წყვეტილია და ლოკალიზებული. კონტინენტებისა და ოკეანეების განაწილება მიწის ზედაპირზე ანტიპოდურია და ტეტრაედრს მოგვაგონებს. თუ ტეტრაედრის ოთხ წვეროზე კონტინენტების ცენტრებს წარმოვიდგენთ, მაშინ მოპირდაპირე წახნაგებს ოკეანეები დაიკავებენ. დედამიწა ბრუნვითი სხეულია და მისი ღერძი გაღის ტეტრაედრის წვეროზე და წახნაგის ცენტრში.

დედამიწას თავდაპირველად ვარს ერთეუ უწყვეტი ერთგვაროვანი სიალური ქერქი, რომელმაც ტეტრაედრული დეფორმაცია სიალის გაჩენამდე განიცადა. ოროგენეზისი თავდაპირველად დაიწყო და განვითარდა ტეტრაედრის წვეროებზე და წიბოებზე: ჩნდება კონტინენტები და ოკეანური ღრმულები, სადაც დროთა ვითარებაში ჩადვა წყალი. ამის შემდეგ ოროგენეზისი ჩვეულებრივად კონტინენტების საზღვარზე ვითარდება და მიიწევს თანდათანობით წინ ოკეანეების სიღრმეში. აქედან წარმოსდგება სწორედ ოროგენეზისა და მთების მიგრაციის თეორია, რომელიც აგრეთვე ჯანელიძის ეკუთვნის (1943 წ.).

აგილოთ ეს გეოლოგიური თეორიები საფუძვლად და შევუდგეთ ეონგოლოგიის მიერ შედგენილი მსოფლიოს გრავიმეტრიული რუკისა (ნახ. 78 და 79) და გეოიდალური სკემის (ნახ. 80) განხილვას. ამ რუკებზე გამოიყოფა

სიმძიმის ძალისა და გეოიდის სიმაღლეთა შემდეგი მინიმუმები და მაქსიმუმები:

### I. მინიმუმები:

1. ინდოეთი-საბჰოეთის (—16 მგლ და —77 მ),
2. წყნარი ოკეანის ჩრდილოეთი ნაწილის (+1 მგლ და —50 მ),
3. სამხრეთ პოლუსის მახლობლად (—3 მგლ და—54 მ),
4. სამხრეთი ამერიკის (—3 მგლ და —80 მ.),
5. ავსტრალიის დასავლეთით (+7 მგლ);

### II. მაქსიმუმები:

1. ჩრდილოეთი პოლუსის (+37 მგლ და +40 მ),
2. ავსტრალიის ჩრდილოეთით (+63 მგლ და +85 მ),
3. სამხრეთი აფრიკის (+64 მგლ და +55 მ),
4. წყნარი ოკეანის სამხრეთი—ნაწილის (+64 მგლ და +66 მ),
5. მექსიკის უბის (+27 მგლ).

ამრიგად, გრავიმეტრიული მაქსიმუმი და მინიმუმი ერთად განსახილველ რუკაზე ათია, ხოლო მათი შესაბამისი გეოიდალური ცენტრები სათანადო სქემაზე—რვა. მინიმუმებს შორის მეხუთე, რომელსაც გეოიდზე შესაბამისი აკლია, არის ავსტრალიის დასავლეთით მდებარე მინიმუმი (+7 მგლ), რომელიც ერთიანდება ინდოეთ-საბჰოეთისაში გეოიდზე. მაქსიმუმებს შორის მეხუთე, რომელსაც გეოიდზე შესაბამისი აკლია, არის მექსიკის უბის მაქსიმუმი (+27 მგლ), რომელიც ერთიანდება წყნარი ოკეანის სამხრეთისაში გეოიდზე.

ამგვარად, დედამიწის აღმოსავლეთ და დასავლეთ ნახევარსფეროებზე მკაფიოდ გამოიყოფიან გრავიმეტრიულ-გეოიდალური მაქსიმუმები და მინიმუმები. დასავლეთის ნახევარსფეროზე გამოსახულია ორი მერიდიანული მაქსიმუმი და ორიც ეკვატორული მინიმუმი. აღმოსავლეთის ნახევარსფეროზე გამოსახულია, პირიქით, ორი მერიდიანული მინიმუმი და ორიც ეკვატორული მაქსიმუმი. დედამიწის ამ ნახევარსფეროებს შორის გრავიმეტრიულ-გეოიდალური განსხვავება ძირითადად მხოლოდ იმაშია. რომ მაქსიმუმები და მინიმუმები სიმეტრიულად ინაცვლებენ ადგილს ერთმანეთის მიმართ: აღმოსავლეთის მაქსიმუმების ადგილს დასავლეთში მინიმუმები იკავებენ და მინიმუმებისას—მაქსიმუმები. შევეცადოთ ამ მოვლენის გეოლოგიური ახსნა. ახსნის ორი სხვადასხვა ვარიანტი გვესახება. ვიღრე ამ ვარიანტებს განვიხილავდეთ, საკიროა აღინიშნოს შემდეგი. ერთი ის, რომ შემჩნეული მოვლენა არ არის გამოწვეული გრავიმეტრიული მასალის დამუშავების იმ მეთოდით, რომელსაც ეონგლოვიჩი მიძარათავს და გამოიყენებს მსოფლიოს გრავიმეტრიული რუკის შედგენის დროს. რუკა შედგენილია ფაის რელუქციაში ისე, რომ დაკვირვებით მიღებული სიმძიმის ძალა მიყვანილია ხმელეთის საშუალო სიმაღლეზე. სახმელეთო პუნქტებისთვის და ზღვის საშუალო სიღრმეზე საზღვაო პუნქტებისთვის.

როგორც ცნობილია, დედამიწის მთელი ზედაპირი ეონგოლოგიის დანაწილებული აქვს 410 თანატოლ „ათგრადუსიან“ სექტორად, რომლის ფართობი  $\frac{4\pi}{410}$  შეადგენს. სექტორების ამ რიცხვის 50 $\frac{1}{2}$ -თვის უშუალო დაკ-

ვირებებით მიღებული გრაფიკურიული მონაცემები არ მოიპოვება. ამიტომ იგი გამოთქვამს შემდეგ ჰიპოთეზს: „სინდონის ძალის ველის უცნობი ნაწილი დედამიწის ზედაპირზე განისაზღვრება იმავე ფორმულით, რომლითაც ამ ველის ცნობილი ნაწილი“. ამ ჰიპოთეზის საფუძველზე მას ჩატარებული აქვს აუცილებელი მათემატიკური გამოთვლები ორ სხვადასხვა ვარიანტში: 1. „უბრალო საშუალოს“ და 2. „რელიეფის საშუალო სიმაღლეზე დაყვანის“ მეთოდებით.

ეონგოლოგიის იზონომალების რუკა შედგენილია მეორე ვარიანტში თითოეული „ათგრადუსიანი“ სექტორისათვის სათანადო მახასიათებელი სიდიდის გამოთვლით. აქედან 204 სექტორისათვის დამახასიათებელი საშუალო ანომალია დაკვირვებით არის მიღებული, ხოლო დანარჩენი 206 სექტორისათვის კი გამოთვლილი ანომალია ჰიპოთეზური სიდიდეა.

ეონგოლოგიის ზემოთმოყვანილი ჰიპოთეზი იმდენად ბუნებრივია და გამოთვლების მეთოდიკაც ისეთი მკაცრი ჩანს, რომ ძნელია ამ დაშვებას ან მეთოდიკას მიეწეროს შეჩნეული მოვლენა; ყოველ შემთხვევაში, ეს გამოცდები უნდა იყოს დედამიწის ჩრდილოეთ ნახევარსფეროსათვის, სადაც უშუალო დაკვირვებებით დამახასიათებელი სექტორების რიცხვი 159 შეადგენს 205-დან (წინააღმდეგ 70-სა—სამხრეთ ნახევარსფეროში). მკორე ის, რომ დედამიწის ზედაპირზე ხმელეთისა და ზღვების განაწილება, რომელიც მკვეთრად ასიმეტრიული ხასიათისა არის, გრაფიკურიული სიმეტრიის ახსნას ვერ მოგვცემს. როგორც ცნობილია, ხმელეთს უკავია მიწის მთელი ზედაპირის 29.2%, ხოლო დანარჩენი 70.8% მოდის ზღვებსა და ოკეანეებზე. ამავე დროს ხმელეთისა და ზღვების ფართობები აღმოსავლეთ ნახევარსფეროზე თითქმის თანაბარია, დასავლეთისაზე კი—ზღვების ფართობი დაახლოებით ხუთჯერ აღემატება ხმელეთისას. ანალოგიური სურათი გვაქვს ჩრდილოეთისა და სამხრეთის ნახევარსფეროებზედაც.

ამასთან ერთად გრაფიკურიულ-გეოიდალური მინიმუმები და მაქსიმუმები ცალ-ცალკე მოიცავენ როგორც კონტინენტებისა და ოკეანეების ნაწილებს ერთდროულად, ისე მარტო ოკეანეებს ან მარტო კონტინენტებს. ამიტომ ხსენებულ მოვლენას კავშირი არა აქვს ხმელეთისა და ზღვების ასიმეტრიულ განაწილებასთან, რადგან სიმძიმის ძალის ანომალიები თავისუფალია რელიეფის გავლენისაგან, გრაფიკურიული მონაცემების დაყვანით ხმელეთის საშუალო სიმაღლეზე და ზღვის საშუალო სიღრმეზე. კერძოდ, განვიხილოთ ამ მოვლენის კავშირი გეოლოგიურ აგებულებასთან. ამისათვის მივმართოთ ბელოუსოვისა და ჯანელიძის წარმოდგენებს მიწის ქერქის აგებულების შესახებ და დავსახოთ ინტერპრეტაციის სათანადო ვარიანტებიც.

პირველი ვარიანტი. დედამიწის გეოლოგიურ აგებულებაში სიმეტრიას აღნიშნავენ (ბელოუსოვი, 1948 წ.) სტაბილიზაციის უძველესი ცენტრების განაწილების მხრივ. ეს ცენტრები გეოლოგიურ წარსულში განიციდნენ გავ-

ნუწყავტლივ ზრდასა და გაფართოებას, კალედონიური, ჰერცინული და ალპური ოროგენეზისური ციკლების დროს. ამის შედეგად მივიღეთ ექვსი ნამდვილი და ორიც სავარაუდო ბაქანი. ვნახოთ, რა კავშირშია ხსენებული მოვლენა გეოლოგიურ სიმეტრიასთან. ამ საკითხის განხილვა დავიწყით წყნარი ოკეანიდან.

ჩრდილოეთისა და სამხრეთის სტაბილიზაციის სავარაუდო ცენტრებს წყნარ ოკეანეში სათანადოდ შეესაბამება მინიმუმი (-1 მგლ და -50 მ) და მაქსიმუმი (+64 მგლ და +66 მ). ეს იმას მოწმობს, რომ აღნიშნული ცენტრებში სიღრმეში ერთნაირი აგებულებისა და შექმნილობის არ არიან ქანების ქარბი სიმკვრივის განაწილების მხრივ. ჩრდილოეთის ცენტრი მასების დეფიციტით ხასიათდება. ხოლო სამხრეთისა კი მასების სიჭარბით.

სამხრეთ ამერიკისა და აფრიკის სტაბილიზაციის ცენტრებს შეესაბამება სათანადოდ მინიმუმი (-3 მგლ და -80 მ) და მაქსიმუმი (+64 მგლ და +55 მ). ეს გარემოებაც იმას მოწმობს, რომ სტაბილიზაციის აღნიშნული ცენტრები. წყნარი ოკეანის ცენტრების მსგავსად, განსხვავებული გეოლოგიური აგებულებისა უნდა იყვნენ ქარბი სიმკვრივის განაწილების მხრივ სიღრმეში. სამხრეთ ამერიკაში მასების დეფიციტი გვაქვს, აფრიკაში კი მასების სიჭარბე.

სტაბილიზაციის დანარჩენი ცენტრების მდებარეობა ზუსტად აღარ შეესაბამება გრავიმეტრიულ-გეოიდალური მაქსიმუმებისა და მინიმუმების გამოჩენას მიწის ზედაპირზე. ინდოეთ-ავსტრალიის სტაბილიზაციის ცენტრი ძვეს ნულოვანი იზოანომალეების მაქსიმალურად დაახლოების ადგილას, ავსტრალიის დასავლეთით, სადაც აღმოსავლეთ ნახევარსფეროს მაქსიმუმებისა და მინიმუმების სამხრეთის საკვანძო ცენტრი გვაქვს. იგი ხასიათდება გრავიმეტრიული მინიმუმით (+7 მგლ). ეს მინიმუმი ერთიანდება მერიდიანული მიმართულების მქონე ინდოეთ-საბჰოეთის გრავიმეტრიულ-გეოიდალურ მინიმუმთან (-16 მგლ და -77 მ). ანალოგიური მდებარეობა უკავიათ ციმბირისა და აღმოსავლეთ ვეროპის სტაბილიზაციის ცენტრებს. ორივენი მდებარეობენ ინდოეთ-საბჰოეთის მერიდიანული მინიმუმის ჩრდილოეთი ქიმის მახლობლობაში: პირველი—ჩრდილოეთი სახალინის საკვანძო ცენტრთან, ხოლო მეორე—ლენინგრადთან. ასევე, ჩრდილოეთ ამერიკის სტაბილიზაციის ცენტრი მდებარეობს დასავლეთ ნახევარსფეროს მაქსიმუმებისა და მინიმუმების ჩრდილოეთის საკვანძო ადგილას, სადაც ნულოვანი იზოანომალეების მაქსიმალურად დაახლოება გვაქვს. ასეთი საკვანძო ცენტრი სამხრეთში არის ანტარქტისა და სამხრეთ ამერიკას შორის, ატლანტიკურ ოკეანეში, რომელსაც სტაბილიზაციის არავითარი ცენტრი არ ეთანადება. ასევე სტაბილიზაციის ცენტრების გარეშე რჩებიან ნულოვანი იზოანომალეების დაახლოების საკვანძო ადგილი ახალი ზელანდის ჩრდილოეთით, აგრეთვე ჩრდილოეთი პოლუსის ნაქსიმუმი (+37 მგლ და +40 მ), ავსტრალიის ჩრდილოეთით მდებარე მაქსიმუმი—წყნარ ოკეანეში (+63 მგლ და +85 მ) და სამხრეთი პოლუსის მახლობლად მდებარე მინიმუმი (-3 მგლ და -54 მ) ახალი ზელანდის სამხრეთით.

ამრიგად, როგორც გრავიმეტრიული მონაცემებით ირკვევა, წყნარ ოკეანეში გვაქვს სტაბილიზაციის არა ორი, არამედ სამი სავარაუდო ცენტრი: ჩრდილოეთი ამერიკის დასავლეთით (ხასიათდება გრავიმეტრიულ-გეოიდალური მინიმუმით), სამხრეთი ამერიკის დასავლეთითა და ავსტრალიის ჩრდილოეთით. ეს ორი უკანასკნელი პირველისაგან განსხვავებით, გრავიმეტრიულ-გეოიდალური მაქსიმუმებით ხასიათდება.

როგორც გრავიმეტრიული და გეოლოგიური სიმეტრიების ერთმანეთთან შედარებით გავარკვევთ, სტაბილიზაციის ცენტრების ერთი ნაწილი ხასიათდება მინიმუმებით, ხოლო მეორე—მაქსიმუმებით; ცენტრების მესამე ნაწილი იკავებს ნულოვანი იზოანომალეების მაქსიმალურად დაახლოების საკვანძო ადგილებს (გრავიმეტრიულად მინიმუმებს), ხოლო გრავიმეტრიული მაქსიმუმების, მინიმუმებისა და საკვანძო ადგილების დანარჩენი ნაწილი გვჩვენებს, რომ მათთვის ვეღარ ვპოულობთ შესაბამის ცენტრებს.

მეორე ყარბანტი. ჯანელიძის თეორიის თანახმად, წყვეტილი სიალური ქერქი მეორადია და წარმოშობილია პირველადი უწყვეტი სიმეტრიული ქერქისაგან კრისტალიზაციური დიფერენციაციის გზით, ოროგენეზისის შედეგად. ქარბი სიმეტრიულ მათ შორის 0.5 უნდა აღემატებოდეს. ამიტომ გრავიტაციული მაქსიმუმები მოწმობენ უთუოდ სიმას მოახლოვებას მიწის ზედაპირთან და სიალის მცირე ან ნულოვან სისქეს, ხოლო მინიმუმები, პირიქით, შეესაბამებიან სიალის გასქელებასა და სიმას ღრმად დაძირვას, რაც იმავე დროს ოროგენეზისის ინტენსივობაზე და შორს განვითარებაზე მიგვითითებს. ამიტომ ოკეანეებისა და კონტინენტების ადგილას გრავიტაციული მაქსიმუმებისა და მინიმუმების გამოჩენა სათანადოდ მასების სიკარბითა და დანაკლისით უნდა აიხსნას; გრავიტაციული ცენტრების შემწინელი სიმეტრიული განაწილება დედაპირზე უნდა დავუკავშიროთ მის ტეტრაედრულ დეფორმაციის პირვანდელ სიმაში, ჯერ კიდევ სიალური ქერქის გაჩენამდე და თანამედროვე სახით ჩამოყალიბებამდე, რაც დღესაც კიდევ გრძელდება დაუმთავრებელი ოროგენეზისის განა: მართლაც, დასაშვებია, რომ კალედონიური, ჰერცინული და ალპური ოროგენეზისის გაუქვებით აღნიშნული ცენტრების პირვანდელმა განლაგებამ განიცადა სათანადო ცვლილება.

ამრიგად, მსოფლიო გრავიმეტრიული რუკა, შედგენილი ეონგოლოვიჩის მიერ, ბელუსოვისა და ჯანელიძის თეორიების საფუძველზე საშუალებას გვაძლევს მიწის ქერქში გამოვყოთ მასების სიკარბისა და დანაკლისის შემდეგი ძირითადი ერთეულები:

1. ინდოეთ-საბჰოეთის მინიმუმი აზიასა და ევროპაში, რომელიც ხასიათდება სიმძიმის ძალის უარყოფითი ანომალიებითა და გეოიდის სიმაღლის უარყოფითი ნიშნულებით, სიალური ქერქის დიდი სისქეებითა და სიმას ღრმად დაძირვით, რაც ამავე დროს უნდა მოწმობდეს აქ ოროგენეზისის ინტენსივურად განვითარებას.

2. სამხრეთი ამერიკის მინიმუმი, რომელიც ხასიათდება სიმძიმის ძალის ნულოვანი ანომალიებითა და გეოიდის უარყოფითი ნიშნულებით, სიალური ქერქის დიდი სისქეებითა და სიმას ღრმად დაძირვით, რაც ამავე დროს

უნდა მოწმობდეს ოროგენეზის ინტენსიურად განვითარებას კონტინენტიდან ატლანტიკური ოკეანის სიღრმისაკენ.

3. აფრიკის მაქსიმუმი და ავსტრალიის მინიმუმი, რომლებიც ხასიათდებიან დადებითი გრავიტაციული ანომალიებითა და გეოიდის დადებითი ნიშნულებით.

4. მაქსიმუმებისა და მინიმუმების კომპლექსი წყნარ ოკეანეში. სადაც ორი მაქსიმუმი და ერთი მინიმუმი გამოისახება შესაბამისად სამხრეთსა და ჩრდილოეთში. მაქსიმუმების ადგილას დადებითი გრავიტაციული ანომალიები და გეოიდის დადებითი ნიშნულები გვაჩქს და ამიტომ უნდა მოველოდეთ აქ სიმას მაქსიმალურად მოახლოვებას ოკეანის ფსკერთან მინიმუმის ადგილთან შედარებით, სადაც, პირიქით, განვითარებულია ნეოლოგანი ანომალიები და გეოიდის უარყოფითი ნიშნულები, რომლებიც უთუოდ დამახასიათებელია სიდალის არსებობისათვის სიმატურ ქერქზე.

5. ჩრდილოეთი პოლუსის მაქსიმუმი და სამხრეთი პოლუსის მ ნიმუმი. პირველი ხასიათდება დადებითი გრავიტაციული ანომალიებითა და გეოიდის დადებითი ნიშნულებით, ხოლო მეორე - ნულოვანი ანომალიებითა და უარყოფითი ნიშნულებით. ამის გამო პირველს უნდა ეთანადებოდეს სიდალის სისქის სიმცირე და სიმას მოახლოვება ზედაპირთან, ხოლო მეორეს—ამ ნხრზე შეტარებული სურათი.

მსოფლიოს გრავიმეტრიული რუკის მხედვით მაკროგეოიული ანომალიების ასეთი ზოგადი გეოლოგიური ინტერპრეტაციის შემდეგ, შეეხებით გეოიული ანომალიების გამომწვევი გეოლოგიური მიზეზების ახსნის საკითხს საბუთა კავშირის მაგალითზე და განვიხილოთ ზოგიერთი ანომალიური რაიონი ინკოეთ-საბუეთის მინიმუმის ჩრდილოეთი ქიმის ფარგლებში.

#### § 4. საბუთა კავშირის გრავიმეტრიული რუკა და მისი გეოლოგიური ინტერპრეტაცია ცალკეული ანომალიების მიხედვით

სიმძიმის ძალის ანომალიების გეოლოგიური ინტერპრეტაცია მკიდროდარის დაკავშირებული რედუქციების სათანადოდ შერჩევასთან, რადგან მიწის ქერქის ერთი და იმავე რაიონისათვის ხშირად დამახასიათებელია სხვადასხვა სიდიდისა და ნიშნის ანომალიები ფაის, ბუეგსა და იზოსტაზისურ რედუქციებში. ამ საკითხში არსებობს აზრთა სხვადასხვაობა. ერთნი ფიქრობენ, რომ გეოლოგიური ინტერპრეტაციის დროს უნდა ვისარგებლოთ ანომალიებით ფაის რედუქციაში, მეორენი უპირატესობას ანიჭებენ ბუეგს რედუქციას, მესამენი ირჩევენ იზოსტაზისურ ანომალიებს, ხოლო მეოთხენი რედუქციების კომპლექსს განიხილავენ, რაც უფრო მართებული ჩანს.

ამასთან ერთად აზრთა სხვადასხვაობას აქვს ადგილი იმის შესახებაც, თუ რასიღრმემდე წვდება და შეიძლება გავავრცელოთ გეოლოგიური ინტერპრეტაცია სიმძიმის ძალის ანომალიების მიხედვით. გეოლოგებისა და გეოფიზიკოსების ერთი ნაწილი ფიქრობს, რომ სიმძიმის ძალის ანომალიები ასახავენ ზედაპირულ გეოლოგიურ აგებულებას 1—3 კმ სიღრმემდე, სხვები აღნიშნავენ, რომ ანომალიების ჩაწვდომის სიღრმე დედამიწის შიგნით გაცილებით იტია და შეადგენს 5—8 ან 50 და უფრო მეტ კილომეტრს.

მიუხედავად ასეთი აზრთა სხვადასხვაობისა გრაფიკური გეოლოგიის ძირითად საკითხებში, შეიძლება ითქვას, რომ რედუქციების შერჩევის ან სიღრმეში ჩაწვდომის ამოცანა არ არის ამა თუ იმ მკვლევარის გემოვნების საქმე, და თითოეულ კონკრეტულ შემთხვევაში კვლევის ობიექტისა და მიზანდასახულების შესაბამისად უნდა გადაწყდეს. რუსეთის მოვაკებული ტერიტორიისათვის საკმარისია ვისარგებლოთ ფაის ან ბუგეს რედუქციით, ხოლო შუა აზიისა და კავკასიის მთაგორიან ადგილებში უნდა მიემართოთ ორივე რედუქციას ერთად იზოსტაზისურ ანომალიებთან კომპლექსში. რუსეთისა და სხვა ბაქნებისათვის ანომალიების მიზეზად შეიძლება მივიჩნიოთ ზედაპირული ფენების გეოლოგიური აგებულება და სიმკვრივეთა არათანაბარი განაწილება ჰორიზონტული მიმართულებით, რადგან აქ იზოსტაზისური ზედაპირი დიდ სივრცეებზე მოსწორებული უნდა იყოს; მაგრამ ამას ვერ ვიტყვიტ გეოსინკლინური და გარდამავალი ბუნების უბნებისათვის, სადაც იზოსტაზისურ ზედაპირს, შესაძლოა, უსწორმასწორობა ახასიათებდეს და სიმკვრივეთა არათანაბარი განაწილება გაზვიადებულ იქნას აგრეთვე აქ გავრცელებული დიდი სისქის ნალექებით.

ვიდრე სიმძიმის ძალის რეგიონული ანომალიების გეოლოგიური ინტერპრეტაციის პრინციპში გავერყეოდეთ, საჭიროა მათ კლასიფიკაციას შევხვით. XII თავში დავინახეთ, რომ სიმძიმის ძალის რედუქციები მათი ფიზიკური შინაარსის მიხედვით სამ ძირითად ჯგუფს შეადგენენ. პირველ ჯგუფს ეკუთვნის რედუქციები სიმალეზე, მეორეს—შესწორებები სიმკვრივეზე და მესამეს—რედუქციები ერთდროულად სიმალეზე და სიმკვრივეზე. აქედან მივიღებთ სიმძიმის ძალის ანომალიების ფიზიკურ კლასიფიკაციას.

თუ ანომალიების კლასიფიკაციას საფუძვლად დავუდებთ სხვა კრიტერიუმს, სახელდობრ, გავრცელების მასშტაბს, მაშინ მივიღებთ მაკრორეგიონულ, რეგიონულ, ლოკალურ და მიკროლოკალურ ანომალიებს ზემოთ აღნიშნულ რედუქციებში ცალ-ცალკე. თუ კი, დაბოლოს, სიმძიმის ძალის ანომალიებს გეოლოგიური თვალსაზრისით შევხედავთ, მაშინ მივიღებთ მათ გეოლოგიურ კლასიფიკაციასაც.

სიმძიმის ძალის რეგიონული ანომალიების გეოლოგიური კლასიფიკაცია ემყარება მიწის ქერქის დანაწილებას. ბაქნურ და გეოსინკლინურ ერთეულებად, რომლებიც, როგორც წინა პარაგრაფში ვნახეთ, მკვეთრად განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან ნალექების სისქეებითა და ფაქციებით, აგრეთვე გეოტექტონიკურ მოძრაობათა ხასიათით. ბაქნისა და გეოსინკლინის ბუნების სხვადასხვაობა განსაზღვრავს მათ ფარგლებში მოქცეული რეგიონული ანომალიების სხვადასხვა ხასიათს ინტენსივობის, გრადიენტისა და ზონალური გავრცელების მხრივ, აგრეთვე გამომწვევი მასების სიღრმეში მდებარეობის მხრივაც.

ფაის, ბუგესა და იზოსტაზისური ანომალიები ბაქანზე ძირითადად ერთნაირი ნიშნისა და მცირე სიდიდის არიან ერთი და იმავე რაიონებისათვის, ამავე დროს ვრცელდებიან ფართობრივად მკაფიო ზონალობის გარეშე, თანაც ხასიათდებიან მცირე გრადიენტითა და ანომალური მასების ზედაპირთან ახლოს მდებარეობით. გეოსინკლინური ხასიათის რეგიონული ანომალიე-

ბისათვის აღნიშნულ რედუქციებში, პირიქით, შეიმჩნევა ნიშნების სხვადასხვაობა, მნიშვნელოვანი ინტენსივობა და დიდი გრადიენტი, მკაფიო ზონალური გავრცელება და გამომწვევი მასების შედარებით ღრმად მდებარეობა მიწის წიაღში.

ამ მახასიათებლების მიხედვით გაირჩევიან ერთმანეთისაგან რეგიონული ხასიათის ბაქნური და გეოსინკლონური ანომალიები. ანის თვალსაჩინო მაგალითს საბჭოთა კავშირის გრავიმეტრიული რუკები გვაძლევს. ეს რუკები შედგენილია არხანგელსკის რეაქციით ფაისა და ბუგეს რედუქციებში (ნახ. 87, 88). იზონომალური გატარებულია 25 მილიგალზე.

ანალოგიური რუკები ფაის, ბუგეს და იზოსტაზისურ ანომალიებში შედგენილი აქვთ აგრეთვე ანდრეევს, ფეინსის, მულრეცოვას, ესევეს, ბულანეეს, ჯიქიას და სხვებს ცალკეული საინტერესო რაიონებზე: სათვის: ყირიმი, კავკასია, შუა აზია, ურალი, ლენინგრადის ოლქი, დონეცის აუზი, მოსკოვის ანომალია და სხვ.

საბჭოთა გეოლოგები: კარპინსკი, არხანგელსკი, შატსკი, რენგარტენი, ბელოუსოვი, ჯანელიძე და სხვ. საბჭოთა კავშირის ტერიტორიაზე ბაქნების შიგნით გამოყოფენ კამბრიულისწინა კრის ჯალური ფუნდამენტის ღრმულებსა და შეფერილებს, აგრეთვე უფრო მცირე სტრუქტურულ ერთეულებსაც; გეოსინკლინებში კი ისინი არჩევენ ძველი და ახალგაზრდა დანაოქების ზოლებს, აგრეთვე მათში მოქცეულ მცირე ზომის ბელტებსა და კრისტალურ მასივებს.

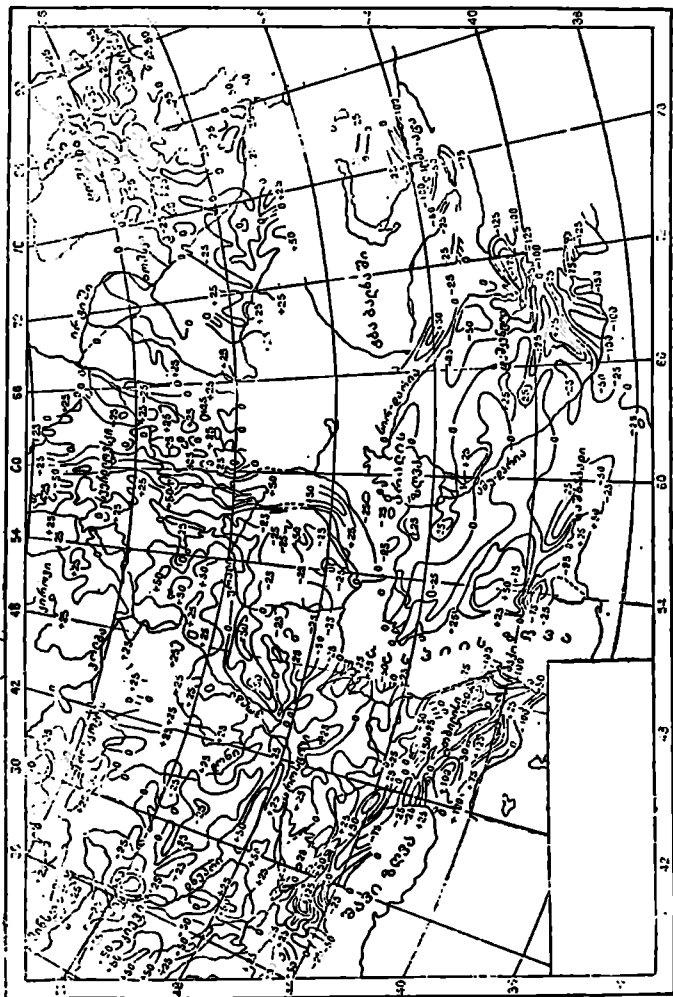
სიმძიმის ძალის დაკვირვებით მიღებული ანომალიები საშუალებას გვაძლევს გამოვყოთ ერთმანეთისაგან ბაქნები და გეოსინკლინები, ზოგჯერ მათ შიგნით მოქცეული უფრო მცირე სტრუქტურული ელემენტებიც, თუ კი გეოლოგიური განსხვავების გვერდით სახეზე არის შემადგენელი ქანების საშუალო სიმკვრივეთა საკმარისი სხვაობა: 0.3 და უფრო მეტი.

აღმოსავლეთ ევროპისა და ციმბირის ბაქნების სამხრეთით გვაქვს ყირიმი—შავი ზღვა—კავკასია—კასპის ზღვა—შუა აზიის გეოსინკლინური დანაოქებული ზოლი. ეს განედური ზოლი ხასიათდება როგორც უარყოფითი, ისე დადებითი ანომალიებით სიმძიმის ძალის ფაის, ბუგესა და იზოსტაზისურ რედუქციებში. ამასთან ანომალიებს ზონალური გავრცელება, დიდი სიმძლავრე და გრადიენტი ახასიათებთ. მაგალითად, ბუგეს ანომალიები დადებითია შავ ზღვასა და ყირიმში, აგრეთვე კასპიის ზღვის აღმოსავლეთით, ხოლო უარყოფითი—კავკასიასა და შუა აზიაში. ანომალიის სიდიდე კავკასიის ყელზე 100—150 მგლ შეადგენს, პამირის მთებში კი 400—500 მგლ აღწევს.

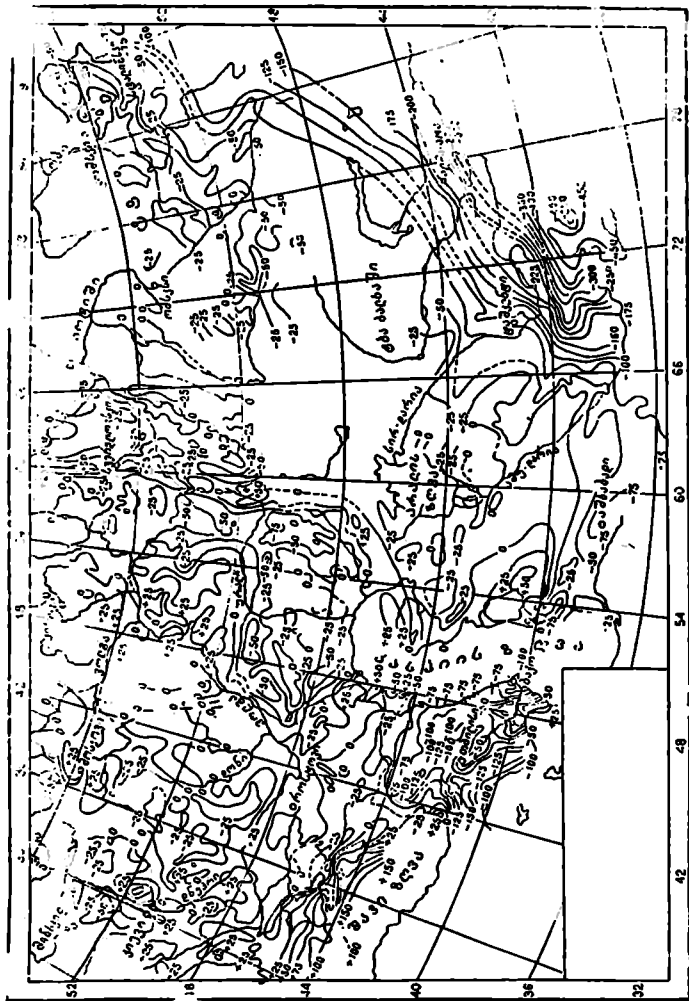
აღმოსავლეთ ევროპისა და ციმბირის ბაქნებისათვის დამახასიათებელია სიმძიმის ძალის ანომალიების სიდიდისა და გრადიენტის სიმცირე, აგრეთვე არა მკაფიოდ გამოსახული ზონალობა და სხვადასხვა ნიშნის მნიშვნელობების ხშირი მერყეობა, ძირითადად  $\pm 25$ —50 მილიგალის ფარგლებში.

ყირიმ-შავი ზღვის დადებით ანომალიას უკავია ზღვის ცენტრული ნაწილი და მოიცავს ყირიმის მთებს, აგრეთვე კავკასიონისა (ნოვოროსიისკის რაიონი) და ამიერკავკასიის (მათუმი, კობულეთი, ანაკლია) ნაწილებს. ანომალიების მაქსიმალური სიდიდე აქ 100 მგლ შეადგენს.





6.5. 67.



კავკასიის ანომალიები ძირითად რედუქციებში ხასიათდებიან სხვადასხვა ნიშნითა და სიდიდით. ფაის რედუქციაში ოთხი ზოლი გამოიყოფა; მათ შორის ორი დადებითია და ეთანადება კავკასიონსა და მცირე კავკასიონს, ხოლო ორიც უარყოფითია და შეესაბამება ამიერკავკასიის დაბლობსა და ჩრდილოეთ კავკასიის ვაკეს. ქიურდაპირის მერიდიანზე დადებითი ანომალიების ეწეწრო და გარდიგარდმო ზოლი გამოიყოფა. იგი ცნობილია ქიურდაპირის „ხიდის“, ან „გრავეიტაციული ქედის“ სახელწოდებით და სპეციალისტების დიდ ინტერესს იმსახურებს. ბუგეს ანომალიები კავკასიაში ძირითადად უარყოფითია, იზოსტაზისური კი ძირითადად დადებითია. ამ უკანასკნელი ანომალიების მაქსიმალური სიდიდე 150 მგლ შეადგენს.

კასპიის ზღვის შუა და სამხრეთი ნაწილები, აგრეთვე მისი დასავლეთი სანაპიროები, აფშერონის ნახევარკუნძულის ჩათვლით, უარყოფით ანომალიებს უკავიათ ფაის, ბუგესა და იზოსტაზისურ რედუქციებში. ანომალიების სიდიდე აქ 100 მგლ აღემატება. კასპიის ზღვის აღმოსავლეთ სანაპიროზე (კრასნოვოდსკის ჩრდილოეთით) და კიდევ უფრო აღმოსავლეთით აშხაბადამდე დადებითი ანომალიებია გავრცელებული. სიდიდით ისინი 50—75 მგლ რიგისაა.

პამირის მთებში ბუგეს უარყოფითი ანომალიები შეადგენენ 400—500 მგლ, ჩრდილოეთისაკენ—ალაიში, ტიან-შანსა და ალტაიში—ისინი თანდათანობით მცირდებიან, ვიდრე დაბოლოს ანგარისის ბაქანზე, ბაიკალის ტბის დასავლეთით,  $\pm 25$ —50 მგლ არ მიაღწევენ.

რუსეთის ვაკის ბაქნური ანომალიები ფაისა და ბუგეს, აგრეთვე იზოსტაზისურ რედუქციებში ძირითადად ანგარისის რიგისა რჩებიან; თუმცა ალაგ-ალაგ შესაძლოა მეტ ან ნაკლებ მნიშვნელობებსაც შეეხვდეთ. რუსეთის ბაქანზე, მოსკოვისა და კასპიისპირეთის სინეკლიზების ფარგლებში, ფაისა და ბუგეს  $\pm 50$ —75 მგლ რიგის ანომალიები გვაქვს. მოსკოვის სინეკლიზა (ღრმული) მოქცეულია ბალტიის ფარსა და ვორონეის მასივს შორის, ხოლო კასპიისპირეთის სინეკლიზას,—ვოლგის, ურალისა და ემპის შესართავთან.— განაპირა მდებარეობა უკავია რუსეთის ბაქნის მიმართ. ეს მდგომარეობა მხედველობაში უნდა იქნას მიღებული ამ რაიონებში შემჩნეული ანომალიების გეოლოგიური ინტერპრეტაციის დროს.

დონეის აუზის დადებით ანომალიებს ფაისა და ბუგეს რედუქციებში უკავიათ იმვასახელიანი ქვანახშირის აუზი, აღმოსავლეთით ვრცელდებიან ყალმუხების ტრამალებში, სადაც რუსეთის ბაქანი ემიჯნება კავკასიის გეოსინეკლინურ-დანაოქებულ, ზოლს, და კასპიის ზღვის ჩრდილოეთ სანაპიროებთან უკავშირდებიან ურალისა და მანგიშლაკის დადებით ანომალიებს, რაც შესაძლოა წარმოადგენდეს კიდევ კარპინსკის მოსაზრების გრავიმეტრიულ დადასტურებას დონეცი—მანგიშლაკის მთიანეთის არსებობის შესახებ ზედა პალეოზოურში. სიმძიმის ძალის ანომალიების მაქსიმალური სიდიდე აქ 25 მგლ შეადგენს და მხოლოდ ალაგ-ალაგ აღემატება მას.

არხანგელსკის მოსაზრებით, სიმძიმის ძალის ანომალიებს ზედაპირული გეოლოგია განსაზღვრავს. ეს მოსაზრება უთუოდ სწორია რუსეთისა და სხვა ბაქნებისათვის, სადაც სეისმოლოგიის მონაცემებით სიმატური ქერქის ზედა-

პირი დაახლოებით ერთსა და იმავე დონეზე მდებარეობს. ამის გამო ანონალიების სიდიდისა და ნიშნის ვარიაციების ასახსნელად გვრჩება მხოლოდ ქანების სიკვრივეთა არათანაბარი განაწილებანი, რომლებიც გამოწვეულია სიალური ქერქისა და დანალექი შრენარის სიქეებისა და ფაციესების ხშირი ცვლებით. ამიტომ კამბრულასწინა ქანების, პალეოზოური და კაინოზოური ნალექების სისქეებისა და ფაციესების ცვალება, გამოისახული საშუალო სიმკვრივეებში, კარგად აგვიხსნის ბაქნური ხასიათის ანომალიებს.

კავკასია—შუა აზიისა და სხვა გეოსინკლიური დანაოქებული ზონებისათვის კი უნდა დაეუწყათ სიღრმის მასების გავლენის გადაძლევა სიმკვრივეთა განაწილებაზე ზედაპირულ ფენაში და შეეცადოთ არხანგელსკის საინტერპრეტაციო თეორიის დაზუსტებასა და შევსებას ჯანელიძის თეორიით მთების მგრაციის შესახებ, რომელიც მართლდება საბჭოური გეოლოგიის მონაცემებით შუა აზიის მაგალითზე.

შუა აზიის სიმძიმის ძალის ბუგესეული უარყოფითი ანომალიების ფონზე შეიმჩნევა განედურ-ზოლღბრივი გავრცელება თანდათან ზრდის ტენდენციით ჩრდილოეთიდან სამხრეთის მიმართულებით, ანგარისის ფარიდან ჯერ კალედონიური (საიაანი და ალტაი) და ჰერცინული (ტიან-შანი და ალაი) მთებისაკენ, ხოლო შემდეგ ალპური პამირისაკენ, სადაც ეს ანომალიები მაქსიმალური ხდებიან. ეს სურათი, ჩვენის აზრით, ორჯანულ კავშირში იმყოფება მთების მიგრაციის მოვლენასთან და მის გრავიმეტრიულ დადასტურებას წარმოადგენს. შუა აზიის ტერიტორიაზე ბაიკალის მხრიდან პამირამდე ერთსა და იმავე მასალის რამდენიმეჯერ დანგრევისა და დალექვის შედეგად აღნიშნული ოროგენეტული ციკლების დროს, უნდა ვიფიქროთ, ჩრდილოეთიდან სამხრეთისაკენ თანდათანობით მცირდება მთების სიმკვრივე, იზრდება სიალური ქერქის სისქე და ძლიერდება იზოსტაზისური მოძრაობა იმავე მიმართულებით, რაც კარგად მოჩანს განხილულ გრავიმეტრიულ მონაცემებში ბუგეს უარყოფითი ანომალიების განუწყვეტელი დასწრაფი ზრდის სახით ანგარისის ფარიდან პამირის ახალგაზრდა მთებამდე

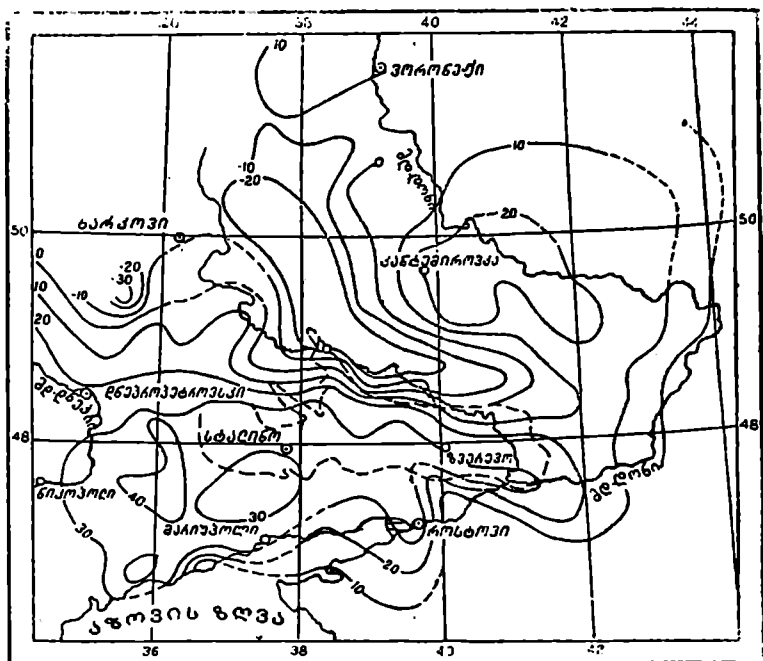
ამრიგად, სიმძიმის ძალის რეგიონული ანომალიები ბაქნებზე და გეოსინკლინებში მკვეთრ განსხვავებას იჩენენ საბჭოთა კავშირის ტერიტორიაზე არხანგელსკის გრავიმეტრიული რუკის მიხედვით ანომალიების სიდიდის, გრადიენტის, ზონალობისა და გამომწვევი მასების სიღრმეში მდებარეობის მხრივ. ბაქნური ანომალიები ძირითადად გამოწვეულია ზედაპირული გეოლოგიით, ხოლო გეოსინკლიური ანომალიების შემთხვევაში სიღრმის მასების განაწილება გადაძლევს ზედაპირულისას და თვით ანომალიებსაც ძირითადად სიღრმის მასები განსაზღვრავენ. ამას მოწმობენ კავკასია-შუა აზიის გეოსინკლიურ-დანაოქებულ ზოლში შემჩნეული კანონზომიერებანი სიმძიმის ძალის ანომალიებსა და გეოლოგიურ აგებულებას შორის. აქ ერთნაირი ნიშნისა და სიდიდის ანომალიებით ხასიათდებიან შავი ზღვა და მისი მოსაზღვრე რაიონები (ყირიმი და კავკასიონის ნაწილი), აგრეთვე კასპიის ზღვა და მისი მიმდებარე რაიონები (აფშერონის ნახევარკუნძული), ხოლო განსხვავებული ნიშნისა და სიდიდის ანომალიებით ხასიათდებიან გეოლოგიურად დაახლო-

ეხით ერთგვაროვან გეოსინკლინურ პირობებში მოქცეული უბნები შავი ზღვიდან პამირის მთებამდე. ამასთან დაკავშირებით საჭიროა მოვიგონოთ აკად. არხანგელსკის საესკებით მართებული მტკიცება დონეცის აუზის ანოვალიების გეოლოგიური ინტერპრეტაციის გამო: „შე შეჩერდი ამ მოვლენაზე, რათა ხაზი გამესვა იმ სიფრთხილისათვის, რომლითაც აუცილებლად ყოველთვის უნდა მოვეკიდოთ სიმძიმის ძალის ანოვალიების ასწრას, რა რიცხვარტული და გასაგებობა არ უნდა გვეჩვენოს მოვლენები“.

ეხლა უფრო ახლოს განვიხილოთ დონეცის აუზის, ლენინგრადის ოლქის, მოსკოვისა და ქიურდამიოის ანოვალიები.

### დონეცის აუზის ანოვ. ლიები

დონეცის აუზის ტერიტორიის გრაფიკული აგებვა საქანიანი ხელსაწყოთა შემწეობით ძირითადად 1928-- 1933 წწ. ჩატარდა ალექსანდროვის, 3 რლოვისა და სოროკინის ხელმძღვანელობითა და უშუალო მონაწილეობით.



ნახ. 89.

დონეცის აუზის გრაფიკული რუკა ბუგის რედაქციაში წარმოდგენილია ნახ. 89-ზე. იზოანოვალეები ვატარებულია 10 მილივალზე.

ამ რუკის მიხედვით გამოდის, რომ აზოვის ზღვის ჩრდილოეთით გვაქვს სიმძიმის ძალის მაქსიმუმი, რომელიც შეესაბამება აზოვის კრისტალურ მასივს

და ღონეცის აუზის სამხრეთ ნაწილს. აღმოსავლეთით მაქსიმუმში თანდათან ვიწროვდება და მიემართება აუზის მთავარი ანტიკლინის ღერძის გასწვრივ. ღონეცის აუზის ჩრდილოეთით არსებობს სიმძიმის ძალის მეორე მაქსიმუმში, რომელიც ეორონეის კრისტალურ მასივს შეესაბამება. ამ მაქსიმუმებს შორის მოთავსებულია სიმძიმის ძალის მინიმუმი, რომელიც დნეპარ-ღონეცის ღრმულს შეესაბამება. ასეთია სიმძიმის ძალის გეოლოგიური ინტერპრეტაცია ერთი შეხედვით. მაგრამ გეოლოგიური, გეოფიზიკური და ბურღვის მონაცემებთან ახლოს გაცნობას მივყევართ ამ სახელდახელო ინტერპრეტაციის მკვეთრად დაზუსტებამდე და შესწორებამდე.

ბურღვის შედეგად გამოირკვა, რომ კანტემიროვკაში 95 მეტრზე მდებარეობენ კარბონული ასაკის ნალექები, ქვევით 300 მ სიღრმეზე—კრისტალური ქანებია გადაკვეთილი, ხოლო სიღრურ გლუბოკაიასთან აღნიშნულია კარბონის გაშიშვლებები. კარბონული ნალექების გავრცელების სხვადასხვა წერტილებში (ზვერეოვ, ლისიჩანსკი) აღმოჩნდა, რომ ანომალიებს შორის სხვაობა 50 მილიგალს აღემატება.

კამბრიულისწინა კრისტალური ქანები (მეავე—გრანიტები, გნეისები და ფუქე—გაბრო, ნორიტები, ბაზალტები), რომლებიც გაშიშვლებული არიან აზოიისა და ეორონეის მასივებზე, ხასიათდებიან სათანადოდ სიმკვრივით 2.60—2.75 და 2.75—3.00. დევონური კირქვების სიმკვრივე ცვალებადობს 2.58-დან 2.74-მდე. კარბონული ნალექების სიმკვრივე, როგორც X თავში მოყვანილი რუკიდან ჩანს (ნახ. 69), განიცდის ცვლას გარკვეული კანონზომიერებით. იგი მაქსიმალური ჩანს (2.72—2.75) ღონეცის აუზის ცენტრულსა და სამხრეთ-აღმოსავლეთ ნაწილებში. აღმოსავლეთის, დასავლეთისა და ჩრდილოეთის მიმართულებით კარბონის სიმკვრივე მცირდება. მაგალითად, კამენსკისა და ჩერკასკის რაიონებში სიმკვრივე მკვეთრად კლებულობს: 2.60-დან — კამენსკ-შახტინსკში 2.40-მდე და 2.35-მდე — სათანადოდ 10 და 20 კმ-ზე (სიღრურ გლუბოკაიასთან). ღონეცის აუზში გავრცელებული კარბონული ნალექების საერთო სიმძლავრე 10—12 ათას მეტრს შეადგენს, ამიტომ ეს უკანასკნელი სიმკვრივის ცვლასთან ერთად გადამწყვეტ გავლენას ახდენს სიმძიმის ძალის ანომალიების განაწილების სურათზე. ტრიასული ქანების სიმკვრივე შეადგენს 2.32, იურისისა—1.9—2.0, ცარტულისა იცვლება 1.5—2.2 ფარგლებში, ხოლო მესამეულია—1.3—2.0 ფარგლებში. ამრიგად, კრისტალური ქანებისა და კარბონული ნალექების საშუალო სიმკვრივე თითქმის ერთნაირია და დიდი ვიჯრე მეზოზოურისა და მესამეულის ნალექების სიმკვრივე. მათ შორის კარბი სიმკვრივე შეადგენს დაახლოებით 0.5.

ღონეცის აუზში სიმძიმის ძალის ანომალიების, ქანების სიმკვრივეების და ნალექების სისქეების განაწილების კომპლექსური ანალიზი მიგვითითებს იმაზე, რომ გრავიმეტრიული რუკის ხასიათს განსაზღვრავენ შემდეგი გეოლოგიური ფაქტორები:

1) სიმკვრივის ცვლა კრისტალურ ქანებში, 2) კრისტალური ქანების რელიეფი პალეოზოურისა და მეზოზოური ნალექების ქვეშ, 3) სიმკვრივეთა ცვლა კარბონულსა და მომდევნო ნალექებში და 4) კარბონის რელიეფი მეზოზოურისა და მესამეულის ნალექებს ქვეშ. ეს ფაქტორები მეტ-ნაკლები ინტენ-

სივობით მოქმედებენ სხვადასხვა ადგილას და განსაზღვრავენ სიამბის ძალის ანონალიების განაწილებას. ამრიგად, გ-ავიმეტრიული დაკვირვებების ინტერპრეტაციისთვის საჭიროა ვიცოდეთ ქანების სიმკვრივეთა და ნალექების სისქეების განაწილება. აგრეთვე სხვა გეოფიზიკურ-გეოლოგიური მონაცემებიც.

ინტერპრეტაციის რიცხობრივი მაგალითები: 1. სიამბის ძალის სხვაობა ზერევესა და ლისინანკს შორის შეადგენს 54 მგლ, კარბონული ნალექების სიმკვრივეები ამ პუნქტებში სათანადოდ შეადგენენ 2.65 და 2.35. თუ მივიღებთ კარბონის სისქეს 4.3 კმ ტოლად, მაშინ გამოვა, რომ დაკვირვებული სხვაობა აიხსნება ქარბი 0.3 სიმკვრივით. ეს მტკიცდება შემდეგნაირად:

$$\Delta g = 2\pi f \sigma h = 42,0 \cdot 10^{-6} \sigma h;$$

აქედან, ზემოთ აღნიშნული რიცხობრივი სიდიდეების ( $\Delta g = 54 \cdot 10^{-3}$  და  $\sigma = 0.3$ ) ჩასმით, მივიღებთ:

$$h = \frac{2,38 \cdot 10^6 \Delta g}{\sigma} = 4,3 \cdot 10^6 \text{ სმ} = 4,3 \text{ კმ.}$$

მაგრამ, როგორც გეოლოგიური აგეკვიფიდან ვიცით, კარბონულის სიმძლავრე შეიძლება 10—12 კმ აღწევდეს.

2. სიამბის ძალის სხვაობა ვოროშილოვგრადსა და როვენსკს შორის 64 მგლ შეადგენს, სიმკვრივეები ამ პუნქტებში შეადგენენ სათანადოდ 2.30 და 2.74 (სიქარბე 0.44 უდრის). ეს სხვაობა განისაზღვრება ორი ფაქტორით: კარბონის დამიჩრით (500 მეტრზე) —გავლენა 8 მგლ შეადგენს, და სიმკვრივეთა შეცვლით 0.44-ით, თუ სისქეს 3 კმ ტოლად მივიღებთ.

### ლენინგრადის ოლქის ანომალიები

ლენინგრადის ოლქისა და მიმდებარე რაიონებისათვის 1937 წელს ანდრეევმა შეადგინა გრაფიკული რუკა ფაის რედუქციაში (ნახ. 90) საქანინანი 430 პუნქტის გამოყენებით და მოგვცა ამ რუკის გეოლოგიური ინტერპრეტაცია, რისთვისაც გამოიყენა როგორც არსებული გეოლოგიური რუკა, ისე ქანების სიმკვრივეთა 1000-ზე მეტი განსაზღვრები.

ანომალიების ინტერპრეტაციის მიზნით შესაძლო გეოლოგიურ ფაქტორებად ანდრეევი გამოყოფს ოთხს, როგორცაა:

- 1) პალეოზოური ნალექების შრენარის სტრუქტურული თავისებურებანი,
- 2) კამბრიულისწინა კრისტალური ქანების მიწისქვეშა რელიეფი,
- 3) კამბრიულისწინა შრენარის სიმკვრივეთა არაერთგვარობა,
- 4) მიწის ქერქის ღრმა ჰორიზონტების სტრუქტურული თავისებურებანი.

ამ ფაქტორების მეტნაკლები როლის გასარკვევად საჭიროა შემდეგი სახის გაანგარიშება:

- 1) პალეოზოური ნალექებისათვის სიმკვრივეთა შესაძლო ცვლა შეადგენს 0.3, რაც, მისი 1 კმ სისქის შემთხვევაში, გვაძლევს მაქსიმალურ ანომალიას, რომელიც უდრის 13 მგლ;

2) პალეოზოოურის სიმკვრივე შეადგენს 2.2, კამბრიულისწინა ქანებისა— 2.7; უკანასნელის 1 კმ დაძირვისას მაქსიმალური ანომალია უნდა შეადგენდეს 21 მგლ;

3) სხვაობა კამბრიულისწინა ქანების სიმკვრივეთა შორის შეადგენს 0.5, რაც მისი სისქის ანუ ნაკლებ 5 კმ ტოლად მიღების შემთხვევაში, მოგვცემს 104 მგლ-ის ტოლ მაქსიმალურ ანომალიას.



ნახ. 90.

სინამდვილეშიც სწორედ გრავიმეტრიულ რუკაზე ანომალიათა ცვლა 100 მგლ ფარგლებში ხდება, რაც იმას მოწმობს, რომ ინტერპრეტაციის დროს არსებითი როლი უნდა მიენიჭოს ორ უკანასკნელ ფაქტორს.

ქანების სიმკვრივეთა ცოდნის გარეშე შეუძლებელია მეტად თუ ნაკლებად მართებული გეოლოგიური ინტერპრეტაციის მიღწევა სიმძიმის ძალის



ანომალიების ვანაწილების შესახებ. ეს ერთნაირად შეეხება როგორც ფაისა და ბუგეს, ისე იზოსტაზისური რედუქციების მიხედვით მიღებულ სიმძიმის ძალის ანომალიებს.

გრავიმეტრიული რუკის ინტერპრეტაციის საფუძველზე ანდრეევი მიდის შემდეგ დასკვნებამდე:

1) უარყოფითი ანომალიები ოლონეცის რაიონში უნდა მოწმობდნენ აქ სიღრმეში რაპაკიის გრანიტების არსებობას;

2) დადებითი ანომალიების ზოლში სოლოვეცკის კუნძულებზე ძირითადად ქანები წარმოდგენილი უნდა იყვნენ არქეულის კრისტალური ფიქლებითა და მიგმატიტებით;

3) ლენინგრადის ოლქის ცენტრულ და დასავლეთ ნაწილებში, აგრეთვე ბელორუსიის ჩრდილოეთ ნაწილში გავრცელებული ინტენსიური დადებითი ანომალიების ეიწოო ზოლები წარმოადგენენ კამბრიულისწინა სტრუქტურების გამოხატულებას;

4) კარელიდების ზოლი ფინეთში, წარმოდგენილი კრისტალური ფიქლებით, დიბაზებითა და კვარციტებით, ხასიათდება დადებითი ანომალიებით და სტარაია რუსის რაიონში იცელის თავის მიმართულებას, როგორც ამას აქ გამავალი დადებითი ანომალიების ზოლი ადასტურებს. ამაზე მიგვითითებენ აგრეთვე აქ დაკვირვებული მაგნიტური ანომალიებიც.

#### მოსკოვის ანომალია

მოსკოვის ანომალია შეეული ხაზის გადახრის სახით პირველად აღმოჩენილ იქნა ჯერ კიდევ გასულ საუკუნეში (შვეიცერი, სლუკი). საქანიანი ხელსაწყოს შემწობით სიმძიმის ძალის ზუსტი გაზომვები მოსკოვის ანომალიის რაიონში ჩაატარეს შტერნბერგმა, კაზანსკიმ, ბულანეემ და სხვ. 1916—1939 წწ. 1940 წლისთვის, როცა კომაროვმა და სნიროვმა აქ 56 პუნქტი ისინგის გრავიმეტრით განსაზღვრეს, მოსკოვის გრავიტაციული ანომალიის რაიონში დაკვირვებული იყო უკვე 180 საქანიანი პუნქტი.

ბულანეეს მიერ ფაისა და ბუგეს რედუქციებში შედგენილ გრავიმეტრიულ რუკებზე. ნახ. 91 და 92, მერიდიანულ პროფილზე შტერნბერგის ხაზის მიხედვით გამოიყოფა ორი მაქსიმუმი და მათ შორის ერთი მინიმუმი. მინიმუმს განედური მიმართულება აქვს და გადის შემდეგ პუნქტებზე: ვნუკოვო—უზკოე, ლენინო და კუჩინო; ჩრდილოეთის მაქსიმუმი მდებარეობს პუშკინის რაიონში, ხოლო სამხრეთისა—პოდოლსკის რაიონში. ანომალიის სიდიდე მაქსიმუმების ადგილას  $+30-40$  და  $+50-60$  მგლ შეადგენს სათანადოდ ბუგესა და ფაის რედუქციებში, ხოლო განედური მინიმუმი კი ხასიათდება  $-20$  და  $-5$  მგლ-ით, იმავე რედუქციებში შესაბამისად.

ამ ანომალიების დამაკაჟყოფილებელი გეოლოგიური ინტერპრეტაცია დღემდე არ მოგვეპოვება. არსებობს სხვადასხვა აზრი ამ ანომალიის გეოლოგიური მიზეზების შესახებ (სტენნიცკი, შატსკი, კაზანსკი, მალოვიჩკო, ლუსსტიხი და სხვ.) სტენნიცკის (1894 წ.) მოსაზრებით, მცირე სიმკვრივის მასები, რომლებიც იწვევენ მოსკოვის ანომალიას, მდებარეობენ პოდოლსკის ჩრდილოეთითა და მოსკოვის სამხრეთით. ეს მოსაზრება, გამოთქმული ოციოდე

წლით ადრე, ვიდრე შტერნბერგი ჩაატარებდა პირველ ზუსტ საქანიან გაზომვებს ხსენებულ რაიონში, მეტად გონებასახვილური და მიგნებული ჩანს.

შატსკის აზრით, მოსკოვის ანომალია (ძინიმუმი) მდებარეობს ეოსახელიანი სინკლიზის ცენტრულ ნაწილში, სადაც კამბრიულისწინა კრისტალური ფუნდამენტის სიღრმე 2—3 კმ არ უნდა აღემატებოდეს.

ლუსტიხის შეხედულებით, მოსკოვის ანომალიის მაქსიმუმები შეეკაბაბებიან ფუძე და ულტრაფუძე ქანების ზედაპირის ანოწვეას, რაც კამბრიულისწინა სახურავს ემთხვევა, თუ არა და მის ქვემოთ 1—2 კმ სიღრმეზე მდებარეობს.

### „ქიურდამირის ხილი“

გასული საუკუნის 70-იან წლებში სტენნიციმ თბილისში დაამთავრა და პეტერბურგში დასტამბა თავისი შესანიშნავი შრომა: „შვეული ხაზის გადახრის შესახებ კავკასიის მთების მიზიდულობის გაელენით“. ამ შრომაში მან პირველად აღნიშნა მკვირი მასების არსებობა შემახის სამხრეთით.

ეს აღმოჩენა შეუმჩნეველი დარჩათ პავლოვს, კორზუნს და სხვა მკვლევარებს. ნხოლოდ 1929—1931 წწ ჩატარებულმა გრავიმეტრიულმა აგეგმვამ (სოროკინი, ფედინსკი და სხვ.) შესაძლებელი გახადა სტენნიციის მოსაზრების დადასტურება იმით, რომ ქიურდამირის მერიდიანზე, მტკვრის დებრესიის უარყოფითი ანომალიების ფონზე, დადგენილ იქნა დადებითი ანომალიების გარდვიარდმო ზოლის არსებობა ფაისა და ბუგეს რედუქციებში. ამ ანომალიას სახელად ეწოდა ქიურდამირის „ხილი“ ან „გრავიტაციული ქედი“ (აბაკელია, 1936 წ.).

ამ ანომალიის გეოლოგიური ინტერპრეტაცია მოგვეცეს არხანგელსკიმ, გუბკინმა, ვარენსკოვმა, ფედინსკიმ, სოროკინმა, რენგარტენმა, ვებერმა, ლუსტიხმა, ალიზადემ, გაბუნიათ, აბაკელიათ და სხვებმა. თავდაპირველად შვეული ხაზიდან გადახრა (სტენნიცი, 1870 წ.), შემდეგ გრავიტაციული (სოროკინი, ფედინსკი) ანომალია, დღეს გადაიქცა საერთო გეოფიზიკურ ანომალიად ქიურდამირის მერიდიანზე, მტკვრის დებრესიაში, სადაც შემჩნეულია აგრეთვე:

1. შვეული ხაზის არანორმალური გადახრა შემახაში,
2. დადებითი მაგნიტური ანომალიების შეცვლა უარყოფითი ანომალიებით (ნოდის მონაცემების მიხედვით),
3. სეისმური რხევების დაკვიანება და ეპიცენტრების აზიმუტების დამახინჯება მტკვრის დაბლობში მინგეჩაურის აფეთქებისა და ბაქოს სეისმური სადგურის ჩანაწერების მიხედვით,
4. მტკვარ-არაქსის დაბლობის ირგვლივ ტექტონიკური ხაზების მიმართულემათა კანონზომიერი შეცვლა,
5. მდ. მტკვრის დინების მიმართულების შეცვლა ალაზნის შესართავიდან კასპის ზღვის სანაპირომდე ისე, რომ მისი განედური მიმართულება ზუსტად ემთხვევა ქიურდამირის „ხილის“ ან „გრავიმეტრიული ქედის“ განივ გავრცელებას.

ამ ანომალიას დისონანსი შეაქვს სიმძიმის ძალის განაწილებაში აღმო-  
სავლეთ ამიერკავკასიაში და მოწმობს ღღებდღე უცნობი გარდვიგარდმო სტრუქ-  
ტურის აქ არსებობას, რაც გეოლოგებსაც გაპოჩჩათ მხედველობიდან.

რენგარტ-ნი ქიურდამირის ანომალიის გეოლოგიურ მიზეზებს შემდეგ-  
ნაირად აგვიხსნის:

„თუ ნეოგენური და მეოთხეული ნალექების საფარი აქ ისეთივეა, რო-  
გორც მ-კერის ზონის სხვა ნაწილებში, მაშინ დადებითი ანომალიების მიზე-  
ზი ყველაზე ადრე უნდა იყოს პალეოგენურისა და მეზოზოურის მიოცენამდე-  
ლი გადარეცხვა, რის შედეგადაც აქ მიწის ზედაპირს დაუახლოვდა სუბსტრა-  
ტის უფრო მკვირი ქანები“.

ჩვენი გამოანგარიშებით ანომალიის გამომწვევი უდრეკიბელტი—სუბსტ-  
რატი, ან ძველი დამარბული ქედი, უნდა იმყოფებოდეს 5—6 კმ სიღრმეში  
მესამეულისა და მეოთხეულის ნალექებს ქვეშ. ეს ინტერპრეტაცია მოითხოვს  
გეოფიზიკის, გეოლოგიისა და ბურღვის მეთოდების კომპლექსურად გამოყე-  
ნებას ანომალიის რაიონში შემოწმების მიზნით, რადგან, შესაძლოა, „ქიურ-  
დამირის ხიდად“ წოდებული, დადებითი ანომალიების ზოლი საინტერესო  
გახდეს აგრეთვე ნავთიანობის მხრივაც.

უკანასკნელი 10 წლის განმავლობაში სხვა გეოფიზიკური მეთოდებით  
ჩატარებულმა გამოკვლევებმა, აგრეთვე ბურღვით მიღებულმა მონაცემებმა  
ცხადჰყვეს, რომ მეოთხეულისა და ზედა მესამეულის საფარის გაქრილი სიმ-  
ძლავრე 3 კმ აღემატება. ამასთან დაზუსტებულ იქნა ანომალიის საზღვრები  
და გავრცელების მიმართულება, აგრეთვე მის ფონზე გამოიყო მთელი რიგი  
ლოკალური და მიკროლოკალური ანომალიები, რომელთა გამოვლინება სრუ-  
ლიადაც არ ცვლის ქიურდამირის ზოგად გეოფიზიკურ ბუნებას.

ამრიგად, სიმძიმის ძალის რეგიონული ანომალიების ინტერპრეტაცია  
უნდა ემყარებოდეს გეოლოგიურსა და გეოფიზიკურ მონაცემებს, აგრეთვე  
ბურღვის შედეგებს, რათა მივალწიოთ გრავიმეტრიის შებრუნებული ანოცანის  
მაქსიმალურად ცალსახა ამოხსნას მონაცემების მთელი კომპლექსის ღრმა  
ანალიზის საფუძველზე. სიმძიმის ძალის ანომალიების გეოლოგიური ინტერ-  
პრეტაციის ძნელსა და რთულ საქმეს დიდი სიფრთხილით უნდა მოვეკიდოთ,  
რა რიგ მართივად და ადვილად არ უნდა გვეჩვენოს, ერთი შეხედვით, კავ-  
შირი ანომალიებისა და გეოლოგიურ აგებულებას შორის მიწის ქერქის  
გეოლოგიური აგებულება სიმძიმის ძალაში პოულობს თავის გამოხატულებას  
იმდენად, რამდენადაც მას თან სდევს მკვეთრი განსხვავება ქანების სიმკვრი-  
ვეთა განაწილებაში ჰორიზონტული მიმართულებით. წინააღმდეგ შემთხვე-  
ვაში მოსალოდნელია უხეში შეცდომები გრავიმეტრიულ დაკვირვებათა  
გეოლოგიურ ინტერპრეტაციაში.

§ 5. ინსტრუქცია გრავიმეტრიულ დაკვირვებათა დაგეგმარების, წარმოებისა  
და გეოლოგიური ინტერპრეტაციისათვის

როგორც ცნობილია, გრავიმეტრიულ დაკვირვებებს აწარმოებენ ასტ-  
რონომიული, გეოდეზიური, გეოფიზიკური და გეოლოგიურ-საძიებო სამეც-  
ნიერო-საკვლევო ინსტიტუტები და საწარმოო უწყება-დაწესებულებები. შემ-

სრულდება ახლა ასეთმა მრავალფეროვნებამ დღის წესრიგში დააყენა სათანადო ინსტრუქციის დამუშავებისა და გამოქვეყნების აუცილებლობა, რათა ჩვენს ქვეყანაში გვემიან წესით მიღწეული ყოფილყო საველე დაკვირვებათა მაღალხარისხიანად ჩატარება და მათი დაქვეყნების მეთოდის უნიფიკაცია, ინტერპრეტაციის კომპლექსური მეთოდების ათვისება და პრაქტიკაში დანერგვა.

საბჭოთა კავშირის ტერიტორიაზე მიმდინარე გრავემეტრიულ დაკვირვებებთან დაკავშირებით მოქმედებს ორი ინსტრუქცია:

1. „ინსტრუქცია საერთო გრავემეტრიული (საქანებიზო) აგეგმვისათვის“
- და 2. „დროებითი ტექნიკური სახელმძღვანელო გრავემეტრიული სამუშაოების საშუალოების გრავემეტრებით ჩატარებისათვის“.

პირველი ინსტრუქცია შემოღებულია 1944 წლის 1 იანვრიდან და საველე მუშაოებში ვახდა ყველა იმ უწყება-დაწესებულებათათვის, რომელნიც გრავემეტრიულ აგეგმვას ატარებენ. იგი შედგენილია კახანსკის, მაუერერისა და ფროლოვის მიერ და წარმოადგენს მრავალი წლების მანძილზე საბჭოთა გრავემეტრისტების მიერ შექმნილი სამეცნიერო და საწარმოო გამოცდილების განხორციელებას გრავემეტრიის დარგში.

მეორე ინსტრუქცია 1950 წლის 3 ივნისს დაამტკიცეს და მოქმედებს სსრ კავშირის ნაეთობის მრეწველობის სამინისტროს გეოფიზიკურ უწყება-დაწესებულებათა ხაზით. იგი შედგენილია პეტროვისა და არესტის მიერ შედგენილი რედაქციით.

აღნიშნულ ინსტრუქციებში მოკლედ არის ნაჩვენები ის წესი და მთხონიდან, რომლებიც დაცული უნდა იქნეს ყოველი გრავემეტრიული აგეგმვის წარმოებისას. აქ გაშუქებულია აგეგმვის შემდეგი ძირითადი საკითხები: ამოცანები, პირობები და აგეგმვის ტიპები, საველე დაკვირვებათა დაგეგმვა და ორგანიზაცია, გამომუშავების ნორმები, ხელსაწყოების მომზადება, დაკვირვებათა პროგრამა და მეთოდის, დაკვირვების პუნქტების შერჩევა, აღწერა და ადგილზე ნიშნულის დადგენის წესი, მასალების დოკუმენტაცია, საველე და კამერული დამუშავება, კონტროლი და შედეგების ინტერპრეტაცია. დაკვირვებებისა და გამოთვლების სიზუსტე, წინასწარი და საბოლოო ანგარიშების შედგენა.

ინსტრუქციების დამატების სახით მოცემულია აგრეთვე საველე დაკვირვებათა დამოთვლების ეურნალებისა და ბლანკების ფორმები სამუშაოთა ცალკეული სახეობების მიხედვით, სახელდობრ, საქანების რხევა, ქრონომეტრის სელა, შტატივის თანარხევა, რხევის პერიოდისა და სიმძიმის ძალის გამოთვლა, გრავემეტრიული პუნქტების კატალოგის შედგენა, ასტრონომიული, გეოდეზიური, ბარომეტრიული, დენსიტომეტრიული და სხვა სამუშაოების წარმოების მეთოდისა გრავემეტრიულ აგეგმვასთან დაკავშირებით.

გრავემეტრიულ აგეგმვას საერთოდ აწარმოებს სპეციალისტებისა (2—3 კაცი) და დამხმარე პერსონალის (1—2 კაცი) მცირერიცხოვანი ჯგუფი, რომელსაც გრავემეტრიული ექსპედიცია, პარტია ან რაზმი ეწოდება. მათსათვის დგას უფროსი, რომელიც პასუხისმგებელია სამუშაოთა გეგმის მიხედვით და წესიერად ჩატარებისათვის იმ დაწესებულების წინაშე, რომლის დაკვირვებათა და დაფინანსებით მუშაობს ექსპედიცია. ექსპედიციის უფროსი

ადგენს საეარაუდო სამუშაოთა გეგმასა და ხარჯთაღრიცხვას, წინასწარსა და საბოლოო ანგარიშს გეგმით ჩატარებული საველე და კამერული გამოკვლევების შესახებ.

საქანებითა და გრაფიმეტრებით აგეგმვა ტარდება ქვეყნის საერთო გეოლოგიურ-გეოფიზიკური და გეოდეზიური შესწავლისა და მიწის წიაღში სასარგებლო ნამარხების ძებნა-ძიების მიზნით, აგრეთვე ზოგჯერ სხვაგვარი სპეციალური დანიშნულებითაც. ამისდა მიხედვით არჩევენ: 1. საერთო ხასიათის აგეგმვას, 2. სპეციალური დანიშნულების აგეგმვას, როგორცაა გრაფიმეტრიული კავშირი საყრდენ პუნქტებს შორის, სიმძიმის ძალის დროში ვარიაციის შესწავლა და სხვ., 3. სამიებო აგეგმვას, რომელიც თავის მხრივ შეიძლება იყოს ორი სხვადასხვა სახის: მარშრუტული და მოედნური, მათ შორის სარეკონოსტიკებო, საძებნო და დეტალური. გრაფიმეტრიული აგეგმვის ამ სახეებისათვის ცალ-ცალკე არსებობს გამომუშავების ერთიანი ნორმები, რომლებიც დამტკიცებულია საბჭოთა მთავრობის მიერ 1948 წელს და ძალაშია დღესაც მცირეოდენი ცვლილებებით.

გრაფიმეტრიული გამოკვლევების სრული კომპლექსი, როგორც ზემოთ დავინახეთ, სამი ძირითადი ეტაპისაგან შედგება. ეს ეტაპებია: 1. საველე და ლაბორატორულ დაკვირვებათა ჩატარება ზუსტი ფიზიკური ხელსაწყოების გამოყენებით, 2. დაკვირვების მასალათა გამოთვლები და დამუშავება სათანადო კატალოგებისა და რუკების შედგენის მიზნით, 3. მიღებული მონაცემების გეოლოგიური, გეოდეზიური თუ გეოფიზიკური ინტერპრეტაცია. ამავე დროს, გრაფიმეტრიული აგეგმვა თითქმის ყოველთვის დაკავშირებულია გარკვეული მოცულობით გეოდეზიური და დენსიტომეტრიული სამუშაოების ჩატარებასთან, აგეგმვის ამოცანისა და სიზუსტის შესაბამისად.

გრაფიმეტრიის გამოყენების სფერო მეტად ფართოა და მრავალფეროვანია. სიმძიმის ძალის გაზომვების შედეგები თითქმის ერთნაირი წარმატებით გამოიყენებიან გეოდეზიაში, რეგიონულ გეოლოგიაში, გეოლოგიურ ძიებაში, გეოფიზიკაში, ასტრონომიაში, მეტროლოგიასა და ტექნიკურ მექანიკაში.

გრაფიმეტრიული მონაცემები გეოდეზიაში დედამიწის ფიგურის განსაზღვრის საფუძვლებს შეადგენენ. რეგიონულ გეოლოგიაში ეს მონაცემები, აკად. არხანგელსკის სიტყვებით რომ გამოვთქვათ, რენტგენის სხივებით გვიშუქებენ მიწის ქერქის აგებულებას. გეოლოგიურ ძიებაში გრაფიმეტრიის საპატიო და წამყვანი ადგილი უკავია მიწის წიაღში სასარგებლო ნამარხების აღმოჩენის საქმეში სხვა მეთოდებთან ერთად. გეოფიზიკაში გრაფიმეტრიული დაკვირვებები დედამიწის შიგნით სიმკვრივეთა განაწილების შესწავლის საშუალებას გვაძლევენ სეისმოლოგიასა და გეოქიმიასთან ერთად. ასტრონომიაში გრაფიმეტრიული გაზომვების საფუძველზე საზღვრავენ დედამიწისა და სხვა ციური სხეულების მასებს. მეტროლოგიაში სხვადასხვა ფიზიკური სიდიდეების სტანდარტიზებისა და ერთეულების დასადგენად საჭიროა სიმძიმის ძალის ცოდნა. იგივე თითქმის ტექნიკურ მექანიკაზე, რომელიც მანქანების, მექანიზმებისა და ნაგებობათა გაანგარიშებისას მოითხოვს სიმძიმის ძალის ცოდნას, თუმცა არა ისეთი სიზუსტით, როგორც ეს მეტროლოგიასა და სხვა დარგებში არის საჭირო.

გრავიმეტრიული აგეგმვის სხვადასხვა სახეობა უნდა უქასხუებდეს მისი მონაცემების გამოყენების ამ სფეროებს ცალ-ცალკე. აქედანაც გამომდინარეობს ზისი უნიფიცირების საჭიროება, რასაც ზემოთ აღნიშნული ინსტრუქციები ემსახურება. გრავიტაციული ვარიომეტრით მუშაობის ინსტრუქციის დახასიათებას ჩვენ აქ არ შევხებით, რადგან ეს სპეციალური კურსის საგანს შეადგენს.

გრავიმეტრიული მეთოდების გეოლოგიურ ძიებაში გამოყენების ძირითად პირობას, ფიზიკურ საფუძველს, ქანების ბუნებრივ ვითარებაში მდებარეობისას სიმკვრივეთა შორის საკმარისი სხვაობის  $0.2-0.3$  და უფრო მეტის არსებობა შეადგენს ჰორიზონტული მიმართულებით. მხოლოდ ამ შენთხვევაში გამოიწვევს ქანების სინკვრივეთა სხვაობა გრავიტაციული ველის ანომალიებს; ამასთან ერთად ანგარიში გეოლოგიური სხეულების სიდიდესა და წოლის პირობებსაც უნდა გაეწიოს. თუ მთელ გამოსაკვლევ ფართობზე ქანები ერთგვაროვანია ჰორიზონტულად, მაშინ, რა რიგ დიდი ზომებითა და სიმკვრივეთა სხვაობითაც არ უნდა ხასიათდებოდნენ ისინი რადიალური მიმართულებით, გრავიმეტრიული ძიება მაინც უშედეგო იქნება. პრაქტიკაში ამას ზოგჯერ ჯეროვანი ყურადღება არ ექცევა და საქმეში ჩაუხედავი პირები ამა თუ იმ ობიექტზე გრავიმეტრიული ძიების უარყოფით შედეგებს თვით მეთოდის სამეცნიერო რეპუტაციის საწინააღმდეგოდ იყენებენ, ნაგრამ იმას აღარ კითხულობენ, თუ რამდენად სწორად იყო თავიდანვე შერჩეული და დასაბუთებული ეს მეთოდი (ეს შეეხება უკლებლივ ყველა გეოფიზიკურ მეთოდსავე ერთნაირად) მოცემული ობიექტის საძიებოდ. დავსაბუთებისას საკიროა გაანგარიშებულ იქნას აგრეთვე დაკვირვებათა ქსელი და მიზანშეწონილად შეირჩეს წერტილების განაწილების სისტემა თითოეული ობიექტისათვის ცალ-ცალკე. გეოფიზიკური კვლევა საზოგადოდ სტანდარტების წინააღმდეგია და მოითხოვს შემსრულებელთა ფართო მეცნიერულ ჰორიზონტსა და ინიციატივას.

გრავიმეტრიული ძიების დაგეგმარებისა და დაყენების წინ საკიროა გეოლოგიურ-საძიებო ამოცანის სწორად დასმა და მკაფიოდ ფორმულირება. წინასწარედ უნდა იყოს გამოარკვეული და ცნობილი ამოცანის ამოხსნის პროგრამა პირდაპირი, ისე არაპირდაპირი მხარე, რადგან ხშირად გრავიმეტრიული ძიება ეფექტურ შედეგს სწორედ ამ არაპირდაპირი გზით აღწევს.

ამა თუ იმ ობიექტზე გრავიმეტრიული ძიების გამოყენების ძეკნიერულად დასაბუთების მიზნით და უეჭველი პრაქტიკული ეფექტის მისაღწევად საკიროა საშუაო რაიონის წინასწარი დათვლიერება გულდასმით, მის შესახებ არსებული გეოლოგიური, გეოფიზიკური და სამთო სამუშაოების მონაცემების ერთად დაგროვება და სისტემაში მოყვანა, კარგად გაცნობა და ღრმა კომპლექსური ანალიზი, რაიონში გავრცელებული ქანების ნიმუშების მკირე რიკვისათვის მაინც სიმკვრივეთა განსახლერა და ცალკეულ შემთხვევებში წინასწარი საცდელი ხასიათის სამუშაოების დაყენებაც. აქ დასმული საკითხების უკეთ განზოგადოების მიზნით საკიროა გრავიმეტრიული ძიების უარყოფითი შემთხვევების ზედნიწეენითი რევიზია, თან ანალიზი და მიღებუ-

ლი შედეგების გამოქვეყნება, რაც უდავოა, სასარგებლო იქნებოდა საქმისათვის.

მხოლოდ ასეთი გზით შეიძლება დაკულ იქნას გრავიმეტრიის, როგორც საძიებო მეთოდის, სამეცნიერო რეპუტაცია პრაქტიკოსების თვალში და მომავალში თავიდან ავიცილოთ ფუჭი ხარჯები.

მტკიცედ უნდა გვახსოვდეს, რომ ნავთობი და ქვანახშირი ან სხვა რომელიმე სასარგებლო ნამარხი არ შეიძლება იყოს გრავიმეტრიული მეთოდებით გეოლოგიური ძიების უშუალო ობიექტი. ამასთან, თუ ტოპოგრაფიული რელიეფის გავლენა სიმძივის ძალაზე უდრის ან ქარბობს საძიებო ობიექტის ვეექტს, მაშინ გრავიმეტრიული ძიება წინასწარვე უშედეგოდ ან არა საიმედოდ უნდა ჩაითვალოს.

გრავიმეტრიული ძიების ძირითადი და საიმედო ობიექტებია: 1. მიწისქვეშა რელიეფი, რომლის კონტაქტის ზედაპირი სიბრტყე არ არის, მცირე სიღრმეზე მდებარეობს და სიმკვრივეთა საკმარისი სხვაობით, 0.2—0.3 და უფრო მეტით, ხასიათდება; ამის მაგალითს წარმოადგენს ცარცული ნალექების ქვეშე ქარბონული შრენარის რელიეფი დონეის აუზში, სადაც ნალექებს შორის სიმკვრივეთა სხვაობა 0.5—0.7 შეადგენს; 2. მარილის გუმბათური სტრუქტურები და მათთან დაკავშირებული ნავთობის საბადოები ურალ-ემბის რაიონში; 3. სხვადასხვა სტრუქტურული ფორმები, დიზუნქტიური დისლოკაციები და ნორმული კონტაქტები, თუ მათ თან სდევს ქანების სიმკვრივეთა მკვეთრი სხვაობა ჰორიზონტული მიმართულებით; 4. მადნეული საბადოები, როცა გამადნებასა და ფუჭ ქანს შორის სიმკვრივეთა სხვაობა და საძიებელი სხეულის ზომები დიდია და სხეული მცირე სიღრმეზე მდებარეობს; 5. სარეკონოსირებო აგეგმვა მაგნიტურ გამოკვლევასთან ერთად კომპლექსური გეოფიზიკური ძიებისათვის განუთვნილ ფართობზე, სადაც საჭიროება მოითხოვს გამოიყოს პერსპექტიული უბნები სეისმური და ელექტრომეტრიული მეთოდებით შემდგომი დეტალური ძიებისათვის. ასეთი ხასიათის აგეგმვები ტარდება უკრაინაში, კავკასიასა და შუა აზიაში და რუსეთის ველზე.

ამავე დროს იგულისხმება, რომ ჩამოთვლილ ობიექტებზე ძიებისას სტატიკური გრავიმეტრებისა და გრავიტაციული ვარიომეტრების გამოყენებას მეტისმეტად ზღუდავს ტოპოგრაფიული რელიეფი, განსაკუთრებით ვარიომეტრის შემთხვევაში, როცა საჭიროა დაკვირვების წერტილის ირგვლივ, დაახლოებით 10 მ რადიუსით, შეირჩეს ისეთი მოვაკებული ადგილი, რომლის დახრა 0.1 არ უნდა აღემატებოდეს.

ზემოთ აღნიშნულის საფუძველზე გრავიმეტრიულ ძიებასთან დაკავშირებით შეიძლება ინსტრუქციის სახით დაისახოს შემდეგი წესები და მოთხოვნები.

1. გრავიმეტრიული რუკის მასშტაბი და კვეთი იზოხაზებს შორის, დაკვირვებებისა და რედუქციების გამოთვლების სიზუსტე, აქ მოთავსებული ცხრილის მონაცემების მიხედვით, უნდა ეთანადებოდნენ ერთმანეთს:

რუკის იზომანომლების კვეთი მგლ	საშუალო კვადრატული ცდომილება			რუკის მასშტაბი
	დაკვირვების მგლ	პუნქტის სი- მალის მ	ანომალიის მგლ	
1	2	3	4	5
0.5	0.15	0.3	0.2	1:10000—1:50000
1.0	0.35	0.8	0.4	1:25000—1:100000
2.0	0.7	1.4	0.8	1:50000—1:200000
5.0	1.5	2.5	2.0	1:100000—1:500000

2. გრავიმეტრით ჩატარებული დაკვირვება 10-ჯერ უფრო მეტად ზუს-  
ტი გამოდის, ვიდრე საქანიანი გაზომვები. ამიტომ აუცილებელია ძველი სა-  
ქანიანი პუნქტების განმეორებითი შემოწმება გრავიმეტრით.

3. ფაის რედუქციაში შედგენილი იზომანომლების რუკა უფრო ნაკლებ  
ცდომილებებს შეიცავს, ვიდრე ბუგესა და იზოსტაზისური ანომალიების რუ-  
კები, რადგან უკანასკნელნი მოითხოვენ დამატებით ქანების სიმკვრივეთა და  
რელიეფის სიმაღლეთა სხვაობების ცოდნას.

4. სიმძიმის ძალის ინტერპრეტაციის მრავალსახობის გამო, მის დროს  
აუცილებელია არსებული რედუქციების, გეოლოგიური, გეოფიზიკური და  
სამთო სამუშაოების მონაცემების კომპლექსურად გამოყენება და მათი ღრმა  
ანალიზი. უნდა გვახსოვდეს, რომ სერიოზული გეოლოგიური საფუძვლის გა-  
რეშე, როგორცაა შემოწმებული თეორია ან სამუშაო ჰიპოთეზი, შეუძლებელ  
ია მივალწიოთ სიმძიმის ძალის ანომალიების აცეღსა და მართებულ გეო-  
ლოგიურ ინტერპრეტაციას არა მარტო მსოფლიო გრავიმეტრიული რუკის  
მასშტაბით, არამედ მიწის ზედაპირის ცელკეულ და მცირე უბნებზედაც. ეს  
გარემოება ერთნაირად შეეხება როგორც რაოდენობრივ, ისე თვისობრივ ინ-  
ტერპრეტაციას. ამავ დროს, შებრუნებითაც, სიმძიმის ძალის შესახებ მიღე-  
ბული მონაცემები ინტერპრეტაციის შემდეგ ამა თუ იმ გეოლოგიური თეო-  
რიის თუ ჰიპოთეზის შემოწმების საშუალებას წარმოადგენენ.

5. ქანების სიმკვრივეთა მასობრივი და სისტემატური განსაზღვრები,  
როგორც წესი, წინ უსწრებენ გრავიმეტრიულ დაკვირვებებს ან მათთან ერ-  
თად მიმდინარეობენ. დეტალური გრავიმეტრიული აგეგმვის დროს აუცილე-  
ბელი გეოდეზიური სამუშაოს დიდი მოცულობის გამო, უკანასკნელი ყო-  
ველთვის წინ უსწრებს პირველს. წინააღმდეგ შემთხვევაში მოსალოდნელია  
ჩამორჩევა გრავიმეტრიული მასალების დამუშავებაში.

6. სიმძიმის ძალის ანომალიების გეოლოგიური ინტერპრეტაციის დროს,  
როგორც ზემოთაც იყო აღნიშნული, მოხერხებულია ვისარგებლოთ მათი შემ-  
დეგი კლასიფიკაციით: მაკრორეგიონული, რეგიონული, ლოკალური და მიკ-  
როლოკალური ანომალიები. მაკრორეგიონული ანომალიები კონტინენტებისა  
და ოკეანეების მასშტაბისა არიან. რეგიონულ ანომალიებს შორის მკვეთრად  
განირჩევიან ერთმანეთისაგან ბაქნური და გეოსინკლინური ანომალიები მათი  
ინტენსივობის, გრადიენტის, ზონალობისა და გამომწვევი მასების სიღრმეში  
მდებარეობის მხრივ. ლოკალური ანომალიების შესწავლისა და დახასიათე-  
ბისათვის საჭიროა წინასწარ მივალწიოთ რეგიონულ ფონზე მათ გამოყოფას



აპა თუ იმ წესით. ლოკალური ანომალიების მასშტაბს განსაზღვრავს სასარგებლო წარმოების საბადოებისა და მცირე გეოლოგიური სტრუქტურების, როგორცაა ანტიკლინი, სინკლინი, დიზუქტიური დისლოკაციები და სხვ. გავრცელება მიწის წიაღში და მის ზედაპირზე.

7. მიწის ქერქის სულ ზედა ნაწილში წარმოდგენილი სტრუქტურული თავისებურებანი: ანტიკლინი, სინკლინი, ფლექსურა, შეცოცება, ნახლეტი, ნორმული კონტაქტი და სხვ., ვერ შექნიათ სიმძიმის ძალის ლოკალურ ანომალიებს. თუ მათ თან არ სდევს ქანების სიმკვრივეთა შორის საკმარისი სხვაობა 0.2—0.3 და უფრო მეტი და სხვა გეოლოგიურ-ტოპოგრაფიული ხელსაყრელი პირობები.

8. გეოფიზიკოსისა და გეოლოგის მქიდრო და შემოქმედებითი კავშირი გრავიმეტრიული ძიების სამივე ეტაპზე—გაზომვები, დამუშავება, ინტერპრეტაცია—აუცილებელია და მიზანშეწონილი.

9. გრავიმეტრიული ძიების დადებითი და უარყოფითი შედეგები, განსაკუთრებით მისი სწორად დაგეგმარების, წარმოებისა და ინტერპრეტაციის შემდეგ, ერთნაირად საინტერესოა მეკნიერებლისათვის და საპრობლემური თანაბარი ინტერესით შესწავლა საინსტრუქციო ხასიათის პრინციპებისა და მოსაზრებების გამოშვებების მიზნით.

10. ამა თუ იმ გეოლოგიურ ობიექტზე გრავიმეტრიული ძიების გამოყენების ძალიანად პირობებს, როგორც შემოთავაზო აღნიშნული, შევადგინე:

ა) ქანების სიმკვრივეთა საკმარისი სხვაობა, ბ) სიმკვრივეთა გასწორებული ზედაპირების არაპროზონტულობა, გ) სამარჯირო შრენარის მცირე სიღრმეზე მდებარეობა, დ) ცალკეული სტრუქტურული ფორმების საკმარისად დიდი ზომები სივრცეში და ე) ტოპოგრაფიული რელიეფის მჭიდრო ხასიათი. თუ კი საშუალო რაიონი სრულიად მოვაკებული არ არის.

ამრიგად, გრავიმეტრიული დაკვირვებების დაგეგმარების, წარმოებისა და ინტერპრეტაციის მიზნით საჭიროა შემდეგი საკითხების გარკვევა, როგორცაა: გრავიმეტრიული ძიების წინაშე დაყენებული ამოცანა, საკვლევი რაიონში წარმოდგენილი ქანების სიმკვრივეთა სხვაობა და წოლის პირობები, უშუალოდ სამიხებელი ობიექტი და სხვა გეოლოგიური მიზეზებით განმარტებული ანომალიების ნიშანი და სიდიდე, აგრეთვე ტოპოგრაფიული რელიეფის ხასიათი.

თანამედროვე გრავიმეტრიის წინაშე ვადასაქრელად დგას შემდეგი ძირითადი პრობლემები:

1. არსებული გრავიმეტრიული აპარატურის შემდგომი მოდიფიკაცია და გაუმჯობესება; სიმძიმის ძალის აბსოლუტური განსაზღვრის ახალი მეთოდების დამუშავება; სტაციონარული ტიპის, საპერო და საკაროტაჟო გრავიმეტრების შექმნა.

2. ზღვებისა და ოკეანეების დიდი სივრცეების დაფარვა გრავიმეტრიული პუნქტების ხშირი და თანაბარი ქსელით; სახმელეთო განსაზღვრების გამარჯვლება მიუვალ და ძნელად მისაწვდომ რაიონებში; სისტემატიზირებული მსოფლიო გრავიმეტრიული კატალოგებისა და რუკების შედგენა სიმძიმის ძალის სხვადასხვა რელექტივებში.

3 სიმძიმის ძალის რედუქციის ახალი მეთოდების დამუშავება და არსებული მეთოდების უკეთ დასაბუთება და მოადიფიკაცია გრაფიმეტრიული მონაცემების გეოლოგიური, გეოფიზიკური და გეოდენზიური ინტერპრეტაციისათვის ცალ-ცალკე; ინტერპრეტაციის კომპლექსური მეთოდების დამუშავება.

4. დღემდე ჩატარებული გრაფიმეტრიული აკეგემის (საქ.ნებით, გრაფიმეტრებითა და ვარიომეტრებით) მასალების ზედმიწევნით დამუშავება და მიღებული შედეგების განხილვა ცალკეული ქვეყნებისა და საინტერესო ანონალიზების მიხედვით სხვა გეოფიზიკურ და გეოლოგიურ მონაცემებთან კომპლექსში.

5. მაღალი კვალიფიკაციის სპეციალისტთა კადრების მონზადება გრაფიმეტრიის დარგში მეზობელი დისციპლინების (მათემატიკა, ფიზიკა, გეოფიზიკა, გეოლოგია, გეოდენზია, ასტრონომია) საფუძველზე უნივერსიტეტებსა და ინსტიტუტებში; ამ მიზნით სტანდარტული სახელმძღვანელოების შექმნა ზოგადსა და სპეციალურ გრაფიმეტრიაში და გეოფიზიკაში, გრაფიმეტრიულსა და გეოფიზიკურ ძიებაში. გეოდენზიურსა და გეოლოგიურ გრაფიმეტრიაში უნივერსიტეტებისა და ინსტიტუტებისათვის ცალ-ცალკე; მეცნიერულ-პოპულარული ლიტერატურის გამოცემა გრაფიმეტრიაში.

ამ პრობლემების მიხედვით სამეცნიერო საკვლევო და საგამომგონებლო მუშაობას მრავალი ინსტიტუტი, ლაბორატორია, უწყება-დაწესებულება და ცალკეული მეცნიერი და ინჟინერი ეწევა მსოფლიოს სხვადასხვა კუთხეში. ამ გრანდიოზულ მუშაობაში საბჭოთა გრაფიმეტრისტების, გეოფიზიკოსებისა და გეოლოგების მრავალრიცხოვან არმიას თვალსაჩინო, ავტორიტეტული და წამყვანი მდგომარეობა უკავია მთელ რიგ საკითხებსა და დარგებში ჩვენი ქვეყნის ასეთ დაწესებულებათა და მეცნიერთა შორის პირველ რიგში ალსანიშნავი არიან: სსრ კავშირის მეცნიერებათა აკადემიის გეოფიზიკური ინსტიტუტი, ძიების გეოფიზიკური და გეოქიმიური მეთოდების ინსტიტუტი, შტერნბერგის სახელობის ასტრონომიული ინსტიტუტი, გეოდენზიის, საჭაერო აკეგემისა და კარტოგრაფიის ცენტრალური სამეცნიერო კვლევითი ინსტიტუტი ანუ „ცნიერგაიკ“ და გუბკინის სახელობის ნავთის ინსტიტუტი მოსკოვში, „გლავენფტერგეოფიზიკა“ თავის მრავალრიცხოვანი განყოფილებებით, ფილიალებითა და ლაბორატორიებით მოსკოვსა და მოკავშირე რესპუბლიკების, დედაქალაქებში; თეორიული ასტრონომიის ინსტიტუტი, საძიებო გეოფიზიკის საკავშირო ინსტიტუტი ანუ „ვირგ“ და სამთო ინსტიტუტი ლენინგრადში, უკრაინის სსრ მეცნიერებათა აკადემიის გრაფიმეტრიული ობსერვატორია პოლტავაში, საქართველოს სსრ მეცნიერებათა აკადემიის გეოფიზიკის ინსტიტუტი თბილისში (1953 წლის სექტემბერში შეუსრულდა დაარსებიდან 20 წლისთავი), უნივერსიტეტების სათანადო გეოფიზიკური კათედრები მოსკოვსა და ლენინგრადში. კიევსა, ლვოვსა, თბილისსა და სხვაგან.

ამ დაწესებულებებში და საერთოდ საბჭოთა კავშირში თავიანთი შრომებითა და მოღვაწეობით, ხელმძღვანელი და წამყვანი მდგომარეობით საბჭოთაა გრაფიმეტრიის სხვადასხვა დარგში ცნობილი არიან: მიხაილოვი, მოლოდენსკი, ტიხონოვი, ჟონგოლოვიჩი, ოროლოვი, სოროკინი, გორშკოვი, კაზანსკი, ანდრეევი, პარიისკი, ფედინსკი, მიგალი, ალექსანდროვი, ზერევი, მურდერეო-

ვა, ლოზინსკაია, ბულანჟე, სამსონოვი, ლუკაჭენკო, პოდლუბნი, მალოვიჩკო, ლუსტიხი, ევსეევი და სხვ. ჩამოთვლილი საბჭოთა მეცნიერნი ღირსეულად აგრძელებენ რუს და საბჭოთა მეცნიერების დიდი წარმატებულ მემკვიდრეობის ლომონოსოვის, ლიტკეს, სლუდსკის, სტენნიცკის, შოტკინის, მენდელეევის, შტერნბერგის, ნიკიფოროვისა და სხვათა შესანიშნავ ტრადიციებს.

გრაფიმეტრიის დარგში გამოკვლევებს წარმართავდა წინად და ახლაც წარმართავს სსრ კავშირის მეცნიერებათა აკადემიასთან არსებული ასტრონომიული საბჭო; ერთხანს ამ როლს ასრულებდა საბჭოთა კავშირის გრაფიმეტრიული კომისია, რომელსაც ირჩევდნენ ყოველ 3—4 წელიწადში ერთხელ მოწვეულ გრაფიმეტრიულ კონფერენციებზე, მოსკოვში, გასულ 20-დე წლის განმავლობაში. ამ კონისიის თავმჯდომარედ მუდმივად ირჩევდნენ მიხაილოვს, რომელიც ამავე დროს აღნიშნული ასტრონომიული საბჭოს თავმჯდომარეც არის.

„საერთოდ უნდა ითქვას, რომ არც ერთი გეოფიზიკური მეთოდი, და მათ შორის გრაფიმეტრიულიც, არ გვიჩვენებს ამა თუ იმ მადნის ადგილმდებარეობას. იგი გვაძლევს მხოლოდ ამა თუ იმ ფიზიკურ მონაცემებს, რომელნიც შენდევს გადატანილ უნდა იქნენ გეოლოგიის ენაზე, ე. ი. უნდა მოხდეს მათი ინტერპრეტაცია. ამას კი შესძლებს ის, ვინც კარგად იცნობს სხვადასხვა მიწისქვეშა ფენების გავლენას ამა თუ იმ გეოფიზიკურ ხელსაწყოზე; მეორე მხრივ იგი კარგად უნდა იცნობდეს ადგილობრივ გეოლოგიურ პირობებს, რომ მიღებულ გეოფიზიკურ ეფექტს არ დაუკავშიროს ნიადაგის ქვეშ ისეთი ფენების არსებობა, რომელნიც გეოლოგიურად სრულიად არ არიან მოსალოდნელი საკვლევ შიდამოებში“ (მ. ნოლია, გეოფიზიკა I, 1933 წ., გვ. 74).

---

## თ ა ვ ი X V I

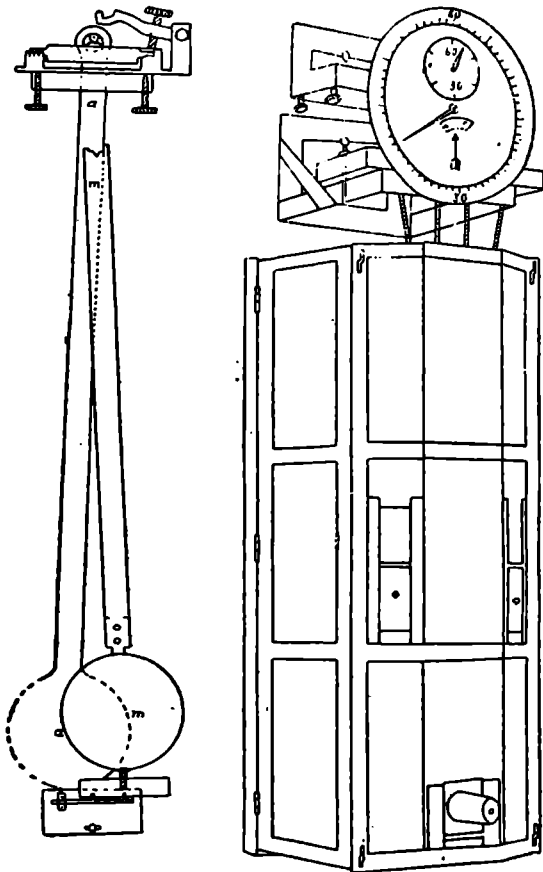
### გ რ ა ვ ი მ ი ბ ტ რ ი უ ლ ლ ა პ ა ვ ი რ ა ვ ე ბ ა თ ა მ ო კ ლ ე მ ი მ ო ს ი ლ შ ა სა პ ა რ ტ ი ვ ა ლ ო შ ი 1829 წ ლ ი დ ა ნ ლ ე მ ე ლ დ

წინათ სიმძიმის ძალის გაზომვებს აწარმოებდნენ მხოლოდ ასტრონომები, გეოდეზისტები და ფიზიკოსები, ახლა მათთან ერთად ამავე საქმეს ემსახურებიან გეოფიზიკოსებიცა და გეოლოგებიც. მიუხედავად ა'ეთი ფართო ინტერესისა სხვადასხვა სპეციალისტის მხრივ, გრაფიკურია იყო და დღემდე რჩება მეტად ვიწრო სპეციალობად. ამ გარემოებას ხელი არ შეუშლია ლომონოსოვისათვის, რომ იგი გამხდარიყო გრაფიკურიის ფუძემდებელი რუსეთში. სიმძიმის ძალის განსაზღვრის პიონერებად, ლომონოსოვის შენიდეგ, ითვლებიან რუსეთში ლიტკე, პაროტი და რეინეკე. მათ ეკუთვნით სიმძიმის ძალის პირველი გაზომვები პეტერბურგში, თბილისში, კაზანის პეტროპავლოვსკში და კანდალაკში XIX საუკუნის 30-იან წლებში. თუ ამ გაზომვების დროს ლიტკე და რეინეკე სარგებლობდნენ კეტერის ინგლისში დამზადებული საქანიანი ხელსაწყოთი, პაროტმა თბილისში გამოიყენა საკუთარი აპარატი, პირველად აგებული რუსეთში.

უფრო დაწვრილებით რომ ვთქვათ, პაროტმა 1829 წელს ააგო პირველი საქანიანი აპარატი დერპტში (ახლა ქ. ტარტუ, ესტონეთის სსრ) და ამავე წელს პირველად გაიზომა სიმძიმის ძალა თბილისში. გავეცნოთ მოკლედ პაროტის ამ საქანიანი აპარატის აღწერილობას.

პაროტის აპარატი შემცირებულად მოცემულია ნახ. 93-ზე. პაროტის *a* საქანი დამზადებული იყო თითბრისაგან, მისი სიგრძე და პერიოდი შეედგენდა დაახლოებით 72 სმ და 0,78 სეკ. საქანი დაკვირვებისას დაკიდებული იყო შტატივზე (ნახაზის მარჯვენა ნაწილი), რომელიც წინასწარ სათანადოდ მაგრდებოდა შენობის კედელზე. ამავე შტატივზე იმართებოდა ასტრონომიული საათი ხის *m* საქანიით. *a* საქანის რხევის პერიოდი ისაზღვრებოდა *m* საქანის შექწობით, მათ თანხედენაზე დაკვირვების წეთოდით, რისთვისაც საქანებს ბოლოში სათანადო მოწყობილობა გააჩნდა. დროის განსაზღვრა და საათის შესწორება ხდებოდა ასტრონომიული დაკვირვებებით. პაროტის მიერ ამიერკავკასიაში მოწყობილ ექსპედიციაში დაკვირვებებს სიმძიმის ძალის არქარებაზე აწარმოებდა თვითონ პაროტი, ხოლო ასტრონომიულ დაკვირვებებს—ფედოროვი. პაროტის დაკვირვებების მიხედვით გამოთვლები ჩატარებული აქვს სტრუვეს.

1833 წელს გამოქვეყნებულ შრომაში ლიტკე მიუთითებდა კეტერის საქანიანი ხელსაწყოს დიდ სიმძიმეზე და სხვა დეფექტებზე საექსპედიციო პირობებში მუშაობისათვის და გამოსთქვამდა მოსაზრებებს მისი გაუმჯობესებისა და საერთოდ სიმძიმის ძალის შეფარდებითი მეთოდით განსაზღვრის შესა-



ნახ. 93.

ხებ. როგორც ვეცობა, იგივე საკითხები აწუხებდა პაროტსაც, რომელმაც 1829 წლისათვის კავკასიაში პირველი გეოფიზიკური ექსპედიციის მოწყობის მიზნით ააგო კიდეც ახალი, იმ დროისათვის მნიშვნელოვნად გაუმჯობესებული, ზემოხსენებული საქანიანი აპარატი. როგორც ამას სტრუვე მოწმობს,

პაროტის საქანიანი აპარატი განირჩეოდა ყველა იმ დროისათვის არსებული საზღვარგარეთული ხელსაწყოებისაგან, მათ შორის კეტერის საქანიანი აპარატისაგან, იმით, რომ საქანის სიგრძისა და პერიოდის სიმცირე ანიჭებდა მას დიდ უპირატესობას წონის, პორტატულობის და სიზუსტის მხრივ საექსპედიციო და მთაგორიან პირობებში მუშაობისათვის. მაგრამ პაროტის საქანიანი აპარატი, ისევე როგორც ლომონოსოვის გაზიანი გრაფიმეტრი, უკანასკნელ დრომდე მივიწყებული რჩებოდა მიუხედავად იმისა, რომ პაროტისა და სტრუფეს სათანადო შრომები გამოქვეყნებულ იქნა გერმანულ ენაზე ბერლინში 1834 წ. პირველი საბჭოთა საქანიანი ხელსაწყოების აგება კი დაიწყო ლენინგრადში 1927 წელს (ალექსანდროვი).

პაროტის მოღვაწეობა, როგორც კავკასიის მკვლევარისა, შესანიშნავია იმითაც, რომ მას ეკუთვნის პირველი გეოფიზიკური ექსპედიციის მოწყობა კავკასიაში და არა მარტო პირველი გაზომვები სიმძიმის ძალისა თბილისში და მთა არარატზე შეფარდებითი მეთოდით, არაშეღ ქანების სიმკვრივეთა განსაზღვრებიც და აგრეთვე ბარომეტრული ნიველობის, მაგნიტური და გეოთერმიული დაკვირვებების აქვე ჩატარება.

პაროტის შემდეგ, XIX საუკუნის მეორე ნახევარში სტებნიცკი და კულბერგმა განაახლეს გრაფიმეტრიული დაკვირვებები თბილისში რეპსოლდის საქანიანი ხელსაწყოთა შემწვობით და განსაზღვრეს სიმძიმის ძალა აბსოლუტურ-ი მეთოდით ამიერკავკასიის სხვა პუნქტებშიც; მათ აღმოაჩინეს შეუღული ბუნისა და სიმძიმის ძალის ანომალიები თბილისში, ბათუმში, განჯაში (ამჟამად კიროვადი) და შემახაში. ცნობილია აგრეთვე, რომ 1884—85 წწ. სტებნიცკი თბილისიდან, სადაც იგი მთელ 25 წლის განმავლობაში მოღვაწეობდა, წარმატებით შეეკამათა პარიზის მეცნიერებათა აკადემიის ნამდვილ წევრს ფაის სიმძიმის ძალის შესწორებათა შესახებ და თავისი ორიგინალური ინტერპრეტაცია მოგვცა ამ საკითხში, რომელსაც აქტუალური მნიშვნელობა ჰქონდა როგორც მაშინ, ისე შემდეგაც და დღესაც აქვს.

XX საუკუნის დასაწყისიდან პირველ მსოფლიო ომამდე თბილისში მოღვაწეობდნენ და აქედან კავკასიის ტერიტორიის გრაფიმეტრიულ აგეგმვას აწარმოებდნენ რუსი გეოდეზისტები: გედეონოვი, შჩოტკინი, პავლოვი, კორზუნი და სხვ. შჩოტკინის იდეის მიხედვით; პირველად თბილისში გადაკეთდა ჩვეულებრივი ქრონომეტრი კონტაქტურად და აქვე გამოიყენეს იგი გრაფიმეტრიული დაკვირვების დროს ასტრონომიული საათის ნაცვლად. შჩოტკინის კონტაქტური ქრონომეტრის იდეა შემდგომ გამოიყენეს და ტექნიკურად განავითარეს ცნობილმა საქრონომეტრო ფირმებმა რუსეთში და საზღვარგარეთ. რადიოს გამოყენება გრაფიმეტრიული სამუშაოების დროს ასტრონომიული დაკვირვებების ნაცვლად ეკუთვნის საბჭოთა მეცნიერს მიხაილოვს (1921 წ.).

საბჭოთა ხელისუფლების დამყარების შემდეგ საქართველოში, გრაფიმეტრიულ დაკვირვებებს როგორც აქ, ისე ამიერკავკასიის დანარჩენ ტერიტორიაზე, შავხა და კასპიის ზღვებზე აწარმოებდნენ შემდეგი საბჭოთა გეოფიზიკოსები და გრაფიმეტრისტები: სოროკინი, ფედინსკი, ლეუშინი, ბულანყე, აბაკელია და სხვ. საბჭოთა პერიოდისათვის დამახასიათებელია გეოფიზიკური და გრა-

ვიმეტრიული სამუშაოების მაქსიმალურად გაშლა და ამ მუშაობაში ადგილობრივი კადრების ჩაბმა. ამის მტკიცე ბაზას თბილისში წარმოადგენენ შექმნილი დაწესებულებები: გეოფიზიკური ობსერვატორია (არსებობს 1844 წლიდან). გეოფიზიკის ინსტიტუტი (დაარსებულია 1933 წელს მეცნიერებათა აკადემიის სისტემაში) და გეოფიზიკური კანტორა (დაარსებულია 1946 წელს). უკანასკნელი ოცი წლის განმავლობაში პროფესორების პ. ნიკიფოროვის (გარდაიცვალა 1944 წელს), ა. მიხაილოვის და მ. ნოდინას ხელმძღვანელობით აღიზარდნენ გრაფიკური სხვადასხვა დარგში მომუშავე სპეციალისტები ადგილობრივი ახალგაზრდა კადრებიდან, რომელთა შორის პირველ რიგში უნდა დავასახელოთ დოკენტები: ბ. ბალაეძე, ვ. ჯიქია, აწ განსვენებული შ. ოქროპირიძე და სხვ.

საქართველოს სსრ ტერიტორიის გრაფიკური შესწავლა დღეს, წინა წლებისაგან განსხვავებით, მკიდრით არის დაკავშირებული სასარგებლო ნამარხების საბადოების ძიებასთან გეოფიზიკური მეთოდებით და წარმოებს ძირითადად გეოფიზიკის ინსტიტუტისა და საქართველოს გეოფიზიკური კანტორის მიერ. ამ შესწავლაში დასაყრდენს და გამოსავალ წერტილს შეადგენდა წინათ (1900 წლიდან მოყოლებული) და დღესაც შეადგენს თბილისის გრაფიკური პუნქტი, რომლის მემართ ჩატარებულია სიმძიმის ძალის მრავალრიცხოვანი განსაზღვრები საქანიანი ხელსაწყოებისა და გრაფიკურების შემწეობით. საქანიანი პუნქტების საერთო რიცხვი საქართველოს სსრ ტერიტორიაზე დღეს 150-ს აღემატება, ხოლო სტატიკური გრაფიკურებითა და გრაფიკური ვარიომეტრებით განსაზღვრული წერტილების რიცხვი ათი ათასზე მეტს შეადგენს. გრაფიკური პუნქტების განაწილება საქართველოში მეტად არათანაბარია, რაც აიხსნება ჩვენი ქვეყნის მთაგორიანი რელიეფით, რომელიც ალაგ-ალაგ ცუდად მისადგომი და ზოგჯერ მიუწვდომელიც კი არის სხვადასხვა გეოფიზიკური დაკვირვებებისათვის.

თბილისში მოთავსებულია საბჭოთა კავშირის ერთ-ერთი უძველესი და დასაყრდენი გრაფიკური პუნქტი, სადაც სიმძიმის ძალის აჩქარება მრავალჯერ, საიმედოდ და შედარებით მაღალი სიზუსტით არის განსაზღვრული. ოთხი ასეთი პუნქტი არის მოსკოვში, პულკოვოში, ყაზანში და პოლტავაში. ეს პუნქტები, როგორც ვიცით, დაკავშირებულია გრაფიკურიულად როგორც ერთმანეთთან, ისე პოტსდამთან, რომელიც დღემდე ითვლება მსოფლიოში ძირითად გრაფიკურულ პუნქტად. უკანასკნელი 120 წლის განმავლობაში თბილისში ჩატარებული სიმძიმის ძალის განსაზღვრები ქრონოლოგიურად მოცემულია ქვემოთ მოყვანილ ცხრილში (სამი ძირითადი პერიოდის მიხედვით: 1829—1881 წწ., 1903—1937 წწ. და 1950 წლიდან დღემდე).

ცხრილში მოცემული 10 განსაზღვრის (4—13) საფუძველზე 1949 წელს პარისკიმ გამოთვალა სხვადასხვა ხელსაწყოებითა და ავტორების მიერ დაკვირვებული  $g$ -ს საშუალო მნიშვნელობა თბილისისათვის (ხეისმური სადგურის სარდაფი, პლენანოვის ქ. № 150) და მიიღო შემდეგი სიდიდე:

№№ რიგზე	დაკვირვების წელი და გამოსავალი პუნქტი	საქანიანი ხელსაწყო	დამკვირვებლის გვარი	სიმძიმის ძალის აჩქარების (L) სიდიდე მილიგრამებში	პუნქტის მისამართი
1	1879—33 წწ., დერპტი	პაროტის	პაროტი	980169	ალავერდის ქ. № 2
2	1876—78 წწ.	რეპსოლდის	სტებნაკი /	980199	კოჯარის ქ. ამაღლების ეკლესიასთან
3	1881 წ.	"	კულბერგი	980186	გეოფიზიკური ობსერვატორიის კაბინეტი, პლენანოვის ქ. № 150
4	1903 წ., პულკოვო	შტერნეის	შროტკინი	980178.0 <sup>1</sup>	" სეისმური სადგურის სარდაფი, პლენანოვის ქ. № 150
5	1909 წ., პოტსდამი	ფენერის	ჰეკოი	980178.2	
6	1909 წ., პულკოვო	შტერნეის	კოროზნი	980176.0	"
7	1909 წ., "	"	პაელოვი და კოროზნი	980173.6	
8	1931 წ., პოლტავა	შუკოატის	ელის ზრატოვი	980171.5	"
9	1931 წ., პულკოვო	კემბრიჯის	ლუშინი	980176.4	
10	1933—34 წწ., "	"	"	980175.2	"
11	1935—36 წწ., მოსკოვი	"	აბაკელია	980175.4	
12	"	ბამპერგის	ბულანეე	980179.3	"
13	1937 წ., მოსკოვი	„აეროგეოპარიბორის“	თეიმურაზი	980178.6	
14	1950 წ. მოსკოვი	ნორგარდის გრავიმეტრი № 466	ბულანეე და აბაკელია	980176.2 ± 0.3 <sup>2</sup>	"

980177.7 ± 0.9<sup>2</sup> მილიგალი.

ზღვის დონეზე და შუალედი შრის სიმკვრივეზე შესწორებათა გათვალისწინებით ცალ-ცალკე სიმძიმის ძალის ანომალიები თბილისში ფაისა და

<sup>1</sup> ცნობილია, რომ ბორასის (1907 წ.) და ჰირენენის (1939 წ.) გამოანგარიშებით სიმძიმის ძალის აჩქარების საშუალო დაკვირვებული მნიშვნელობა თბილისისათვის ზუსტად ორი მილიგალით მცირეა ამ სიდიდებზე, რომელიც თანხვედბა გეიციასა და საკუვირის (1923 წ.) გამოთვლებს.

<sup>2</sup> ± 0.3 და ± 0.9 მგლ აქ ცდომილებებია. როგორც 1950 წლის განსახდვრები გვიჩვენებენ, თბილისში სიმძიმის ძალა 1903—1937 წწ. განმავლობაში საკმაოდ მაღალი სიხუსტით ყოფილა გაზომილი, რაც, ამავე დროს, მოწმობა პარიისკის გამოთვლების სისწორეს გაზომვის ცდომილების ფარგლებში.



ბუგეს სარედუქციო ფორმულების მიხედვით შესაბამისად შეადგენენ 18 და —60 მილიგალს.

ცხრილში ჩამოთვლილი 14 განსახლებიდან ბულანჯესა და აბაკელიას 1950 წლის დაკვირვებები მოეწყო გრავიმეტრებით, ხოლო ყველა დანარჩენი — სხვადასხვა სისტემის საქანიანი ხელსაწყოებით, რომელთა შორის გამოყენებული იყო თითბრის, ბრინჯაოს, ინვარის და კვარცის საქანები, დამზადებული როგორც ჩვენში, ისე საზღვარგარეთ. 1950 წლის დაკვირვებებში, წინა წლებისაგან განსხვავებით, გამოყენებული იყო თვითმფრინავი, როგორც სატრანსპორტო საშუალება, და შვიდი ერთნაირი სისტემის გრავიმეტრი სათანადო თერმოსტატებით. ამ დაკვირვებებით საბჭოთა კავშირის დასაყრდენი გრავიმეტრიული პუნქტები: მოსკოვი - პულკოვო - ყაზანი - პოლტავა - თბილისი პირველად დაუკავშირდნენ ერთმანეთს ერთდროულად, ერთი და იმავე ხელსაწყოებით და, რაც მთავარია, საკმაოდ მაღალი სიზუსტით. ეს სამუშაოები ჩატარდა სსრ კავშირის მეცნიერებათა აკადემიის გეოფიზიკური ინსტიტუტის მიერ საქ. სსრ მეცნიერებათა აკადემიის გეოფიზიკის ინსტიტუტისა და თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მონაწილეობით.

---

### ლიტერატურა

- მ. ნოდია. გეოფიზიკა, ნაწ. I, თბილისი, 1933 წ.
- მ. ნოდია. ფიზიკისა და გეოფიზიკის მეთოდები საძიებო საქმეში (პოპულარულად). თბილისი, 1933 წ.
- მ. აბაკელია. მთების მიგრაციის თეორია გეოფიზიკურ-გრავემეტრიული თვალსაზრისით. საქ. სსრ მეცნ. აკად. გეოლოგია-მინერალოგიის ინსტიტუტის შრომათა კრებული, 1951 წ.
- მ. აბაკელია. სიმძიმის ძალა და მისი ანომალია თბილისში. ჟურნ. „მეცნიერება და ტექნიკა“, № 5, თბილისი, 1953 წ.
- მ. აბაკელია. სესია დედამიწის შინაგანი აგებულების შესახებ. ჟურნ. „მეცნიერება და ტექნიკა“, № 10, თბილისი, 1953 წ.
- ალ. ჯანელიძე. მთების წარმოშობის საკითხისათვის. საქ. მეცნ. აკად. მოამბე, ტ. IV, № 5, თბილისი, 1943 წ.
- ალ. ჯანელიძე. კონტინენტების წარმოშობის პრობლემის შესახებ (მოხსენება საქ. გეოლოგიური საზოგადოების სხდომაზე ქ. თბილისში 1952 წლის მაისის 8-სა და 22 ს).
- ვ. ჯიქია. გრავეიტაციულ დაკვირვებათა ინტერპრეტაციის საკითხისათვის... ფიზიკისა და გეოფიზიკის ინსტიტუტის შრომები, ტ. VII, 1941 წ.
- П. Н. Тверской. Курс геофизики. 1930 г.
- П. М. Никифоров. Гравитационный вариометр Этвеша. Российская А. Н. т. 7, вып. III, Ленинград, 1924 г.
- А. И. Заборовский. Геофизические методы разведки, 1932 г.
- А. Д. Архангельский. Геология и гравиметрия. Москва, 1933 г.
- В. Н. Дахнов, Л. А. Рябчикова, Б. Л. Шнейерсон. Геофизические методы разведки нефтяных месторождений. М. Л., 1939 г.
- А. А. Михайлов. Курс гравиметрии и теории фигуры земли. Москва, 1939 г.
- А. В. Сорокин. Гравиметрия и гравиметрическая разведка. М. Л., 1953 г.
- Б. А. Андреев, М. С. Закашанский, Н. Н. Самсонов, Э. Э. Фотиади. Курс гравитационной разведки. М. Л., 1941 г.
- А. Д. Архангельский, А. А. Михайлов, В. В. Федюнский, Е. Н. Люстич. Геологическое значение аномалий силы тяжести в СССР. Известия А. Н. СССР, сер. геол., 4, 1937 г.
- М. С. Молодецкий. Основные вопросы геодезической гравиметрии. Москва, 1945 г.

- И. Д. Жонголович. Внешнее гравитационное поле земли и фундаментальные постоянные, связанные с ним. Труды Института теоретической астрономии, выпуск III. М.—Л., 1952 г.
- В. В. Белоусов. Колебательные движения земной коры, их развитие, свойства и задачи их изучения. Труды совещания по методам изучения движений и деформаций земной коры, Москва, 1948 г.
- Ю. Д. Буланже. Определение силы тяжести в центральном районе Московской гравитационной аномалии. Труды СИАИ СССР, № 81, М. Л., 1940 г.
- В. К. Балавадзе, М. С. Абакеджи. Омиаретская гравитационная аномалия и опыт ее интерпретации. Сообщения АН ГССР, т. I, № 8, 1940 г.
- В. К. Балавадзе, М. С. Абакеджи. К вопросу геологической интерпретации Омиаретской гравитационной аномалии. Сообщения АН ГССР, т. II, № 7, 1941 г.
- М. С. Абакеджи. Об изменении силы тяжести во времени в связи с геотектоническими движениями на Кавказе. Проблемы советской геологии, № 2, 1936 г.
- М. С. Абакеджи. К вопросу гравиметрической изученности Кавказа. Проблемы советской геологии, № 4, 1936 г.
- М. С. Абакеджи. Гравитационные карты Грузинской ССР. Известия ГПИ, книга № 11, Тбилиси, 1939 г.
- М. С. Абакеджи. Проблема Кюрдямпрского гравитационного хребта. Труды института физики и геофизики, т. X, 1947 г.
- М. С. Абакеджи. Некоторые вопросы геологической гравиметрии. Труды ГПИ, № 32, Тбилиси, 1954 г.
- В. В. Федынский. Аномалии силы тяжести в Азербайджане, 1937 г.
- Н. Н. Парийский. Ускорение силы тяжести в Тбилиси, Труды СИАИ СССР, № 102, 1949 г.
- М. С. Зверев, Л. С. Казаков, Н. А. Казапский, М. С. Молоденский, Ю. Д. Буланже. Справочник и руководство по гравиметрическим работам, 1936 г.
- Г. Рейх, К. Юнг. Прикладная геофизика, вып. I, переработка с дополнениями Г. А. Гамбурцева, 1936 г.
- О. А. Шванк, Е. Н. Люстих. Интерпретация гравиметрических наблюдений, 1950 г.
- А. Ф. Комаров, Л. И. Смирнов. Полевые работы с гравиметром Исаига в Московской области. Разведка недр, № 2, 1941 г.
- А. С. Уклонский. Новые волюмометры для определения плотности минералов и горных пород. Советская геология, № 2—3, 1940 г.

- Л. Я. Нестеров, Л. Д. Берсудский, А. Т. Донабедов, Н. С. Бибиков. Краткий курс разведочной геофизики, М.—Л., 1938 г.
- П. М. Никифоров. Физические основания гравитационного метода горной разведки. Известия института прикладной геофизики, вып. 1 и 2, Ленинград, 1925—1926 г. г.
- Ю. Д. Буланже, А. А. Михайлов, Н. Н. Парицкий. Формулы и таблицы для обработки гравиметрических наблюдений. М.—Л., 1949 г.
- А. И. Джанелидзе. Территория Грузии в системе альпийского орогена. Труды геологического института, том VII, 1953 г.
- М. С. Абакелиа. Средние плотности горных пород некоторых стратиграфических горизонтов в Южной Бакетии. Сообщения АН ГССР, т. X, № 9, 1949 г.
- С. В. Евсеев. Изостатические аномалии силы тяжести на Кавказе. Труды ЦНИИГАиК, вып. 28, 1939 г.
- М. И. Варенцов. Геологическое строение западной части Куринской депрессии, 1950 г.
- В. П. Ренгартен. Общий обзор тектоники Закавказья. Геология СССР, том X, часть I, 1941 г.
- И. Р. Кахадзе. Грузия в юрское время, 1947 г.
- Г. С. Дзоценидзе. Домезоценовый вулканизм Грузии, 1948 г.
- П. Д. Гамкредидзе. Геологическое строение Аджаро-Триалетской складчатой системы, 1948 г.
- Г. М. Заридзе. Закономерности развития вулканизма в Грузии, 1947 г.
- Е. И. Бюс. Сейсмические условия Закавказья, часть II, 1952 г.
- М. З. Нодия. Магнитное поле Кавказского перешейка, 1939 г.
-

# სარჩმვი

## წინასიტყვაობა

83-  
3

### თავი I

დედაშიწის გრაფიკაციულ ევლის მოკლე თეორია

§ 1. სიმძიმის ძალა . . . . .	5
§ 2. სიმძიმის ძალის პოტენციალი . . . . .	8
§ 3. პოტენციალური ფუნქციის ძირითადი თვისებანი	10
§ 4. სიმძიმის ძალის პოტენციალის დაშლა	12
§ 5. იდეალური გეოიდის განტოლება . . . . .	19
§ 6. სიმძიმის ძალა გეოიდის ხედაპირზე . . . . .	22
§ 7. სიმძიმის ნორმალური ძალის ფორმულები . . . . .	25
§ 8. სიმძიმის ძალის პოტენციალის მეორე წარმომადგენელი მნიშვნელობა . . . . .	26
§ 9. სიმძიმის ძალის პოტენციალის მეორე წარმომადგენელი ნორმალური მნიშვნელობანი . . . . .	33

### თავი II

მიზიდულობის ძალის პოტენციალის წიგვირთი შემოხვევა

§ 1. მატერიალური სფერული შრის მიერ გარეგანი წერტილის მიზიდვა	35
§ 2. მატერიალური სფერული შრის მიერ შინაგანი წერტილის მიზიდვა	37
§ 3. მიზიდულობა მატერიალური სფეროს მიერ . . . . .	39
§ 4. პოტენციალური ფუნქციის მეორე დიფერენციალური პარამეტრი	43

### თავი III

სიმძიმის ძალის აბსოლუტური განსაზღვრა

§ 1. მათემატიკური საქანის თეორია	46
§ 2. თიხიური საქანის თეორია . . . . .	51
§ 3. მინიმალური საქანი . . . . .	56
§ 4. სიმძიმის ძალის აბსოლუტური განსაზღვრა შესაბრუნებელი საქანის შემწობით . . . . .	58
§ 5. სიმძიმის ძალის განსაზღვრის შესაძლებელი სიზუსტე შესაბრუნებელი საქანიანი ხელსაწყოთა შემწობით . . . . .	63
§ 6. საქანის რხევის პერიოდის განსაზღვრა თანხედრის მეთოდით . . . . .	64
§ 7. ძირითადი საყრდენი გრაუიმეტრიული პუნქტები სსრ კავშირში	68

### თავი IV

სიმძიმის ძალის შეფარდებითი განსაზღვრა საქანიანი ხელსაწყოთა შემწობით . . . . . 71

§ 1. საქანიანი ხელსაწყოთა შემწობით სიმძიმის ძალის შეფარდებითი განსაზღვრის მეთოდის საფუძვლები . . . . .	71
§ 2. ოთხსაქანიანი ხელსაწყოები . . . . .	73
§ 3. მთვლელები . . . . .	77

თ ა ზ ი V

შესწორებები საქანთან ხელსაწყოთი წარმოებულ დაკვირვებათათვის და მათი თეორია 83

§ 1. შესწორება ამპლიტუდაზე . . . . .	83
§ 2. შესწორება ტემპერატურაზე . . . . .	84
§ 3. შესწორება ჰაერზე . . . . .	87
§ 4. შესწორება საათის სვლაზე . . . . .	93
§ 5. შესწორება შტატივის რხევაზე . . . . .	95

თ ა ზ ი VI

სიმძიმის ძალის განსაზღვრა ზღვაზე . . . . . 100

თ ა ზ ი VII

დრეკადი საქანი . . . . . 108

თ ა ზ ი VIII

გრაფიტაციული ვარიომეტრი . . . . . 112

§ 1. გრაფიტაციული ვარიომეტრის მოქმედების პრინციპი . . . . .	112
§ 2. გრაფიტაციული ვარიომეტრის თეორია . . . . .	113
§ 3. ღუორე გვარის ვარიომეტრის თეორია . . . . .	119
§ 4. გრაფიტაციული ვარიომეტრის მოწყობილობა . . . . .	123
§ 5. გრაფიტაციული ვარიომეტრის ზოგიერთი ტიპი . . . . .	130
§ 6. მეორე გვარის ვარიომეტრით წარმოებულ დაკვირვებათა დამუშავება . . . . .	132

თ ა ზ ი IX

სტატოკური გრავიმეტრები . . . . . 137

§ 1. გრაფიმეტრების ზოგადი დახასიათება . . . . .	137
§ 2. ლომონოსოვის გრაფიმეტრი . . . . .	138
§ 3. თანამედროვე გაზიანი გრაფიმეტრები . . . . .	139
§ 4. ნორგარდისა და „ვირაგ“-ის გრაფიმეტრები . . . . .	142
§ 5. ჰელანდისა და სხვა უცხოელი ავტორების გრაფიმეტრები . . . . .	144
§ 6. მოლოდენსკისა და ლონინსკისა გრაფიმეტრები . . . . .	148
§ 7. გრაფიმეტრიული ძიების ძირითადი პირობები და მეთოდთა . . . . .	151

თ ა ზ ი X

ქანების სიმკვრივე . . . . . 154

§ 1. დენსიტომეტრიის ამოცანები . . . . .	154
§ 2. ქანის ნიმუშის აღება და სიმკვრივის განსაზღვრის მეთოდების ზოგადი დახასიათება . . . . .	155
§ 3. ჰიდროსტატიკური აწონვის მეთოდი . . . . .	157
§ 4. სიმკვრივის გაზომვა ვალუმომეტრითა და სხვა მეთოდებით . . . . .	158
§ 5. სიმკვრივის განსაზღვრა გრაფიმეტრიული მეთოდით . . . . .	160
§ 6. გრაფიტომეტრიული მეთოდი . . . . .	162
§ 7. დენსიტომეტრიული მეთოდი . . . . .	163
§ 8. „ხვედრითი წონის თეორიული გამოთვლის“ მეთოდი . . . . .	164
§ 9. შრენარის საშუალო სიმკვრივის გამოთვლის წესი და სიმკვრივეთა განაწილება მიწის ქერქის ზედა ფენებში . . . . .	165

თ ა ზ ი XI

ოზოსტაზიხის თეორია . . . . . 173

§ 1. ოზოსტაზიხის მოვლენა . . . . .	173
§ 2. პრატის მოსახრება . . . . .	174

§ 3. ერის მოსაზრება . . . . .	. 174
§ 4. <u>ფენიხე</u> მეინესის და ჰეისკანენის მოსაზრებანი	. 175

თ ა ზ ი XII

ხიმამის ძალის რედუქციები . . . . . 177

§ 1. რედუქციების ზოგადი დახასიათება	. 177
§ 2. რედუქცია სიმალეზე . . . . .	. 177
§ 3. ტომოგრაფიული რედუქცია . . . . .	. 178
§ 4. შუალედი შრის რედუქცია ბუგეს მიხედვით	. 180
§ 5. იზოსტაზისური რედუქცია . . . . .	. 181
§ 6. გრაფიტაციული ვარიომეტრიით წარმოებულ დაკვირვებათა შესწორების შესახებ	. 182

თ ა ზ ი XIII

ხიმამის ძალის განაწილება დედამიწის ზედაპირზე და მის შიგნით . . . . . 184

§ 1. სიმძიმის ძალის ნორმული სიდიდე	. 184
§ 2. სიმძიმის ძალის ანომალიები	. 185
§ 3. სიმძიმის ძალის განაწილება დედამიწის ზედაპირზე	. 186
§ 4. ჰელიოს ფორმა . . . . .	. 188
§ 5. სიმძიმის ძალა დედამიწის შიგნით . . . . .	. 189
§ 6. დროის მიხედვით სიმძიმის ძალის ვარიაციის პრობლემა	. 190

თ ა ზ ი XIV

გრაფომეტრიის პირდაპირი და შებრუნებული ამოცანები . . . . . 191

§ 1. გრაფომეტრიული მონაცემების ინტერპრეტაციის შესახებ	. 192
§ 2. სფეროს გრაფიტაციული ეფექტი . . . . .	. 194

თ ა ზ ი XV

გრაფომეტრიულ დაკვირვებათა გეოლოგიური ინტერპრეტაცია . . . . . 199

§ 1. ზოგერთი მოსაზრება გეოლოგიური ინტერპრეტაციის შესახებ	. 199
§ 2. გეოლოგია და გრაფომეტრია . . . . .	. 204
§ 3. მსოფლიო გრაფომეტრიული რუკის გეოლოგიური ინტერპრეტაციის ცდა . . . . .	. 205
§ 4. საბჭოთა კავშირის გრაფომეტრიული რუკა და მისი გეოლოგიური ინტერპრეტაცია ცალკეული ანომალიების მიხედვით . . . . .	. 212
დონეცის აუზის ანომალიები. ლენინგრადის ოლქის ანომალიები. მოსკოვის ანომალია. „ქიურდაპირის ხედი“ . . . . .	. 212
§ 5. ინსტრუქცია გრაფომეტრიულ დაკვირვებათა დაგეგმარების, წარმოებისა და გეოლოგიური ინტერპრეტაციისათვის . . . . .	. 225

თ ა ზ ი XVI

გრაფომეტრიულ დაკვირვებათა მოკლე მიმოხილვა საქართველოში 1829 წლიდან დღემდე . . . . .	. 234
ლიტერატურა . . . . .	. 240
ხაზები . . . . .	. 243

# ს ა ძ ი ე ბ ლ ე ბ ი

## საბანთა საქმიანობა

- ამპლიტუდა 46, 51, 54, 83, 84, 92, 96, 98, 101, 105, 111, 113
- ამპლიტუდა რხევის 61, 75, 83, 84, 90, 95, 97, 133
- ამპლიტუდა მაქსიმალური 96
- აპარატი საქანინი 46, 138, 186, 187, 219, 234, 235, 236
- აპარატი თანხედენის 67
- ანომალია ადგილობრივი 33
- ანომალია სიმძიმის ძალის 26, 185, 192, 203, 209, 212, 213, 214, 217, 218, 219, 220, 221, 223, 225, 230, 236, 238
- ანომალია ფაის 185, 213, 214, 217
- ანომალია ბუგვს 185, 213, 214, 217, 218, 230
- ანომალია იზოსტახისური 185, 212, 213, 214, 217, 230
- ბუნეი გრეხითი 126, 127, 130
- ბერკეტი ოპტიკური 127, 133
- გალი 6, 69, 106, 107, 109, 129, 178, 180, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000
- ანომალია მიკროლოკალური 185, 201, 203, 213, 225, 230
- ანომალია ლოკალური 185, 201, 203, 213, 225, 230, 231
- ანომალია რეგიონული 185, 201, 203, 205, 212, 213, 218, 225, 230
- ანომალია მაკრორეგიონული 185, 201, 203, 205, 212, 213, 230
- ანომალია ბაქნური 201, 214, 217, 218, 230
- ანომალია გეოსინკლინური 201, 214, 218, 230
- ანომალია გრავეტაციული 212, 224
- ამოცანა გრავემეტრიის პირდაპირი 192
- ამოცანა გრავემეტრიის შებრუნებული 192, 193, 197, 198, 225
- ბარომეტრი დიფერენციალური 137, 151
- გრავიმეტრი ბიფილარული ტომაშეკ-შაფერნიხ-განსახვრა აბსოლუტური სიმძიმის ძალის 46, ტის 148
- გრავიმეტრი მოლოდენსკის 148, 149
- გრავიმეტრი ლოხინსკაიას 148, 149, 150
- გრავიმეტრი კვარციანი ვესელოვი-ლუკაჩენკოს 149
- გრავიმეტრი კვარციანი ასტახირებული 149
- გრავიმეტრი წრითული ასტახირებული 150
- გრავიმეტრი სიმალისშობი 150
- გრავიტომეტრი 157, 162, 163
- გეოიდი 11, 20, 23, 24, 25, 34, 45, 177, 184, 185, 188, 189, 208, 211, 212
- გეოიდი იდეალური 19, 22
- განედი გეოცენტრული 19, 22
- გრადიენტი სიმძიმის ძალის ჰორიზონტალური 30
- გრადიენტი სიმძიმის ძალის ვერტიკალური 31
- გრადიენტი სრული ჰორიზონტალური 31
- გრადიენტი სიმძიმის ძალის 178, 192
- ვანტოლემა ლაპლასის 44, 45



გრავემეტრი ბოლიდენის 147  
გრავემეტრი ისინგის 147, 223

დაბრტყელება დედამიწის 19, 20, 63  
დაყვანა ხელის დონეზე 89, 177  
დენსიტომეტრია 155

ეტვეში 122, 129, 161, 182, 186  
ეჟექტი ეტვეშის 106  
ეჟექტი გრავეიტაციული 192, 194, 195, 202, 203

ჟლი გრავეიტაციული, 5, 118, 155, 191, 193, 228

ჟლი გრავეიტაციული ერთგვაროვანი 113  
ჟლი გრავეიტაციული არაერთგვაროვანი 113  
ვარიომეტრი გრავეიტაციული 112, 113, 114, 115, 118, 120, 121, 122, 123, 125, 130, 131, 138, 152, 156, 160, 161, 182, 186, 228, 229, 237

ხედაპირი იზოსტაზისის 174

თერმოსტატი 138, 144, 147, 149, 150  
თერმოსტატი ვლექტრული 145, 149, 150  
თეორია იზოსტაზისის 173, 176

ინერცია ტემპერატურული 86

კოეფიციენტი ტემპერატურული 85, 87  
კოეფიციენტი ტემპერატურული სტატიკური 86  
კოეფიციენტი ტემპერატურული კვადრატული 86

მოძრაობა რხევითი 51, 95, 96  
მომენტი სტატიკური 53  
მილიგალი 59, 63, 73, 140, 141, 143, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 178, 181, 182, 185, 186, 187, 188, 190, 208, 210, 214, 217, 220, 221, 223, 238, 239  
მეთოდი თანხედენის 64, 66, 77  
მეთოდი სტატიკური 137  
მეთოდი დინამიკური 137  
მეთოდი ჰიდროსტატიკური აწონვის 156, 157,  
მეთოდი გრავემეტრიული 156, 160, 162, 165  
მეთოდი ვოლუმომეტრიული 156  
მეთოდი გრავეიტომეტრიული 156, 162

პერიოდი იდეალური 59  
პოტენციალი სიმძიმის ძალის 8, 9, 12, 19, 26, 30, 33, 34, 45, 194

განტოლება პუასონის 45  
გრავეიტაციომეტრი ლეონტოუსკის 183

დენსიტომეტრი 157, 163, 164  
დონე სტრატეგრაფიული 156

ერთეული სტრატეგრაფიული 165, 166, 171  
ელონგაცია 46, 100, 103

ვარიომეტრი გრავეიტაციული I გვარის 112, 113, 114, 119, 136

ვარიომეტრი გრავეიტაციული II გვარის 112, 113, 119, 120, 121, 125, 130, 132

ვარიომეტრი ეტვეშის 191  
ვარიაცია სიმძიმის ძალის 147, 148, 190, 191

ვოლუმომეტრი 158  
ვოლუმომეტრი წყლიანი 158  
ვოლუმომეტრი ვერცხლისწყლიანი 158, 159

ხედაპირი დონებრივი 11, 12, 20, 27, 45, 113, 114

თეორემა კლეროსი 23, 25  
თერმომეტრი მაღაზნისებური 87

ინტერპრეტაცია სიმძიმის ძალის ანომალიების 192

კოეფიციენტი ტემპერატურული დინამიკური 86, 87

კოეფიციენტი მილევის (დაცხრომის) 92, 133  
კანონი არქიმედის 87

კომპენსატორი ტემპერატურული 141, 143

მეთოდი დენსიტომეტრიული 156, 163

მეთოდი შტუფური 157, 164

მეთოდი საერთო სინჯის 160, 164

მეთოდი „ხედაპირითი წონის თეორიული გა-  
მოთვლის“ 164

მდგომარეობა განგრეხილი 113

მოდული გრეხის 118, 121

მუდმივი მიზიდულობის 5

მუდმივი გრავეიტაციული 178

მთვლეელი 77, 78, 79

მთვლეელი ოპტიკური 77, 78

მოვლენა ასტაზირების 149

პოტენციალი მიზიდულობის 35, 43, 44, 45  
პიკნომეტრი 158, 159

- რხევა შტატის 59, 73, 74, 95, 96, 97, 98, 102
- რედუქცია 177
- რედუქცია თავისუფალი ჰაერის 105
- რედუქცია სიმძიმის ძალის 26, 173, 177, 201, 204, 213, 232
- რედუქცია ფასი ანუ ჰელმერტის 177, 178, 181, 182, 208, 212, 213, 214, 217, 221, 223, 224, 230
- საქანი ფიზიკური 51, 54, 58, 87
- საქანი მათემატიკური 46, 51, 52, 54, 83
- საქანი შესაბრუნებელი 56, 58, 59, 61, 63, 68, 70
- საქანი მინიმალური 56, 57, 58, 61, 77
- საქანი დაყვანილი 56
- საქანი კუბურის 58, 59
- საქანი იდეალური 59
- საქანი შტერნეის 89
- საქანი თარახო 74, 76
- საქანი ფიქტიური 99, 101, 102, 103, 104
- საქანი ფაქტიური 101
- უღელი გრეზითი სისტემის 113
- ფორმა გეოიდის 63
- ფუნქცია პოტენციალური 9, 10, 11, 15, 22, 37, 41, 42, 43, 115, 116, 118, 122, 194
- ღერძი რხევათა 57, 95
- შესწორება ამპლიტუდაზე 64, 83
- შესწორება ტემპერატურაზე 64, 84
- შესწორება საათის სელაზე 64, 93
- შესწორება ჰაერის სიმკვრივეზე 64
- შესწორება შტატის რხევაზე 64, 95, 102
- შესწორება პრიზმის წიბოს ფორმაზე 64
- ცენტრი რხევათა 54, 56
- ძალა გრავიტაციული 113, 126
- ძალა გრეზითი 114
- წონასწორობა ჰიდროსტატიკური 175
- ჭრილი სტრატეგია 152
- ხელსაწყო საქანანი 71, 72, 73, 76, 81, 83, 88, 98, 101, 182, 223, 234, 235, 236, 237
- ხელსაწყო ოთხსაქანანი 73, 74, 75, 77, 98, 107
- ხელსაწყო შტერნეის 73, 75
- ხელსაწყო შტიუკარტის 73, 77, 98
- ჩოდუქცია ტოპოგრაფიული 177, 178, 180
- ჩოდუქცია ბუგეს 177, 180, 181, 182, 212, 213, 214, 217, 219, 223, 224,
- ჩოდუქცია იზოსტაზისური 177, 181, 182, 204, 212, 214, 217, 223
- ჩოდუქცია სიმაღლეზე 177, 187, 201, 213
- ჩოდუქცია სიტალიერუმი ან „თავისუფალ ჰაერში“ 178, 181
- ჩოდუქცია პრეის 187
- საქანი დრეკადი 108, 109, 111
- სისტემა გრეზითი 113, 114, 118
- სისტემა საყიდი 114, 115, 117, 118, 119, 120, 122
- სისტემა ასტაზირებული 109
- სიმკვრივე ზედაპირული 35, 40
- სიმკვრივე ქანების 152, 153, 154, 155
- სასწორი გრეზითი 112, 113
- სიგრძე დაყვანილი 52, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 61, 64, 84, 96, 100
- სიგრძე დაყვანილი საქანის 84, 85, 72
- ფორმულა ბორასის 98
- ღერძი საქანის 58
- შესწორება დედამიწის მაგნიტური ველის გაღუნებაზე 64
- შესწორება ჰაერზე 87
- შესწორება აეროსტატიკური 87
- შესწორება მასის სიმკვრივეზე 201, 213
- ძალა დრეკადი 114
- ხელსაწყო ვენინგ-შეინესის 101, 102, 103
- ხიდი ოპტიკური 75
- „ხიდი ქიურადამირის“ ანუ „ქედი გრავიტაციული“ 217, 224, 225
- ხერხი პიენამეტრიული 156, 148, 164
- ბოლოთება პრატის 173, 174, 175, 176, 181, 182
- ბოლოთება ვენინგ-შეინესის 175

ნახაზთა სარეგისტრაციო

ნახ. 1, გვ. 5.	ნახ. 25, გვ. 104.	ნახ. 49, გვ. 139.	ნახ. 71, გვ. 169.
ნახ. 2, გვ. 9.	ნახ. 26, გვ. 104.	ნახ. 50, გვ. 140.	ნახ. 72, გვ. 174.
ნახ. 3, გვ. 27.	ნახ. 27, გვ. 105.	ნახ. 50 a, გვ. 141.	ნახ. 73, გვ. 175.
ნახ. 4, გვ. 31.	ნახ. 28, გვ. 108.	ნახ. 51, გვ. 142.	ნახ. 74, გვ. 178.
ნახ. 5, გვ. 35.	ნახ. 29, გვ. 110.	ნახ. 52, გვ. 143.	ნახ. 75, გვ. 179.
ნახ. 6, გვ. 38.	ნახ. 30, გვ. 110.	ნახ. 53, გვ. 144.	ნახ. 76, გვ. 181.
ნახ. 7, გვ. 41.	ნახ. 31, გვ. 112.	ნახ. 54, გვ. 144.	ნახ. 77, გვ. 186.
ნახ. 8, გვ. 46.	ნახ. 32, გვ. 112.	ნახ. 55, გვ. 144.	ნახ. 78, გვ. 186—187.
ნახ. 9, გვ. 53.	ნახ. 33, გვ. 121.	ნახ. 56, გვ. 146.	ნახ. 79, გვ. 188—189.
ნახ. 10, გვ. 54.	ნახ. 34, გვ. 122.	ნახ. 57, გვ. 146.	ნახ. 80, გვ. 188—189.
ნახ. 11, გვ. 56.	ნახ. 35, გვ. 124.	ნახ. 58, გვ. 146.	ნახ. 81, გვ. 190.
ნახ. 12, გვ. 59.	ნახ. 36, გვ. 125.	ნახ. 59, გვ. 147.	ნახ. 82, გვ. 190.
ნახ. 13, გვ. 62.	ნახ. 37, გვ. 126.	ნახ. 60, გვ. 147.	ნახ. 83, გვ. 193.
ნახ. 14, გვ. 68.	ნახ. 38, გვ. 127.	ნახ. 61, გვ. 148.	ნახ. 84, გვ. 196.
ნახ. 15, გვ. 74.	ნახ. 39, გვ. 128.	ნახ. 62, გვ. 149.	ნახ. 85, გვ. 197.
ნახ. 16, გვ. 74.	ნახ. 40, გვ. 128.	ნახ. 63, გვ. 150—151.	ნახ. 86 <sup>1</sup> , გვ. 206.
ნახ. 17, გვ. 75.	ნახ. 41, გვ. 129.	ნახ. 64, გვ. 158.	ნახ. 87, გვ. 215.
ნახ. 18, გვ. 76.	ნახ. 42, გვ. 130.	ნახ. 65, გვ. 159.	ნახ. 88, გვ. 216.
ნახ. 19, გვ. 78.	ნახ. 43, გვ. 130.	ნახ. 66, გვ. 160.	ნახ. 89, გვ. 219.
ნახ. 20, გვ. 78.	ნახ. 44, გვ. 131.	ნახ. 67, გვ. 162.	ნახ. 90, გვ. 222.
ნახ. 21, გვ. 79.	ნახ. 45, გვ. 131.	ნახ. 68, გვ. 163.	ნახ. 91, გვ. 222—223.
ნახ. 22, გვ. 79.	ნახ. 46, გვ. 132.	ნახ. 69, გვ. 167.	ნახ. 92, გვ. 224—225.
ნახ. 23, გვ. 96.	ნახ. 47, გვ. 132.	ნახ. 70, გვ. 168.	ნახ. 93, გვ. 235.
ნახ. 24, გვ. 103.	ნახ. 48, გვ. 138.		

<sup>1</sup> ახსნა: 1. სტაბილიზაციის პირვანდელი ცენტრები; 2. კალედონიური ბაზენები; 3. ბაქნების ზრდა ჰერცინულ ციკლში; 4. ბაქნების ზრდა ალპურ ციკლში; 5. ალპური გეოსინკლინები.



რედაქტორები {  
  • კახაძე,  
  გ. შირიანაშვილი,  
  ვ. ჯიქია.

კორექტორი { გ. შალანია.

---

გადაეცა წარმოებას 3/VI. 54 წ. ხელმოწერილია დასაბუქდად 24/1954 წ. ტირაჟი 1000  
უფ 17236. ქალაქის ზომა 70 x 108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. ფორმათა რაოდენობა: სასტამბო 22,55  
სააღრიცხვო-საგამომცემლო 17,58. სტამბის შედეგთა 589.

---

წიგნი აიწყო და დაიბეჭდა სტალინის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის  
გამომცემლობის სტამბაში. უნივერსიტეტის ქ. № 1.

**МИХАИЛ ЗОСИМОВИЧ НОДИА и  
МИХАИЛ СЕМЕНОВИЧ АБАКЕЛИА**

**Геофизика**

**часть I**

**Гравиметрия и гравиметрическая разведка**

**(на грузинском языке)**

**Изд-ство Тбилисского государственн. университета им. И. В. Сталина**

**Тбилиси—1954**