

ИНСТИТУТ ЗА ФИЗИКУ У БЕОГРАДУ И ДВЕ ДЕЦЕНИЈЕ ИСТРАЖИВАЊА ЈОНОСФЕРЕ

ВЛАДИМИР А. СРЕЋКОВИЋ

*Институт за физику Београд, Универзитет у Београду, Прегревица, 118,
11080 Београд, Србија
E-mail: vlada@ipb.ac.rs*

Резиме: У овом раду описана су научна достигнућа настала током две деценије истраживања јоносфере у Институту за физику Београд. Током вишегодишњег истраживања публиковани су резултати проучавања плазме јоносферске D-области засновани на континуираној, симултаном регистрацији електромагнетних таласа врло ниских фреквенција емитованих предајницима лоцираним широм света и регистрованих пријемницима који су почетком 2000-тих инсталирани у Институту за физику у Београду.

Кључне речи: Институт за физику, јоносфера, астрофизика, звездане атмосфере, историја астрономије, друштвене науке и астрономија

1. УВОД

Историјат истраживања јоносфере у Институту за физику у Београду је описан у овом раду. Представљени су резултати који су плод интензивне међународне научне сарадње, што је за последицу имало више десетина публикација као и трансфер знања и усавршавање истраживача.

Скоро 20 година одвија се интензивно истраживање плазме јоносферске D-области засновано на континуираној, симултаном регистрацији електромагнетних таласа врло ниских фреквенција емитованих предајницима лоцираним широм света и регистрованих пријемницима који су почетком 2000-тих инсталирани у Институту за физику у Земуну. Тачније на Институту за физику се од 2003. налази AbsPAL (Absolute Phase and Amplitude Logger), а од 2008. године и AWESOME (Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation Modeling and Education) VLF пријемни системи.

Велики број сарадника дао је допринос овом истраживању и стварању као и развоју јоносферске лабораторије у Институту за физику. Ту истичемо

допринос истакнутих српских интелектуалаца др. Десанке Шулић, др. Даворке Грубор, др. Анатолиј Анатољевича Михајлова, др. Љубинка Игњатовића, др. Владимира Срећковића, др. Александре Нине, др. Александре Коларски и многих сарадника из Србије и света као што су др. Владимир Чадеж, др. Лука Поповић, др. Јован Бајчетић, др. Вида Жигман, Morris Cohen, P.F. Biagi, итд.

Нарочито током последњег пројектног циклуса ова домаћа сарадња се интензивирала где поменути сарадници постају чланови научних пројеката ОИ 176002 “Утицај сударних процеса на спектре астрофизичке плазме” и ИИИ 44002 “Астроинформатика: примена ИТ у астрономији и сродним дисциплинама”. Ови пројекти су финансирани од стране Министарство просвете, науке и технолошког развоја на основу уговора који је закључен јануара 2011. г., и кроз више анекса је продужаван до 2019. године. Пројекти су из области “Геонауке и астрономија”, а тип пројекта је био теоријско-експериментални, а реализатори Астрономска опсерваторија у Београду (АОБ), Институт за физику Београд (ИПБ), итд.

Само испитивање јоносфере од стране горепоменутих сарадника др. Десанке Шулић и др. Даворке Грубор је почело 80тих година прошлог века и наставило се током 90тих година низом радова. Набројаћемо само неке од њих:

-Carpenter, D. L. and D. M. Šulić (1988). "Ducted whistler propagation outside the plasmapause." *Journal of Geophysical Research* 93: 9731.

-Grubor, D. P. and D. M. Šulić (1996). "Electric Properties of Thermosphere-Plasmasphere System Estimated from - Based Data." *Bulletin Astronomique de Belgrade* 154: 29.

-Grubor, D. P., D. M. Šulić and Ž. V. Jelić (1995). "The role of geomagnetic field configuration on the GPS signal paths through the magnetosphere and ionosphere." *Bulletin Astronomique de Belgrade* 151: 29.

-Šulić, D. M. (1999). "Guiding of Whistler-Mode Waves with Frequencies above One Half of the Gyrofrequency in the Magnetosphere." *Serbian Astronomical Journal* 159: 11.

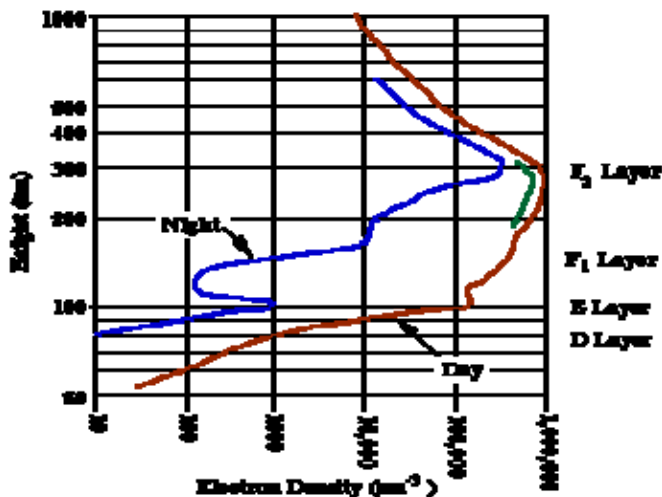
-Šulić, D. M. (1997). "Ray tracing study of whistlers guided by a field-aligned depression of electron density in the magnetosphere." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 59: 569.

-Šulić, D. M. and D. P. Grubor (1996). "A trough as waveguide for whistlers in the magnetosphere." *Bulletin Astronomique de Belgrade* 154: 23.

-Šulic, D. M. and D. P. Grubor (1996). "Ray-tracing analysis of multicomponent whistlers propagating in the asymmetric interhemispheric plasma." *Advances in Space Research* 17: 228.

-Šulić, D. M. and Z. V. Jelić (1994). "Ray-tracing study about initial conditions of multicomponent whistlers in the asymmetric model of the magnetosphere." *Bulletin Astronomique de Belgrade* 150: 15.

Негде у то време се јавила идеја за будућа експериментална истраживања земљине атмосфере. Тако, почетком 2000тих јоносферска проблематика се развија у Институту за физику Београд формирањем Лабораторије за испитивање јоносфере. Експериментална опрема је набављена, група је оформљена и почео је рад и истраживање под вођством др. Анатолија Анатољевича Михајлова и др. Десанке Шулић.



Слика 1: Карактеристике D-, E- и F-области јоносфере.

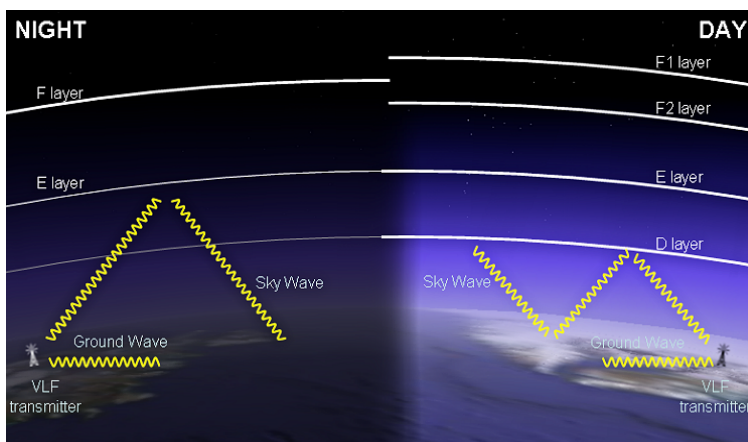
Земљина атмосфера је, као слој који обавија све остале делове планете, под константним утицајем зрачења из свемира, са једне, и бројних природних и вештачки изазваних процеса који долазе са Земљине површине и из њене унутрашњости, са друге стране. Њихово појединачно присуство и интензитети се мењају у времену и простору чинећи физичке и хемијске особине гаса у Земљиној атмосфери просторно-временски зависним. На тај начин они утичу на класификације делова атмосфере према различитим карактеристикама.

Као што је познато јоносфера представља слој који се од осталих делова разликује по незанемарљивом присуству наелектрисаних честица и бројним процесима који плазму издвајају од неутралног гаса. Поред чисто научног значаја, истраживања ове области Земљине атмосфере имају и бројне практичне примене. Она су, пре свега, изузетно важна у области телекомуникација. Наиме, приликом простирања радио сигнала на великим раздаљинама долази до њихове рефлексije од јоносфере чије стање утиче на карактеристике сигнала на месту пријемника. Такође, у савремено доба веома заступљене, комуникације помоћу сателита зависе од особина плазме на различитим висинама.

Посматрање јоносфере, чија се структура, идући од површине Земље, састоји од D-, E- и F-области током дана, се врши различитим техникама у

зависности од висине која се истражује. Оне се могу базирати на мерењима са површине Земље радарима и пријемницима радио сигнала, на директним ракетним мерењима и на мерењима која укључују сателите.

Истраживања у ИПБ су фокусирана на најнижу јоносферску област - D-област, и на метод посматрања базиран на простирању електромагнетних таласа врло ниских фреквенција (VLF од енглеског very low frequency).



Слика 2: Простирање VLF радио сигнала кроз јоносферу током дана и током ноћи.

Call sign	Notes	Frequency	Location	Latitude	Longitude
VTX1		16300	South Vijayanarayanam, India Locator: MJ88vj	N 08° 23' 13.25" (+08.387015)	E 077° 45' 9.94" (+077.752762)
JXN	(1)	16400	Novik, Norway Locator: JP66wx	N 66° 58' 27.67" (+66.974353)	E 013° 52' 25.02" (+013.873617)
VTX2		17000	South Vijayanarayanam, India Locator: MJ88vj	N 08° 23' 13.25" (+08.387015)	E 077° 45' 9.94" (+077.752762)
SAQ	(2)	17200	Grimeton, Sweden Locator: JO67ec	N 57° 06' 47.42" (+57.113171)	E 012° 23' 50.20" (+012.397277)
RDL	(3)	18100	7 Locator: ----- (.....) (.....)
VTX3		18200	South Vijayanarayanam, India Locator: MJ88vj	N 08° 23' 13.25" (+08.387015)	E 077° 45' 9.94" (+077.752762)
VTX4		19200	South Vijayanarayanam, India Locator: MJ88vj	N 08° 23' 13.25" (+08.387015)	E 077° 45' 9.94" (+077.752762)
GBZ		19580	Anthorn, UK Locator: IO84iv	N 54° 54' 41.91" (+54.911643)	W 003° 16' 42.44" (-003.278456)
NWC		19800	Harold E. Holt, North West Cape, Exmouth, Australia Locator: OG78be	S 21° 48' 58.78" (-21.816328)	E 114° 09' 56.11" (+114.165586)
ICV		20270	Isola di Tavorola, Italy Locator: JN40uw	N 40° 55' 23.26" (+40.923127)	E 009° 43' 51.64" (+009.731011)
FTA	(4)	16800 20900	Sainte-Assise, France Locator: JN18gn	N 48° 32' 40.68" (+48.544632)	E 002° 34' 45.94" (+002.579429)
NPM		21400	Pearl Harbour, Lualaba, HI Locator: BL01wk	N 21° 25' 12.60" (+21.420166)	W 158° 09' 4.10" (-158.151140)
HWU	(5)	15100 18300 19100 21750 22600	Rosnay, France Locator: JN06or	N 46° 42' 47.26" (+46.713129)	E 001° 14' 42.89" (+001.245248)
CQD		22100	Skelton, UK Locator: IO84iv	N 54° 43' 54.48" (+54.731788)	W 002° 52' 58.92" (-002.883033)

Слика 3: Део листе светских VLF радио трансмитера.

VLF таласи се рефлектују на доњим слојевима јоносфере, што дозвољава употребу амплитуде и фазе VLF сигнала забележених на VLF пријемницима за истраживање ове атмосферске области. У том циљу, широм света налазе се, с једне стране, многобројни предајници VLF сигнала, а са друге стране, десетине VLF пријемника.

На Институту за физику се од 2003. налази AbsPAL (Absolute Phase and Amplitude Logger), а од 2008. године и AWESOME (Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation Modeling and Education) VLF пријемни систем. Изучавање ниске јоносфере овом методом има врло важну предност. Емитовање и примање сигнала је континуирано у времену, што поред периодичних и дуготрајних промена у D-области омогућава праћење и непредвидивих и краткотрајних утицаја различитих појава на овај део јоносфере.

У циљу квантитативних анализа, развијени су како нумерички модели за симулацију простирања VLF сигнала тако и бројне теоријске процедуре којима се израчунавају параметри плазме D-области.

У наставку текста су представљени резултати истраживања који су засновани на анализи сигнала регистрованих VLF пријемницима у Институту за физику Београд (видети нпр. радове Čadež et al. 2009; Nina et al. 2011, 2012a, 2012b, 2019; Srećković & Šulić 2017; Srećković, & Nina 2019; Srećković et al. 2017; Šulić & Srećković 2014; Šulić et al. 2016).



Слика 4: AWESOME VLF пријемник на крову Института за физику Београд.

Приказана истраживања представљају резултат сарадње са истраживачима из различитих научних области што је резултирало у развоју неколико правца развоја:

- Моделирање параметара плазме D-области под свим SW условима.
- Проучавање соларних бакљи и утицаја на јоносферу.
- Испитивање детектабилности догађаја који слабо јонизују плазму у D-области применом статистичке анализе.
- Испитивања везана за Земљину атмосферу, екстремне појаве и природне катастрофе – конекција.



Слика 5: др. Десанка Шулић представља резултате истраживања на Конференцији астронома Србије.

У оквиру истраживања коришћени су сигнали емитовани VLF предајницима лоцираним у Немачкој, Италији, Великој Британији, Турској, Француској, Исланду, Сједињеним Америчким Државама и Аустралији. Посматрани подаци су употребљени за VLF истраживања.

2. ИСТРАЖИВАЧКА АКТИВНОСТ

Истраживање јоносфере је текло у неколико различитих правца који су укратко описани у оквиру овог поглавља као посебне целине 2.1, 2.2, 2.3 и 2.4:

2.1 Моделирање електронске концентрације током поремећаја плазме D-области Сунчевим X-бакљама.

У оквиру ове теме сарадници су се бавили истраживањима везаним за моделирање електронске концентрације током поремећаја плазме D-области

Сунчевим X-флеровима. У овом истраживању добијене су просторно-временске зависности концентрације електрона које су даље коришћене у развијеном теоријском моделу у оквиру радова. Изрази датог модела резултују просторно-временском расподелом брзина производње и губитака електрона, и коефицијента који се односи на ефективне губитке овог конституента плазме. Добијене временске зависности теже ка вредностима које карактеришу непертурбовано стање плазме на посматраним висинама чиме се добија просторна расподела посматраних величина у мирној D-области.



Слика 6: Један од система за детекцију VLF радио таласа на крову Института за физику. др. Владимир Срећковић, др. Александра Нина и колеге из Италије, 2019 година.

Процес моделирања просторних и временских расподела електронске концентрације је базиран на посебно развијеној техници упоређивања регистрованих амплитуда и фаза са одговарајућим вредностима добијеним нумеричким моделирањем простирања сигнала.

Ова процедура је представљала основу на којој су, као последица добре временске резолуције израчунатих података, даље омогућене теоријске анализе других параметара плазме.



Слика 7: А. А.Михајлов (1941-2016) вођа пројекта “Радијативне и транспортне особине неидеалне лабораторијске и јоносферске плазме” (Пројект бр. 1466) за време чијег трајања је покренута експериментална VLF апаратура у Земуну.

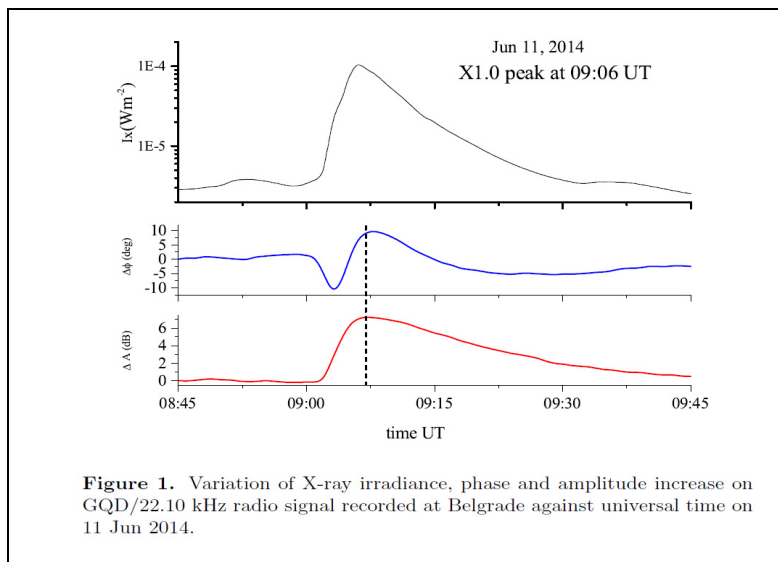
У студији је приказана метода у којој се интензивнији поремећаји (у конкретним случајевима су разматрани Сунчеви Х-флерови и расподеле електронске концентрације током поремећаја које они изазивају) користе за одређивања карактеристика плазме у периоду њене релаксације након престанка утицаја и последично, на основу добијених сатурационих вредности, у периоду мирне јоносфере.



Слика 8: Радионица у истраживачкој станици Петници 10 - 13. Мај 2019.

Неки од резултати истраживања приказани су у следећим радовима:

- Žigman, V., D. Grubor, and D. Šulić. "D-Region Electron Density Evaluated from Vlf Amplitude Time Delay During X-Ray Solar Flares." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 69 (2007): 775.
- Grubor, D. P., D. M. Šulić, and V. Žigman. "Classification of X-Ray Solar Flares Regarding Their Effects on the Lower Ionosphere Electron Density Profile." *Annales Geophysicae* 26 (2008): 1731.
- Nina, A., V. Čadež, V. Srećković, and D. Šulić. "Altitude Distribution of Electron Concentration in Ionospheric D-Region in Presence of Time-Varying Solar Radiation Flux." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 279 (2012): 110.
- Kolarski, Aleksandra, and Davorka Grubor. "Sensing the Earth's Low Ionosphere During Solar Flares Using Vlf Signals and Goes Solar X-Ray Data." *Advances in Space Research* 53 (2014): 1595.
- Srećković, V. A., Šulić, D. M., Vujčić, V., Jevremović, D., and Vyklyuk, Y.: 2017, *Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijic", SASA* 67(3), 221
- Nina, Aleksandra, Giovanni Nico, Srđan T. Mitrović, Vladimir M. Čadež, Ivana R. Milošević, Milan Radovanović, and Luka Č. Popović. "Quiet Ionospheric D-Region (Qiondr) Model Based on Vlf/Lf Observations." *Remote Sensing* 13 (2021): 483.



2.2 Испитивање могућности детекције поремећаја у D-области јоносфере услед упада зрачења које слабо јонизује анализирану плазму.

У оквиру ове теме сарадници су се бавили истраживањима везаним за могућности детекције поремећаја у D-области јоносфере услед упада зрачења које слабо јонизује анализирану плазму.



Слика 9: др. Срећковић Владимир на 'Regional workshop on atomic and molecular data' Јун 14 - 16, 2012, Београд, Србија.

Поред наведених разматраних реакција плазме D-области на конкретну пертурбацију, овај простор је константно изложен и многобројним слабијим пертурбацијама. Из тог разлога вршена су истраживања утицаја слабих пертурбација изазваних γ -бљесковима. Урађена је статистичка анализа краткотрајних поремећаја у амплитуди сигнала након почетака посматраних пертурбација. Конкретна примена ове анализе је дата на примеру упада високоенергијског зрачења који се односи на регистроване γ -бљескове из свемира. Испитивани су и остали слаби пертурбери.



Слика 10: др. Александра Нина на 'Regional workshop on atomic and molecular data' Јун 14 - 16, 2012, Београд, Србија.

Резултати ових истраживања су презентовани у неколико публикација од којих издвајамо:

- Nina, Aleksandra, Saša. Simić, Vladimir A. Srećković, and Luka Č. Popović. "Detection of Short-Term Response of the Low Ionosphere on Gamma Ray Bursts." *Geophysical Research Letters* 42 (2015): 8250.
- Nina, Aleksandra, Vladimir M. Čadež, Luka Č. Popović, and Vladimir A. Srećković. "Diagnostics of Plasma in the Ionospheric D-Region: Detection and Study of Different Ionospheric Disturbance Types." *European Physical Journal D* 71 (2017): 189.
- Nina, A., V. M. Čadež, L. C. Popović, V. A. Srećković, and S. Simić. "Detection of Terrestrial Ionospheric Perturbations Caused by Different Astrophysical Phenomena." *Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd* 96 (2017): 365.



Слика 11: др. Александра Коларски на промоцији доктораната.

2.3 Детектовање линеарних хидродинамичких таласа узрокованих наглим поремећајима у D-области.

У оквиру ове теме сарадници су се бавили истраживањима везаним за детектовање линеарних хидродинамичких таласа у D-области. Урађена је детаљна анализа хидродинамичких таласа проузрокованих наглим поремећајима. У радовима је дата теоријска процедура којом се помоћу Fourier-ових трансформација одређују периоди осцилација линеарних акустичних и гравитационих таласа. Она је примењена на процесе изласка и заласка Сунца.

Анализа представља проширење постојећих истраживања тог феномена. Резултати ових истраживања приказани су на неколико конференција и радионица као и у следећим радовима:

- Nina, A., & Čadež, V. M. (2013). Detection of acoustic-gravity waves in lower ionosphere by VLF radio waves. *Geophysical Research Letters*, 40(18), 4803-4807.
- Nina, A., Pulinet, S., Biagi, P. F., Nico, G., Mitrović, S. T., Radovanović, M., & Popović, L. C. (2020). Variation in natural short-period ionospheric noise, and acoustic and gravity waves revealed by the amplitude analysis of a VLF radio signal on the occasion of the Kraljevo earthquake (Mw= 5.4). *Science of the Total Environment*, 710, 136406.



Слика 12: др. Владимир Чадеж.

2.4. Земљина атмосфера, екстремне појаве и природне катастрофе

Атмосфера је врло осетљив медијум на разне утицаје. Ти утицаји могу проузроковати нагле поремећаје у Земљиној атмосфери и даље створити земаљске телекомуникационе сметње, нестанке струје, проблеме са транспортом, проблеме са снабдевањем водом, потенцијалне здравствене последице, као и природне катастрофе, попут шумских пожара. Ови екстремни догађаји могу проузроковати милијарде долара штете и утицати на појединце, породице, заједнице и друштва. Из тог разлога је од пресудне важности истражити везе између екстремних активности и природних катастрофа и даље развијати начине за спречавање, припрему и одговор на њих. У оквиру ове теме сарадници су се бавили мултидисциплинарним истраживањима. Резултати ових истраживања су презентовани у неколико публикација од којих издвајамо:

- Žigman, V., Kudela, K., & Grubor, D. (2014). Response of the Earth's lower ionosphere to the ground level enhancement event of December 13, 2006. *Advances in Space Research*, 53(5), 763-775.
- Srećković, Vladimir A, and Aleksandra Nina. "Special Issue on Astrophysics & Geophysics: Research and Applications." *Data* (2019).
- Nina, Aleksandra, Vladimir A Srećković, and Milan Radovanović. "Multidisciplinarity in Research of Extreme Solar Energy Influences on Natural Disasters." *Sustainability* 11, no. 4 (2019): 974.
- Nina, Aleksandra, Pier Francesco Biagi, Srđan T. Mitrović, Sergey Pulnits, Giovanni Nico, Milan Radovanović, and Luka Č. Popović.

"Reduction of the Vlf Signal Phase Noise before Earthquakes."
Atmosphere 12 (2021): 444.



Слика 13: др. Лука Поповић, Научни саветник АОБ.

3. БИБЛИОГРАФИЈА РАДОВА У МЕЂУНАРОДНИМ ЧАСОПИСИМА (Извор SAO/NASA Astrophysics Data System (ADS))

У оквиру горепоменутог вишедеценијског истраживања јоносфере, публиковано је више од 40 научних радова у међународним часописима цитираних више стотина пута (извор SAO/NASA ADS¹). Од тога броја више од половине научних радова су публиковани у међународним астро и гео часописима, обично највишег ранга. Неколико доктората је одбрањено и организовано неколико радионица.



Слика 14: проф. др. Вида Жигман, Универзитет Нова Горица.

¹ <https://ui.adsabs.harvard.edu/>

Списак Радова:

1. Grubor, D., Šulić D., and V. Žigman. "Influence of Solar X-Ray Flares on the Earth-Ionosphere Waveguide." *Serbian Astronomical Journal* 171 (2005): 29.
2. Šulić, D., V. Čadež, D. Grubor, and V. Žigman. "Space Weather Signatures on Vlf Radio Waves Recorded in Belgrade." *Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd* 80 (2006): 191.
3. Žigman, V., D. Grubor, and D. Šulić. "D-Region Electron Density Evaluated from Vlf Amplitude Time Delay During X-Ray Solar Flares." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 69 (2007): 775.
4. Grubor, D. P., D. M. Šulić, and V. Žigman. "Classification of X-Ray Solar Flares Regarding Their Effects on the Lower Ionosphere Electron Density Profile." *Annales Geophysicae* 26 (2008): 1731.
5. D. Šulic, D. Grubor, V. Žigman, V. Srećković, Numerical simulation of perturbations on VLF signals caused by ionization enhancement in the nighttime ionosphere, 3rd VERSIM 2008, Tihany, Hungary, 2008.
6. Čadež, V., D. Šulić, and V. Srećković. "Modal Frequencies of Ionospheric Perturbations Induced by Solar Wind Impacts." *Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd* 86 (2009): 39.
7. Šulic, D., A. Nina, and V. Srećković. "Numerical Simulations of the Effect of Localised Ionospheric Perturbations on Subionospheric VLF Propagation." *Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd* 89 (2010): 391.
8. Kolarski, Aleksandra, Davorka Grubor, and Desanka Šulić. "Diagnostics of the Solar X-Flare Impact on Lower Ionosphere through the VLF-NAA Signal Recordings." *Baltic Astronomy* 20 (2011): 591.
9. Nina, A., V. Čadež, V. A. Srećković, and D. Šulić. "The Influence of Solar Spectral Lines on Electron Concentration in Terrestrial Ionosphere." *Baltic Astronomy* 20 (2011): 609.
10. Kolarski, A., D. Grubor, and D. Šulić. "Study of the X-Ray Flare Induced Lower Ionosphere Changes by Simultaneous Monitoring of GQD and NAA VLF Signals." *Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd* 91 (2012): 353.

11. Nina, A., V. Čadež, V. Srećković, and D. Šulić. "Altitude Distribution of Electron Concentration in Ionospheric D-Region in Presence of Time-Varying Solar Radiation Flux." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 279 (2012): 110.
12. Nina, A., V. Čadež, D. Šulić, V. Srećković, and V. Žigman. "Effective Electron Recombination Coefficient in Ionospheric D-Region During the Relaxation Regime after Solar Flare from February 18, 2011." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 279 (2012): 106.
13. Nina, A., & Čadež, V. M. (2013). Detection of acoustic-gravity waves in lower ionosphere by VLF radio waves. *Geophysical Research Letters*, 40(18), 4803-4807.
14. Kolarski, Aleksandra, and Davorka Grubor. "Sensing the Earth's Low Ionosphere During Solar Flares Using VLF Signals and Goes Solar X-Ray Data." *Advances in Space Research* 53 (2014): 1595.
15. Šulić, D., A. Nina, and V. Srećković. "Numerical Simulations of the Effect of Localised Ionospheric Perturbations on Subionospheric VLF Propagation." (2014), 2014arXiv1405.3783S.
16. Šulić, D. M., and V. A. Srećković. "A Comparative Study of Measured Amplitude and Phase Perturbations of VLF and LF Radio Signals Induced by Solar Flares." *Serbian Astronomical Journal* 188 (2014): 45.
17. Žigman, Vida, Karel Kudela, and Davorka Grubor. "Response of the Earth's Lower Ionosphere to the Ground Level Enhancement Event of December 13, 2006." *Advances in Space Research* 53 (2014): 763.
18. Kolarski, A., and D. Grubor. "Comparative Analysis of VLF Signal Variation Along Trajectory Induced by X-Ray Solar Flares." *Journal of Astrophysics and Astronomy* 36 (2015): 565.
19. Nina, Aleksandra, Saša. Simić, Vladimir A. Srećković, and Luka Č. Popović. "Detection of Short-Term Response of the Low Ionosphere on Gamma Ray Bursts." *Geophysical Research Letters* 42 (2015): 8250.
20. Šulić, Desanka, Vladimir Srećković, and A. A. Mihajlov. "Amplitude and Phase Changes on VLF/LF Radio Signals Depending on Solar Zenith Angle During Occurrences of Solar X-Ray Flares." July 01, 2016 2016.

21. Šulić, D., V. Srećković, and A. A. Mihajlov. Analysis of the Ionospheric D-Region Disturbances in Response to the Effects of Solar X-Ray Flares in Ch.3 Solar Flares: Investigations and Selected Research: Nova Science Publishers, Incorporated, 2016.
22. Šulić, D. M., V. A. Srećković, and A. A. Mihajlov. "A Study of VLF Signals Variations Associated with the Changes of Ionization Level in the D-Region in Consequence of Solar Conditions." *Advances in Space Research* 57 (2016): 1029.
23. Nina, Aleksandra, Vladimir M. Čadež, Luka Č. Popović, and Vladimir A. Srećković. "Diagnostics of Plasma in the Ionospheric D-Region: Detection and Study of Different Ionospheric Disturbance Types." *European Physical Journal D* 71 (2017): 189.
24. Nina, A., V. M. Čadež, L. C. Popović, V. A. Srećković, and S. Simić. "Detection of Terrestrial Ionospheric Perturbations Caused by Different Astrophysical Phenomena." *Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd* 96 (2017): 365.
25. Nina, Aleksandra, Milan Radovanović, Boško Milovanović, Andjelka Kovačević, Jovan Bajčetić, and Luka Č. Popović. "Low Ionospheric Reactions on Tropical Depressions Prior Hurricanes." *Advances in Space Research* 60 (2017): 1866.
26. Srećković, V. A., and D. M. Šulić. "Untypical Perturbations on LF Radio Signals During Solar Flares." *Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd* 96 (2017): 229.
27. Srećković, V. A., Šulić, D. M., Vujčić, V., Jevremović, D., and Vyklyuk, Y. "The effects of solar activity: Electrons in the terrestrial lower ionosphere.", *Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijic", SASA* 67(3), (2017) 221
28. Butka, P., M. Gritsevich, D. Vinković, A. Cellino, M. Bertaina, S. Mönkölä, M. Moreno-Ibáñez, G. Nico, A. Nina, V. Srećković, and S. T. Mitrović. "Novel Meteor Simulation and Observation Techniques That Emerged from Big-Sky-Earth Cost Action." July 01, 2018 2018.
29. Butka, Peter, Dejan Vinković, Maria Gritsevich, Alberto Cellino, Mario Bertaina, Sanna Mönkölä, Manuel Moreno-Ibáñez, Giovanni Nico, Aleksandra Nina, Vladimir Srećković, Srdjan Mitrović, and Pedro Mateus. "Meteor Activities within the Bigskyeearth Cost Action: Enabling New Approaches in Modeling and Observations." EPSC2018-826, 2018.

30. Ilić, L., M. Kuzmanoski, P. Kolarž, A. Nina, V. Srećković, Z. Mijić, J. Bajčetić, and M. Andrić. "Changes of Atmospheric Properties over Belgrade, Observed Using Remote Sensing and in Situ Methods During the Partial Solar Eclipse of 20 March 2015." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 171 (2018): 250.
31. Nina, A., V. M. Čadež, L. C. Popović, V. A. Srećković, J. Bajcetic, S. T. Mitrovic, M. Radovanovic, M. Todorovic Drakul, A. Kolarski, and S. Simić. "Low Ionospheric Response to Astro- and Geo-Phenomena - Recent Research." *Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd* 98 (2018): 309.
32. Srećković, V. A., and D. Šulić. "Strong Solar X-Ray Flares: Influence on the Ionosphere." *Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd* 98 (2018): 337.
33. Srećković, Vladimir A, and Aleksandra Nina. "Special Issue on Astrophysics & Geophysics: Research and Applications." *Data* (2019).
34. Nina, Aleksandra, Vladimir A Srećković, and Milan Radovanović. "Multidisciplinarity in Research of Extreme Solar Energy Influences on Natural Disasters." *Sustainability* 11, no. 4 (2019): 974.
35. Biagi, Pier Francesco, Alexandra Nina, Anita Ermini, and Giovanni Nico. "Variations Revealed by Infrep Radio Network in Correspondence of Six Earthquakes with Mw Greater Than 5.0 Occurred in the Balkan Peninsula and Adriatic Sea on 26 and 27 November, 2019." 9200, 2020.
36. Nina, Aleksandra, Giovanni Nico, Oleg Odalović, Vladimir M. Čadež, Miljana Todorovic Drakul, Milan Radovanovic, and Luka C. Popović. "Gnss and Sar Signal Delay in Perturbed Ionospheric D-Region During Solar X-Ray Flares." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 17 (2020): 1198.
37. Nina, Aleksandra, Sergey Pulinets, Pier Francesco Biagi, Giovanni Nico, Srđan T. Mitrović, Milan Radovanović, and Luka Č. Popović. "Variation in Natural Short-Period Ionospheric Noise, and Acoustic and Gravity Waves Revealed by the Amplitude Analysis of a VLF Radio Signal on the Occasion of the Kraljevo Earthquake (Mw = 5.4)." *Science of the Total Environment* 710 (2020): 136406.
38. Nina, Aleksandra, Milan Radovanović, Luka Č. Popović, Ana Černok, Bratislav P. Marinković, Vladimir A. Srećković, Anđelka Kovačević, Jelena Radović, Vladan Čelebonović, Ivana Milić Žitnik, Zoran Mijić,

- Nikola Veselinović, Aleksandra Kolarski, and Alena Zdravković. "Activities of Serbian Scientists in Europlanet." Publications of the Astronomical Society "Rudjer Boskovic" 20 (2020): 107.
39. Nina, Aleksandra, Pier Francesco Biagi, Srđan T. Mitrović, Sergey Pulnits, Giovanni Nico, Milan Radovanović, and Luka Č. Popović. "Reduction of the VLF Signal Phase Noise before Earthquakes." Atmosphere 12 (2021): 444.
40. Nina, Aleksandra, Giovanni Nico, Srđan T. Mitrović, Vladimir M. Čadež, Ivana R. Milošević, Milan Radovanović, and Luka Č. Popović. "Quiet Ionospheric D-Region (Qiondr) Model Based on VLF/LF Observations." Remote Sensing 13 (2021): 483.
41. Nina, Aleksandra, Milan Radovanović, and Luka Č. Popović. "Extraterrestrial Influences on Remote Sensing in the Earth's Atmosphere." Remote Sensing 13 (2021): 890.
42. Aleksandra Nina Dijagnostika plazme jonosferske d oblasti elektromagnetnim VLF talasima, Doctoral dissertation, Belgrade University, Belgrade 2014
43. Aleksandra B. Kolarski Elektromagnetska sprega sistema litosfera-atmosfera-jonosfera, Doctoral dissertation, Belgrade University, Belgrade 2016.

4. ЗАКЉУЧЦИ

Намера овог рада је да упозна астрономску заједницу са научним достигнућима створеним током скоро 20 година истраживања јоносфере у Институту за физику Београд. Током две деценије истраживања публиковани су резултати проучавања плазме јоносферске D-области засновани на континуираној, симултаној регистрацији електромагнетних таласа врло ниских фреквенција емитованих предајницима лоцираним широм света и регистрованих пријемницима који су почетком 2000-тих инсталирани у Институту за физику у Београду.

Основни научни циљ ових истраживања и научних сарадњи са разним институцијама био је проучавање соларних флорова и утицаја на јоносферу као и моделирање параметара плазме пертурбоване и непетурбоване D-области јоносфере. Исто тако ова истраживања су имала за циљ испитивање детектабилности догађаја који слабо јонизују плазму у D-области.

Поред научних циљева, ова истраживања би требала да буду основа за образовање младих научника као и за међународну сарадњу у овој области.

Захвалница

Овај рад је финансирао Институт за физику Београд кроз грант Министарства просвете науке и технолошког развоја Републике Србије.

Литература

- Čadež, V., Šulić, D., and Srećković, V.: 2009, *Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd* **86**, 39.
- Nina, A., Čadež, V., Srećković, V., and Šulić, D.: 2011, *Open Astronomy* **20(4)**, 609.
- Nina, A., Čadež, V., Srećković, V., and Šulić, D.: 2012a, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **279**, 110.
- Nina, A., Čadež, V., Šulić, D., Srećković, V., and Žigman, V.: 2012b, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **279**, 106.
- Nina, A., Srećković, V. A., and Radovanović, M.: 2019, *Sustainability* **11(4)**, 974.
- Srećković, V. and Šulić, D.: 2017, *Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd* **96**, 229.
- Srećković, V. A. and Nina, A.: 2019, *Data* **4(1)**, 21.
- Srećković, V. A., Šulić, D. M., Vujčić, V., Jevremović, D., and Vyklyuk, Y.: 2017, *Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijic", SASA* **67(3)**, 221.
- Šulić, D., Nina, A., and Srećković, V.: 2014, *arXiv preprint arXiv:1405.3783*.
- Šulić, D. and Srećković, V.: 2014, *Serbian Astronomical Journal* **188**, 45.
- Šulić, D., Srećković, V., and Mihajlov, A.: 2016, *Advances in Space Research* **57(4)**, 1029.

INSTITUTE OF PHYSICS BELGRADE AND TWO DECADES OF IONOSPHERE RESEARCH

This paper describes the scientific achievements created during two decades of ionosphere research at the Institute of Physics, Belgrade. During almost 20 years of research, the published results of ionospheric D-region plasma investigation are based on continuous, simultaneous registration of very low frequency electromagnetic waves emitted by transmitters located around the world and registered by receivers installed in the early 2000s at the Institute of Physics Belgrade.

Key words: Institute of Physics, Ionosphere, Collaboration, Astrophysics, Stellar Atmospheres, History of Astronomy, Culture, Social Sciences and Astronomy