

გლობალური დათბობის ფიზიკური საწყისები

ადეიშვილი თეიმურაზ, ბერძენიშვილი ნანა

საქართველოს ეკოლოგიურ მეცნიერებათა აკადემია

აბსტრაქტი. ნაშრომი ეძღვნება დედამიწის კლიმატის დათბობის თანამედროვე პრობლემების ზოგადი კანონზომიერებების მიმოხილვას. ის მოიცავს მთლიანად დედამიწის კლიმატის რყევებს დროთა განმავლობაში, რომელიც გამოიხატება ამინდის პარამეტრების სტატისტიკურად საიმედო გადახრებში ხანგრძლივი პერიოდის (მილიონამდე წლების) მანძილზე.

საკვანძო სიტყვები. ანთროპოგენური ფაქტორი, გლობალური დათბობა, სათბურის აირები, გლობალური ტემპერატურა, მყინვართა დნობა, მზის ნათობა, მზის აქტიურობა, კლიმატური მოდელები.

1. შესავალი

გლობალური დათბობა წარმოადგენს დედამიწის კლიმატური სისტემის საშუალო ტემპერატურის გრძელვადიან მომატებას. ეს პროცესი საუკუნეებია, რაც მიმდინარეობს და სპეციალისტთა უპირატესად დიდი ნაწილის აზრით მისი გამომწვევი ძირითადი მიზეზებია ადამიანის საქმიანობა - ანთროპოგენური ფაქტორი [1].

1850 წლიდან ჰაერის ტემპერატურა ყოველ ათწლეულში იყო წინა ათწლეულზე მაღალი [2]. 1750-1800 წლებში ადამიანი პასუხისმგებელია საშუალო გლობალური ტემპერატურის $0,8-1,2^{\circ}\text{C}$ - ით მატებაზე. შემდგომი მატების ალბათური სიდიდე XXI საუკუნეში კლიმატური მოდელების საფუძველზე შეადგენს $0,3-1,7^{\circ}\text{C}$ სათბურის აირების ემისიის მინიმალური რაოდენობისათვის, ხოლო $2,6-4,8^{\circ}\text{C}$ - მაქსიმალური სცენარისათვის [3]. გლობალური დათბობის შედეგები მოიცავს ზღვის დონის აწევას, ნალექების რეგიონალურ ცვლილებებს, უფრო ხშირ ექსტრემალურ ამინდის მოვლენებს, მაგალითად, სიციხე და უდაბნოების გაფართოება. როგორც გაეროს ვებგვერდები უჩვენებს, არსებობს იმის საგანგაშო მონაცემები, რომ საზღვრულ მარჯვენა მხარეს გადამეტება, რომელსაც მიყვავართ ეკოსისტემებში და ჩვენი პლანეტის კლიმატურ სისტემებში შეუქცევად ცვლილებებამდე, უკვე მოხდა.

1988 წელს გაეროს მონაწილეობით ობიექტური სამეცნიერო მონაცემების მოპოვების მიზნით შეიქმნა სამთავრობათაშორისი ჯგუფი კლიმატის ცვლილებების ექსპერტთა (IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change) მონაწილეობით (კცესჯ), რომელიც მუშაობდა გაერთიანებული ერების ორგანიზაციის ეგიდით.

შემდგომმა წლებმა განაპირობა გლობალური დათბობის მიზეზთა შეფასებაში კონსენსუსის მიღწევა. კცესჯ - ის მეოთხე შეფასებით მოხსენებაში (2007წ) ხაზი გაესვა იმის 90%-იან ალბათობას, რომ ტემპერატურის ცვლილების დიდი ნაწილი გამოწვეულია ადამიანის საქმიანობის შედეგად სათბურის აირების კონცენტრაციის მატებით. თავის მეხუთე მოხსენებაში (2014წ) კლიმატის ცვლილების სამთავრობათაშორისო ჯგუფმა განაცხადა: „დადგინდა ადამიანის გავლენა ატმოსფეროსა და ოკეანის ტემპერატურის მატებაზე, გლო-

ბალური ჰიდროლოგიური ციკლის ცვლილებაზე, თოვლისა და ყინულის რაოდენობის შემცირებაზე, ზღვის გლობალური საშუალო დონის მომატებაზე და ზოგიერთ ექსტრემალურ კლიმატურ ცვლილებებზე. ერთობ ალბათურია, რომ ადამიანის გავლენა იყო XX საუკუნის შუა ხანებიდან დამზერილი დათბობის მიზეზი [4].

2021 და 2022 წლებში გამოვიდა კვლევა - ის მეექვსე შეფასებითი მოხსენება. მისი მომზადების ფარგლებში 2018 წელს გამოსულ სპეციალურ მოხსენებაში „გლობალური დათბობა 1,5° C“ მსოფლიოს მასშტაბით ფართოდ გაშუქდა მასობრივი ინფორმაციის საშუალებებში.

როგორც **ბ.სანტერის** პუბლიკაციაშია ნაჩვენები 2016 წლიდან დამაჯერებლობის ხარისხმა მასში, რომ კლიმატის ცვლილება გამოწვეულია ადამიანის საქმიანობით, ე.წ. „ოქროს სტანდარტს (99,9999%)“ მიაღწია.

გლობალური ტემპერატურის ზრდის შედეგს წარმოადგენს ზღვის დონის მატება, ნალექების რაოდენობის ცვლილება და უდაბნოების ზრდა. დათბობის სხვა შედეგებს მიეკუთვნება სიციხის, გვალვებისა და თავსხმა წვიმების სიხშირის ზრდა, ოკეანის დაჟანგვა, ტემპერატურული რეჟიმის ცვლილების გამო ბიოლოგიური სახეობების გადაშენება. კაცობრიობისათვის მნიშვნელოვან შედეგებს წარმოადგენს სასურსათო უსაფრთხოება, რომელიც შეიძლება შეიქმნას მოსავლიანობაზე ნეგატიური გავლენის გამო (განსაკუთრებით ეს შეეხება აზიასა და აფრიკას) და ზღვის დონის მომატებით ადამიანთა არსებობის ადგილების დაკარგვით.

გლობალური დათბობის საწინააღმდეგო პოლიტიკა მოიცავს მის შემსუბუქებას სათბურის აირების შემცირების ხარჯზე და ასევე ადაპტაციას მისი ზემოქმედებისადმი. მომავალში, ზოგიერთის აზრით შესაძლებელი იქნება გეოინჟინერია. მსოფლიოს ქვეყნების უმეტესობა მონაწილეობს გაეროს ჩარჩო კონვენციაში კლიმატის ცვლილების საკითხებში. ისინი დათანხმდნენ აირების ემისიების მნიშვნელოვნად შემცირების აუცილებლობას გლობალური დათბობის 2,0°C-ით შემოსაზღვრის მიზნით.

2000-2010 წლებში სათბურის აირების ემისია წელიწადში 2,2%-ით გაიზარდა, ხოლო 1970-2000 წლებში ზრდა შეადგენდა 1,3%-ს წელიწადში.

II ტემპერატურის ცვლილება

ჰაერის საშუალო ზედაპირული ტემპერატურა 1901-2012 წლებში გაიზარდა $0,89 \pm 0,20^{\circ}\text{C}$ -ით. უაღბათესია, რომ 1983-2012 წლების 30 წლიანი პერიოდი ყველაზე თბილი იყო ჩრდილო ნახევარსფეროში უკანასკნელი 800 წლის განმავლობაში [6]. სათბურის აირებით გამოწვეულმა კლიმატის ცვლილებებმა უკვე XX საუკუნის პირველ ნახევარში, გავლენა მოახდინეს მცენარეების განვითარებაზე. კერძოდ, გაიზარდა გვალვიანობის რისკი მსოფლიო მასშტაბით.

ჰაერის ტემპერატურის პირდაპირი გაზომვით გამოვლენილი დათბობა თანხმობაშია დაკვირვებათა ფართო სპექტრთან, რომელიც შესრულებულია მრავალი დამოუკიდებელი კვლევითი ჯგუფის მიერ [7,8]. ასეთი დაკვირვებების მაგალითები შეიძლება იყოს ზღვის დონის ზრდა (გამოწვეულია გაცხელებისას წყლის თერმული გაფართოებით), მყინვარების დნობა, ოკეანის თბოტევადობის ზრდა, ტენიანობის მომატება, ატმოსფერული ოპტი-

კური პროცესების გაძლიერება, გაზაფხულის შედარებით ადრე დადგომა და სხვა. ასეთი მოვლენების თანხვედრის ალბათობა ძალზე მცირეა.

რამდენიმე ათწლეულის მასშტაბში ატმოსფეროს დათბობის პროცესი საგრძნობლად სტაბილურია, ვიდრე ათწლეულთა რიგის ფარგლებში. 10-15 წლის პეროდები ხშირად უჩვენებს დათბობის უფრო სუსტ, ან უფრო ძლიერ, ტენდენციებზე [6]. ასეთი შედარებით მოკლევადიანი რყევები ზედ ედებიან დათბობის ხანგრძლივ ტრენდებს და შეუძლიათ დროებით მათი შენიღბვა. ატმოსფერული ტემპერატურების ფარდობით სტაბილურობას 2002-2003 წლებში ზოგიერთი მეცნიერი გლობალური დათბობის „პაუზას“ ან „შეჩერებას“ უწოდებდა, რაც ასეთი ეპიზოდის მაგალითი შეიძლება იყოს. თუმცა ზედაპირული ტემპერატურის ზრდის ტემპები ამ პერიოდში შემცირდა, ოკეანე მაინც განაგრძობდა სითბოს დაგროვებას, თანაც პირვანდელზე უფრო ღრმად.

ყოველი წელიწადი 1986-2013 წლებში უფრო ცხელი იყო 1961-1990 წლების საშუალოზე. წლის მდგომარეობის დაკვირვებით ისტორიაში [20] ყველაზე თბილი წელი მოდის უკანასკნელი 22 წლის განმავლობაში და უკანასკნელი 2015-2018 წელი ყველაზე თბილია, რომელთაგან მაქსიმუმი 2016 წელზე დაიკვირვება.

დედამიწის სხვადასხვა ნაწილში ტემპერატურა სხვადასხვანაირად იცვლება. 1979 წლიდან ტემპერატურა ხმელეთზე ორჯერ მეტად გაიზარდა ვიდრე ოკეანის თავზე. აქ ტემპერატურა იზრდება უფრო ნელა იმის გამო, რომ ოკეანეს უფრო დიდი თბოტევადობა აქვს და აორთქლებაზე ენერჯის ხარჯიც მეტი აქვს [9]. ჩრდილო ნახევარსფერო უფრო სწრაფად თბება, ვიდრე სამხრეთი, ოკეანეში მერიდიანული სითბოს გადატანის გამო. ასევე თავისი წვლილი შეაქვს პოლარული რეგიონების ალბედოთა სხვაობას. არქტიკაში დათბობის ტემპები ორჯერ აღემატება საშუალო მსოფლიო მნიშვნელობებს. თუმცა ჩრდილო ნახევარსფეროში სათბური აირების ემისია გაცილებით მეტია სამხრეთზე, დათბობაში განსხვავებათა მიზეზი ამაში არ არის, რამდენადაც ძირითადი სათბური აირების სიცოცხლის ხანგრძლივობა მათ ატმოსფეროში ეფექტურად გადაადგილების საშუალებას აძლევს. ოკეანეთა თერმული ინერცია და კლიმატური სისტემის სხვა ელემენტების ნელი რეაქცია ნიშნავს, რომ კლიმატს ასწლეულები დასჭირდება წონასწორული მდგომარეობის მისაღწევად [10].

III დათბობის მიზეზები (გარეგანი ზემოქმედებები)

ჩვენი პლანეტის კლიმატური სისტემა რეაგირებს გარეგანი ზემოქმედებების (ინგლ. external forcings) ცვლილებებზე, რომლებიც კლიმატს მიმართავენ, ან დათბობის, ან კიდეც აცივებისაკენ. ასეთი ზემოქმედებების მაგალითებია: ატმოსფეროს აიროვანი შედგენილობის ცვლილება, მზის ნათობის ვარიაციები, ვულკანური ამოფრქვევები, მზის გარშემო დედამიწის ორბიტული მოძრაობის ცვლილებები.

3.1 სათბურის აირების გამოფრქვევები

დედამიწა გარდაქმნის მასზე დაცემული მზის ხილული სინათლის ენერჯიას ჩვენი პლანეტიდან კოსმოსში გასულ ინფრაწითელ გამოსხივებად. სათბურის აირები ართულეზენ ამ პროცესს, რადგან ნაწილობრივ შთანთქავენ ინფრაწითელ გამოსხივებას და აკავებენ კოსმოსურ სივრცეში გამავალ ენერჯიას ატმოსფეროში, სადაც სათბურის აირების დამატე-

ბით კაცობრიობა კიდევ უფრო ზრდის ატმოსფეროში ინფრაწითელი ტალღების შთანთქმის პროცესს, რაც განაპირობებს დედამიწის ზედაპირთან ტემპერატურის ზრდას.

სათბურის ეფექტი აღმოჩენილი იყო **ჟოზეფ ფურიეს** მიერ 1896 წელს.

დედამიწაზე ძირითადად სათბურის აირებს წარმოადგენენ: წყლის ორთქლი (დაახლოებით პასუხისმგებელია 36-60% სათბურის ეფექტზე, ღრუბლების გაუთვალისწინებლად) და ოზონი $-O_3$ (3-7%), აზოტი N_2 და ჟანგბადი O_2 და სხვა აირები, რომელთა მოლეკულებს გააჩნიათ ელექტრული პოტენციალის მკაცრად სიმეტრიული განაწილება, გამჭირვალეა ინფრაწითელი გამოსხივებისათვის და სათბურის ეფექტისათვის არანაირი მნიშვნელობა არ გააჩნიათ. წყლის ორთქლის თავისებურებას წარმოადგენს კონდენსირების უნარი და ატმოსფეროში მისი კონცენტრაციის ჰაერის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება, რაც კლიმატურ სისტემაში მას დადებითი უკუკავშირის თვისებას ანიჭებს.

ყველა სათბური აირის თითქმის ნახევარი, მიღებული კაცობრიობის სამეურნეო საქმიანობის მსვლელობისას, ატმოსფეროში რჩება. ნახშირორჟანგის ყველა ანთროპოგენური გამონაბოლქვის დაახლოებით 3/4 უკანასკნელი 20 წლის განმავლობაში ნავთობის ბუნებრივი აირის და ქვანახშირის მოპოვებისა და წვის შედეგი გახლდათ. ამასთან ნახშირორჟანგის ანთროპოგენურ გამონაბოლქვთა მოცულობის თითქმის ნახევარი დაკავშირებულია მიწისზედა მცენარეულობასთან და ოკეანესთან. CO_2 -ის დანარჩენ გამონაბოლქვთა დიდი ნაწილი გამოწვეულია ლანდშაფტის ცვლილებით და პირველ რიგში ტყის გაჩეხვით. მაგრამ გაეროს კლიმატის ცვლილების ექსპერტთა სამთავრობათაშორისო ჯგუფის მონაცემებით CO_2 -ის საერთო ანთროპოგენური გამონაბოლქვის მესამედი ტყის განადგურების შედეგი აღმოჩნდა. ყველა სათბური აირის თითქმის ერთი მეოთხედი წარმოადგენდა სასოფლო-სამეურნეო საქმიანობის შედეგს.

3.2. მდიდრების გავლენა

ოქსფამისა (17 საერთაშორისო სოციალური ორგანიზაციის) და სტოკჰოლმის გარემოს ინსტიტუტის 2015 წლის მონაცემებით ყველაზე უზრუნველყოფილი ადამიანების 10% -ზე მოდის CO_2 -ის გამონაბოლქვთა 50%, გამონაბოლქვთა 15% მოდის ყველაზე მდიდრების 1%ზე, რაც დაახლოებით 2-ჯერ აღემატება 50%-ზე მოსული საშუალო ფენის მიერ ერთობლივ გამონაბოლქვს. თანაც CO_2 -ის გამონაბოლქვთა ნეგატიური შედეგები ყველაზე ძლიერად მოქმედებს მსოფლიო მოსახლეობის ღარიბ ნაწილზე[11].

3.3 მძიმე აეროზოლური ნაწილაკები და ჭვარტლი

1960-იანი წლებიდან თითქმის 1990 წლებამდე დაიკვირვებოდა მზის სინათლის ნაკადის თანდათანობითი შემცირება. ამ მოვლენას გლობალური დაბნელება უწოდეს [12,13]. მის მთავარ მიზეზს წარმოადგენს მტვროვანი ნაწილაკები, რომლებიც ატმოსფეროში ხვდებიან ვულკანური ამოფრქვევებისა და საწარმოო საქმიანობის შედეგად. ატმოსფეროში ასეთი ნაწილაკების არსებობა ქმნის გამაგრილებელ ეფექტს, რომელიც იქმნება მათ მიერ მზის სინათლის ეფექტური არეკვლის შედეგად. ნამარხი სათბობის წვის ორი გვერდითი პროდუქტი $-CO_2$, აეროზოლები რამდენიმე ათწლეულია აკომპენსირებენ ერთმანეთს და ამ პერიოდში ამცირებდნენ დათბობის ეფექტს. აეროზოლური ნაწილაკების რადიაციული ზემოქმედება დამოკიდებულია მათ კონცენტრაციაზე. გამოფრქვეული ნაწილაკების

შემცირებისას კონცენტრაციის კლება განისაზღვრება ატმოსფეროში მათი სიცოცხლის ხანგრძლივობით, რომელიც ერთი კვირის რიგისაა. ატმოსფეროში ნახშირორჟანგს გააჩნია ასწლეულების რიგის არსებობის ხანგრძლივობა. ამრიგად, აეროზოლთა კონცენტრაციის ცვლილებას შეუძლია მხოლოდ დროებით გადაავადოს CO₂-ით გამოწვეული დათბობა [14].

ნახშირბადის მცირედისპერსიული ნაწილაკები (ჰვარტლი) ტემპერატურაზე მათი გავლენის მიხედვით მხოლოდ CO₂-ს ჩამორჩებიან. მათი მოქმედება დამოკიდებულია მასზე, თუ სად იმყოფებიან ისინი - ატმოსფეროში თუ დედამიწის ზედაპირზე. ატმოსფეროში ისინი შთანთქმევენ მზის ენერგიას, ახურებენ ჰაერს და აცივებენ ზედაპირს. ჰვარტლის მაღალი შემცველობის იზოლირებულ რაიონებში, მაგალითად, ინდოეთის სასოფლო რაიონებში, დედამიწის ზედაპირზე დათბობის 50%-მდე ინიღბება ჰვარტლიანი ღრუბლებით, განსაკუთრებით მყინვარებზე და თოვლზე ჰვარტლის ნაწილაკების დალექვისას მათი შემცირებით იწყება ზედაპირის გახურება.

გარდა უშუალო ზემოქმედებისა მზის ენერგიის გაბნევისა და შთანთქმის გზით, აეროზოლური ნაწილაკები შეადგენენ ტენის კონდენსაციის ცენტრებს და მცირე დისპერსიული წვეთების დიდი რაოდენობისაგან ხელს უწყობენ ღრუბლების ფორმირებას. ასეთი ღრუბლები უფრო ძლიერად ირეკლავენ მზისიერ სინათლეს, ვიდრე უფრო მსხვილი წვეთებისგან შედგენილი ღრუბლები. აეროზოლური ნაწილაკების ასეთი როლი უფრო ძლიერადაა გამოსახული ზღვის თავზე წარმოქმნილი ღრუბლებისათვის, ვიდრე ხმელეთზე. აეროზოლთა ირიბი ეფექტები განუსაზღვრელობის ყველაზე დიდი წყაროა სხვადასხვა სახის რადიაციული ზემოქმედებების შეფასებებში. აეროზოლური ნაწილაკების გავლენა გეოგრაფიულად არათანაბარია. ის ყველაზე უფრო გამოსახულია ტროპიკებში, სუბტროპიკებში, კერძოდ კი აზიაში [14].

3.4. მზის აქტიურობის ცვლილება

მზის ნათობა და მისი სპექტრი იცვლებიან დროით ინტერვალებში რამდენიმე წლიდან ათასწლეულებამდე. ამ ცვლილებებს აქვს პერიოდული მდგენელები, რომელთაგან ყველაზე გამოხატულია მზის აქტიურობის 11-წლიანი ციკლი (შვაბეს ციკლი [15]). ცვლილებები ასევე მოიცავს აპერიოდულ რხევებს. მზის აქტიურობის უკანასკნელი ათწლეული იზომება თანამგზავრების მეშვეობით. უფრო ადრეული პერიოდებისთვის ის გამოითვლება ინდიკატორების გამოყენებით. მზის რადიაციის ცვლილებები გავლენას ახდენს დედამიწის კლიმატზე.

საერთო მზისიერ რადიაციაში ცვლილებები ერთობ მცირეა პირდაპირი გაზომვებისათვის იმ ტექნოლოგიების გამოყენებით, რომლებიც ხელმისაწვდომი იყო თანამგზავრული ერის დაწყებამდე. უკანასკნელი სამი 11 წლიანი ციკლის განმავლობაში მზის აქტიურობა იცვლებოდა თოთქმის 0,1% ამპლიტუდით. პირდაპირი გაზომვების დროს ადგილი აქვს უმნიშვნელო უარყოფით ცვლილებას. დედამიწის გარეგან საზღვარზე მიღებული მზისიერი ენერგიის რაოდენობა საშუალოდ შეადგენს 1361 ვატ/მ² [16]. უფრო ადრეული პერიოდისათვის მზის ნათობის პირდაპირი გაზომვები არ არსებობს. მთლიანობაში დომინირებს აზრი, რომ მზის გამოსხივების ინტენსიურობა, რომელმაც დედამიწაზე მოაღწია

უკანასკნელი 2000წლის განმავლობაში შედარებით მუდმივი იყო. მზის ნათობის ვარიაციები, ვულკანურ მოქმედებებთან ერთად, სავარაუდოდ ხელს უწყობდნენ წარსულში კლიმატის ცვლილებას, მაგალითად, მანუდერული მინიმუმის დროს. იმისათვის, რომ ავხსნათ კლიმატის თანამედროვე ცვლილება ეს ვარიაციები ერთობ სუსტია [17]. უკანასკნელ ათწლეულში მათი გავლენა უმნიშვნელოა სიდიდით და მიმართულია აცივების მხარეს.

თანამედროვე დათბობის შესაძლო მიზეზების წინააღმდეგ არსებულ სხვა არგუმენტად გვევლინება ატმოსფეროში ტემპერატურულ ცვლილებათა განაწილება. მოდელები და დაკვირვებები გვიჩვენებს, რომ დათბობა სათბურის ეფექტის გაძლიერების შედეგად განაპირობებს ატმოსფეროს ქვედა ფენების (ტროპოსფეროს) გახურებას და მისი ზედა ფენების ერთდროულ გაცივებას. თუ დათბობა იქნებოდა მზის ზემოქმედების შედეგი, მაშინ ტემპერატურის მომატება დაიკვირვებოდა მთელ ატმოსფეროში.

IV უკუკავშირები

კლიმატური სისტემა მოიცავს რიგ უკუკავშირებს, რომლებიც ცვლიან სისტემის რეაქციას გარეგან ზემოქმედებებზე. დადებითი უკუკავშირები აძლიერებენ კლიმატური სისტემის გამოძახილს საწყის ზემოქმედებაზე, ხოლო უარყოფითები - ამცირებენ.

უარყოფით უკუკავშირებს მიეკუთვნებიან: ატმოსფერული წყალი (ჰაერის გათბობისას ტენიანობის ზრდა ხელს უწყობს დამატებით დათბობას წყლის ორთქლის სათბურის თვისებების გამო, ალბედოს ცვლილება (დათბობის კვალდაკვალ პლანეტაზე მცირდება თოვლისა და ყინულის ფართობი, რაც იწვევს მზის ენერჯის შთანთქმის ზრდას და დამატებით დათბობას), ღრუბლის საფარის ცვალებადობა (შეიძლება გამოიწვიოს როგორც დათბობა, ისე აცივება), ნახშირბადური ციკლის ცვლილება (მაგალითად ნიადაგიდან CO₂-ის გამოყოფა [13, 18]).

მთავარ უარყოფით უკუკავშირს წარმოადგენს კოსმოსურ სივრცეში დედამიწის ზედაპირიდან გახურებისას გამოყოფილი ინფრაწითელი გამოსხივების გაზრდა. სტეფან-ბოლცმანის კანონის მიხედვით, ტემპერატურის გაორმაგებისას ზედაპირიდან ენერჯის გამოსხივების ზრდა 16-ის ტოლია.

უკუკავშირები მთავარ ფაქტორს წარმოადგენს სათბურის აირების კონცენტრაციის ზრდისადმი კლიმატური სისტემის მგრძობიარობის განსაზღვრაში. დიდი მგრძობიარობა ნიშნავს სათბურის აირების ზემოქმედების მოცემულ დონეზე დიდი დათბობის გამოვლენას. ზოგიერთი უკუკავშირის (განსაკუთრებით ღრუბლებისა და ნახშირბადური ციკლის) სიდიდის მაღალი განუზღვრელობა იმის მთავარი მიზეზია, რომ კლიმატურ მოდელებს შეუძლია დათბობის შესაძლო სიდიდეთა მხოლოდ დიაპაზონების პროგნოზი და არა მათი ზუსტი მნიშვნელობებისა ემისიის მოცემული სცენარისათვის.

V კლიმატური მოდელები

კლიმატური მოდელები წარმოადგენს კლიმატური სისტემების რიცხვით აღწერას მისი ძირითადი ფიზიკური, ქიმიური და ბიოლოგიური პარამეტრების წარმოდგენებზე დაყრდნობით. კლიმატური მოდელები შეიძლება იყოს სხვადასხვა ხარისხის სირთულის. მაგალითად, შეიძლება აიგოს მოდელი ყოველი კლიმატური კომპონენტისათვის და ასევე

მთლიანად დედამიწის ატმოსფეროსათვის. მოდელები გამოიყენება კლიმატის კვლევისა და პროგნოზირებისათვის, და ასევე ამინდის უფრო მოკლევადიანი წინასწარმეტყველებისათვის.

5.1 საერთო ცირკულაციური მოდელი (სცმ)

დედამიწის ატმოსფეროს, ან ოკეანის, საერთო ცირკულაციური მოდელი - ეს არის სხვადასხვა ენერჯის (მზის ენერჯია, ფარული სითბო) თერმოდინამიკური მდგენელების მქონე მბრუნავი სფეროსათვის ნავიე-სტოქსის განტოლებებზე დაფუძნებული მათემატიკური მოდელი, რომელიც წარმოადგენს გეოფიზიკური ჰიდროდინამიკის განვითარების შედეგს. ეს განტოლებები წარმოადგენს ბაზისს იმ კომპლექსური კოდისათვის, რომელიც გამოიყენება დედამიწის ატმოსფეროს, ან ოკეანის, მოდელირებისათვის. ატმოსფერული, ან ოკეანური სცმ წარმოადგენს გლობალური კლიმატური მოდელების ძირითად ელემენტებს, რომლებიც ასევე მოიცავენ ზღვის ყინულს და ხმელეთის ზედაპირს. საერთო ცირკულაციური და გლობალური კლიმატური მოდელები ფართოდ გამოიყენება ამინდის პროგნოზის, კლიმატის გაგებისა და მისი ცვლილების პერსპექტიული შეფასებისათვის.

საერთო ცირკულაციის მოდელები - ესაა დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემები, რომლებიც ეყრდნობიან ფიზიკის, ჰიდროდინამიკისა და ქიმიის კანონებს. მოდელის გასაშვებად მეცნიერები ქმნიან სპეციალურ ბადეს პლანეტის მთლიანად გადასაფარავად, მასზე იყენებენ ძირითად განტოლებებს და აფასებენ მიღებულ შედეგებს. ატმოსფერული საერთო ცირკულაციის მოდელები აფასებენ ქარს, სითბოს გადატანას, რადიაციას, ფარდობით ტენიანობას და ზღვის ზედაპირის მდგომარეობას ბადის თითოეულ უჯრედში, ხოლო შემდეგ საზღვრავენ ურთიერთქმედებას მეზობელ უჯრედებთან.

5.2 ატმოსფერული და ოკეანური ზოგადი ცირკულაციური მოდელები (ზცმ)

არსებობს როგორც ატმოსფერული, ისე ოკეანური მოდელები, რომლებიც აღწერენ საერთო ცირკულაციას. ისინი შეიძლება იყვნენ ერთმანეთთან კავშირში და ამიტომ ასეთ მოდელის ოკეანე-ატმოსფეროს ერთობლივ მოდელს უწოდებენ. სხვა კომპონენტების დამატებისას ერთობლივი მოდელი ხდება ძირითადი გლობალური კლიმატური მოდელისათვის.

თანამედროვე ტენდენციები ისეთია, რომ ზოგადი ცირკულაციის მოდელები მთავარი ელემენტები ხდებიან. დედამიწის სისტემის მოდელებში (ინგლ. Earth system models), თუ რასაკვირველია მათ შევუთავსებთ გრენლანდიისა და ანტარქტიდის ყინულოვანი საფარების მოდელებს, ატმოსფეროს ქიმიურ მოდელებს და ეკონომიურ მოდელებსაც კი, ატმოსფეროს ქიმიის მოდელი შეიძლება დაეხმაროს ზცმ-ს, რათა უკეთ იქნას ნაწირნასწარმეტყველები ნახშირბადის დიოქსიდის კონცენტრაციის ცვლილება. ასეთი მიდგომა საშუალებას იძლევა გავითვალისწინოთ სისტემათაშორისი უკუკავშირები: მაგალითად, ატმოსფეროს ქიმიის ჩართვა, აადვილებს ანტარქტიდის თავზე ოზონის ხვრელის აღდგენაზე კლიმატის ცვლილების შესაძლო ეფექტის შესწავლას. კლიმატის ცვლილების ზუსტი პროგნოზი დამოკიდებულია ფიზიკური, ქიმიური და სოციალური მოდელების სიზუსტეზე. უკანასკნელ ხანებში მიღწეულია მნიშვნელოვანი პროგრესი მოდელში უფრო რეალური, ფიზიკური და ქიმიური პროცესების ჩართვით, თუმცა მაინც დარჩა მნიშვნელოვანი ცდომი-

ლებები, განსაკუთრებით, როცა ლაპარაკია დედამიწის პოპულაციის, ინდუსტრიისა და ტექნოლოგიების განვითარების პროგნოზზე.

5.3 კლიმატის წარმომქმნელი ფაქტორები

პლანეტის კლიმატი დამოკიდებულია ასტრონომიული და გეოგრაფიული ფაქტორების მთელ კომპლექსზე, რომლებიც გავლენას ახდენენ მზის რადიაციის ჯამურ რაოდენობაზე, ასევე მის სეზონურ, ნახევარსფერულ და კონტინენტურ განაწილებაზე. სამრეწველო რევოლუციის დაწყებისთანავე ადამიანის საქმიანობა გახდა კლიმატის შემქმნელი ფაქტორი. გამოყოფენ კლიმატის შემქმნელ სამ მთავარ ფაქტორს: 1. მზის რადიაცია; 2. ატმოსფეროს ცირკულაცია; 3. ადგილის რელიეფი.

გარდა ამისა ასტრონომულ ფაქტორებს მიეკუთვნება: 1. მზის ნათება; 2. პლანეტის მდებარეობა და მოძრაობა მზის მიმართ; 3. დედამიწის ბრუნვის ღერძის დახრის კუთხე მისი ორბიტის სიბრტყისადმი; 4. დედამიწის ბრუნვის სიჩქარე; 5. მახლობელ კოსმოსურ სივრცეში მატერიის სიმკვრივე.

დედამიწის ბრუნვა თავისი ღერძის გარშემო განაპირობებს ამინდის დღე-ღამურ ცვლილებას. დედამიწის ბრუნვა მზის გარშემო და ბრუნვის ღერძის დახრა ორბიტის სიბრტყისადმი იწვევს ამინდის პირობების სეზონურ და განედურ განსხვავებას [19]. დედამიწის ორბიტის ექსცენტრისიტეტი გავლენას ახდენს ჩრდილო და სამხრეთ ნახევარსფეროებს შორის სითბოს განაწილებაზე და ასევე სეზონური ცვლილებების სიდიდეზე. დედამიწის ბრუნვის სიჩქარე პრაქტიკულად არ იცვლება და მუდმივად მოქმედი ფაქტორია. დედამიწის მოძრაობის გამო ადგილი აქვს პასატებსა და მუსონებს და ასევე წარმოიშობა ციკლონები.

გეოგრაფიული ფაქტორებია: 1. დედამიწის ზომები და მასა; 2. სიმძიმის ძალის სიდიდე; 3. ჰაერის შედგენილობა და ატმოსფეროს მასა; 4. გეოგრაფიული განედი; 5. სიმაღლე ზღვის დონიდან; 6. ზღვისა და ხმელეთის განაწილება; 7. ოროგრაფია; 8. ოკეანური დინებები; 9. ქვეფენილი ზედაპირის ხასიათი - ნიადაგობრივი, მცენარეული, თოვლისა და ყინულოვანი საფარები.

5.4 კლიმატის ცვლილებისა და გლობალური დათბობის კრიტიკული ფაქტორები

კლიმატის ცვლილების კრიტიკული ფაქტორები წარმოადგენს კლიმატური სისტემის ისეთ ელემენტებს, რომელთა ცვლილებები არსებით გავლენას ახდენენ მთლიანობაში დედამიწის კლიმატზე. დედამიწის გეოლოგიურ ისტორიაში ასეთი ცვლილებები არაერთხელ მომხდარა, და გეოლოგიური განზომილებებით საკმაოდ სწრაფადაც. თანამედროვე ეტაპზე კლიმატის ცვლილების კრიტიკული ფაქტორები განსაკუთრებით ინტერესს იწვევენ გლობალური დათბობის მიზეზების შესწავლის თვალსაზრისით. ზოგიერთ რეგიონში ტემპერატურის საშუალო სტატისტიკური მნიშვნელობიდან გადახრას (მაგალითად, არქტიკაში) შეუძლია გაუშვას დადებითი უკუკავშირის მექანიზმები, რის შედეგადაც საშუალო ტემპერატურის ზრდა კიდევ უფრო სწრაფად ხდება [20]. დინამიკური სისტემების თეორიაში კარგადაა ცნობილი კრიტიკული მოვლენები, როცა სისტემის ცალკეული პარამეტრების მცირე ცვლილებებს შეუძლია მისი თვისობრივად ახალ მდგომარეობაში გადაყვანა. დედამიწის კლიმატური სისტემა იმდენად რთული და მრავალფაქტორულია, რომ აქამდე

სამეცნიერო წრეებში არ არსებობს თანხმობა მასში, თუ რომელი ფაქტორები ახდენენ კლიმატზე კრიტიკულ გავლენას. მიუხედავად ამისა, დადებითი უკუკავშირის ზოგიერთი მექანიზმი საიმედოდაა დადგენილი და აქტიურად შეისწავლება. ახლა წარმოვიდგინოთ გლობალურ კლიმატზე მოქმედი კრიტიკული ელემენტები [21].

- არქტიკის ზაფხულის ყინულის ფართობი. გავლენა დედამიწისა და ეკოსისტემის არევის უნარიანობაზე;
- გრენლანდიის მყინვარები. მათი დნობა იწვევს ზღვის დონის მომატებას.
- ატლანტური თერმოჰალინური (თერმომარილოვანი) ცირკულაცია. გავლენას ახდენს ევროპის კლიმატზე;
- ელ-ნინიო. მსოფლიოს სხვადასხვა რეგიონში იწვევს გვალებს;
- ინდოეთის ზაფხულის მუსონები. იწვევს გვალებს, ჰაერის მასების გადატანას;
- საჰარისა და დასავლეთ აფრიკის მუსონები. ჰაერის მასების მოძრაობა;
- ამაზონის ტროპიკული ტყეები ქმნის ბიომრავალფეროვნებას და ზრდის ნალექების რაოდენობას;
- სუბარქტიკული ტყეები. ცვლის ეკოსისტემებს.

გარდა ზემოთჩამოთვლილი ელემენტებისა, რომელთა გავლენა რაოდენობრივად და შესწავლილი და რომელთათვის ხელმისაწვდომია დედამიწის კლიმატზე გავლენის რიცხობრივი შეფასებები, გამოყოფენ სხვა ფაქტორებსაც, რომლებიც არანაკლებ ზემოქმედებას ახდენენ კლიმატის ცვლილებაზე და გლობალურ დათბობაზე, მაგრამ ჯერ კიდევ არასაკმარისად არიან შესწავლილი.

მათ რიცხვს შეიძლება მიეკუთვნოს:

- ანტარქტიდის სიღრმისეული წყლები. ოკეანური ცირკულაცია, ნახშირბადის ფიქსაცია;
- ტუნდრის მცენარეულობა, რომელიც ნაწილობრივ განაპირობებს დათბობასა და ეკოსისტემის ცვლილებას;
- მუდმივი გამყინვარება. მეთანის გამოფრქვევა და ნახშირორჟანგის მომატება;
- ზღვის მეთანოჰიდრატები. მეთანის გამოფრქვევა;
- ოკეანის დაჟანგვა, ზღვის ეკოსისტემის ცვლილება.
- არქტიკული ოზონი. ულტრაიისფერი დასხივება.

რამდენადაც კლიმატური სისტემა წარმოადგენს მთლიანს, და მათში ყველა მოვლენა ურთიერთდამოკიდებულია, რომელიმე კრიტიკული ელემენტის ზღურბლის გადამეტებამ შეიძლება თან მიიყლოს სხვა ელემენტების ჯაჭვური ზემოქმედება. მაგალითად, ყინულების დნობას და ოკეანის დონის მომატებას შეიძლება თან ახლდეს არქტიკაში ტემპერატურული რეჟიმის ცვლილება და ამან გამოიწვიოს მუდმივი გამყინვარების სულ უფრო მეტი ეფექტური დნობა და ატმოსფეროში დამატებითი მეთანის გამოფრქვევა, რაც თავის მხრივ დააჩქარებს და გააძლიერებს სათბურის ეფექტს და დათბობას [22].

ლიტერატურა:

1. Организация Объединенных Наций. Изменение климата. Официальный сайт ООН. Архивировано 21 июня 2021 г.
2. Michael E. Mann, Henrik Selin. Global warming. (ინგლ). Britannica.Com. არქივირებულია 20.08.2008.
3. Climat Change Impacts in the United States. (ინგლ)-2013.-ISBN 9780160924026.
4. JPCC AR 5 WG2 A (2014), Field, C.B ; at al. Climat Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulneability.
5. Emissions still increasings, according to leaked JPCC findings,, with urgent action required to avent worst effects. საარქივი ასლი 19.10.2017. Wayback Machine Friday 17 January.
6. Техническое резюме, стр. 37 в IPCC AR5WG1. 2013.
7. Kennedy J.J et al. How do we know the World has warmed? In: Global Climate, 2009.
8. ადგიშვილი თ. მიწისძვრის წინამორბედები და მისი პროგნოზის შესაძლებლობა, ქუთაისი 2021.ISBN-978-9941-8-3436-3.
9. ROWAN T. Sutton, Buwen Dong, Jona than M. Gregory. Journal of Geophysical Reaserch Letters, 2007- Vol. 34, NO.2 p. 202701.
- 10.Mil J et al. How much more Global Warning and Sea level Rise (ი ნ გ ლ) // Science.-2005.-18 March, vol. 307 № 5716, p. 1769-1772
- 11.How the rich are driving climate change Архивная копия от 05ноября 2021 г.
12. Surface Radiation II Climate Change, 2007 Working Group I: the physical Sience Basic.
- 13.ადგიშვილი თ. გეოფიზიკა, ატმოსფეროს ფიზიკა ნაწ. I, II, ქუთაისი 2018.
14. Romanathan V at al. Global and regional climate changes due to black carbon. Nature Geosciencies : J 2008 , vol.1. no. 4.
15. ადგიშვილი თ, ნავერიანი თ, ნაკაშიძე ვ. კოსმოგენური ფაქტორების გავლენა ბიოსისტემებზე. ქუთაისი, 2010.
16. Willson R.C et al. Secular total soplar air radiance trend during solar cycles 21-23. Geophysical Researche Letters, 2003, vol.30 , №5.
17. Changes in Solar Brightness Too Week To Explain Global Warming: Journal-UCAR 2006.
18. ადგიშვილი თ. , ბერძენიშვილი ნ. და სხვა. სატრანსპორტო კოსმიური სისტემების გავლენის გავლენა დედამიწის ატმოსფეროზე. საერთაშორისო კონფერენციის „ეკოლოგიის პრობლემები“ შრომები, ტ. IX, ქუთაისი, 2023.
19. ადგიშვილი თ. და სხვა. ასტრონომიის საფუძვლები ტომი I, II. ქუთაისი 2012,2014.
20. Timothy M. Lenton H, et al. Climate tipping points-too risky to let against // Nature , 2019 №11, vol 575.
21. Lenton H, et al. Tipping elements in the Earth climate system// Proceedings of the National Academy of siences.-2008-02-07.-vol.105,iss6.
22. Juan C. Rocha et al. Cascading regime shifts within and across scales// science. 2012, 12-21, vol. 332.

**Physical Origins of Global Warming
Summary**

The work discusses modern views of climate warming. Since the mid-20th century Climate scientists have gathered detailed observations of various weather phenomena and of related influences on climate. These date indicate that Earth’s climate has changed over almost every conceivable timescale since the beginning of geologic time and that human activities since at least the beginning of the industrial revolution have a growing influence over the pace and extend of present-day climate change.