**Thermal pollution and global climate changes**

Adeishvili T., Adeishvili Tor., Berdzenishvili N., Chkhirodze D., Tskipurishvili T.

**SUMMARY**

The Work presents the most environmental problems of our time – thermal pollution and global climate changes and shows ways to solve them.

# ხელოვნური ინტელექტის რევოლუცია გლობალურ მეტეოროლოგიაში

ცირა ბერაძე
აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
საქართველოს ეკოლოგიურ მეცნიერებათა აკადემია

***აბსტრაქტი**-სტატიაში შესწავლილია ატმოსფერული ქაოსი და პროგნოზირების კლასიკური ლიმიტები, მაქსიმალური ეფექტურობით პრობლემების გადაწყვეტა და მოვლენათა წინასწარი პროგნოზირება. განხილულია მასალები ფიზიკური განტოლებებიდან ნეირონულ ქსელებამდე. AI მოდელების არქიტექტურა, მათ მათემატიკურ პრინციპები, ტრადიციულ მეთოდებთან შედარება და არსებული გამოწვევები. ნაჩვენებია დიდ მონაცემთა თანამედროვე ტექნოლოგიები, რაც ეხმარება მკვლევარებს ოპტიმალური გადაწყვეტილებების მიღებაში და ზუსტი პროგნოზების გაკეთებაში, აღნიშნული ტექნოლოგიები ინფორმაციის დამუშავების ალტერნატიულ გზებს წარმოადგენს და მათი რეალიზება შესაძლებელია თანამედროვე კომპიუტერებზე, AI მოდელები ისტორიულ მონაცემებზე სწავლობენ და პროგნოზს წამებში აგენერირებენ.*

***საკვანძო სიტყვები**: ხელოვნური ინტელექტი, მანქანური სწავლება, გრაფების ნეირონული ქსელები.*

ხელოვნურმა ინტელექტმა (AI) რევოლუცია მოახდინა მეტეოროლოგიაში. საუკუნეების განმავლობაში ამინდის წინასწარმეტყველება ადამიანის ერთ-ერთი ყველაზე დიდი გამოწვევა იყო. დღეს, კლიმატის გლობალური ცვლილებისა და სტიქიური უბედურებების ფონზე, ზუსტ პროგნოზს სასიცოცხლო მნიშვნელობა აქვს. ამ ბრძოლაში მეტეოროლოგების მთავარი მოკავშირე ხელოვნური ინტელექტი (AI) გახდა, შიქმნა ამინდის პროგნოზირების ახალი ეპოქა, რომელმაც ამინდის პროგნოზირების სიზუსტე და სიჩქარე სრულიად ახალ საფეხურზე აყვანა, ტრადიციული მეთოდებისგან განსხვავებით, რომლებიც რთულ ფიზიკურ და მათემატიკურ განტოლებებს ეყრდნობა.

AI მოდელები წინა წლების გიგანტურ მონაცემთა ბაზებს აანალიზებენ და კანონზომიერებებს წამებში პოულობენ.

ამინდის პროგნოზირება თანამედროვე მეცნიერების ერთ-ერთი ყველაზე რთული გამოთვლითი ამოცანაა. ატმოსფერო წარმოადგენს არახაზოვან, დინამიკურ სისტემას,

რომლის ქცევასაც ახასიათებს ე.წ. "პეპლის ეფექტი" (ქაოსის თეორია). საწყის პირობებში უმცირესმა ცდომილებამაც კი შეიძლება გამოიწვიოს რადიკალურად განსხვავებული შედეგები დროთა განმავლობაში.

ხელოვნური ინტელექტი ამინდის პროგნოზირებაში იყენებს დიდი რაოდენობით მონაცემებს და ნეირონულ ქსელებს, რომ ამოიცნოს ამინდის ცვლილების კანონზომიერებები და სწრაფად გააკეთოს პროგნოზი.

AI ჯერ იღებს უამრავ მონაცემს სხვადასხვა წყაროდან: ამინდის სადგურები (ტემპერატურა, ტენიანობა, ქარი); თანამგზავრები (satellites) — ღრუბლები, შტორმები; რადარები — ნალექი (წვიმა, თოვლი); ოკეანის ბუები — ზღვის ტემპერატურა; ისტორიული მონაცემები — წლების ამინდის ჩანაწერები. ეს მონაცემები არის AI-ის „სასწავლო მასალა“.

AI-ს ასწავლიან წარსული მონაცემებით: მაგალითად: თუ ჰაერის წნევა ეცემა, ტენიანობა იზრდება, ღრუბლების ტიპი ასეთია→ ხშირად წვიმა მოდის. ნეირონული ქსელი ამ კავშირებს სწავლობს და მომავალშიც მსგავს ნიშნებზე პროგნოზს აკეთებს. როცა ახალი მონაცემები მოდის, AI ამბობს მაგალითად: ხვალ 22°C, საღამოს 70% შანსია წვიმის, ქარი 15 კმ/სთ. ეს ბევრად სწრაფად ხდება, ვიდრე ტრადიციული მოდელებით.

ხშირად იყენებენ: ღრმა ნეირონული ქსელები - ზოგადი პროგნოზისთვის; რეკურენტული ნეირონული ქსელები-რადგან ამინდი დროში იცვლება; Transformers — ახალი ძლიერი მოდელები; გრაფიკული ნერვული ქსელები-
რადგან დედამიწის სხვადასხვა რეგიონი ერთმანეთზე მოქმედებს.

რეალური მაგალითებია: Google DeepMind-ის ამინდის ლაბორატორია (AI მოდელები, როგორიცაა GraphCast, ძალიან ზუსტ პროგნოზს აკეთებს); ევროპის ამინდის ცენტრი უკვე იყენებს AI -ს პროგნოზის გასაუმჯობესებლად. რაც მეტი მონაცემია და რაც უკეთესი მოდელია, მით უფრო ზუსტია პროგნოზი. ეს ხშირად ბევრად სწრაფად ხდება, ვიდრე ტრადიციული მოდელებით.

AI ამინდს „სწავლობს“ წარსულიდან და ცდილობს გამოიცნოს მომავალი, იგი აერთიანებს ხელოვნურ ინტელექტს + რეალურ პრაქტიკულ გამოყენებას.

ათწლეულების განმავლობაში ამ პრობლემას ებრძოდა ციფრული ამინდის პროგნოზირება (Numerical Weather Prediction - NWP). NWP მოდელები, როგორიცაა ევროპული ცენტრის ECMWF ან ამერიკული GFS, ეყრდნობა ნავიე-სტოქსის განტოლებებს ჰიდროდინამიკაში, თერმოდინამიკის კანონებსა და მასის კონსერვაციის პრინციპებს. თუმცა, დედამიწის ზედაპირის ბადისებრ უჯრედებად დაყოფა და ამ უჯრედებში დიფერენციალური განტოლებების რიცხვითი ამოხსნა უზარმაზარ გამოთვლით რესურსს მოითხოვს. უძლიერეს სუპერკომპიუტერებსაც კი 10-დღიანი გლობალური პროგნოზის გამოსათვლელად რამდენიმე საათი სჭირდებათ. აქ ასპარეზზე გამოდის ხელოვნური ინტელექტი (AI) და მანქანური სწავლება (ML), რომლებმაც შეცვალეს მიდგომა: ფიზიკური სიმულაციის ნაცვლად, მათ დანერგეს მონაცემებზე დაფუძნებული პროგნოზირება.

AI-ის რევოლუცია-ხელოვნური ინტელექტი, კერძოდ კი მონაცემებზე დაფუძნებული ღრმა სწავლება ტრადიციულ მეთოდთან შედარებით სრულიად განსხვავებულად მოქმედებს. ფიზიკის განტოლებების ამოხსნის ნაცვლად, AI მოდელებს "აწვდიან" დედამიწის ამინდის ბოლო 40 წლის ისტორიულ მონაცემებს (სატელიტური ფოტოები, ტემპერატუ-

რა, წნევა, ქარის სიჩქარე).

მოდელი სწავლობს შაბლონებს: თუ წარსულში X და Y პირობები იწვევდა Z ამინდს, ე.ი. ახლაც ასე მოხდება.

მსოფლიოში წამყვანი AI მოდელებია:

- GraphCast (Google DeepMind): 2023 წელს წარდგენილმა ამ მოდელმა აჩვენა, რომ შეუძლია 10-დღიანი გლობალური პროგნოზი სულ რაღაც ერთ წუთში შექმნას, თანაც უფრო ზუსტად, ვიდრე მსოფლიოს საუკეთესო ტრადიციულმა სისტემამ;
- Pangu-Weather (Huawei): კიდევ ერთი უძლიერესი მოდელი, რომელიც წამებში პროგნოზირებს ციკლონებისა და ქარიშხლების ტრაექტორიას.
- FourCastNet (NVIDIA): სპეციალიზებულია ექსტრემალური ამინდის წინასწარმეტყველებაში მაღალი სიზუსტით.

ტრადიციულ სუპერკომპიუტერს, რომელიც რამდენიმე მილიონი დოლარი ღირს, პროგნოზისთვის საათები სჭირდება, უკვე გაწვრთნილ AI მოდელს კი იგივე დავალების შესასრულებლად ჩვეულებრივი დესკტოპ კომპიუტერი და რამდენიმე წამი ჰყოფნის.

რატომ არის ეს მნიშვნელოვანი?

1. სიცოცხლის გადარჩენა: ქარიშხლების, წყალდიდობებისა და ანომალიური სიცხეების რამდენიმე დღით ადრე და ზუსტად პროგნოზირება ქალაქების დროული ევაკუაციის საშუალებას იძლევა;

2. სოფლის მეურნეობა: ფერმერებს შეუძლიათ ზუსტად დაგეგმონ თესვა, მორწყვა და მოსავლის აღება, რაც თავიდან აცილებს მილიარდობით დოლარის ზარალს;

3. მწვანე ენერგია: მზისა და ქარის ელექტროსადგურების მუშაობა პირდაპირ ამინდზეა დამოკიდებული. AI ეხმარება ენერგოკომპანიებს წინასწარ იცოდნენ, რამდენ ენერგიას გამოიმუშავებენ ხვალ.

მეტეოროლოგიის მომავალი ტრადიციული ფიზიკისა და ხელოვნური ინტელექტის ჰიბრიდულ მოდელებშია, რაც ამინდის პროგნოზს თითქმის უშეცდომოს გახდის.

ხელოვნური ინტელექტის როლი მეტეოროლოგიაში დღეს იმდენად სწრაფად იზრდება, რომ სამეცნიერო საზოგადოება ამას "პარადიგმის ცვლილებას" უწოდებს.

ტრადიციული ფიზიკური მოდელებისგან განსხვავებით, AI მოდელები წინასწარ არ "იცნობენ" კორიოლისის ძალას ან თერმოდინამიკის კანონებს. ისინი ამ კანონზომიერებებს თავად აღმოაჩენენ მონაცემების ანალიზის საფუძველზე.

მეტეოროლოგიური ხელოვნური ინტელექტის წარმატების საძირკველი არის ERA5 მონაცემთა ბაზა, რომელიც შექმნილია ECMWF-ის მიერ. ეს არის დედამიწის კლიმატის "ისტორიული ჩანაწერი" 1940 წლიდან დღემდე, სადაც გაერთიანებულია სატელიტების, ამინდის ზონდების, გემებისა და სახმელეთო სადგურების მილიარდობით მონაცემი. AI მოდელები სწორედ ამ 40-80 წლის განმავლობაში დაგროვილ გლობალურ ატმოსფერულ სურათებზე იწვრთნებიან.

სამეცნიერო წრეებში დღეს დომინირებს რამდენიმე ტიპის ნეირონული ქსელი: გრაფების ნეირონული ქსელები (GNNS): დედამიწის ატმოსფერო არ არის ბრტყელი ზედაპირი. GNN-ები საშუალებას იძლევა დედამიწის სფერული სტრუქტურა და არარეგულარული მეტეოროლოგიური ბადეები წარმოდგენილ იქნას გრაფების სახით, სადაც კვან-

ძები (მაგ. წნევა, ტემპერატურა კონკრეტულ წერტილში) ერთმანეთთან კავშირშია. ტრანსფორმერები (Vision Transformers - VIT): ისევე, როგორც ChatGPT წინასწარმეტყველებს მომდევნო სიტყვას ტექსტში, VIT-ზე დაფუძნებული მოდელები წინასწარმეტყველებენ ატმოსფეროს მომდევნო "მდგომარეობას" (ვიზუალურ ფენებს) დროში.

განსაკუთრებული წარმატება AI-მ აჩვენა ტროპიკული ციკლონებისა და ქარიშხლების პროგნოზირებაში. მაგალითად, GraphCast-მა და Pangu−Weather-მა შეძლეს რამდენიმე დამანგრეველი ქარიშხლის (მათ შორის ქარიშხალ "ლის" 2023 წელს) ზუსტი ტრაექტორიის განსაზღვრა 9 დღით ადრე, მაშინ როდესაც ტრადიციულმა ფიზიკურმა მოდელებმა რეალური მიმართულების დაფიქსირება მხოლოდ 6 დღით ადრე შეძლეს. ეს 3-დღიანი სხვაობა გადამწყვეტია ევაკუაციის დაგეგმვისთვის.

ტექნოლოგიური უპირატესობებია: სიჩქარე და ენერგოეფექტურობა.
AI მოდელის მთავარი უპირატესობა გამოთვლითი ეფექტურობაა.

- ტრენინგის ფაზა (სამუშაოს 99%): ხელოვნური ინტელექტის მოდელის გაწვრთნას ათწლეულების მონაცემებზე სჭირდება კვირები და უზარმაზარი გამოთვლითი სიმძლავრე (GPU-ების კლასტერები).
- ინფერენციის ფაზა (პროგნოზის გენერირება): მას შემდეგ, რაც მოდელი "გაიწვრთნება", მისი მუშაობა (ინფერენცია) წარმოებადია ჩვეულებრივ სამუშაო სადგურზე.

ფიზიკური მოდელები ყოველი ახალი პროგნოზისთვის თავიდან იწყებენ მილიარდობით განტოლების ამოხსნას. AI კი უბრალოდ "ატარებს" მიმდინარე მონაცემებს მზა ნეირონულ ქსელში. ეს ამცირებს პროგნოზირების ენერგოდანახარჯებს და საშუალებას იძლევა შეიქმნას ანსამბლური (მრავალჯერადი, სხვადასხვა სცენარის მქონე) პროგნოზები წამებში.

ბოლო წლებში AI მოდელებმა არაერთ კომპონენტში გადაასწრეს მსოფლიოს წამყვან ფიზიკურ მოდელებს. მოდელი იყენებს გრაფულ ნეირონულ ქსელებს (GNNS). მან აჩვენა, რომ ევროპის საშუალო ვადიანი ამინდის პროგნოზების ცენტრის (ECMWF) უძლიერეს ფიზიკურ მოდელზე (HRES) უფრო ზუსტია შემთხვევათა 90%-ში და 10-დღიან პროგნოზს 1 წუთზე ნაკლებ დროში აკეთებს. ფოტონური აპარატურა (Photonic Hardware) მნიშვნელოვნად აჩქარებს SNN-ის გამოთვლებს და ამცირებს ენერგიის მოხმარებას (Nature, 2026).

მთავარი უპირატესობებია:

- სიჩქარე: AI ამას აკეთებს წამებში ჩვეულებრივ გრაფიკულ პროცესორზე (GPU).
- რესურსების დაზოგვა: ტრენინგის შემდგომ მოდელის გაშვება (Inference) ძალიან იაფი და ხელმისაწვდომია.
- ექსტრემალური ამინდის პროგნოზირება: ტროპიკული ციკლონებისა და ატმოსფერული მდინარეების ტრაექტორიის უკეთესი წინასწარმეტყველება.

ქვემოთ მოცემული **ცხრილი** ასახავს სამი უმსხვილესი მოდელის მახასიათებლებს ტრადიციულ ECMWF (HRES) მოდელთან შედარებით:

| მოდელი / შემქმნელი | ძირითადი არქიტექტურა | გამოთვლის დრო (10 დღე) | სიზუსტე (ტრადიციულთან შედარებით) |
|---|---|---|---|
| GraphCast (Google DeepMind) | Graph Neural Networks (GNN) | ~ 60 წამი | აღემატება შემთხვევათა 90%-ში |
| Pangu-Weather (Huawei) | 3D Earth-Specific Transformers | ~ 1-2 წამი | უფრო ზუსტია ტროპოპაუზის წნევის გათვლაში |
| FourCastNet (NVIDIA) | Fourier Neural Operators (FNO) | წამზე ნაკლები | საუკეთესოა მცირე მასშტაბის ექსტრემალური მოვლენებისას |
| ECMWF (HRES) (ტრადიციული) | ფიზიკური NWP (სუპერკომპიუტერი) | ~ 1-2 საათი | საბაზისო ეტალონი |

ამრიგად, მეტეოროლოგიის მომავალი არა ტრადიციული მეთოდების სრულ გაქრობაში, არამედ ჰიბრიდულ მიდგომაშია (Physics–Informed ML). თანამედროვე კვლევები მიმართულია იქითკენ, რომ ნეირონული ქსელების მათემატიკურ არქიტექტურაში ჩაეწეროს ფიზიკური შეზღუდვები (მაგ. მასის კონსერვაციის განტოლება). ფიზიკური მოდელები უზრუნველყოფენ საწყის სიზუსტეს და კანონების დაცვას, ხოლო ხელოვნური ინტელექტი ახდენს მონაცემთა სწრაფ კორექტირებას, ლოკალური ეფექტების ოპტიმიზაციას და მყისიერ გამოთვლას.

ხელოვნური ინტელექტის (AI) გამოყენება ამინდის პროგნოზირებაში ამჟამად მეტეოროლოგიის ყველაზე აქტუალური და რევოლუციური მიმართულებაა. AI მოდელები ისტორიულ მონაცემებზე სწავლობენ და პროგნოზს წამებში აგენერირებენ. ეს სიმბიოზი კაცობრიობას აძლევს შანსს, ბევრად უფრო მომზადებული შეხვდეს გლობალური კლიმატის ცვლილებით გამოწვეულ კატაკლიზმებს.

**ლიტერატურა:**

1. ო. ნამიჩეიშვილი. ხელოვნური ნეირონული ქსელები / Machine Learning (სასწავლო კურსები და ნაშრომები).საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი.
2. გ. უგულავა. (2019). ხელოვნური ნეირონული ქსელების გამოყენება ტერიტორიული ეკონომიკური მაჩვენებლების პროგნოზირებისთვის. *გლობალიზაცია და ბიზნესი*, №8.
3. Lam, R., et al. (2023). "Learning skillful medium-range global weather forecasting." Science.
4. Bi, K., et al. (2023). "Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks." Nature.
5.Nguyen, T., et al. (2023). "ClimaX: A foundation model for weather and climate."

**The Artificial Intelligence Revolution in Global Meteorology**

**Tsira Beradze**

**Summary**

*This article explores atmospheric chaos and the classical limits of forecasting, problem-solving with maximum efficiency, and the early prediction of events. It examines the transition from physical equations to neural networks, the architecture of AI models, their mathematical principles, comparisons with traditional methods, and existing challenges. The study highlights modern Big Data technologies, which assist researchers in making optimal decisions and accurate predictions. These technologies represent alternative pathways for information processing and can be implemented on modern computers. AI models learn from historical data and generate forecasts within seconds.*

***Keywords**: Artificial intelligence, machine learning, graph neural networks.*

# წყლისა და სითხეების დეკონტამინაცია ინოვაციური მეთოდით

სუმბაძე ც., სიხარულიძე ი., მარქარიანი ს.
ი. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის
ალ. ნათიშვილის სახელობის მორფოლოგიის ინსტიტუტი

***აბსტრაქტი:*** *წყალი სიცოცხლის უნარიანობის წყაროა. სუფთა წყალი ადამიანის კეთილდღეობის ერთ-ერთი წინაპირობაა და მისი დაბინძურება საფრთხის ქვეშ აყენებს მილიონობით ადამიანის ჯანმრთელობას. ასევე ჯანმრთელობისთვის საფრთხეს წარმოადგენს ქლორით გაწმენდილი სასმელი წყალი. ი. ჯავახიშვილის სახ. სახელმწიფო უნივერსიტეტის ალ. ნათიშვილის სახ. მორფოლოგიის ინსტიტუტის მკვლევარების მიერ შექმნილია ქლორის და სხვა ქიმიური რეაგენტების გარეშე სითხეებს გაწმენდის ინივაციური მრავალკომპონენტიანი მოდულის (დმმ) ლაბორატორიული მოდელი და მიღებულია შესაბამისი პატენტი p 20135987 B.*

*მოდულის ეფექტურობის შესწავლა ჩატარდა ლ. საყვარელიძის სახ. დაავადებათა კონტროლის და საზოგადოებრივი ჯანმრთელობის ეროვნული ცენტრის ლუგარის ს/კ ცენტრის ბაქტერიებისა და ვირუსების ეროვნული საცავის ბაზაზე. კვლევის ობიექტად შერჩეულ იქნა სხვადასხვა ინფექციური პათოლოგიების გამომწვევი ბაქტერიების შტამები: S. aureus - 25923, E. coli - 25922, Ps.aeruginiosa-7853, E. hirae - 10541, B. cereus - 4342, B. anthracis СТИ.*

*ჩატარებულმა კვლევამ გამოავლინა მოდულის თვალსაჩინო ეფექტურობა ზემოთ აღნიშნული პათოლოგიური მიკროორგანიზმების მიმართ. მოდულის მეშვეობით მოხდა მასში გატარებული დაბინძურებული სითხეების დეზინფექცია. საყურედღებოა ის ფაქტიც, რომ აპარატში გატარებული სუფთა სითხეები (წყალი, ფიზიოლოგიური ხსნარი) თავის მხრივ იძენენ მიკროორგანიზმებზე ბიოციდური მოქმედების თვისებას.*

*შესაბამისად, წარმოდგენილი კომპლექსური მოდულის მეშვეობით შესაძლებელია როგორც სუფთა სასმელი წყლის მიღება, ასევე სხვადასხვა ბაქტერიებით დაბინძურებული სითხეების დეზინფექცია.*

***საკვანძო სიტყვები: სუფთა წყალი, კომპლექსური მოდული, დაბინძურებული სითხეების გაწმენდა.***

წყალი სიცოცხლის უნარიანობის წყაროა. სუფთა წყალი ადამიანის კეთილდღეობის ერთ-ერთი წინა პირობაა და მისი დაბინძურება საფრთხის ქვეშ აყენებს მილიონობით ადამიანის ჯანმრთელობას.

გარემოში ტექნოლოგიურად დაბინძურებული წყლის მასის მნიშვნელოვანი ზრდის შედეგად, მსოფლიოში ერთ-ერთი აქტუალური პრობლემაა მოსახლეობისთვის სუფთა წყლით მომარაგება. პრობლემას ამწვავებს არსებული წყალმომარაგების სისტემების გაუ-