**Review of the NCD 45 (2024), 77-87**

**Недељко Тодоровић**
метеоролог, Београд, Србија

# БЉЕСКОВИ НА НЕБУ
## Светлосно – електромагнетни записи у атмосфери Земље

**Апстракт.** Земља је велики магнет и има магнетосферу која ју у великој мери штити од утицаја међупланетарног магнетног поља и наелектрисаних честица Сунчевог ветра. Наелектрисане честице из активних региона и короналних рупа који су у геоефективној позицији на Сунцу крећу се дуж линија међупланетарног магнетног поља и долазе до магнетосфере Земље и изазивају геомагнетне поремећаје и олује. Променљивост магнетног поља Земље је показатељ утицаја Сунчеве активности на терестријални систем. Развојем и применом космичке технологије добијено је мноштво вредних инструменталих података о активности Сунца и његовом утицају на Земљино магнетно и електрично поље. То је допринело проширивању сазнања и њиховом повезивању са механизмом метеоролошких процеса у атмосфери Земље. Улазак наелектрисаних честица Сунчевог ветра у атмосферу Земље узрокује појаву разноврсних светлосно-електромагнетних појава, од поларне светлости, преко уобичајених муња, до мноштва других феномена који људском оку нису лако доступни, а откривени су развојем космичке и компјутерске технологије. Последњих неколико деценија откривени су и други облици поларне светлости и појаве назване *плави млазеви*, *вилењаци* и *духови*. Ове светлосне појаве јављају се у вишим слојевима атмосфере (стратосфера и јоносфера) као краткоживећи бљесак. Механизам настанка муња у тропосфери сличан је настанку муња и поларне светлости у стратосфери. Наелектрисане честице Сунчевог ветра избијају електроне из атома хемијских елемената који се налазе у саставу ваздуха, а затим електрони, при враћању на првобитни енергетски ниво у атому, брзо ослобађају енергију у виду светлости. Бљескови (муње) у вишим слојевима су показатељ уласка наелектрисаних честица са Сунца, а оне у тропосфери повезане су и са метеоролошким појавама, пре свега са грмљавинским облацима.

**Кључне речи:** Сунчева активност, наелектрисане честице, муње у атмосфери

## 1. Увод

Главни извор енергије у атмосфери Земље је Сунце. Нематеријални део (електромагнетно зрачење) чини 99 %, а 1 % материјално (корпускуларно) зрачење у виду наелектрисаних елементарних честица (Сунчев ветар). У атмосферу Земље продиру и космички зраци пореклом из дубине космоса.

Земља има своје магнетно поље. Претпоставља се да магнетно поље настаје по законима електромагнетизма. Проток електричне струје (телурске струје) кроз унутрашњост планете, пре свега кроз гвоздено језгро, ствара њено магнетно поље. Земљино магнетно поље има свој северни и јужни магнетни пол чије се локације разликују од географских полова. Магнетосфера је област свемира која окружује Земљу где је њено магнетно поље јаче од магнетног поља међупланетарног простора. Магнетосфера у великој мери штити Земљу од деловања међупланетарног магнетног поља и наелектрисаних честица које потичу са Сунца [1].

Услед присуства наелектрисаних честица, позитивних и негативних јона у атмосфери, Земља има електрично поље. Јонизација атмосфере настаје под утицајем:

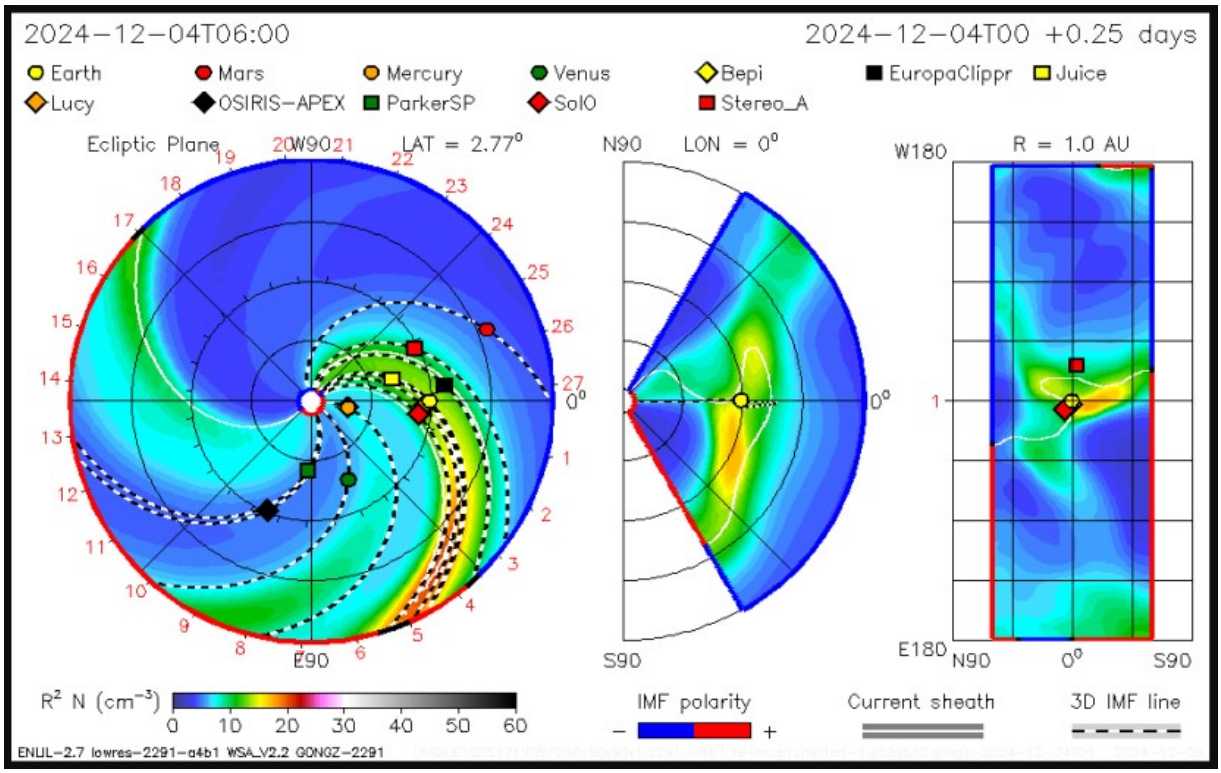
- галактичких космичких зрака, које чине високоенергетска језгра водоника и хелијума који настају изван нашег соларног система у експлозијама супернове; генеришу каскаду јона док продиру наниже кроз атмосферу и главни су извор јонизације,
- Сунчевих енергетских честица које настају избацивањем короналне масе при експлозијама и ерупцијама на Сунцу (Сунчев ветар),
- природне радиоактивности из тла и стена над копном (не изнад океана) и који продиру навише од површине до висине од око 1 км [2].

У вишим слојевима јоносфере гасови који чине атмосферу делом су атомске структуре или плазме.

Поред глобалних покретача атмосферског електрицитета постоје и локални утицаји:

- временске прилике; скоро сваки тип времена може утицати на атмосферски електрицитет, на пример, магла изазива велико повећање градијента потенцијала, киша узрокује да он постане негативан и веома променљив, а снег да буде позитиван,
- загађење ваздуха; на пример, честице дима из издувних гасова и пожара и капљице стварају додатни отпор и сходно томе велики потенцијал градијент.

- промене у физичком окружењу; на пример, шиљасте металне конструкције као што су стубови и ограде искривљују електрично поље близу површине Земље [2].




Слика 1. ENLIL Spiral | Magnetic Sector Boundaries and CME Events [5]

На основу закона електромагнетизма, наелектрисане честице у атмосфери крећу се у правцу мегнетних силница. Атмосферско електрично поље усмерено је вертикално у таквом смислу да покреће позитивна наелектрисања према доле, ка тлу [3]. Сунчев ветар непрекидно тече напоље од Сунца и састоји се углавном од протона и електрона у стању познатом као плазма. Заједно са Сунчевим ветром креће се и магнетно поље које је уграђено у плазму. Различити региони на Сунцу производе Сунчев ветар различитих брзина, густина и температуре. Сунце се окреће око своје осе, једна ротација износи приближно 27 земаљских дана и Сунчев ветар постаје сложена спирала великих и малих брзина и густина (слика 1), [4], [5].

WSA-Enlil is a large-scale, physics-based prediction model of the heliosphere, used by the Space Weather Forecast Office to provide 1- 4 day advance warning of solar wind structures and Earth-directed coronal mass

ejections (CMEs) that cause geomagnetic storms. Solar disturbances have long been known to disrupt communications, wreak havoc with geomagnetic systems, and to pose dangers for satellite operations [5].

Када се на Сунцу активни региони и коронални рупе нађу у геоефективној позицији, наелектрисане честице се после ерупције крећу дуж линија интерпланетарног магнетног поља и долазе до магнетосфере Земље и изазивају геомагнетни поремећај. Променљивост магнетног поља Земље је показатељ утицаја Сунчеве активности на терестријални систем. Највећи део Сунчевих наелектрисаних честица улази у атмосферу у поларним областима, око северног и јужног повратника (од 60$^{o}$ до 70$^{o}$ географске ширине), на ноћној страни магнетосфере. Сунчев ветар има велику променљивост у простору и времену [6].

## 2. Утицај Сунчеве активности на метеоролошке процесе у атмосфери Земље

Развој космичке технологије (сателити, оптика, рачунари) омогућио је добијање мноштва вредних инструменталних података о активности Сунца и његовом утицају на Земљино магнетно и електрично поље. То је допринело проширивању сазнања и њиховом повезивању са процесима у атмосфери Земље. Последњих неколико деценија објављено је много радова о повезаности активности Сунца и метеоролошких процеса у атмосфери Земље. На пример, утврђена је веза активности Сунца и јачања тропских циклона [7], [8], и циклона у Северном Атлантику [9], повезаност поновљивости неких метеоролошких појава са периодичношћу ротације Сунца [10], повезаност геомагнетне активности и динамике хладних фронтова [11].

## 3. Светлосно-електромагнетне појаве у стратосфери и јоносфери

Улазак наелектрисаних честица Сунчевог ветра у атмосферу Земље узрокује појаву разноврсних светлосних појава, од поларне светлости, преко уобичајених муња, до мноштва других феномена који људском оку нису лако доступни, а откривени су развојем космичке и компјутерске технологије. Пре једног века постојало је преко 80 теорија за објашњење поларне светлости [12].

## 3.1 Поларна светлост

Поларна светлост (aurora polaris, borealis, australis) је добро објашњена. Она представља светлење ноћног неба, углавном у поларним областима. При великој активности Сунца и јаким ерупцијама наелектрисаних честица, поларна светлост је видљива и на мањим географским ширинама, понекад, врло ретко, на пример и у области Средоземља.

Поларну светлост (слика 2) изазивају наелектрисане честице, пре свега брзи електрони, који се налазе у саставу Сунчевог ветра и који имају енергију од 1 keV до 15 keV, то јест, убрзани су напоном од 1.000 V до 15.000 V. Електрони се сударају са атомима и молекулима ваздуха и предају им извесну енергију. Због тога електрони из електронског омотача атома краткотрајно прелазе на виши енергетски ниво. Када се враћају у основно стање, електрони (и атом као целина) ослобађају енергију у виду светлости. Када је побуђен атом кисеоника, његови електрони се за непуну секунду враћању у основно стање и тада емитује зелену боју. Преостали електрони, који се враћају у року од два минута, исијавају црвенкасту светлост. Када је густина гасова већа, енергија коју емитују електрони из љуске губи се међусобним сударима између атома. На висинама од око 80 km концентрација атома кисеоника ја мала, судара има мало, али постоји довољно времена да побуђени атоми емитују зелену светлост (557,7 nm), а они на вишим висинама браонкастоцрвену боју (630 nm). Јонизовани атоми азота емитују светлоплаву, а нејонизовани црвену боју [13].

Поларна светлост може да се опази и у ултраљубичастом делу спектра, поготово осматрањем из свемира. Свемирска сонда „Полар“ је регистровала аурору чак и у подручју X-зрака. Поларна светлост се јавља као „дифузно светлење“, као „завеса“ или „лукови“, која се премешта у смеру од истока ка западу. Светлост се често мења („активна аурора“). Свака завеса се састоји од бројних паралелних трака (зрака) које су усмерене у смеру пружања линија магнетног поља. Иначе, познато је да се наелектрисане честице премештају дуж линија магнетног поља, што указује да интерпланетарно и Земљино магнетно поље имају утицаја на појаву поларне светлости.

Поларна светлост постоји и на Јупитеру и Сатурну чија су магнетна поља много снажнија од Земљиног, а последица је дејства Сунчевог ветра као и на Земљи. Такође, и Јупитеров сателит Ио има изражене ауроре. Недавно је поларна светлост откривена и на Марсу [14].

### 3.2 Протонска аурора

Око планете Земље постоје прстенови електричне струје који су невидљиви голим оком, за разлику од видљивих Сатурнових прстенова састављених од леда. При јаким ерупцијама на Сунцу и јаким магнетним олујама, наелектрисане честице из прстенова падају и изазивају секундарну кишу електрона који ударају у атмосферу и изазивају аурору. Сателити у орбити Земље регистровали су силазно кретање протона у прстеновима. Протонске ауроре обично се јављају у сумрак, пулсирају и праћене су црвеним луковима светлости који излазе из прстена електричне струје (слика 3). [15].

### 3.3 Плави млазеви, вилењаци и духови

Последњих неколико деценија космичка технологија омогућила је нова сазнања и откриће до тада непознатих светлосних појава у стратосфери и јоносфери (слика 4). Заједничка особина свих облика ових светлосних појава (Blue Jet, Elves, Red Sprite) је да настају ударом наелектрисаних честица Сунчевог ветра у горње слојеве (врхове) грмљавинског облака (Cumulonimbus). Механизам је сличан као и код настанка поларне светлости.



Слика 2. Aurora polaris. https://nationalgeographic.rs/. Извор: Foto: Shutterstock



Слика 3. Aurora borealis, изолована протонска аурора. Снимак са Међународне свемирске станице. (Image credit: NASA/ Scott Kelly)

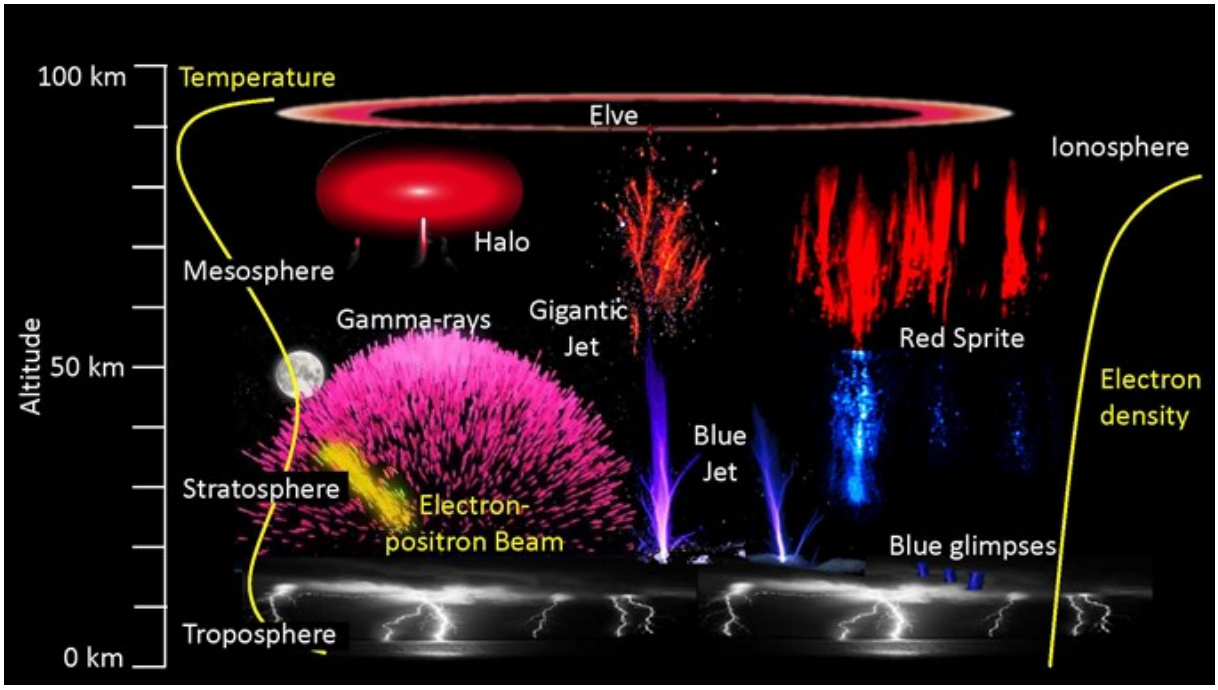
Приспеле честице избијају електроне из атома при чему се јављају бели бљескови, а позитивно јонизовани атоми дејством електричног поља крећу се навише од врха облака. Због повећања концентрације електрона на већим висинама, настала светлост (бљесак, муња) јача услед све већег броја судара протона и електрона. Бљескови светлости овог типа могу да буду разних боја у зависности који је хемијски елемент јонизован. Кисеоник ствара плаве муње, азот црвене.

**Плави млазеви** (Blue Jet) имају велику брзину (100 km/s), настају на висинама од 40 km до 50 km. Трају око ¼ s и могу се видети људским оком. Имају боје плавичастих нијанси (слика 5)**.**

**Вилењаци** (ELVE - Emissions of Light and Very Low Frequency Perturbations due to Electromagnetic Pulse Sources) представљају **в**елике ореоле на висинама од око 100 km изнад грмљавинских облака (Cumulonimbus - Cb). Хоризонталне димензије су им око 400 km. Трају неколико милисекунди. Представљају емисију светлости услед поремећаја после удара нискофреквентног електромагнетног импулса (слика 6).

**Духови или црвени духови** (Red Sprite) имају облик атомске печурке. Трају веома кратко и региструју их само брзе камере. Обично су црвенкасто-наранџасте боје, имају различите облике (дух, траке, рибе). Уочавају се на

висинама од 50 km до 90 km. Типична хоризонтална димензија им је око 50 km. Имају хало на горњој граници. Трају 3-10 микросекунди, једва видљиви за људско око (слика 7).




Слика 4. Плави млазеви, вилењаци и црвени духови [16] (сликовни приказ)



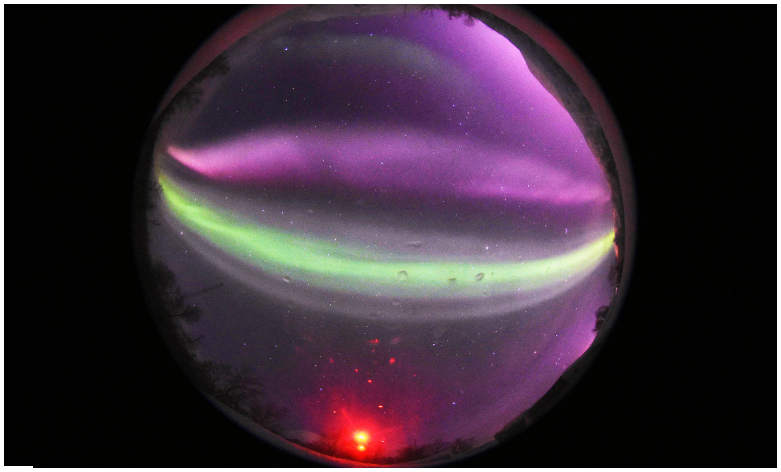
Слика 5. Излазак плавог млаза (Blue Jet) из грмљавинског облака навише у стратосферу снимљен са Међународне свемирске станице 2019. DTU SPACE, DANIEL SCHMELLING/MOUNT VISUAL [17]



Слика 6. Вилењак изнад јаке грмљавинске олује у близини Анконе, Италија. Црвени прстен означава место где је електромагнетни поремећај (EPM) ударио у Земљину јоносферу (photo:Valter Binotto, 27.03.2023. [18]



Слика 7. Црвени духови у јоносфери снимљени августа 2015. године са Међународне свемирске станице. Види се бели бљесак и скуп црвених форми изнад врха грмљавинске олује над Мексиком. https://earthsky.org/space/ [19]



Слика 8. STEVE - Strong Thermal Emission Velocity Enhancement
https://www.earth.com/news/steve-phenomenon-not-aurora-has-dawn-side-twin-swarm-satellites-discovery/ [21]

### 3.4 STEVE - Strong Thermal Emission Velocity Enhancement

STEVE is an aurora-like glow that often accompanies the northern lights, yet is a distinct phenomenon, according to the American Geophysical Union (AGU). Scientists discover what powers celestial phenomenon STEVE.
STEVE, an unusual aurora-like structure characterized by a glowing purple arc, was first observed by amateur sky watchers, the study reported. Unlike usual auroras, which are caused by charged particles from the sun colliding with Earth's magnetic field, STEVE is believed to be a stream of hot gas [20], (слика 8).

## 4. Светлосно-електромагнетне појаве у тропосфери

Јонизовани хемијски елементи у атмосфери непрестано се стварају и ишчезавају. Јонизацију узрокује ултраљубичасто и X-зрачење као део спектра Сунчевог нематеријалног зрачења и наелектрисане елементарне честице, протони и електрони, које долазе у атмосферу Земље са Сунца у виду Сунчевог ветра и из дубине космоса као космичко зрачење. Сваки јон има око себе своје сопствено електрично поље, а електрично поље атмосфере је резултанта свих таквих елементарних поља.

Електрични потенцијал атмосфере представља електрични напон у односу на Земљино тло и повећава се са висином. Нарочито се брзо повећава у слоју до 1 км. Та промена потенцијала са висином показује јачину електричног поља која при тлу износи 130 V/m, а на висини од 12 km svega 4 V/m [22].

У атмосфери постоје две врсте електричних струја [23].

**Струје проводљивости (кондукционе)** су изазване кретањем постојећих јона у ваздуху и обично су слабе. Када се успостави критична потенцијална разлика између две области атмосфере јавља се пражњење у виду грома (севање и грмљавина).

**Конвективне струје** представљају кретање млаза наелектрисаних честица (протона и електрона) велике кинетичке енергије које улазе у атмосферу у виду Сунчевог ветра и крећу се дуж линија резултујућег интерпланетарног и геомагнетног поља. Нису последица разлике електричног потенцијала између облака и тла. Протонске муње се одликују јаком електричном струјом и релативно ниским напоном, а електронске слабом електричном струјом и високим напоном.

**Механизам настанка муња (севања, бљескови)** је сличан настанку поларне светлости и других светлосно-електромагнетних појава у јоносфери. Наелектрисане честице Сунчевог ветра избијају електроне из атома хемијских елемената који се налазе у саставу ваздуха. Због тога електрони који се налазе у електронском омотачу атома краткотрајно прелазе на виши енергетски ниво. Када се враћају у основно стање, електрони и атом као целина, ослобађају енергију у виду светлости (слика 9).



Слика 9. Муња из грмљавинског облака (Cumulonimbus)

## 5. Закључак

Улазак наелектрисаних честица Сунчевог ветра у атмосферу Земље узрокује појаву разноврсних светлосно-електромагнетних појава, од поларне светлости, преко уобичајених муња, до мноштва других феномена који људском оку нису лако доступни, а откривени су развојем космичке и компјутерске технологије. Откривени су и други облици поларне светлости и појаве назване *плави млазеви*, *вилењаци* и *духови*. Ове светлосно-електромагнетне појаве (муње) јављају се у вишим слојевима атмосфере (стратосфера и јоносфера) као краткоживећи бљесак на небу. Механизам настанка муња у тропосфери сличан је настанку муња и поларне светлости у стратосфери. Наелектрисане честице Сунчевог ветра избијају електроне из атома хемијских елемената који се налазе у саставу ваздуха, а затим електрони, при враћању на првобитни енергетски ниво у атому, брзо ослобађају енергију у виду светлости. Бљескови у вишим слојевима су показатељ уласка наелектрисаних честица са Сунца, а оне у тропосфери повезане су и са метеоролошким појавама, пре свега са грмљавинским облацима.

## References:


[1] https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/earths-magnetosphere
[2] https://www.metlink.org/wp-content/uploads/2020/11/PhysRev25_4_Nicoll.pdf
[3] (AMS) https://glossary.ametsoc.org/wiki/Atmospheric_electric_field
[4] https://spaceweathernews.com/
[5] https://www.swpc.noaa.gov/products/wsa-enlil-solar-wind-prediction
[6] NASA - Nacional Aeronautics and Space Administration
[7] Elsner, J.B., Jagger, T.H. (2008) United States and Caribbean tropical cyclone activity related to the solar cycle. *Geophysical Research Letters*, 35, L18705. https://doi.org/10.1029/2008GL034431
[8] Prikryl, P., Nikitina, L., Rušin, V. (2019) Rapid intensification of tropical cyclones in the context of the solar wind magnetosphere-ionosphere-atmosphere coupling. *Journal of Atmospheric Solar-terrestrial Physics,* 183, 36-60. https:/doi.org//j.jastp.2018.12.009
[9] Veretenenko, S.V. (2017) Comparative Analysis of Short-Term Effects of Solar and Galactic Cosmic Rays on the Evolution of Baric Systems at Middle Latitudes. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2017, 81(2), 260–263. https://doi.org/10.3103/S1062873817020460

[10] Todorović, N., Vujović, D. (2014) Effect of solar activity on the repetitiveness of some meteorological phenomena. *Advances in Space Research,* 54, 2430-2440. https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.08.007
[11] Todorović, N., & Vujović, D. (2022). Links between geomagnetic activity and atmospheric cold fronts passage over the Belgrade region, Serbia. Meteorological Applications, 29(6), e2107. https://doi.org/10.1002/ met.2107
[12] Жардецки В.: „О неким појавама у високим слојевима атмосфере“, „Гласу Српске краљевске академије“ CXX, Beograd, 1926.
[13] https://pwg.gsfc.nasa.gov/polar/EPO/auroral_poster/aurora_all.pdf
[14]https://science.nasa.gov/missions/hubble/hubble-captures-vivid-auroras-in-jupiters-atmosphere/
[15] https://spaceweatherarchive.com/2023/05/16/mysterious-aurora-blobs-identified/
[16] https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2021/01/25/nasa
[17] https://www.sciencenews.org
[18] https://www.spaceweather.com
[19] https://earthsky.org/space/
[20] https://www.space.com/what-is-steve
[21] https://www.earth.com/news/steve-phenomenon-not-aurora-has-dawn-side-twin-swarm-satellites-discovery/
[22] https://www.metlink.org/wp-content/uploads/2020/11/PhysRev25_4_Nicoll.pdf
[23] Stevančević M.: Heliocentric Electromagnetic Meteorology, Belgrade 2023.

nedeljko52@yahoo.com

**http://elib.mi.sanu.ac.rs/files/journals/ncd/45/ncdn45p77-87.pdf**