

შავი ზღვის ჰიდროდინამიკის რიცხვითი მოდელირება: ისტორია და თანამედროვე მდგომარეობა

დემეტრაშვილი დ.

ოსუ მ. ნოდიას სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი

demetr_48@yahoo.com

შესავალი

შავი ზღვა, რომელიც თითქმის ჩაკეტილი წყალსატევია და მხოლოდ ბოსფორის ვიწრო სრუტით უკავშირდება მსოფლიო ოკეანეს, თავისი დიდი გეოპოლიტიკური და უნიკალური ჰიდროლოგიური სტრუქტურით დიდი ხანია ყურადღების ცენტრშია. არსებითია შავი ზღვის როლი შავიზღვისპირა ქვეყნების სოციალურ-ეკონომიკურ მდგომარეობაზე. მრავალ ექსპერტთა შეფასებით შავი ზღვის თანამედროვე კონფიგურაცია და მორფომეტრიული პარამეტრები დაახლოებით 7000-8000 წლის წინათ ჩამოყალიბდა. ბოსფორის გეოლოგიური ევოლუციის გამოკვლევები, რომლებიც განხორციელებულია მისი ფსკერის ბურღვის გზით, გვიჩვენებს, რომ ბოსფორი მრავალჯერ დამშრალა და ავსებულა წყლით სეისმური პროცესების შედეგად და შავი ზღვის დონის ცვალებადობის გამო გამყინვარებისა და დათბობის პერიოდების მონაცვლეობის გავლენით [1-3]. შავი ზღვის ისტორიული ევოლუციის ანალიზს მივყავართ იმ დასკვნამდე, რომ თანამედროვე შავი ზღვის სახე თავისი კონფიგურაციით, მორფომეტრიული პარამეტრებით, ფლორითა და ფაუნით გარკვეული ეტაპია ზღვის აუზის ევოლუციურ გარდაქმნათა გრძელ ჯაჭვში.

საქართველოსათვის შავ ზღვას დიდი სატრანსპორტო და რეკრეაციული მნიშვნელობა აქვს. იგი არის დამაკავშირებელი სატრანსპორტო დერეფანი დასავლეთსა და აღმოსავლეთს შორის. მომავალში მოსალოდნელია ქვეყნის შავიზღვისპირა ზონის რეკრეაციული ფუნქციისა და შესაბამისი ინფრასტრუქტურის კიდევ უფრო გაზრდა. ამის ერთ-ერთ მიზეზად შეიძლება დავასახელოთ თუნდაც ის ფაქტი, რომ ქ. ბათუმის მიმდებარე აკვატორიაში იგეგმება ხელოვნური კუნძულებისა და ნახევარკუნძულების სისტემის შექმნა, რაც უსათუოდ გაზრდის ბათუმის, როგორც საერთაშორისო ტურისტული ცენტრის მნიშვნელობას. მზარდი ანთროპოგენური ზემოქმედების პირობებში იზრდება სანაპირო წყლების დაბინძურების საშიშროება ნოვობროდუქტებით, მყარი საყოფაცხოვრებო ნაჩენებითა და სხვა მინარევებით, რაც პოტენციურ საფრთხეს წარმოადგენს ზღვის ეკოსისტემისთვის. ზღვის ჰიდროდინამიკური პროცესები მნიშვნელოვნად განაპირობებს ზღვაში მოხვედრილი ანთროპოგენური მინარევების გავრცელების თავისებურებებს და ამიტომ მათი შესწავლა და პროგნოზი შავი ზღვის ოკეანოგრაფიის აქტუალური ამოცანაა.

მნიშვნელოვანია შავი ზღვის როლი ამინდისა და რეგიონული კლიმატის ფორმირებაში. შავი ზღვა და ატმოსფერო ერთიანი ჰიდროდინამიკური სისტემაა, რომელთა შორის

უწყვეტად მიმდინარეობს ენერჯიათა და ნივთიერებათა გაცვლის პროცესები. ეს ფაქტორი კიდევ უფრო აქტუალურს ხდის შავ ზღვაში მიმდინარე ჰიდროფიზიკური პროცესების კვლევას არასტაციონარული ატმოსფერული პროცესების ზემოქმედების პირობებში.

წინამდებარე სტატიაში მოკლედ განიხილება შავი ზღვის ჰიდროფიზიკური პროცესების შესწავლის ისტორია და ამ საკითხისადმი მიძღვნილი შრომები მათემატიკური მოდელირების მეთოდების გამოყენებით, მათ შორის, ივ. ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მ. ნოდისა და სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტის ზღვისა და ატმოსფეროს დინამიკის მოდელირების სექტორში ჩატარებული კვლევები ზღვის დინამიკის აუზის მასშტაბისა და რეგიონული რიცხვითი მოდელების საფუძვლზე.

ძირითადი ნაწილი

მეცნიერების განვითარების თანამედროვე ეტაპი ხასიათდება მათემატიკური მოდელირების მეთოდების ფართოდ გამოყენებით არა მარტო ბუნებრივ გარემოში მიმდინარე ფიზიკური პროცესებისა და ეკოლოგიური ხასიათის ამოცანების შესწავლაში, არამედ მეცნიერებისა და ტექნიკის მრავალ დარგში. ამ მეთოდების გამოყენება დაფუძნებულია გამოთვლითი ექსპერიმენტების ჩატარებაზე, რაც დაკავშირებულია შესასწავლი პროცესის აღმწერ მათემატიკური (რიცხვითი) მოდელების კომპიუტერულ რეალიზაციასთან. ასეთი ექსპერიმენტები საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ ბუნებრივი პროცესების იმიტაცია პერსონალური კომპიუტერის მეშვეობით, რაოდენობრივად შევაფასოთ სხვადასხვა ფაქტორების როლი პროცესის ფორმირებაში და, ბოლოს, ვიწინასწარმეტყველოთ პროცესის ევოლუცია.

შავი ზღვის ჰიდროდინამიკური პროცესების შესწავლა რიცხვითი მოდელების ინტენსიური გამოყენებით დაიწყო გასული საუკუნის 60-70-იან წლებში. ამ პერიოდის მოდელების მიმოხილვა და ანალიზი მოცემულია ე. სტანევისა [4] და ა. კორძაძის [5] მონოგრაფიებში. რიცხვითი მოდელები ეფუძნება დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემებს, რომელთა ამოხსნა ხორციელდება სასრულ-სხვაობითი (რიცხვითი) მეთოდების გამოყენებით [6]. ადრეულ გამოკვლევებში მკაფიოდ გამოირჩეოდა ორი სახის მოდელები: დიაგნოსტიკური და პროგნოსტიკური. მათ შორის შედარებით მარტივია დიაგნოსტიკური მოდელები, რომლებშიც სიმკვრივის ველი განისაზღვრება დაკვირვების მონაცემთა საფუძვლზე (და არა ამოხსნის პროცესში) [7, 8]. ეს განტოლებათა სისტემის გამარტივების საშუალებას იძლევა, რადგანაც გამოირიცხება სითბოსა და მარილიანობის გადატანის განტოლებათა განხილვის საჭიროება. ა. ს. სარქისიანის მონოგრაფიაში [9] მოცემულია ასეთი სახის მოდელების მიმოხილვა და ანალიზი.

დიაგნოსტიკურმა მოდელებმა მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანეს შავი ზღვის დინამიკური პროცესების შესწავლაში, მაგრამ მათი სამეცნიერო და პრაქტიკული ღირებულება გარკვეულწილად შეზღუდულია. სრულყოფილების თვალსაზრისით გაცილებით მნიშვნელოვანია პროგნოსტიკური მოდელები, რომლებსაც საფუძვლად უდევს ოკეანის ჰიდროთერმოდინამიკის განტოლებათა სრული სისტემა. ეს სისტემა მოიცავს მოძრაობის განტოლებებს დაგეგმილებულს ჰორიზონტალურ საკოორდინატო ღერძებზე, ჰიდროსტატიკის განტოლებას, უწყვეტობის განტოლებას უკუმშვადი სითხისათვის, სითბოსა და მარილიანობის გადატანის განტოლებებს და ზღვის წყლის მდგომარეობის ემპირიულ განტოლებას. პიონერული შრომა ამ მიმართულებით შესრულებული იყო ყოფილ საბჭოთა კავ-

შირში – სსრკ მეცნიერებათა აკადემიის ციმბირის განყოფილების გამოთვლით ცენტრში (ქ. ნოვოსიბირსკი, აკადემქალაქი) გ. მარჩუკის, ა. კორძაძის, ა. სკიბას მიერ [10], სადაც განტოლებათა სისტემის ამოსახსნელად გამოყენებული იყო აკადემიკოს გ. ი. მარჩუკის მიერ გეოფიზიკური ჰიდროდინამიკის განტოლებათა სისტემის ამოსახსნელად შემოთავაზებული გახლეჩის ორციკლიანი მეთოდი ფიზიკური პროცესებისა და კოორდინატების მიხედვით. ამ მეთოდმა დიდი გამოყენება ჰპოვა ოკეანის და ატმოსფეროს დინამიკის რთული არასტაციონარული მოდელების რეალიზაციაში [6, 11]. გახლეჩის მეთოდი საშუალებას იძლევა თითოეულ ფიქსირებულ დროით ინტერვალზე რთული არასტაციონარული სამგანზომილებიანი ამოცანის ამოხსნა დაყვანილ იქნას შედარებით მარტივ ორ და ერთგანზომილებიან ამოცანათა სიმრავლის ამოხსნამდე. შავი ზღვის დინამიკის ბაროკლინური მოდელი განიხილებოდა აგრეთვე [12, 13]-ში, სადაც განტოლებათა სისტემის ამოხსნა განხორციელებულია გახლეჩის ორციკლიანი მეთოდის გამოყენებით.

გ. ი. მარჩუკისა და ა. ს. სარქისიანის მონოგრაფიაში [14] განხილულია ოკეანის დინამიკის ამოცანათა ფორმულირება დიაგნოსტიკური და პროგნოსტიკული მიდგომით, მათი ამოხსნის რიცხვითი ალგორითმები და მათ საფუძველზე ოკეანის დინებათა გამოთვლები.

დიაგნოსტიკური და პროგნოსტიკური მოდელების საფუძველზე ჩატარებულმა გამოთვლებმა მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანეს შავი ზღვის დინამიკური პროცესების შესწავლაში – დადასტურდა გასული საუკუნის პირველ ნახევარში ცნობილი ზოოლოგისა და ოკეანოლოგის ნ. მ. კნიპოვიჩის მიერ ექსპედიციური მონაცემების ანალიზის საფუძველზე [15]-ში მიღებული დასკვნა შავი ზღვის ცირკულაციის ზოგადი ციკლონური ხასიათისა და შავი ზღვის ცირკულაციის მთავარი ელემენტის – შავი ზღვის ძირითადი დინების (**The Rim Current**) შესახებ, რომელიც გარს უვლის შავ ზღვას ჭავჭავური დინების სახით პერიფერიებზე, ასევე, ციკლონური ხასიათის წრებრუნვების არსებობა ზღვის დასავლეთ და აღმოსავლეთ ნაწილებში. გამოთვლებმა აჩვენა რელიეფის მნიშვნელოვანი როლი ცირკულაციის ჩამოყალიბებაში, განსაკუთრებით შავი ზღვის ჩრდილო-დასავლეთ ნაწილში. მარილიანობის მაქსიმალური კონცენტრაცია მიიღებოდა ზღვის ცენტრალურ ნაწილში, რაც მოწმობს მარილიანი ღრმა წყლების ამოსვლას ციკლონური ბრუნვის ცენტრალურ არეებში.

გასული საუკუნის 70-იანი წლების გამოთვლითი ტექნიკის დონე არ იძლეოდა არასტაციონარული სივრცითი ამოცანების რეალიზაციას სასურველი სივრცითი გარჩევისუნარიანობით. [10]-ში სივრცითი ბიჯი იყო 37 კმ, ხოლო უმრავლეს გამოთვლებში, რომლებიც ჩატარებული იყო დიაგნოსტიკური და პროგნოსტიკული მოდელების საფუძველზე, სივრცითი ბიჯი იყო 40-50 კმ, რაც არ იყო საკმარისი შავი ზღვის ჰიდროდინამიკური პროცესების თავისებურებათა სრულფასოვანი შესწავლისათვის, განსაკუთრებით, ზღვის სანაპირო/შელფურ ნაწილში, რომელიც გამოირჩევა მეზომასშტაბური და სუბმეზომასშტაბური გრიგალური სტრუქტურების ინტენსიური ფორმირებით [16, 17].

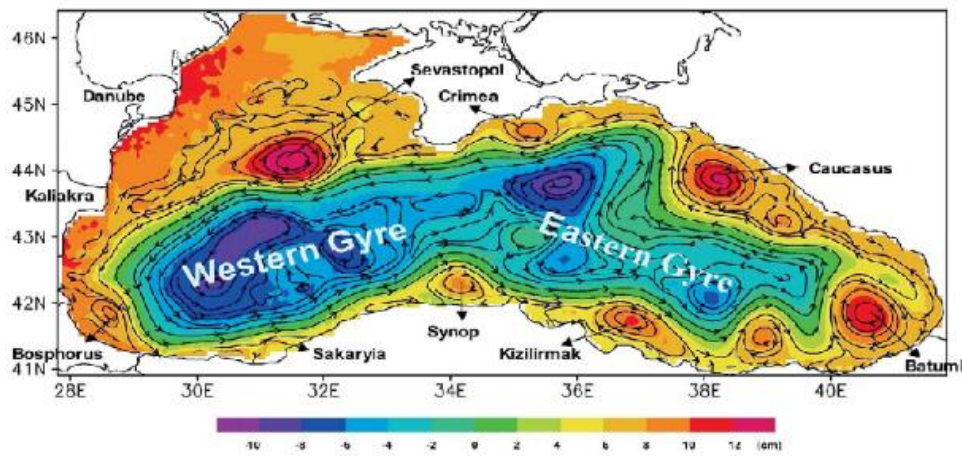
ბოლო ათეულ წლებში გამოთვლითი ტექნიკის პროგრესმა არსებითად ხელი შეუწყო შავი ზღვის დინამიკის რიცხვითი მოდელების სივრცითი გარჩევისუნარიანობის საგრძნობ ამაღლებას, რამაც უფრო საიმედო და ადეკვატური გახადა ზღვის დინამიკური პროცესების მოდელირების შედეგები და გააფართოვა ჩვენი ცოდნა შავ ზღვაში მიმდინარე პროცესების შესახებ. ამჟამად, მთელი რიგი პუბლიკაციებია მიმდინარე შავი ზღვის ცირკულაციური პროცესების მაღალი გარჩევისუნარიანობით მოდელირებისადმი როგორც მთლიანად ზღვის აუზის მასშტაბით, ასევე ზღვის ცალკეული რეგიონებისათვის [18-32].

თითქმის ყველა თანამედროვე შავი ზღვის დინამიკის მოდელი ეფუძნება ოკეანის ჰიდრო-თერმოდინამიკის განტოლებათა სრულ სისტემას ჰიდროსტატიკური და უკუმშვადი სითხის მიახლოებაში. ისინი განსხვავდებიან, ძირითადად, გამოყენებული კოორდინატთა სისტემით, სხვადასხვა ფიზიკური ფაქტორების პარამეტრიზაციის მეთოდებით, ამოხსნის ალგორითმით. უნდა აღინიშნოს, რომ შავი ზღვის ჰიდროდინამიკის მოდელებმა მნიშვნელოვანი გამოყენება ჰპოვეს ზღვაში ავარიულად მოხვედრილი ნავთობისა და სხვა მინარე-ვების გავრცელების მოდელირებისა და პროგნოზის ამოცანებში [33-36].

შავი ზღვის დინამიკის რიცხვითი მოდელების მიმოხილვა მიმდინარე საუკუნის დასაწყისისათვის მოცემულია ე. სტანევის სტატიაში [21]. მოკლედ აღვწეროთ ზოგიერთი მათგანი.

ცნობილი **POM (Princeton Ocean Model)** მოდელი გამოიყენებოდა [18]-ში ქარისმიერი და თერმობალინური ცირკულაციის შესასწავლად კლიმატური მონაცემების გამოყენებით. POM იყენებს ვერტიკალზე ზღვის ფსკერის ტოპოგრაფიის მიმყოფ σ კოორდინატს და სანაპირო ხაზის მიმყოფ ორთოგონალურ მრუდწირულ კოორდინატთა სისტემას. ზღვის ზედაპირი მოდულირებულია თავისუფალი ზედაპირის სახით. [18] – ში POM მოდელი რეალიზებული იყო მთლიანად შავი ზღვის აუზისათვის 5 კმ სივრცითი ბიჯით ზღვის სამხრეთ სანაპირო აკვატორიისათვის, სადაც ზღვის ტოპოგრაფია გამოირჩევა მკვეთრი არაერთგვაროვნებით, ხოლო ზღვის ღია ნაწილში, სადაც ზღვის ტოპოგრაფია თითქმის ბრტყელია, სივრცითი ბიჯი იყო 15 კმ. მოდელის კომპიუტერული რეალიზაციის შედეგად შეფასებული იყო ზოგიერთ ინდივიდუალურ ფაქტორთა (ბოსფორის ქვედა და ზედა დინება, მდ. დუნაის ჩამონადენი, ატმოსფერული ზემოქმედება) როლი ცირკულაციის ფორმირებაში. მიუხედავად ამისა, უნდა აღვნიშნოთ მოდელის ზოგიერთი ნაკლოვანებანი. როგორც თვით ავტორები მიუთითებენ, აუზის დასავლეთ ნაწილში მიღებულია ანტიციკლონური გრიგალი, რომელიც ინსტრუმენტული გაზომვების შედეგად არ დაიკვირვება. აღვნიშნოთ, რომ POM გამოიყენებოდა აგრეთვე შავი ზღვის ცალკეული რეგიონებისათვის [31] და კასპიის ზღვისთვის ზღვაში დაღვრილი ნავთობის გავრცელების მოდელირებისა და პროგნოზისათვის ჰიდროდინამიკური ბლოკის სახით [33]. [22, 23] – ში **HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model)** მოდელი ადაპტირებული იყო შავი ზღვის აუზისათვის $\approx 3,2$ კმ სივრცითი გარჩევისუნარიანობით, სადაც შემოთავაზებული იყო ზღვის ზედა ფენებში მზის რადიაციის გავრცელების ორიგინალური სქემა. მოდელი რეალიზებული იყო კლიმატური მონაცემების გამოყენებით. შეისწავლებოდა შავი ზღვის ზედაპირული ტემპერატურის მგრძობიარობა ზღვის წყლის სიმღვრივის მიმართ, ზედაპირული ფენის ტემპერატურული რეჟიმის ეფექტი ზღვის ზედაპირულ დინებებზე და სხვ. [20]-ში ოკეანის **DieCAST (The Dietrich Center for Air Sea Technology)** მოდელი (<http://www.ssc.erc.msstate.edu/DieCAST/>) ადაპტირებული იყო შავი ზღვისათვის, სადაც მოდელირებული იყო ზღვის დინამიკური პროცესები $1/12^{\circ}$ (5 საზღვაო მილი) ჰორიზონტალური გარჩევისუნარიანობით და 20 დონით ვერტიკალზე. გათვალისწინებული იყო მტკნარი წყლის შემოდინება 11 მდინარიდან და წყლის გაცვლა ხმელთაშუა ზღვასთან ბოსფორის სრუტის მეშვეობით. z-კოორდინატებში ჩაწერილ განტოლებათა სისტემის ინტეგრირება ხდებოდა კლიმატური მონაცემების გამოყენებით. საწყის $t = 0$ მომენტში ზღვა იყო უძრავი და მოიცემოდა ტემპერატურისა და მარილიანობის საშუალო წლიური კლიმატური მონაცემები. ნახ. 1-ზე ნაჩვენებია მოდელირებით მიღებული ზღვის დონისა და დენის წირების სურათი შავი ზღვი-

სათვის, საიდანაც კარგად ჩანს, რომ მოდელი კარგად ასახავს ზღვის ზოგადი ცირკულაციის ძირითად თავისებურებებს – ციკლონური ხასიათის ზღვის ძირითად დინებას, ციკლონურ გრიგალებს ზღვის ღია ნაწილში და ანტიციკლონურ სანაპირო გრიგალებს. შედარებამ დაკვირვების მონაცემებთან აჩვენა, რომ მოდელი რეალურად ასახავდა ცირკულაციის მთავარ თავისებურებებს. DieCAST მოდელი ჰიდროდინამიკური მოდულის სახით გამოიყენებოდა ნავთობის აფსკის მოდელირებისათვის შავ ზღვაში [34, 35]. როგორც [35] სტატიის ავტორები აღნიშნავენ მოდელში გამოყენებულმა ჰორიზონტალური და ვერტიკალური ტურბულენტური სიბლანტის კოეფიციენტების დაბალმა მნიშვნელობებმა და მე-4 რიგის აპროქსიმაციამ სივრცითი ცვლადების მიმართ უზრუნველყო მოდელის მიერ სანაპირო ანტიციკლონური გრიგალების შედარებით ზუსტი აღწერა.



ნახ.1. DieCAST მოდელის საფუძველზე მიღებული ზღვის დონეები და დენის წირები შავი ზღვის ზედაპირზე [20].

აღსანიშნავია შავი და აზოვის ზღვების ჰიდროდინამიკის რიცხვითი მოდელი, რომელიც დაფუძნებულია სფერულ კოორდინატთა სისტემაში ჩაწერილ სრულ განტოლებათა სისტემაზე [28]. ვერტიკალური კოორდინატის სახით გამოიყენება უგანზომილებო კოორდინატი σ

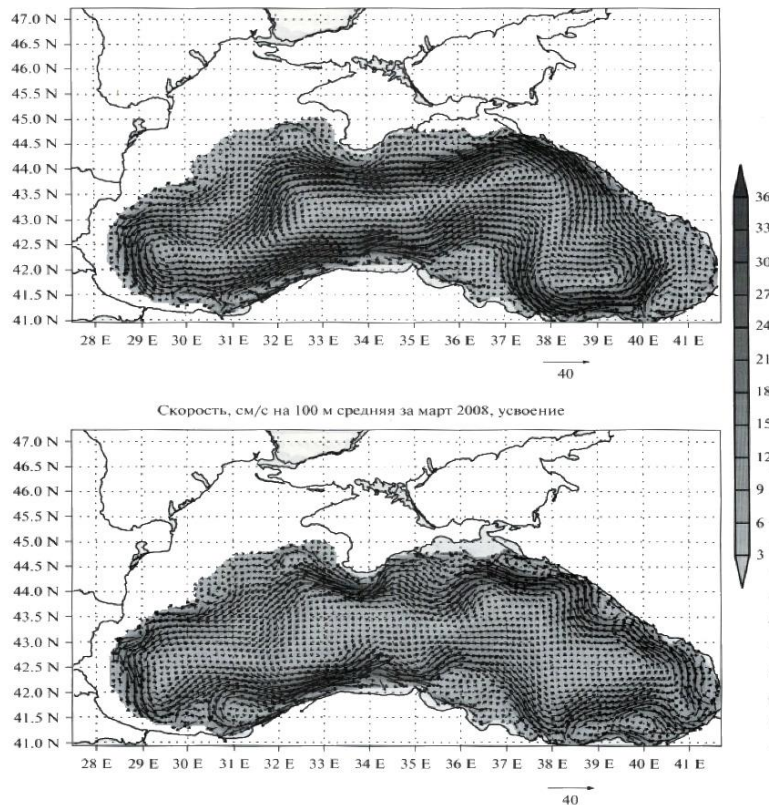
$$\sigma = (z - \zeta)/(H - \zeta), 0 \leq \zeta \leq 1,$$

სადაც z ვერტიკალურად ქვემოთ მიმართული კოორდინატია, H – ზღვის სიღრმეა, ζ ზღვის დონის გადახრაა შეუშფოთებელი მდგომარეობიდან.

მოდელს გააჩნია 4×4 კმ გარჩევისუნარიანობა ჰორიზონტებზე და 40 დონე ვერტიკალზე. მოდელში გამოყენებულია ტემპერატურისა და მარილიანობის ველების 4-განზომილებიანი ვარიაციული ინიციალიზაცია. ინიციალიზაციის ალგორითმი დაფუძნებულია გახლეჩის მეთოდებისა და შეუღლებულ განტოლებათა კომბინაციაზე. ჩატარებულმა გამოთვლებმა 2008 წლის რეალური ატმოსფერული ზემოქმედების პირობებში აჩვენა შავი ზღვის ძირითადი ჰიდროფიზიკური მახასიათებლების აღწერის ადეკვატურობა. გამოთვლები ჩატარებული იყო როგორც ტემპერატურისა და მარილიანობის ველების ასიმილაციის პირობებში, ასევე მის გარეშე. მნიშვნელოვანია, რომ როგორც ავტორები აღნიშნავენ, თერმობალანსური ველების ვარიაციული ინიციალიზაციის ჩართვა აუმჯობესებს მარილიანობისა და თერმული რეჟიმის ვერტიკალური სტრუქტურის აღწერას. თერმობალანსური ვე-

ლების ასიმილაციას მნიშვნელოვანი ცვლილებები შეაქვს ზღვის დონისა და ცირკულაციის სტრუქტურაში.

ნახ. 2-ზე ნაჩვენებია 2008 წლის მარტის შესაბამისი მოდელირებული საშუალო თვიური ცირკულაცია $z = 100$ მ – ზე ასიმილაციის გარეშე და ასიმილაციის გათვალისწინებით. ნახაზიდან ჩანს, რომ თერმოკალინური ველების ასიმილაციამ არსებითად შეცვალა ცირკულაციის სტრუქტურა ზღვის აღმოსავლეთ ნაწილში და სამხრეთ ნაპირის გასწვრივ. მონაცემთა ასიმილაციის გათვალისწინებით დინების გრიგალური სტრუქტურა უფრო გამოკვეთილია.

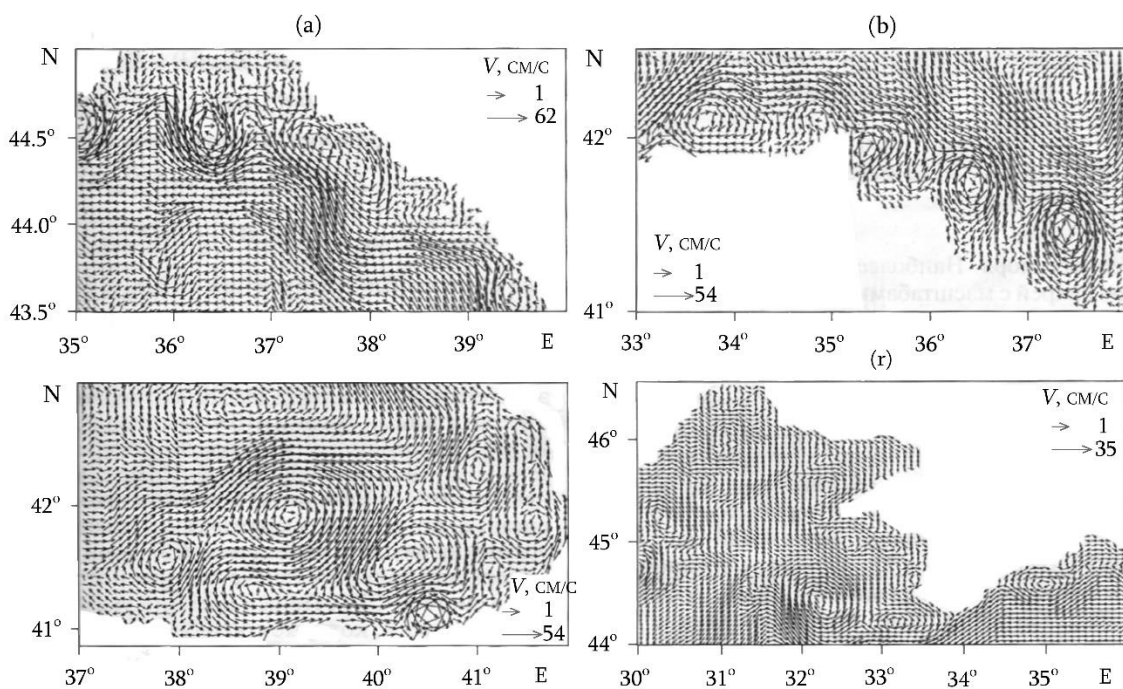


ნახ. 2. 2008 წლის მარტის საშუალოწლიური დინება $z = 100$ მ დონეზე ასიმილაციის გარეშე (ზემოთ) და ასიმილაციის გამოყენებით (ქვემოთ) [28].

[29]-ში შემოთავაზებული იყო შავი ზღვის ცირკულაციის რიცხვითი მოდელი გაუმჯობესებული გარჩევისუნარიანობით ზღვის სანაპირო ზონაში. მოდელის განტოლებათა სისტემა ანალოგიური იყო [28]-ის, ხოლო ამოცანის ამოსახსნელად გამოყენებული იყო სათვლელი ბადე ცვლადი სივრცითი ბიჯით, რომელიც იცვლებოდა 150 მ-დან სანაპირო ზონაში, 4.6 კმ-მდე ძირითად აკვატორიაში. ამან უზრუნველყო ერთდროულად შავი ზღვის ზოგადი ცირკულაციის და სანაპირო სუბმეზომასშტაბური გრიგალური სტრუქტურების აღწერა, რომელთა სივრცითი მასშტაბი 1-10 კმ-ია.

[30]-ში წარმოდგენილია შავი ზღვის ცირკულაციის მოდელირების შედეგები 1,6 კმ გარჩევისუნარიანობით მოდელში შემავალი კლიმატური მონაცემების გამოყენებით. მიღებულია ბათუმისა და სევასტოპოლის, ასევე ანატოლიის სანაპიროსთან ფორმირებული მეზომასშტაბური ანტიციკლონების თავისებურებები. ნაჩვენებია, რომ ჰორიზონტალური გარჩევისუნარიანობის გაუმჯობესებას პრინციპული მნიშვნელობა აქვს სანაპირო გრიგალური სტრუქტურების აღსაწერად.

[27] – ში შავი ზღვის ჰიდროფიზიკური ველები მოდელირებული იყო 1.64 x 1.64 კმ გარჩევისუნარიანობით 2006 წლის იანვარი-სექტემბრის პერიოდისათვის რეალური ატმოსფერული ზემოქმედების გათვალისწინებით. რიცხვითი ექსპერიმენტი ჩატარებული იყო ზღვის ჰიდროფიზიკის ინსტიტუტის (ქ. სევასტოპოლი) შავი ზღვის თერმოჰიდროდინამიკის რიცხვითი მოდელით [25, 26], რომელსაც საფუძვლად უდევს დეკარტის კოორდინატთა სისტემაში ჩაწერილი ოკეანის ჰიდროთერმოდინამიკის განტოლებათა სრული სისტემა ბუსინესკის და უკუმშვადი სითხის მიახლოებაში. ვერტიკალური ტურბულენტური სიბლანტისა და დიფუზიის კოეფიციენტების გამოასათვლელად გამოიყენებოდა ცნობილი მელორ-იამადის პარამეტრიზაციის მეთოდი. სტატიაში მოყვანილია ზღვის სხვადასხვა რეგიონებში მოდელირებული მეზომასშტაბური და სუბმეზომასშტაბური გრიგალების თავისებურებები, რომლებიც შედარებულია 5 კმ გარჩევისუნარიანი ბადის გამოყენებით მიღებულ მოდელირების შედეგებთან. ანალოგიური გამოკვლევები ჩატარებულია აგრეთვე [32]-ში.



ნახ.3. [27]- ში მოდელირებული დინების ველი ზედა სათვლელ დონეზე. (ა) – კავკასიის სანაპიროსთან, 11.04.2006; (ბ) – თურქეთის სანაპიროსთან, 14.08.2006; (გ) – ზღვის სამხრეთ აღმოსავლეთ ნაწილში, 18.09.2006; (რ) – ზღვის ჩრდილო-დასავლეთ შეღოფზე 07.08.2006.

ნახ. 3-ზე ნაჩვენებია დინების ვექტორული სურათები ზედა სათვლელ დონეზე შავი ზღვის სხვადასხვა რაიონებში. გრიგალური მეზომასშტაბური სტრუქტურების ფორმირება ინტენსიურია კავკასიისა და ანატოლიის სანაპიროსთან. ნახაზიდან ჩანს, რომ უმეტესად ჭარბობს ანტიციკლონური გრიგალები. ავტორთა შეფასებით ასეთი გრიგალების სიცოცხლის ხანგრძლივობა 15-40 დღეა. საშუალოდ დინების სიჩქარე 30-35 სმ/წმ-ია. კავკასიის სანაპიროსთან გრიგალური სტრუქტურები დაიკვირვება 100 მ სიღრმემდე, ხოლო თურქეთის სანაპიროსთან – 300 მ სიღრმემდე.

გასული საუკუნის 90-იანი წლებიდან მ. ნოდისას სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტში განხორციელდა [10] მოდელის სრულყოფა ძირითადი ფიზიკური ფაქტორების გათვალისწინებით და ერთდროულად მოდელის სივრცით გარჩევისუნარიანობის გაზრდა როგორც ჰორიზონტალური (5 კმ ჰორიზონტალური ბიჯით), ასევე ვერტიკალური მიმართულებით

(32 სათვლელი დონე). მოდელის თანამედროვე ვერსია ითვალისწინებს შემდეგ ძირითად ფაქტორებს: ფსკერის კვაზირეალური რელიეფი და ზღვის სანაპირო ხაზის კონფიგურაცია, ატმოსფერული ქარისა და თერმოხალინური ზემოქმედება, მზის მოკლეტალღოვანი რადიაციის შთანთქმა ზღვის ზედა ფენის მიერ, წყლის გაცვლა მარმარილოს ზღვასთან ბოსფორის დინებათა მეშვეობით, მდ. დუნაის ჩამონადენი, ტურბულენტური სიბლანტისა და დიფუზიის კოეფიციენტების სივრცით-დროითი ცვალებადობა. მოდელის საფუძველზე ჩატარებულმა გამოთვლითმა ექსპერიმენტებმა შავი ზღვის აუზის დამახასიათებელი კლიმატური ქარის ტიპების მონაცვლეობის პირობებში აჩვენა, რომ ზედაპირული ცირკულაცია მუდმივ ტრანსფორმაციას განიცდის მთელი წლის განმავლობაში. შავი ზღვის ზემოთ მოქმედი ძლიერი ატმოსფერული ქარები გამაგლუვებელ გავლენას ახდენენ ზღვის ზედაპირულ დინებაზე და გრიგალწარმოქმნის პროცესები ნაკლებად ინტენსიურია. ასეთ შემთხვევაში ზღვის დინების სიჩქარემ შეიძლება 100 მ/წმ – ს გადააჭარბოს [37, 38].

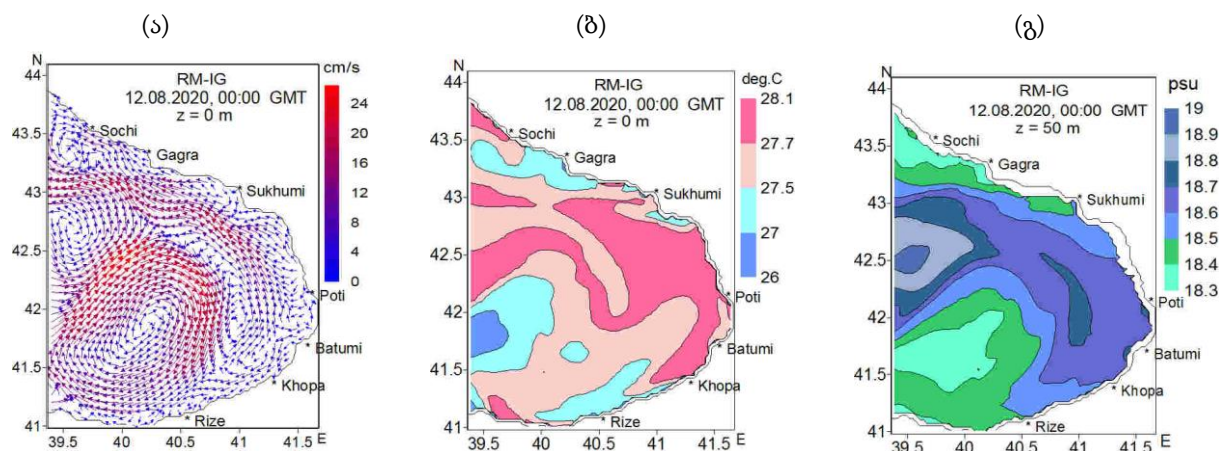
მაღალი გარჩევისუნარიანი და ფიზიკური თვალსაზრისით სრულყოფილი ზღვის დინამიკის მოდელებისა და დაკვირვების მონაცემთა ასიმულაციის მეთოდების შემუშავებამ, დისტანციური (თანამგზავრული), კონტაქტური დაკვირვებისა და ტელეკომუნიკაციური ტექნოლოგიების განვითარებამ შექმნა მყარი საფუძველი, რათა გასული საუკუნის 90-იანი წლებიდან შემუშავებულიყო ევროპის ცალკეული ზღვებისათვის მოკლევადიანი პროგნოზული სისტემები, ისეთი როგორც ამინდის პროგნოზებია [39, 40]. მიმდინარე საუკუნის დასაწყისის შავი ზღვის ოპერატიული ოკეანოგრაფიის უდიდესი მიღწევაა შავი ზღვის დიაგნოზისა და პროგნოზის ოპერატიული სისტემის შემუშავება [41, 42], რაც განხორციელდა ევროკავშირის საერთაშორისო პროექტების ARENA და ECOOP ფარგლებში. სისტემა მოიცავდა დისტანციურ (თანამგზავრულ) და კონტაქტურ დაკვირვებებს, დაკვირვების მონაცემთა შეკრებასა და დამუშავებას, მონაცემთა ასიმულაციას, ატმოსფეროს დინამიკის რეგიონულ მოდელს, ზღვის ჰიდროფიზიკის ინსტიტუტის შავი ზღვის დინამიკის მათემატიკურ მოდელს მთლიანად შავი ზღვის აუზის მასშტაბით და მაღალი გარჩევისუნარიანი მოდელებს ზღვის ცალკეული სანაპირო რეგიონებისათვის. აღნიშნული სისტემის ერთ-ერთი კომპონენტი გახდა შავი ზღვის რეგიონული პროგნოზის სისტემა, რომელიც მოიცავს შავი ზღვის საქართველოს სექტორსა და მიმდებარე აკვატორიას [43-46]. მოდელირებისა და პროგნოზის არე შემოსაზღვრულია კავკასიისა და თურქეთის სანაპირო ხაზით და ა. გ. 39.08⁰ -ზე გამავალი თხევადი პირობითი საზღვრით. რეგიონული სისტემის ძირითადი ბირთვია შავი ზღვის დინამიკის რეგიონული მოდელი 1 კმ სივრცითი გარჩევისუნარიანობით, რომელიც მიღებულია შავი ზღვის აუზის მასშტაბის დინამიკის რიცხვითი მოდელის [37, 38] ადაპტირების გზით ზღვის განაპირა აღმოსავლეთ აკვატორიისათვის და სივრცითი გარჩევისუნარიანობის გაზრდით 5 კმ -დან 1 კმ-დე. ზემოთ აღნიშნული ევროკავშირის პროექტების ფარგლებში შავი ზღვის დინამიკის რეგიონული მოდელის სათვლელი ბადე ჩადგმული იქნა ზღვის ჰიდროფიზიკის ინსტიტუტის ზღვის აუზის მასშტაბის მოდელში 5 კმ გარჩევისუნარიანობით, რამაც უზრუნველყო ზღვის აუზის მასშტაბის ჰიდროთერმოდინამიკური პროცესების ზემოქმედების გათვალისწინება რეგიონულ პროცესებზე პირობითი თხევადი საზღვრის მეშვეობით (one-way nesting method). რეგიონული მოდელი ითვალისწინებს ისეთ ძირითად ფაქტორებს, როგორცაა ატმოსფერული ქარის-მიერი და თერმოხალინური ზემოქმედება, მზის მოკლეტალღოვანი რადიაციის შთანთქმა ზღვის ზედა ფენის მიერ, ზღვის ფსკერის რელიეფი და ნაპირების კონფიგურაცია, საქართ-

ველოს ძირითად მდინარეთა ჩადინება და სხვ. რეგიონულ მოდელთან შეწყვილებულია მინარევების გავრცელების ორი და სამგანზომილებიანი ადვექცია-დიფუზიური მოდელები.

რეგიონული საზღვაო პროგნოზის სისტემა, რომელიც ეფუძნება თანამედროვე მათემატიკური მოდელირების მეთოდების გამოყენებას, საშუალებას იძლევა მოდელში შემავალი რეალური მონაცემების შემთხვევაში გამოვთვალოთ შავი ზღვის საქართველოს სექტორსა და მიმდებარე აკვატორიაში ძირითადი ჰიდროფიზიკური ველების – ზღვის დინების, ტემპერატურისა და მარილიანობის 3-დღიანი პროგნოზი 1 კმ გარჩევისუნარიანობით, ხოლო საგანგებო სიტუაციების დროს ვიწინასწარმეტყველოთ აგრეთვე ზღვაში ჩაღვრილი ნავთობისა და სხვა მინარევების გავრცელების არეები და კონცენტრაციები.

საზღვაო პროგნოზების გამოთვლისათვის საჭირო ყველა მონაცემი ციფრული მასივების სახით მიიღებოდა ყოველდღიურად 2010-2021 წწ.-ში ინტერნეტის საშუალებით 5 კმ ბიჯის მქონე ბადის კვანძებში. ჩვენს მიერ შემუშავებული პროგრამული უზრუნველყოფის საშუალებით ხდებოდა მიღებული მასივების გადაყვანა 1 კმ ბიჯის მქონე ბადის კვანძებში და მათი გამოყენება საწყისი და სასაზღვრო პირობების სახით ზღვის დინამიკის რეგიონული მოდელის განტოლებათა სისტემის ინტეგრირებისათვის. 2022 წლიდან შეწყდა ამ მონაცემთა მიღება გარკვეული ტექნიკური სირთულეების გამო.

მ. ნოდისას სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტის ზღვის დინამიკის რეგიონული მოდელის საფუძველზე ჩატარებულმა მრავალრიცხოვანმა გამოთვლებმა რეალური ატმოსფერული ზემოქმედების გათვალისწინებით აჩვენა, რომ შავი ზღვის საქართველოს აკვატორია ხასიათდება ჰიდროფიზიკური პროცესების მნიშვნელოვანი ცვალებადობით, რასაც თან ახლავს მეზომასშტაბური და სუბმეზომასშტაბური გრიგალური სტრუქტურების ფორმირება [43-54]. თბილ სეზონში ხშირად ფორმირდება ბათუმის ანტიციკლონური გრიგალი, რომელიც მნიშვნელოვან როლს თამაშობს თერმობალნური ველების განაწილებაზე, განსაკუთრებით კი მარილიანობის ველზე. დინების ველის სტრუქტურა ზღვის ზედა 15-20 მეტრის ფენაში მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ატმოსფერული ქარის ზემოქმედებაზე. ძლიერი ქარი გამაგლუვებელ გავლენას ახდენს ზღვის დინებაზე და აფერხებს მეზომასშტაბური და სუბმეზომასშტაბური გრიგალების ფორმირებას, ხოლო სუსტი ქარის პირობებში დაიკვირვება გრიგალური სტრუქტურების ინტენსიფიკაცია. ასეთი სტრუქტურები მნიშვნელოვან გავლენას ახდენენ ზღვაში მოხვედრილი ნავთობისა და სხვა მინარევების გავრცელების პროცესზე.



ნახ. 4. მ. ნოდისას სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტის ზღვის დინამიკის რეგიონული მოდელით მიღებული ზედაპირული დინება (ა), ტემპერატურა (ბ) და მარილიანობა $z = 50$ მ ჰორიზონტზე (გ) 2020 წლის 12 აგვისტოს, 00:00 GMT.

ზღვის დინამიკის რეგიონული მოდელის საფუძველზე ჩატარებული გამოთვლების შედეგების შედარებამ ჩვენს ხელთ არსებულ დაკვირვების მონაცემებთან აჩვენა, რომ მოდელი რეალურად აღწერს შავი ზღვის განაპირა აღმოსავლეთ ნაწილში განვითარებული ჰიდროფიზიკური პროცესების თავისებურებებს [43, 46, 47].

ილუსტრაციის მიზნით ნახ.4-ზე ნაჩვენებია რეგიონული მოდელის საფუძველზე გამოთვლილი ზღვის ზედაპირული დინების, ტემპერატურისა და მარილიანობის სურათები, რომლებიც შეესაბამებიან 2020 წლის 12 აგვისტოს. სურათები ნაჩვენებია პროგნოზის საწყისი მომენტიდან 72 საათის შემდეგ. პროგნოზული ინტერვალია 9-12 აგვისტო, 2020. ნახ, 4ა -ზე კარგად ჩანს ბათუმის ანტიციკლონური გრივალი, რომელიც რეგიონული ცირკულაციის მთავარი ელემენტია აღნიშნული დღისათვის. დაიკვირვება აგრეთვე მცირე ზომის გრივალური სტრუქტურების ფორმირებაც.

დასკვნა

წინამდებარე სტატია მოკლედ მიმოიხილავს შავი ზღვის ჰიდროთერმოდინამიკური პროცესების კვლევის ისტორიას რიცხვითი მოდელების გამოყენებით, დაწყებულს გასული საუკუნის 60-70-იანი წლებიდან. გამოთვლითი ტექნიკის პროგრესმა, რაც ბოლო ათეულ წლებში განხორციელდა, დიდი სტიმული მისცა მაღალი გარჩევისუნარიანი მოდელების სიტემების განვითარებას, რამაც უფრო სრულყოფილი გახადა ჩვენი ცოდნა შავ ზღვაში მიმდინარე ჰიდროდინამიკური პროცესების შესახებ და საფუძველი ჩაუყარა ამ პროცესების საზღვაო პროგნოზის მეთოდების შემუშავებას, ისეთის როგორც ამინდის პროგნოზებია. შავი ზღვის საქართველოს სექტორისათვის შემუშავებული რეგიონული საზღვაო პროგნოზის სისტემა შესაძლებლობას იძლევა გამოვთვალოთ ძირითადი ჰიდროფიზიკური ველების მოკლევადიანი პროგნოზი 1 კმ სივრცითი გარჩევისუნარიანობით რეალური მონაცემების შემთხვევაში და ვიწინასწარმეტყველოთ ანთროპოგენური მინარევების გავრცელების ზონები და კონცენტრაციები. ამჟამად, დაგეგმილია აღნიშნული სისტემის შემდგომი განვითარება გარჩევისუნარიანობის გაზრდით ბათუმი-ფოთი-ანაკლიის სანაპირო წყლებში.

მადლიერება. კვლევა განხორციელდა შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის მხარდაჭერით [გრანტის ნომერი FR-22-365].

ლიტერატურა – References – Литература

1. Сорокин Ю. И. Черное море, Москва, Наука, 1982, 217 с.
2. История Черного моря. <https://anapacity.com/chernoe-more/istoriya-chernogo-morya.html>
3. Gülden Erkut, Stephen Mitchel. The Black Sea: past, present and future. Published by: British Institute at Ankara. 2007. <https://www.jstor.org/stable/10.18866/j.ctt1n7qjwz>
4. Станев Е., Трухчев Д., Русенов В. Циркуляция вод и численное моделирование течений Черного моря. София, университетское издательство “Климент охридски“, 1988, 220 с.
5. Кордзадзе А. А. Математическое моделирование динамики морских течений (теория, алгоритмы, численные эксперименты). Москва, ОВМ АН СССР, 1989, 128 с.
6. Марчук Г. И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана. Ленинград, 1974, 303 с.
7. Саркисян А. С., Джиоев Т. З. Численная модель и расчет течений в Черном море. Метеорология и гидрология, № 3, 1974, с. 70-76.
8. Джиоев Т. З., Саркисян А. С. Прогностические расчеты течений в Черном море. Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, т.12, № 2, 1976, с. 217-223.

9. Саркисян А. С. Основы теории расчета океанических течений. Ленинград, 1966, 123 с.
10. Марчук Г. И., Кордзадзе А. А., Скиба Ю. Н. Расчет основных гидрологических полей Черного моря на основе метода расщепления. Изв. РАН, Физика атмосферы и океана, т.11, №4, 1975, с. 379-393.
11. Саркисян А. С., Залесный В. Б., Дианский Н. А., Ибраев Р. А., Кузин В. И., Мошинкин Е. В., Семенов Е. В., Тамсалу Р., Яковлев Н. Г. Математические модели циркуляции океанов и морей. Современные проблемы Вычислительной математики и математического моделирования. т. 2, Математическое моделирование, Москва, Наука, 2005, с. 176-278.
12. Girgvliani A. Circulation of seasonal variability of the hydrological characteristics of the Black Sea. J. Georgian Geophys. Soc., v. 3b, 1998, pp.17-26.
13. Girgvliani A. The Coriolis force parameterization in numerical model of the Black Sea dynamics. J. Georgian Geophys. Soc., v.4b, 1999, pp.15-27.
14. Марчук Г. И., Саркисян А. С. Математическое моделирование циркуляции океана. Москва, "наука", 1988, 302 с.
15. Книпович Н. М. Гидрологические исследования в Черном море. Тр. Азово-Черноморской научно-промысловой экспедиции, вып. 10, 1932, 272 с.
16. Зацепин А. Г. Гидродинамика Черного моря: Бассейновая циркуляция, мезомасштабные и субмезомасштабные вихри. 132 с. http://d33.infospace.ru/d33_conf/tarusa2014/pdf/Zatsepin1.pdf.
17. Зацепин А. Г., Кондрашов А. А., Корж А. О. и др. Субмезомасштабные вихри на Кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы. Океанология, т. 51, № 4, 2011, с. 592-605.
18. Oguz T, Malalnote-Rizzoli P., Aubrey D. Wind and thermohaline circulation of the Black Sea driven by yearly mean climatological forcing. J. Geophys. Res., vol. 100, No. C4, 1995, pp. 6845-6863.
19. Oguz T, Malalnote-Rizzoli P. Seasonal variability of wind and thermohaline –driven circulation in the Black Sea: Modeling studies. J. Geophys. Research., 101(C7), 1996, 16551-16569. DOI: 10.1029/96JC01093
20. Staneva J. V., Dietrich D. E., Stanev E. V., Bouman M. J. Mesoscale circulation in the Black Sea: New results from DieCAST model simulation. J. Mar. Sys., 31, 2001, pp. 137-157.
21. Stanev E. V. Understanding Black Sea dynamics: Overview of recent numerical modeling. Oceanography, v. 18, № 2, 2005, pp. 52-71.
22. Kara A. B., Wallcraft A. J., Hurlburt H. E. Sea surface temperature sensitivity to water turbidity from simulations of the turbid Black Sea using HYCOM. J. Physic Oceanography, 35(1), 2005, pp. 33-54 . <https://doi.org/10.1175/JPO-2656.1>
23. Kara A. B., Wallcraft A. J., Hurlburt H. E. A new solar radiation penetration scheme for use in ocean mixed layer studies: An application to the Black Sea a fine resolution Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM). J. Phys. Oceanography, 35 (1), 2005, pp. 13-32. <https://doi.org/10.1175/JPO2677.1>
24. Demyshev S. G., Dymova O. A. High resolution modeling of the Black Sea circulation. Ecological safety of coastal and shelf zones and comprehensive use of shelf resources. Collected scientific papers. NAS of Ukraine, 2(25), 2011, pp. 114-134 (in Russian).
25. Демьшев С. Г. Численный прогностический расчет течений в Черном море с высоким горизонтальным разрешением. Морской гидрофизический журнал, № 1, 2011, с. 36-47.
26. Демьшев С. Г. Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море. Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т.48, № 1, 2012, с.137-149.
27. Демьшев С. Г., Дымова О. А. Численный анализ мезомасштабных особенностей циркуляции в прибрежной зоне Черного моря. Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т.49, № 6, 2013, с.655-663.
28. Zalesny V. B., Gusev A. V., Moshonkin S. N. Numerical model of the Hydrothermodynamics of the Black Sea and the Sea of Azov with variational initialization of temperature and salinity. Izvestiya RAS, Atmospheric and Oceanic Physics, 49 (6), 2013, pp. 699-716. DOI.10.7868/S000235151306014X.
29. Zalesny V. B., Gusev A. V., Агошков В. И. Моделирование циркуляции Черного моря с высоким разрешением прибрежной зоны. Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т.52, № 3, 2016, с.316-333.

30. Demyshev S. G., Evstigneeva N. A. Numerical experiment on modeling climatic fields on the northwestern shelf of the Black Sea in winter and summer seasons. *Morskoi Gidrofizicheskii Journal*, № 2, 2012, pp. 18-36 (in Russian).
31. Grigoriev A. V., Zatsepin A. G. Numerical modeling of water dynamics of Russian zone of the Black Sea within the framework of operational tasks. *J. Georgian Geophys. Soc.*, v. 16b, 2013, pp.138-157.
32. Dymova O. High-resolving simulation of the Black Sea circulation. In: Ozhan E(ed) *Proceedings of the 13th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation*, 2017, 31 Oct-04 Nov 2017, Melliecha, Malta. 2: pp. 1203-1213. <https://www.medcoast.net/modul/index/menu/Proceedings/36>
33. Korotenko K. A., Mamedov R. M., Mooers C. N. Prediction of the transport and dispersal of oil in the south Caspian Sea resulting from blowouts. *Environ. Fluid Mech.*, 1(4), 2002, pp. 383 – 414. DOI:10.1023/A:1015785909615
34. Korotenko K. A. Predicting the behavior of an oil spill in The Black Sea resulting from accidental offshore deep water blowout. *Journal of Sustainable Energy Engineering*, 6 (1), 2018, 48-83. <https://doi.org/10.7569/jsee.2018.629501>
35. Коротенко К. А., Дитрих Д. Е., Боуман Дж. Моделирование циркуляции и перенос нефтяных пятен в Черном море. *Океанология*, т. 43, № 3, 2003, с. 367-378.
36. Дианский Н. А., Фомин В. В., Жохова Н. В., Коршенко А. Н. Расчет течений и распространения загрязнения в прибрежных водах большого Сочи. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т.49, № 6, 2013, с. 664-675.
37. Кордзадзе А. А., Деметрашвили Д. И., Сурмава А. А. О реакции гидрологического режима Черного моря на изменчивость атмосферных процессов. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и рациональное использование ресурсов шельфа. Севастополь, ЕКОСИ-Гидрофизика, вып. 10, 2004, с. 265-277.
38. Кордзадзе А. А., Деметрашвили Д. И., Сурмава А. А. Численное моделирование гидрофизических полей Черного моря в условиях чередования атмосферных циркуляционных процессов. *Изв. РАН, Физика атмосферы и океана*, т.44, №2, 2008, с. 227-238.
39. Pinardi N., Allen I., Demirov E., De Mey P., Korres G., et al., The Mediterranean ocean forecasting system: first phase of implementation (1998-2001). *Annales Geophysicae*, 21(1), 21(1), 2003, pp.3-20. DOI: 10.5194/adgeo-21-3-2003.Source: OAI.
40. She J., Meier HEM, Dareci M., Gominge P., Huess V., Kouts T., Reissmann JH., Tuomi L. Baltic Sea operational oceanography – a stimulant for regional earth system research. *Research Frontiers in Earth Science*, vol.8, № 7, 2020, pp. 1-14. doi: 10.3389/feart.2020.00007.
41. Korotaev G. K., Oguz T., Dorofeyev V. L., Demyshev S. G., Kubryakov A. I., Ratner Yu. B. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system. *Ocean Science*, 7, 2011, pp.629-649. doi: 10.5194/os-7-629-2011/.
42. Kubryakov A. I., Korotaev G. K., Dorofeev V. L., Ratner Y. B., Palazov A., Valchev N., Malciu V., Matescu R., Oguz T. Black Sea coastal forecasting system. *Ocean Science*, 8, 2012, pp.183-196.
43. Kordzadze A. A., Demetrashvili D. I. Operational forecast of hydrophysical fields in the Georgian Black Sea coastal zone within the ECOOP. *Ocean Science*, 7, 2011, pp. 793-803. www.ocean-sci.net/7/793/2011/.
44. Kordzadze A. A., Demetrashvili D. I. Coastal forecasting system for the easternmost part of the Black Sea. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 12, 2012, pp. 471-477. www.trjfas.org.
45. Kordzadze A. A., Demetrashvili D. I. Development of the Black Sea regional forecasting system for its easternmost part with inclusion of oil spill transport forecast. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, v.8, № 3, 2014, pp.40-47.
46. კორძაძე ა., დემეტრაშვილი დ. შავი ზღვის ოკეანოგრაფია წარსულში და თანამედროვე ეტაპზე. თბილის სახელმწიფო უნივერსიტეტის გამომცემლობა, 2017, 187 გვ.
47. Demetrashvili, D., Kukhalashvili, V. High-resolving modeling and forecast of regional dynamic and transport processes in the easternmost Black Sea basin. In: *Proceedings of the International*

- Conference on Geosciences (GEOLINKS 2019), 26-29 March, Athens, Greece, Book 3, v.1, pp. 99-107 (2019).
48. Demetrashvili D., Kukhalashvili V., Surmava A., Kvaratskhelia D. Modeling of variability of the regional dynamic processes developed during 2017-2019 in the easternmost part of the Black Sea. International Conference on Geosciences GEOLINKS-2020, Plovdiv, Bulgaria, 23-26 March 2020. Conference proceedings, pp. 111-120.
 49. Demetrashvili D., Kukhalashvili V., Kvaratskhelia D., Surmava A. Marine forecast for the easternmost part of the Black Sea. Conference Proceedings GEOLINKS -2021, Book 1, Volume 3, 17-18 May 2021, 2021, pp. 453-460.
 50. Demetrashvili D., Kukhalashvili V., Kvaratskhelia D. Numerical study of some peculiarities of hydrological mode for the South Eastern part of the Black Sea (2010-2021). Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences, v.16, № 4, 2022, pp. 47-53.
 51. დემეტრაშვილი დ. საზღვაო პროგნოზის სისტემა და მისი განვითარების პერსპექტივები შავი ზღვის საქართველოს სექტორისათვის. მ. ნოდიას სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტის შრომები, ტ. LXXVI, 2022, გვ. 40-51.
 52. Demetrashvili D, Kukhalashvili V., Kvaratskhelia D. Numerical study of the circulation and its contribution to the oil slick transport in the easternmost part of the Black Sea. Environmental Science and Pollution Research (ESPR), Preprint, April, 2023, 11 p. DOI:10.21203/rs.3.rs-2801090/v1
 53. Demetrashvili D., Kukhalashvili V., Kvaratskhelia D. Numerical study of variability of hydrological regime for the southeastern part of the Black Sea (2010-2021). Journal of the Georgian Geophysical Society, v. 26(1), 2023, pp. 42-48. DOI: <https://doi.org/10.60131/ggs.1.2023.6960>
 54. Demetrashvili D., Kukhalashvili V., Kvaratskhelia D. Modeling and forecasting of mesoscale circulation and oil pollution transport in the southeastern Black Sea. Journal of Environmental Protection and Ecology, v. 25, № 1, 2024, pp. 42-52.

შავი ზღვის ჰიდროდინამიკის რიცხვითი მოდელირება: ისტორია და თანამედროვე მდგომარეობა

დემეტრაშვილი დ.

რეზიუმე

სტატიაში განიხილება შავი ზღვის ჰიდროთერმოდინამიკური პროცესების შესწავლის ისტორია და თანამედროვე მდგომარეობა რიცხვითი მოდელების საშუალებით, რომელთა ინტენსიური შემუშავება და გამოყენება დაიწყო გასული საუკუნის 60-70-იანი წლებიდან. დაახლოებით უკანასკნელ 3 ათეულ წელიწადში გამოთვლი ტექნიკის პროგრესმა დიდი ბიძგი მისცა მაღალი გარჩევისუნარიანი და ფიზიკურად სრულყოფილი შავი ზღვის დინამიკის მოდელების შემუშავებას, რომელთაც უნარი აქვთ დიდი სიზუსტით ასახონ ჰიდროთერმოდინამიკური პროცესების განვითარება როგორც მთლიანად აუზის მასშტაბით, ასევე რეგიონულ არეებში. მოდელების მაღალი გარჩევისუნარიანობა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია შავი ზღვის სანაპირო/შელფურ ზონაში, სადაც ხშირად ვითარდებიან მეზომასშტაბური და სუბმეზომასშტაბური გრიგალური სტრუქტურები. მნიშვნელოვანი ყურადღება ეთმობა მ. ნოდიას სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტის ზღვისა და ატმოსფეროს დინამიკის მოდელირების სექტორში შემუშავებული მაღალი გარჩევისუნარიანი ზღვის დინამიკის რეგიონული მოდელის საფუძველზე ჩატარებულ კვლევებს შავი ზღვის საქართველოს სექტორში.

საკვანძო სიტყვები: ზღვის ცირკულაცია, ატმოსფერული ზემოქმედება, განტოლებათა სისტემა, რიცხვითი მეთოდი.

NUMERICAL MODELING OF BLACK SEA HYDRODYNAMICS: HISTORY AND CURRENT STATE

Demetrashvili D.

Abstract

The article discusses the history and current state of the study of the hydrothermodynamic processes of the Black Sea by means of numerical models, the intensive development and use of which began in the 60-70s of the last century. In the last three decades, the progress of computational techniques has given a great impetus in the development of high-resolution and physically perfect Black Sea dynamics models, which are capable of accurately reflecting the development of hydrothermodynamic processes both in a basin-scale and regional areas. The high-resolution of the models is especially important in the coastal/shelf areas of the Black Sea, where mesoscale and submesoscale eddy structures often develop. Significant attention is paid to the research conducted in the Georgian sector of the Black Sea on the basis of the high-resolution regional model of the sea dynamics developed in the Modeling Sector of the Sea and Atmosphere Dynamics of the M. Nodia Institute of Geophysics.

Key words: sea circulation, atmospheric forcing, system of equations, numerical method.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ЧЕРНОГО МОРЯ: ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Деметрашвили Д.

Реферат

В статье рассматривается история и современное состояние изучения гидротермодинамических процессов Черного моря с помощью численных моделей, интенсивное развитие и использование которых началось в 60-70-х годах прошлого столетия. В последние три десятилетия прогресс вычислительной техники дал большой толчок развитию физически совершенных моделей динамики Черного моря высокого разрешения, способных точно отражать развитие гидротермодинамических процессов как в общебассейновом масштабе, так и в региональных районах. Высокое разрешение моделей особенно важно в прибрежных/шельфовых районах Черного моря, где часто развиваются мезомасштабные и субмезомасштабные вихревые структуры. Значительное внимание уделено исследованиям, проводимым в грузинском секторе Черного моря на основе региональной модели динамики моря высокого разрешения, разработанной в секторе моделирования динамики моря и атмосферы Института геофизики им. М. Нодиа.

Ключевые слова: циркуляция моря, атмосферное воздействие, система уравнений, численный метод.