

ოკეანის ინჟინერია

შავი ზღვის ფოთის სანაპირო ზოლის ეროზიისაგან დაცვა წყალქვეშა ბარიერების გამოყენებით

ივანე საღინაძე

ivane.saghinadze@atsu.edu.ge

მანანა ფხაკაძე

manana.pkhakadze@atsu.edu.ge

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
ქუთაისი, საქართველო

ნაშრომში განხილულია შავი ზღვის ქალაქ ფოთის სანაპირო ზოლში არსებული ეროზიული ხასიათის ნაპირდაცვითი პრობლემები. სანაპირო ზოლის არსებული გეომეტრიული და ფიზიკური პარამეტრების გათვალისწინებით შემუშავებულია ნატანის ტრანსპორტირების მათემატიკური მოდელი. მიღებული განტოლებების რიცხვითი ამოხსნების შედეგად გამოთვლილია ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარეები. განსაზღვრულია სანაპირო ზოლში ნატანის მოძრაობის ტენდენციები, მისი დეფიციტის რაოდენობრივი მაჩვენებელი და მრავალწლიურ ჭრილში ეროზიის საშუალო სიჩქარე. ნაპირზე ტალღური დატვირთვებისა და ეროზიული პროცესების შემცირების მიზნით გამოყენებულია ზღვის სიღრმეში წყალქვეშა ტალღმტეხი ბარიერების მოწყობის მეთოდი. წყალქვეშა ბარიერებად გამოყენებულია ქვიშით ავსებული გეოტექსტილის მილები, გეოტუბები. აკუმულაციური ნაპირის შემთხვევაში გაანგარიშებულია წყალქვეშა გეოტუბების ზღვის ფსკერზე განთავსების გეომეტრიული და ფიზიკური პარამეტრები. ნატურული დაკვირვებებისა და შემუშავებული რიცხვითი მოდელების ანალიზის საფუძველზე, შემუშავებულია მდინარე რიონის „საქალაქო არხის“ სამხრეთით მდებარე სანაპირო ზოლის დასაბუთებული ნაპირდაცვითი ესკიზური პროექტი.

საკვანძო სიტყვები: ნაპირი, ეროზია, ტალღა, გეოტუბი.

შესავალი. ქალაქ ფოთსა და მის საზღვაო რეგიონში რამდენიმე ათეული წელია არსებობს გარემოსდაცვითი და გეომორფოლოგიური ხასიათის დღემდე გადაუჭრელი პრობლემები (სურ. 1), რაც განაპირობა ამ რეგიონში, სხვადასხვა წლებში და სხვადასხვა მიზნით წარუმატებლად დაპროექტებულმა და განხორციელებულმა ჰიდროსაინჟინრო მშენებლობებმა (გაგომიძე ... 2017).

გეომორფოლოგიური ხასიათის ეს პრობლემები ქალაქ ფოთის სანაპირო ზოლში დაიწყო მას შემდეგ, რაც 1939 წელს მდ. რიონი მთლიანად

ი. სალინაძე, მ. ფხაკაძე

იქნა გადაგდებული ქალაქის ჩრდილოეთით. ამ ღონისძიებამ მართალია ქალაქი იხსნა ხშირი დატბორვებისგან, მაგრამ პორტის სამხრეთით ზღვის ნაპირზე შექმნა პლაჟწარმომქმნელი ნატანის აუნაზღაურებელი დეფიციტი. ზღვამ კატასტროფულად წარეცხა ფოთის სანაპირო ზოლი და ასეულობით მეტრით დაახევინა უკან.



სურ. 1. ქალაქ ფოთის სანაპირო ზოლის სქემა.

1959 წელს მდ. რიონზე, ფოთის ჩრდილო-აღმოსავლეთით მეშვიდე კილომეტრზე, აიგო წყალგამყოფი ჰიდროკვანძი კაშხალ-ხიდით და რაბ-რეგულატორით (სურ. 1). მისი დანიშნულება იყო 600 მ³/წმ-მდე მდინარის ხარჯების დაბრუნება ქალაქის „საქალაქო არხში“ და ამ გზით ზღვის ნაპირზე ნატანის არსებული დეფიციტის შევსება. მაგრამ არხის კალაპოტის ნატანით 35-40%-ით დაღეჭვის გამო მისი გამტარუნარიანობა შემცირდა 250-300 მ³/წმ-მდე. ამის გამო „საქალაქო არხის“ შესართავში წარმოიშვა ნატანის დეფიციტი, რამაც გამოიწვია ნაპირის წარეცხვები. ნატურული დაკვირვებები გვიჩვენებს, რომ ეროზიის საშუალო წლიური სიჩქარე თანდათანობით იზრდება.

ამჟამად ინტენსიურად ირეცხება მდინარე რიონის „საქალაქო არხის“ შესართავის სამხრეთით მდებარე სანაპირო (სურ. 1). ამ ტერიტორიაზე გადის ევროპა-აზიის ოპტიკურ ბოჭკოვანი წყალქვეშა ინტერნეტ კაბელი. 2014-2022 წლების ძლიერმა შტორმებმა და შესართავში მდინარის მიერ წარმოქმნილმა სანაპირო დინებებმა გამოიწვია ამ ზონაში ნაპირის ინტენსიური წარეცხვები და ნაპირმა 70-80 მეტრით დაიხია უკან (სურ. 2).

ამასთანავე აღსანიშნავია, რომ სამხრეთ-დასავლეთი შტორმების დროს წარმოქმნილ დინებებს ჩამოშლილი ნატანი შეაქვს შესართავში, რომელიც შემდეგ მდინარეს გააქვს ღია ზღვაში და ამ უბნისათვის იკარგება.



სურ. 2. წარეცხილი ნაპირი „საქალაქო არხის“ შესართავის სამხრეთით.

უმოქმედობის შემთხვევაში, ამ ინტენსიობით ნაპირის წარეცხვების გაგრძელება კიდევ უფრო გაზრდის ეროზიის საშუალო წლიურ სიჩქარეს და საფრთხეს შეუქმნის არა მარტო ინტერნეტ კაბელის ფუნქციონირებას, არამედ “საქალაქო არხის” შესართავის სამხრეთით მდებარე მთელ სანაპირო ზოლს.

მიუხედავად იმისა, რომ ზემოთ აღნიშნული პრობლემა მრავალი წელია არსებობს, პრობლემა გადაუწყვეტელია და მისი მოგვარება აქტუალურ საკითხს წარმოადგენს.

ნაშრომის მიზანია მდინარე რიონის “საქალაქო არხის” შესართავის სამხრეთით მდებარე სანაპირო ზოლის ეროზიისაგან დაცვის ისეთი მეცნიერულად დასაბუთებული ღონისძიებების შემუშავება, რომელიც გამართლებული იქნება, როგორც ეკონომიკურად, ასევე ეკოლოგიურად.

ძირითადი ნაწილი. ნატანის ტრანსპორტის მათემატიკური მოდელი. ნაპირის ცვლილება გამოწვეულია სანაპირო ზოლში ტალღების მოძრაობითა და სანაპირო დინებებით. ქალაქ ფოთის სანაპირო ზოლში ნატანის ტრანსპორტირებისა და ზღვის ფსკერის ტოპოგრაფიის ცვლილებების შესასწავლად ვისარგებლოთ ნატანის მასის მუდმივობის კანონით, საიდანაც მიიღება წყლის სიღრმის ცვლილების განტოლება (Saghinadze ... 2019):

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y}, \quad (1)$$

ი. სალინაძე, მ. ფხაკაძე

სადაც X და Y ჰორიზონტალური კოორდინატებია, q_x და q_y კი - ელემენტის საზღვრებში ნატანის მოძრაობის სიჩქარე X და Y მიმართულებებით. მოძრაობის მოცულობითი სიჩქარეები (q_x, q_y) გამოსახება ელემენტის ვერტიკალური განივი კვეთის მიერ დროს ერთეულში გატარებული ეფექტური ნატანის მოცულობით. ნატანის მოძრაობის სიჩქარის განსასაზღვრავად მიღებულია ფორმულა:

$$(q_x, q_y) = (q_{cx}, q_{cy}) + (q_{wx}, q_{wy}), \quad (2)$$

სადაც (q_{cx}, q_{cy}) გასაშუალებული დინებებით გამოწვეული ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარეა, (q_{wx}, q_{wy}) კი ტალღებით გამოწვეული ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარე. დინებებით გამოწვეული ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით (Saghinadze ... 2019):

$$q_{cx} = Q_c U, \quad q_{cy} = Q_c V, \quad (3)$$

$$Q_c = A_c (\tau_m - \tau_{cr}) / \rho g,$$

სადაც U და V გასაშუალებული დინებების სიჩქარეებია x და y მიმართულებით, $A_c = 0, 1-1$ რიგის უგანზომილებო კოეფიციენტი, τ_m ტალღებისა და დინებების ერთობლივი მოქმედებით გამოწვეული ფსკერული ძვრის ძაბვის მაქსიმალური მნიშვნელობაა $\tau_m = \frac{1}{2} \rho f_{cw} \hat{u}_b^2$, \hat{u}_b ფსკერული ორბიტული სიჩქარის ამპლიტუდაა, f_{cw} ფსკერის ხახუნის კოეფიციენტი, τ_{cr} ნატანის ასამოძრავებლად საჭირო ფსკერის კრიტიკული ძვრის ძაბვაა (თუკი $\tau \leq \tau_{cr}$, მაშინ $Q_c = 0$).

ტალღების მიერ ნატანის მოძრაობა გამოწვეულია ფსკერული ტალღური სიჩქარის ასიმეტრიულობით და უფრო რთულია, რადგანაც ის ითხოვს ისეთი ფაქტორების გათვალისწინებას, როგორცაა ტალღათა რეფრაქცია, დიფრაქცია, დამსხვრევა, არეკვლა და ფსკერის დახრილობა. ტალღებით გამოწვეული ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით (Saghinadze ... 2019):

$$q_{wx} = F_d Q_w \hat{u}_b \cos \alpha, \quad q_{wy} = F_d Q_w \hat{u}_b \sin \alpha, \quad (4)$$

$$Q_w = A_w (\tau_m - \tau_{cr}) / \rho g,$$

სადაც A_w არის უგანზომილებო კოეფიციენტი, \hat{u}_b ფსკერული ორბიტული სიჩქარის ამპლიტუდაა, α - კუთხე ტალღების გავრცელების მიმართულებასა და x ღერძს შორის. A_w კოეფიციენტიტოლია:

$$A_w = B_w \frac{w_0}{(1 - \lambda_v) s \sqrt{sgd}} \sqrt{\frac{f_w}{2}}, \quad s = (\rho_s - \rho) / \rho,$$

τ_m ტალღებითა და დინებებით გამოწვეული ძვრის მაქსიმალური ძაბვაა, λ_v ფსკერის ფორიანობაა, f_w კი - ხახუნის ტალღური კოეფიციენტი. f_w -ს მნიშვნელობა დამოკიდებულია ორბიტული სიჩქარის ამპლიტუდასა და პერიოდზე, აგრეთვე ფსკერის მახასიათებლებზე. მაგალითად, თუ

ფსკერი შედგება ქვიშისაგან $d=0,2$ მმ, $w_0=2,4$ სმ/წმ, $\lambda_v=0,4$, $s=1,65$ და $B_w=7$ და $f_w=0,01\sim 0,2$, მაშინ A_w -ს მნიშვნელობა იცვლება დიაპაზონში $A_w=0,1\sim 1$. გამოთვლების დროს A_w მუდმივია. (4) ფორმულებში:

$$F_d = \tanh\left(k_d \frac{\Pi_c - \Pi}{\Pi_c}\right), \quad \Pi = \psi' \frac{h}{L_0} = \frac{\hat{u}_b^2}{sgd} \frac{h}{L_0}, \quad (5)$$

სადაც Π_c ნულოვან წერტილში Π -ს კრიტიკულ მნიშვნელობას წარმოადგენს (სადაც ნატანის განივი მოძრაობა ნულის ტოლია). Π_c ერთეული რიგის სიდიდეა და ზუსტდება გამოთვლების პროცესში.

(4) ტოლობები დამოკიდებულია ფსკერულ ხახუნზე (ძვრის კრიტიკულ ძაბვებზე), რომლის მნიშვნელობა უნდა განისაზღვროს ტალღებისა და დინებების გავლენით ნატანის მოძრაობის კრიტიკული პირობა განისაზღვრება შილდის პარამეტრის კრიტიკული მნიშვნელობით, რომელიც ტოლია

$$\psi_c = \tau_{cr} / (\rho_s - \rho)gd.$$

მცირე ზომის ქვიშისთვის ($d=0,1\sim 0,4$) შილდის კრიტიკული პარამეტრის მნიშვნელობა უდრის 0,11, მსხვილი ქვიშისთვის კი 0,06 -ს.

ფორმულებში, რომლებითაც განისაზღვრება (q_x, q_y) , არ არის გათვალისწინებული ფსკერის დახრის ფაქტორი. მისი გათვალისწინებით მიიღება:

$$q'_x = q_x + \varepsilon_s |q_x| \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q'_y = q_y + \varepsilon_s |q_y| \frac{\partial h}{\partial y} \quad (6)$$

და (1)-ის ნაცვლად მივიღებთ

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q'_x}{\partial x} + \frac{\partial q'_y}{\partial y}. \quad (7)$$

ამოხსნის ალგორითმი. შემოვიტანოთ (6) განტოლებაში აღნიშვნები:

$$A = q_x, \quad B = \varepsilon |q_x|, \quad C = q_y, \quad D = \varepsilon |q_y|$$

და (7) გადავწეროთ შემდეგი სახით:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A + B \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(C + D \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (8)$$

ჩამოვყალიბოთ განზოგადებული ამოცანა. (8) განტოლების განზოგადოებული ამოხსნა ვუწოდოთ ფუნქციას $h \in \tilde{W}_2^{(1)}$ ($\tilde{W}_2^{(1)}$ სობოლევის ფუნქცია), რომელიც აკმაყოფილებს განტოლებას (Saghinadze ... 2019):

$$\iint_S \frac{\partial h}{\partial t} \omega_{i,j} dS = \iint_S \frac{\partial}{\partial x} \left(A + B \frac{\partial h}{\partial x} \right) \omega_{i,j} dS + \iint_S \frac{\partial}{\partial y} \left(C + D \frac{\partial h}{\partial y} \right) \omega_{i,j} dS. \quad (9)$$

ნებისმიერი $\omega_{i,j} \in W_2^{(1)}$, აქ $W_2^{(1)}$ - თავის პირველი რიგის წარმოებულთან ერთად კვადრატულად შეჯამებადი ფუნქციების სივრცეა, რომელიც Γ საზღვარზე ნულის ტოლია და ლებულობს ნებისმიერ ფიქსირებულ მნიშვნელობას S არის შიგნით.

გამოვიყენოთ(9)-ში გრინის ფორმულა, მივიღებთ:

$$\iint_S \frac{\partial h}{\partial t} \omega_{i,j} dS = - \iint_S \left(A + B \frac{\partial h}{\partial x} \right) \frac{\partial \omega_{i,j}}{\partial x} dS - \iint_S \left(C + D \frac{\partial h}{\partial y} \right) \frac{\partial \omega_{i,j}}{\partial y} dS. \quad (10)$$

გადავიდეთ აპროქსიმაციის სქემის შედგენაზე. შემდგომში S არეში ვაგებთ ბადურ მართკუთხოვან არეს ბიჯით $\Delta x = a$, $\Delta y = b$ და პროექციულ-სხვაობიანი სქემის ასაგებად არეზე ბადის თითოეულ კვანძს ვუთავსებთ კურანტის ფუნქციას, რომელიც მოცემულ კვანძში ერთის ტოლია, ხოლო ბადის დანარჩენ კვანძებში - ნულისა.

$$\omega_{m,n}(x_i, y_j) = \begin{cases} 1, & (i, j) = (m, n) \\ 0, & (i, j) \neq (m, n) \end{cases}.$$

ფუნქციებს $\omega_{m,n}(x_i, y_j)$ მატარებლად აქვს ექვსკუთხედი. გარდაქმნების შემდეგ ყოველი $(i, j) \in S^n$ -სთვის (10) ტოლობა მიიღებს სახეს:

$$\theta \frac{dh_{i,j}}{dt} + E_1 h_{i,j} - E_2 h_{i+1,j} - E_3 h_{i,j+1} - E_4 h_{i-1,j} - E_5 h_{i,j-1} = F, \quad (11)$$

მე-(11) განტოლებაში შემავალი კოეფიციენტები განისაზღვრება იმავე არეზე ტალღური და სანაპირო დინებების განტოლებების ამოხსნის შედეგად.

მე-(11) განტოლების ამოხსნისას ვიყენებთ კრანკ-ნიკოლსონის სქემას, რომელიც უზრუნველყოფს დროში მეორე რიგის აპროქსიმაციას. საბოლოოდ მივიღებთ:

$$h_{i,j}^{m+1} \left[\frac{ab}{\Delta t} + \frac{E_1}{2} \right] - h_{i+1,j}^{m+1} \frac{E_2}{2} - h_{i,j+1}^{m+1} \frac{E_3}{2} - h_{i-1,j}^{m+1} \frac{E_4}{2} - h_{i,j-1}^{m+1} \frac{E_5}{2} = h_{i,j}^m \left[\frac{ab}{\Delta t} - \frac{E_1}{2} \right] + h_{i+1,j}^m \frac{E_2}{2} + h_{i,j+1}^m \frac{E_3}{2} + h_{i-1,j}^m \frac{E_4}{2} + h_{i,j-1}^m \frac{E_5}{2} + F. \quad (12)$$

მე-(12) განტოლებები შესაბამისი სასაზღვრო და საწყისი პირობების დროს ეფექტურად იხსნება ზედა რელაქსაციის მეთოდით.

გამოთვლითი ექსპერიმენტები. განტოლება (12) ამოხსნილია ზედა რელაქსაციის მეთოდით (გაგოშიძე ... 2017, Saghinadze ... 2019). გამოთვლა მოითხოვს გამოთვლითი არეალის ზომის, ქსელის ინტერვალის და დროის ნამატების განსაზღვრას, რაც დამოკიდებულია მოდელირების არეალზე. საწყის პირობად გამოიყენება გამოკვლევული ტერიტორიის ტოპოგრაფიული რუკები. მოდელის დაკალიბრების ან სხვადასხვა კოეფიციენტების კორექტირების მიზნით ძალზე მნიშვნელოვანია ბათიმეტრიული დაკვირვებები წარსულის სხვადასხვა ეტაპებზე. ოფშორული საზღვარი გადაღებულია სანაპიროდან ისეთ მანძილზე, სადაც წინასწარ ცნობილია, რომ ფსკერის ტოპოგრაფიის ცვლილებები უმნიშვნელო იქნება. ფოთის სანაპიროსთვის ასეთი საზღვარი 10-15 მ სიღრმეზეა (სალინაძე ... 2020, გაგოშიძე ... 2017).

ნატანის ტრანსპორტირების და ზღვის ფსკერის ტოპოგრაფიული ცვლილებების არსებული მოდელი მოიცავს შვიდ კოეფიციენტს A_c , A_w , τ_{cr} , k_c , Π_c , k_d , ε_s . კოეფიციენტები A_c და A_w ნალექის ტრანსპორტირების განტოლებები აღებულია შესაბამისად 0.1 და 1.

კოეფიციენტები A_c და A_w უნდა დაკალიბრდეს სანაპირო ცვლილებების გამოთვლილი შედეგების შედარებით გაზომვებთან იმ ადგილებში, სადაც ამოხსნა წინასწარ არის ცნობილი. კოეფიციენტის Π_c მნიშვნელობა არის 0,16, ხოლო $k_d = 2$ ისინი შემდგომში უნდა დაზუსტდეს გამოთვლების პროცესში.

განტოლების (12) ამოხსნისას განვიხილავთ სანაპირო ზონას, რომელიც მდებარეობს ფოთის პორტის სამხრეთით. x ღერძი აღებულია ნაპირის პერპენდიკულარული და y ღერძი პარალელურად. ბადის დანაყოფის ინტერვალები ტოლია $a = \Delta x = 5 მ$, $b = \Delta y = 50 მ$. x ღერძზე არის 141 წერტილი, ხოლო y ღერძზე - 13, სულ 1833 წერტილი.

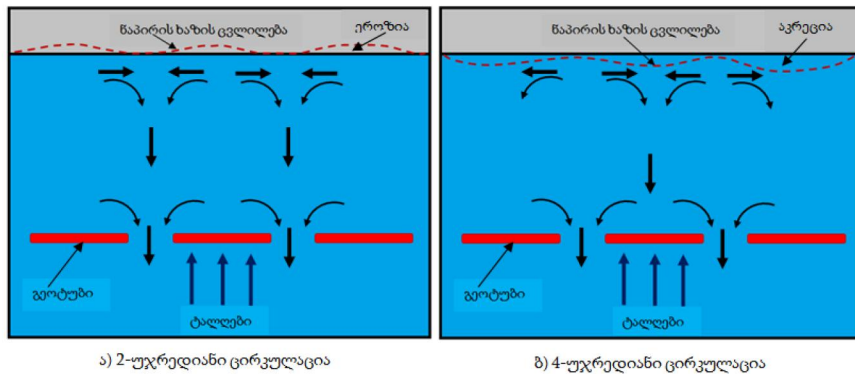
რიცხვითმა ამოხსნებმა გვიჩვენა, რომ ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარე q_x თითქმის ნულის ტოლია წყლის 10-15 მ სიღრმეზე, ის მნიშვნელოვანი ხდება მხოლოდ 8-10 მეტრის სიღრმეზე. მათი მაქსიმალური მნიშვნელობები მერყეობს 0,0015-0,0022 მ³/წმ. ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარე q_y -ის მაქსიმალური მნიშვნელობებია 0,00001-0,000013 მ³/წმ.

სანაპირო ზონაში ზღვის ფსკერის ტოპოგრაფიის ცვლილებების გამოთვლის შედეგად ვღებულობთ, რომ წყლის სიღრმეები იცვლება - 0,29მ-დან 0,26მ-მდე. უარყოფითი მნიშვნელობა შეესაბამება სანაპირო ეროზიას და დადებითი მნიშვნელობა შეესაბამება აკუმულაციას.

სანაპირო ეროზიის საშუალო წლიური მაჩვენებელი დაახლოებით არის 6-8 მ/წელი, ხოლო მდინარე რიონის „საქალაქო არხის“ სამხრეთით პლაჟმექმნელი მასალის დეფიციტი არის დაახლოებით 200000 - 250000 მ³/წელი.

ნაპირის რეაქციის ტიპის განსაზღვრა რამდენიმე წყალქვეშა გოტუბის შემთხვევაში. წყალქვეშა ტალღმტეხის მიდამოებში აღმოჩენილ იქნა წყალქვეშა სტრუქტურის მიერ ინდუცირებული დინებების ცირკულაციების სხვადასხვა ტიპები, რომლებიც შეიძლება გამოყენებულ იქნას სანაპირო ხაზის რეაქციის პროგნოზირებისათვის (Bellotti ... 2007, Ranasinghe ... 2010). ეს ცირკულაციები გვხვდება ორი ფორმის და იწვევენ სანაპირო ხაზის განსხვავებულ რეაქციას: 2-უჯრედიანი ცირკულაცია, რომელიც იწვევს ნაპირის ეროზიას და 4-უჯრედიანი ცირკულაცია, რომელიც იწვევს ნაპირის აკრეციას (Bellotti ... 2007) (ნახ. 4).

ი. სალინაძე, მ. ფხაკაძე



ნახ.4. ტალღმტეხზე ტალღების გადავლისას დინებების ცირკულაციები

ტალღები სიმაღლით H_t , რომლებიც მიდიან წყალქვეშა გოტუბთან დაიმსხვრევიან მასზე და წარმოიშვება ახალი ტალღა სიმაღლით - H_t . ტალღების დამსხვრევის შედეგად მოხდება წყლის დონის აწევა სიდიდით $-\eta$. შემდეგში წარმოშობილი ტალღა დაიმსხვრევა ნაპირთან ახლოს h_b სიღრმეზე და წყლის დონე დამატებით აიწევს - η_b . ამრიგად ნაპირთან ზღვის დონის აწევის სიდიდე იქნება - $\eta + \eta_b$ (ნახ. 4).

ტალღმტეხებს შორის ტალღები დაუბრკოლებრივ ვრცელდება და ნაპირთან h_g სიღრმეზე დამსხვრევის შემდეგ წყლის დონე აიწევა სიდიდით - η_g . ნაპირთან წყლის დონის აწევის ვარიანტები განსაზღვრავენ ნაპირგასწვრივი დინებების მიმართულებებს და შესაბამისად ნაპირის რეაქციის ხასიათს. ნაშრომებში (Bellotti ... 2007, Ranasinghe ... 2010) შემოღებულია პარამეტრი, რომლის მეშვეობით დგინდება წყალქვეშა გოტუბის განთავსების შემდეგ ნაპირის რეაქციის ხასიათი:

$$r = \frac{\eta + \eta_b}{\eta_g}, \quad (13)$$

როცა $r > 1$ ადგილი აქვს ნაპირის ეროზიას, ხოლო $r < 1$ - ნაპირის აპრეციას.

η_b და η_g გამოითვლება შესაბამის სიღრმეებზე ტალღების დამსხვრევისას წყლის დონის აწევა ფორმულებით (Bellotti ... 2007, სალინაძე ... 2018).

გოტუბებზე ტალღების გადავლების შემდეგ მათი დამსხვრევის შედეგად გამოწვეული წყლის დონის აწევის η საანგარიშოდ ვისარგებლოთ ტოლობებით (სალინაძე ... 2020):

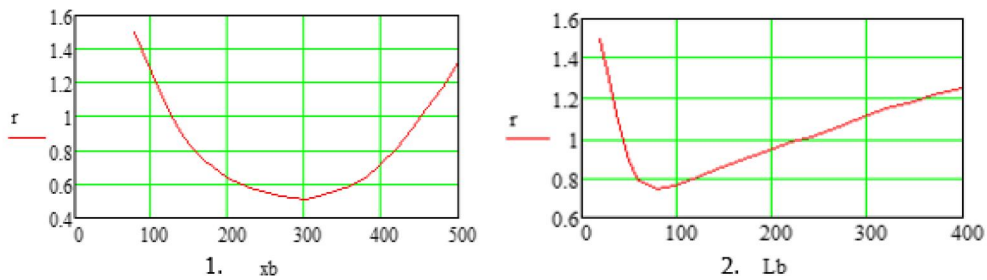
$$q_1^2 \left[\frac{1}{g(h_2 + \eta)} - \frac{1}{gh_1} \right] + \mu B_1 q_1 + \eta a + \frac{\eta^2}{2} + C = 0, \quad (14)$$

$$q_1 = u_1 h_1 = C_1 \sqrt{2g\eta} \cdot h_g \cdot \frac{L_g}{L_b}, \quad (15)$$

სადაც $C = \beta_2 H_t^2 - \beta_1 H_i^2$, $C_1 = 0,54$, h_1 და h_2 ზღვის სირღმეა ტალღების მოძრაობის მიმართულებით გეოტუბამდე და გეოტუბის შემდეგ, ხოლო a გეოტუბის ქიმის ჩაღრმავება.

მიღებული (14) და (15) განტოლებათა სისტემა ამოხსნილია კომპიუტერული პროგრამა „Mathcad” -ის გამოყენებით. რიცხვითი ამოხსნების შედეგები მოცემულია სურ. 5-ზე და ცხრილში.

შედეგები და დასკვნები. სურ. 5-ზე ნაჩვენებია გეოტუბის ნაპირიდან დაშორების - x_b და გეოტუბის სიღრმის - L_b ნაპირის რეაქციის ხასიათზე, როცა სისტემის დანარჩენი პარამეტრები მუდმივია. ნახ. 5.1-ზე მოცემულია გეოტუბის ნაპირიდან დაშორების გავლენა ნაპირის რეაქციის ხასიათზე. შუალედში $120 \leq x \leq 450$, ნაპირის რეაქციის პარამეტრი $r < 1$ და ნაპირი აკრეციულია. თუ $r \geq 1$, ე. ი. თუ გეოტუბები განთავსებულია ნაპირთან ახლოს ან ნაპირიდან შორს, მაშინ ნაპირის რეაქცია ეროზიულია. ასევე ნახ. 5.2-დან გამომდინარეობს, როცა $x_b = 180\text{მ}$ და $40 \leq L_b \leq 220$, მაშინ $r < 1$ და ნაპირი აკრეციულია.



სურ. 5. გეოტუბების სიღრმისა და ნაპირიდან დაშორების გავლენა ნაპირის რეაქციის ხასიათზე.

ქვემოთ მოყვანილ ცხრილში ნაჩვენებია გეოტუბის ძირითადი პარამეტრების სიღრმის - L_b , გეოტუბებს შორის მანძილის - L_g და გეოტუბების ნაპირიდან დაშორების - x_b -ს სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის ნაპირის რეაქცია: „+“ - ნაპირის აკრეციულია. „-“ - ნაპირი ეროზიულია.

$L_b = 120\text{მ}$	$L_g = 60\text{მ}$	$L_g = 80\text{მ}$	$L_g = 100\text{მ}$	$L_g = 120\text{მ}$
$x_b = 120\text{მ}$	-	+	+	+
$x_b = 180\text{მ}$	-	+	+	+

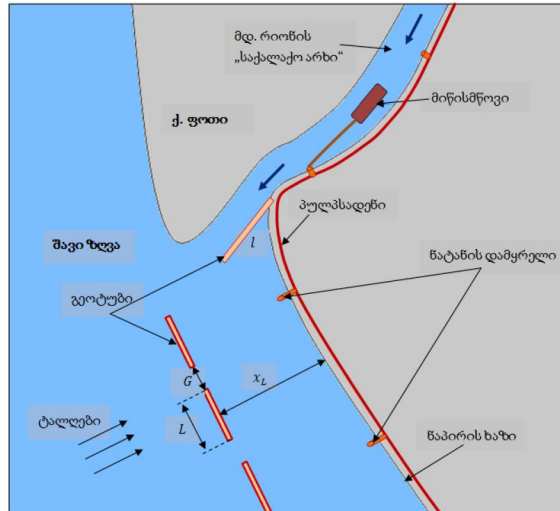
$L_b = 150\text{მ}$	$L_g = 60\text{მ}$	$L_g = 80\text{მ}$	$L_g = 100\text{მ}$	$L_g = 120\text{მ}$
$x_b = 120\text{მ}$	-	-	+	+
$x_b = 180\text{მ}$	-	-	-	+

ი. სალინაძე, მ. ფხაკაძე

ფოთის სანაპირო ზოლისათვის ვირჩევთ $L_b = 120\text{მ}$, $x_b = 180\text{მ}$
და $L_g = 100\text{მ}$. ამ დროს ნაპირის რეაქცია აკრეციულია
(აკუმულაციური).

ნატურული დაკვირვებებისა და შემუშავებული რიცხვითი
მოდელების ანალიზის საფუძველზე, ჩვენ მიერ შემუშავებულია მდინარე
რიონის „საქალაქო არხის“ სამხრეთით მდებარე სანაპირო ზოლის
დასაბუთებული ნაპირდაცვითი ღონისძიება, რომელიც 3 პუნქტისაგან
შედგება (სურ. 6):

1. მდინარე რიონის საქალაქო არხის კალაპოტის, ჩვენს მიერ
შემუშავებული სქემის მიხედვით, მიწისმწოვი დანადგარის
გამოყენებით ეტაპობრივად (4 წელი) გაწმენდა (სურ. 6). ამოღებული
მასალის მოცულობით დაახლოებით 800 000მ³ მილსადენის მეშვეობით
ნაპირზე რამდენიმე ადგილას დაყრა, რომელსაც შემდგომში
გადაამუშავებს ტალღები. გაწმენდის შემდეგ მდინარე გაატარებს
საპროექტო ხარჯს და გაიზრდება შემოტანილი ნატანის მოცულობა;
2. „საქალაქო არხის“ შესართავში მდინარის დინების გასწვრივ ქვიშით
ავსებული გეოტუბის ჩადება (სურ. 6), რომელიც სამხრეთ-დასავლეთის
შტორმების დროს ბლოკირებას გაუკეთებს ჩრდილოეთით მიმართული
დინებების მიერ ნატანის მდინარის კალაპოტში შეტანას და მის
შემდგომ კარგვას. გეოტუბის გეომეტრიული პარამეტრები
გაანგარიშებული იქნება ნაშრომის შესრულების დროს;
3. ნაპირიდან 180მ მანძილზე ზღვის ფსკერზე ერთმანეთისგან 100მ
მანძილით დაშორებული 120მ სიგრძის წყალქვეშა გეოტუბების
სისტემის მოწყობა (სურ. 6). გეოტუბების განთავსების გეომეტრიული
პარამეტრები შერჩეულია ისეთი, რომ გეოტუბებზე ტალღების
გადავლების შემდეგ მასსა და ნაპირს შორის წარმოიშვება წყლის
დინებების 4 უჯრედიანი ცირკულაციები. ამ დროს ნაპირის რეაქცია
იქნება აკრეციული (სურ. 4).



სურ. 6. გოტუბების განთავსებისა და „საქალაქო არხის“ გაწმენდის სქემა.

სადაც x და y ჰორიზონტალური კოორდინატებია, q_x და q_y კი - ელემენტის საზღვრებში ნატანის მოძრაობის სიჩქარე x და y მიმართულებებით. მოძრაობის მოცულობითი სიჩქარეები (q_x, q_y) გამოისახება ელემენტის ვერტიკალური განივი კვეთის მიერ დროის ერთეულში გატარებული ეფექტური ნატანის მოცულობით. ნატანის მოძრაობის სიჩქარის განსასაზღვრავად მიღებულია ფორმულა:

$$(q_x, q_y) = (q_x, q_y) + (q_x, q_y), \quad (2)$$

სადაც (q_x, q_y) გასაშუალებული დინებებით გამოწვეული ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარეა, (q_x, q_y) კი ტალღებით გამოწვეული ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარე. დინებებით გამოწვეული ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით (Saghinadze ... 2019):

$$q_x = Q_c U, \quad q_y = Q_c V, \quad (3)$$

$$Q_c = A_c (\tau_m - \tau_c) / \rho g,$$

სადაც U და V გასაშუალებული დინებების სიჩქარეებია x და y მიმართულებით, $A_c = 0,1-1$ რიგის უგანზომილებო კოეფიციენტია, τ_m ტალღებისა და დინებების ერთობლივი მოქმედებით გამოწვეული

ფსკერული ძვრის ძაბვის მაქსიმალური მნიშვნელობაა $\tau_m = \frac{1}{2} \rho f_w \hat{u}_b^2$, \hat{u}_b ფსკერული ორბიტული სიჩქარის ამპლიტუდაა, f_w ფსკერის ხახუნის კოეფიციენტია, τ_c ნატანის ასამოძრავებლად საჭირო ფსკერის

ი. სალინაძე, მ. ფხაკაძე

კრიტიკული ძვრის ძაბვაა (თუკი $\tau \leq \tau_c$, მაშინ $Q_c = 0$).

ტალღების მიერ ნატანის მოძრაობა გამოწვეულია ფსკერული ტალღური სიჩქარის ასიმეტრიულობით და უფრო რთულია, რადგანაც ის ითხოვს ისეთი ფაქტორების გათვალისწინებას, როგორცაა ტალღათა რეფრაქცია, დიფრაქცია, დამსხვრევა, არეკვლა და ფსკერის დახრილობა. ტალღებით გამოწვეული ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით (Saghinadze ... 2019):

$$q_w = F_d Q_w \hat{u}_b \cos \alpha, \quad q_w = F_d Q_w \hat{u}_b \sin \alpha, \quad (4)$$
$$Q_w = A_w (\tau_m - \tau_c) / \rho g,$$

სადაც A_w არის უგანზომილებო კოეფიციენტი, \hat{u}_b ფსკერული ორბიტული სიჩქარის ამპლიტუდაა, α - კუთხე ტალღების გავრცელების მიმართულებასა და x ღერძს შორის. A_w კოეფიციენტიტოლია:

ოქსიმაციის სქემის შედგენაზე. შემდგომში S არეში ვაგებთ ბადურ მად გამოიყენება გამოკვლეული ტერიტორიის ტოპოგრაფიული რუქები. მოდ შემოთავაზებული პროექტის განხორციელების შემდეგ ზღვის ნაპირზე და მდინარე რიონის „საქალაქო არხის“ გასწვრივ გაყვანილი იქნება პულსადენი თავისი შუალედური ტუმბოებით. შემდეგში საჭიროების შემთხვევაში შეიძლება პულსადენის დაგრძელება 1 კმ და ნატანის ამოღება მდინარე რიონის მთავარ არხში, წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის ქვედა ბიეფში (სურ. 1). მდინარის ამ ნაწილში დიდი რაოდენობით მოიპოვება პლაჟშემქმნელი ნატანი და საჭიროების შემთხვევაში ნაპირის დასაცავად ეს ნატანი არსებული სისტემით შეიძლება გადაიქაჩოს სანაპირო ზოლში. გარდა ამისა დროთა განმავლობაში „საქალაქო არხის“ დალექვის შემთხვევაში, არსებული სისტემა შეიძლება გამოყენებულ იქნას მის ხელმეორედ გასაწმენდად.

ლიტერატურა

- გაგოშიძე, შ., კოდუა, მ., სალინაძე, ი., ქადარია, ი. 2017. სამდინარო ჰიდრომშენებლობა და საქართველოს შავი ზღვისპირეთის გეომორფოლოგიური პროცესები. თბილისი: „ტექნიკური უნივერსიტეტი“.
- სალინაძე, ი., გამეზარდაშვილი ზ. 2018. „შავი ზღვის ქალაქ ფოთის სანაპირო ზოლში შტორმების დროს ტალღების გავრცელებისას წყლის საშუალო დონის ცვლილების გაანგარიშება“. საქართველოს საინჟინრო სიახლენი . N1. 2018: 63-67.
- სალინაძე, ი., ფხაკაძე, მ. 2020. საქართველოს მექანიკოსთა კავშირის XI ყოველწლიური საერთაშორისო კონფერენცია. მოხსენებათა თეზისები. ბათუმი, 2020: 112-113.
- Bellotti, G. 2007. „An Improved Analytical Model for Estimating Water level set-up and currents induced by waves over submerged low crested coastal defense structures“. *Proceedings of the 5th Coastal Structures International Conference*, 1, 2007: 975-989.
- Ranasinghe, R., M. Larson and J. Savioli. 2010. „Shoreline response to a single shore-parallel submerged breakwater“. *Coastal Engineering* 57, 2010: 1006-1017.
- Saghinadze, I., Kodua, M. 2019. „[A Mathematical Model of Sediment Transport of the Poti Coastal Zone](#)“. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*. Volume 12, Number 12. 2019: 3032-3037.

Ocean Engineering

Protection of the Black Sea coast of Poti from erosion by using underwater barriers

Ivane Saghinadze

ivane.saghinadze@atsu.edu.ge

Manana Pkhakadze

manana.pkhakadze@atsu.edu.ge

Akaki Tsereteli State University

Kutaisi, Georgia

The paper discusses the coastal protection problems of the Black Sea coast of Poti. A mathematical model of transportation of the sediment has been developed, that takes into account the existing geometric and physical parameters of the coastline. As a result of the numerical solution of the obtained equations, sediment transport rates are calculated. The tendencies of sediment movement in the coastal zone, the quantitative index of its deficit and the average speed of erosion in the multi-year section are determined. In order to reduce wave loads and erosion processes on the coastline, the method of arranging underwater breakwave barriers in the depth of the sea are used. Geotextile pipes(Geotubes) filled with sand are used as underwater barriers. In case of accumulative shore, the geometrical and physical parameters of placing underwater geotubes at the bottom of the sea are calculated. Based on the analysis of field observations and the developed numerical models, a preliminary design for protecting the coastline to the south of the "City Canal" of the Rioni River was developed.

Keywords: shore, erosion, wave, geotube.

Introduction. In the economic development of Georgia Poti Region is of a primary importance, the prospects of economic development of the countries of Black Sea basin is associated essentially with the intensification of transport and cable communications between Asia and Europe in which Poti City with its port and cable of marine under water communications now plays the important role. But, along with it, in Poti and its sea region the unsolved problems of ecological and geomorphological nature have existed over ten years (see situational map of problems, Fig. 1) which were caused by unsuccessfully designed and realized

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y}, \quad (1)$$

Where x and y are horizontal coordinates, q_x and q_y - sediment transport rate within the element in direction x and y . Volumetric transport rates (q_x, q_y) expressed in terms of the effective volume of sediment transmitted by the vertical cross section of the element per unit of time.

The equation for determining the sediment transport rate is:

$$(q_x, q_y) = (q_{cx}, q_{cy}) + (q_{wx}, q_{wy}), \quad (2)$$

Where (q_{cx}, q_{cy}) are sediment transport caused by the averaged flows, (q_{wx}, q_{wy}) - sediment transport caused by waves. Sediment transport caused by average flows is determined by the equations (Saghinadze ... 2019):

$$\begin{aligned} q_{cx} &= Q_c U, & q_{cy} &= Q_c V, \\ Q_c &= A_c (\tau_m - \tau_{cr}) / \rho g, \end{aligned} \quad (3)$$

Where U and V are averaged flow rates in the direction x and y , A_c - dimensionless ratio of the order of 0,1-1, τ_m - the maximum value of seabed shear stress under the mutual action of waves and flow $\tau_m = \frac{1}{2} \rho f_{cw} \hat{u}_b^2$, \hat{u}_b - near-seabed orbital velocity amplitude, f_{cw} - seabed friction ratio, τ_{cr} - critical shear stress of the seabed at the beginning of movement of sediment. If $\tau \leq \tau_{cr}$, $Q_c = 0$. Equations (3) are based on the concept of a force model, i.e. sediment volume Q_c is proportional to the combined shear stress.

Wave transport of sediments is caused by asymmetry of the seabed wave velocity and is more complicated because requires consideration of factors such as refraction, diffraction, reflection and collapse of waves, as well as the slope of the sea bed. The equations for determining transport rate of sediments caused by wave motion looks like (Saghinadze ... 2019):

$$\begin{aligned} q_{wx} &= F_d Q_w \hat{u}_b \cos \alpha, & q_{wy} &= F_d Q_w \hat{u}_b \sin \alpha, \\ Q_w &= A_w (\tau_m - \tau_{cr}) / \rho g, \end{aligned} \quad (4)$$

Where A_w is dimensionless ratio, \hat{u}_b -near-seabed orbital velocity amplitude, α -angle between the direction of wave propagation and the axis x . Dimensionless ratio A_w is equal to:

$$A_w = B_w \frac{w_0}{(1 - \lambda_v) s \sqrt{sgd}} \sqrt{\frac{f_w}{2}},$$

$s = (\rho_s - \rho) / \rho$, τ_m - maximum shear stress due to waves and flows, λ_v - seabed porosity, f_w - wave friction ratio. The value of f_w depends on the amplitude and period, orbital velocity and characteristics of the seabed. For example, if the seabed is formed from sand $d = 0.2$ mm, $w_0 = 2.4$ cm/s, $\lambda_v = 0.4$, $s = 1.65$, $B_w = 7$ and $f_w = 0.01 \sim 0.2$, then according to equation (5), the values of A_w vary within the range $0.2 \sim 0.9$. In calculations, the coefficient A_w is as summed as constant. In the equations (4) F_d is equal to:

$$F_d = \tanh\left(k_d \frac{\Pi_c - \Pi}{\Pi_c}\right), \quad \Pi = \psi' \frac{h}{L_0} = \frac{\hat{u}_b^2}{sgd} \frac{h}{L_0}, \quad (5)$$

Where Π_c is the critical value of Π at zero point (where the transverse sediment transport is 0). The values of Π_c are values of the order of one and specified in the calculation process. The parameter Π value is specified, if ψ' replaced by the Shields parameter.

Formulas (3, 4) depend on seabed friction (critical shear stress), the values of which must be determined. Critical condition of sediment movement under the waves and flows influence is determined by critical volume of Shields parameter:

$$\psi_c = \tau_{cr} / (\rho_s - \rho)gd.$$

According to Watanabe, the value of the critical Shields parameter for fine sand ($d = 0.1 \sim 0.4$) is equal to 0.11 for coarse sand – 0.06.

In the equations for determining (q_x, q_y) the seabed slope effect was not taken into account. The following equations were introduced to account for the slope of the seabed:

$$q'_x = q_x + \varepsilon_s |q_x| \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q'_y = q_y + \varepsilon_s |q_y| \frac{\partial h}{\partial y} \quad (6)$$

And instead of equation (1) we obtain:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q'_x}{\partial x} + \frac{\partial q'_y}{\partial y}. \quad (7)$$

Solution algorithm. In equation (6) were introduced notations:

$$A = q_x, \quad B = \varepsilon |q_x|, \quad C = q_y, \quad D = \varepsilon |q_y|$$

and were rewritten as:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A + B \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(C + D \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (8)$$

Let's formulate a generalized statement of the problem. If we denote the generalized solution of problem (8) with the function $h \in \widetilde{W}_2^{(1)}$ ($\widetilde{W}_2^{(1)}$ - Sobolev space) the following equation would be satisfied (Saghinadze ... 2019):

$$\iint_S \frac{\partial h}{\partial t} \omega_{i,j} dS = \iint_S \frac{\partial}{\partial x} \left(A + B \frac{\partial h}{\partial x} \right) \omega_{i,j} dS + \iint_S \frac{\partial}{\partial y} \left(C + D \frac{\partial h}{\partial y} \right) \omega_{i,j} dS. \quad (9)$$

For any $\omega_{i,j} \in W_2^{(1)}$. Here $W_2^{(1)}$ is the space of square-integrals functions, together with their first derivatives, equal to zero on the boundary B and taking arbitrary fixed values within the area S , (Saghinadze ... 2019).

Applying in equation (9) Green's formula we obtain:

$$\iint_S \frac{\partial h}{\partial t} \omega_{i,j} dS = - \iint_S \left(A + B \frac{\partial h}{\partial x} \right) \frac{\partial \omega_{i,j}}{\partial x} dS - \iint_S \left(C + D \frac{\partial h}{\partial y} \right) \frac{\partial \omega_{i,j}}{\partial y} dS. \quad (10)$$

Afterwards, let's proceed to the construction of the approximating scheme. In the S area we construct a grid rectangular area S^n with a step $a = \Delta x$ and $b = \Delta y$. Triangulate the area by separating the rectangles of the grid with diagonals of positive direction. The projection-difference scheme will be built as following: to each node of the grid of (x_i, y_j) of S^n area we put in accordance with Courant function $\omega_{i,j}$, which is equal to 1 in this node and equal to 0 in all other nodes of the grid:

$$\omega_{m,n}(x_i, y_j) = \begin{cases} 1, & (i, j) = (m, n) \\ 0, & (i, j) \neq (m, n) \end{cases}.$$

The functions $\omega_{m,n}(x_i, y_j)$ have a hexagon carrier. After transformations, for each $(i, j) \in S^n$ (10) the equation will take the form:

$$\theta \frac{dh_{i,j}}{dt} + E_1 h_{i,j} - E_2 h_{i+1,j} - E_3 h_{i,j+1} - E_4 h_{i-1,j} - E_5 h_{i,j-1} = F, \quad (11)$$

The coefficients included in equation (11) are determined as a result of solving the wave and coastal current equations in the same area.

To construct temporal approximations associated with solving equations (11), Crank-Nicholson schemes can be used, which provide a second order of approximation of time (გაგომბიძე ... 2017, Saghinadze ... 2019). We approximate problem (20) as follows:

$$h_{i,j}^{m+1} \left[\frac{ab}{\Delta t} + \frac{E_1}{2} \right] - h_{i+1,j}^{m+1} \frac{E_2}{2} - h_{i,j+1}^{m+1} \frac{E_3}{2} - h_{i-1,j}^{m+1} \frac{E_4}{2} - h_{i,j-1}^{m+1} \frac{E_5}{2} = h_{i,j}^m \left[\frac{ab}{\Delta t} - \frac{E_1}{2} \right] + h_{i+1,j}^m \frac{E_2}{2} + h_{i,j+1}^m \frac{E_3}{2} + h_{i-1,j}^m \frac{E_4}{2} + h_{i,j-1}^m \frac{E_5}{2} + F. \quad (12)$$

Equations (12) under the corresponding boundary conditions and initial data are effectively solved by the upper block relaxation method (სადინაძე ... 2020, გაგომბიძე ... 2017).

Computational experiments. When solving equation (12), we consider the coastal zone located to the south of Poti port. The abscissa axis is perpendicular to the coast, and the y axis is parallel. The meshing steps are $a = \Delta x = 5m$,

ი. სალინაძე, მ. ფხაკაძე

$b=\Delta y=50\text{m}$. There are 141 points on the x-axis, 13 points on the y-axis, for a total of 1833 points.

Numerical solutions have shown that the sediment transfer rate q_x is practically zero at a water depth of 10-15m. It becomes significant only at a depth of 8-10 m. Their maximum values range from 0.0015-0.0022 m^2/s . The maximum values of the sediment transfer rate q_y are 0.00001-0.000013 m^2/s .

As a result of calculations of changes in the relief of the seabed in the coastal zone, we find that the water depths vary from -0.29m to +0.26m. A negative value corresponds to coastal erosion, and a positive value corresponds to accretion. The average annual rate of coastal erosion is approximately 6-8 m/year, and the deficit of beach-forming material south of the Rioni River "City Channel" is approximately 200,000 - 250,000 m^3/year .

Determining the nature of the shore response in the case of several underwater geotube. Different types of current circulations induced by the underwater structure have been found in the vicinity of the underwater breakwater, which can be used to predict the shoreline response (Bellotti ... 2007, Ranasinghe ... 2010). These circulations occur in two forms and cause different shoreline responses: 2-cell circulation, which causes bank erosion, and 4-cell circulation, which causes bank accretion (Bellotti ... 2007).

Waves with a height H_i , that reach the underwater geotube will break on it and a new wave with a height - H_t . Will be generated. As a result of breaking waves, the water level will rise by $-\eta$. Next, the resulting wave will break near the shore at the depth h_b and the water level will rise additionally - η_b . Thus, the amount of sea level rise near the shore will be $-\eta + \eta_b$.

Between the breakwaters, the waves propagate freely, and after breaking at the shore at a depth of h_g , the water level rises by the amount $-\eta_g$. Options for raising the water level near the shore determine the direction of the riparian currents and, accordingly, the nature of the shore response. In the works (Bellotti ... 2007, Ranasinghe ... 2010) a parameter is introduced, through which the character of the shore reaction after the placement of the underwater geotube is determined:

$$r = \frac{\eta + \eta_b}{\eta_g}, \quad (13)$$

When $r > 1$ there is bank erosion, and $r < 1$ - bank accretion.

η_b and η_g are calculated by the formulas of water level rise during breaking waves at the respective depths (Bellotti ... 2007, Saghinadze ... 2018).

To calculate the water level rise η caused by the breaking of the waves after passing over the geotube, let's use the equations (საღინაძე ... 2020):

$$q_1^2 \left[\frac{1}{g(h_2 + \eta)} - \frac{1}{gh_1} \right] + \mu B_1 q_1 + \eta a + \frac{\eta^2}{2} + C = 0, \quad (14)$$

$$q_1 = u_1 h_1 = C_1 \sqrt{2g\eta} \cdot h_g \cdot \frac{L_g}{L_b}, \quad (15)$$

Where $C = \beta_2 H_t^2 - \beta_1 H_i^2$, $C_1 = 0,54$, h_1 and h_2 are the depth of the sea in the direction of wave movement before and after the geotube, and a is the depth of the geotube.

Results and conclusions. The obtained system of equations (14) and (15) was solved using the computer program "MathCAD". The results of the numerical solution are given in fig. 3 and in the table.

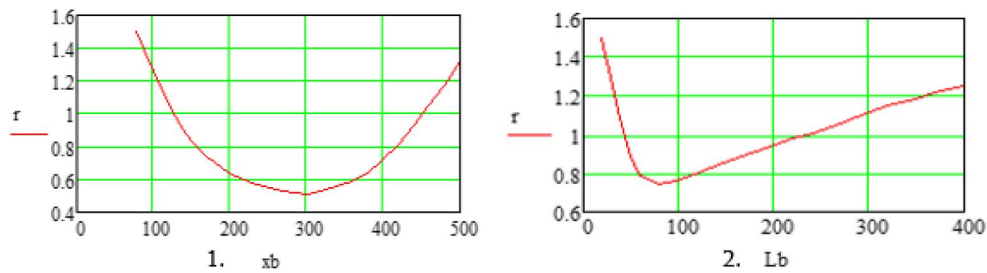


Fig. 3. Influence of the length of geotube and its distance from the shore on the character of the shore reaction.

The table below shows the reaction of the shore for the different values of the length of the geotube - L_b , the distance between the geotubes - L_g and the distance of the geotubes from the shore - x_b : "+" - shore accretion. "-" - the shore is eroded.

$L_b = 120\theta$	$L_g = 60\theta$	$L_g = 80\theta$	$L_g = 100\theta$	$L_g = 120\theta$
$x_b = 120\theta$	-	+	+	+
$x_b = 180\theta$	-	+	+	+

$L_b = 150\theta$	$L_g = 60\theta$	$L_g = 80\theta$	$L_g = 100\theta$	$L_g = 120\theta$
$x_b = 120\theta$	-	-	+	+
$x_b = 180\theta$	-	-	-	+

For Poti coastline we choose $L_b = 120m$, $x_b = 180m$ and $L_g = 100m$. At this time, the shore reaction is accumulative.

Based on the analysis of natural observations and developed numerical models, we have developed a justified coastal protection measure for the coastal strip to the south of the "city channel" of the Rioni River, which consists of 3 points (Fig. 4):

1. Staged (4 years) cleaning of the bottom of the "city canal" of the Rioni River according to the scheme was developed by us using a suction device (Fig. 4). Transferring extracted material (About 800,000 m^3) by pipeline on the seashore;

2. Placement of a geotube filled with sand along the river at the mouth of the "city canal" (Fig. 4), which will prevent the introduction of sediments into

the river bed by northward currents during southwestern storms and their subsequent loss;

3. Installation of a system of underwater geotube on the seabed at a distance of 180 m from the shore. The length of the geotube is 120 m, and the distance between them is 100 m. Geotubes are chosen so that the coastal reaction is accretionary (Fig. 4).

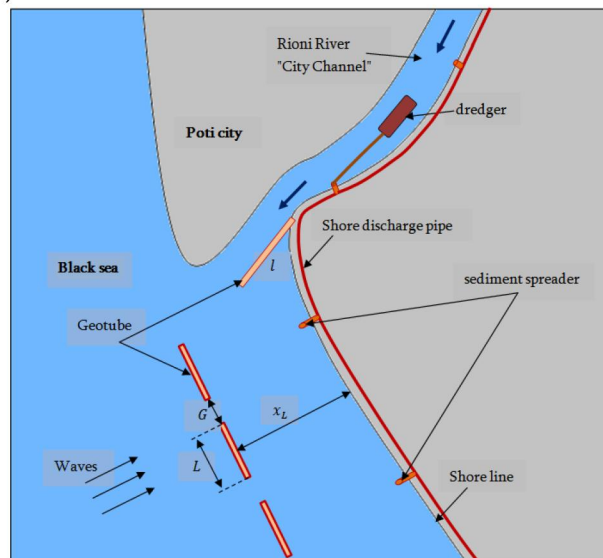


Fig. 4. Scheme of placement of geotube and cleaning "city canal".

After the implementation of the proposed project along the seashore and along the "City Canal" of the Rioni River, a slurry pipeline with its intermediate pumps will be laid.