

Analiza seizmičkog nemira na devet seizmoloških postaja Hrvatske mreže seizmografa

Matsuno, Nina

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:123584>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-18**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Nina Matsuno

ANALIZA SEIZMIČKOG NEMIRA NA DEVET
SEIZMOLOŠKIH POSTAJA HRVATSKE MREŽE
SEIZMOGRAFA

Diplomski rad

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA
SMJER: SEIZMOLOGIJA I FIZIKA ČVRSTE ZEMLJE

Nina Matsuno

Diplomski rad

**Analiza seizmičkog nemira na devet
seizmoloških postaja Hrvatske mreže
seizmografa**

Voditeljica diplomskog rada: doc. dr. sc. Iva Dasović

Zagreb, 2021.

Zahvaljujem mentorici doc. dr. sc. Ivi Dasović na pruženoj pomoći i podršci pri pisanju ovog rada, te na susretljivosti i strpljenju u svakom trenutku.

Zahvaljujem mr. sc. Ines Ivančić i Seizmološkoj službi na ustupljenim seizmološkim podacima. Također zahvaljujem Snježanu Prevolniku, dipl. ing. na savjetima i podacima o radu seizmoloških postaja, te Heleni Latečki, mag. phys.-geophys. na pomoći u radu s podacima i korištenju programskog paketa.

Zahvaljujem dr. sc. Ivi Međugorac na ustupljenim podacima epizoda jakog juga i olujnih uspora.

Na kraju želim zahvaliti obitelji, prijateljima i kolegama na pruženoj potpori i društvu kroz cijeli studij i pisanja diplomskog rada.

Sažetak

Da bi se odredila razina seizmičkog nemira i njezina vremenska promjenjivost, analizirani su kontinuirani zapisi s devet seizmoloških postaja Hrvatske mreže seizmografa u razdoblju između 1. siječnja 2018. i 30. lipnja 2020. godine. Primijenjena je metoda računanja gustoće spektra snage (engl. *power spectral density*, PSD) i pripadajuća funkcija gustoće vjerojatnosti (engl. *probability density function*, PDF) prema radu McNamare i Bulanda (2004). Za svaku postaju izračunate su vrijednosti PSD za svaki jednosatni niz s preklapanjem od 50% u cijelom promatranom razdoblju na sve tri komponente. Iz dobivenih PSD krivulja, izračunate su PDF krivulje za svaku komponentu i svaku postaju. Dobiveni rezultati pokazali su da se PDF krivulja u pravilu nalazi između krivulja niske i visoke razine nemira (NLNM i NHNM) definiranim u radu Petersona (1993), iako na $T > 10$ s na horizontalnim komponentama nekih postaja postoji nezanemariva vjerojatnost premašivanja razine nemira NHNM. To ukazuje na zadovoljavajuću kvalitetu zapisa razmatranih seizmoloških stanica. U području mikroseizmičkog nemira ($T = 1 - 10$ s) vidljiva su u pravilu dva šiljka, čiji se maksimumi približavaju za postaje udaljenije od morske obale, za koje se pretpostavlja da su posljedice djelovanja oceanskih i lokalnih morskih valova na obalu, odnosno dno. Na svim postajama vidljive su dnevne promjene na $T < 1$ s, a na nekim postajama postoje i na $T \approx 20 - 40$ s. Na $T < 1$ s uočene su tjedne promjene u obliku smanjenja razine nemira za vrijeme vikenda, pogotovo nedjelje. Sezonske promjene najviše se ističu na srednjim periodima ($1 - 10$ s), pri čemu je njihov utjecaj najjači zimi. Analiza razine seizmičkog nemira za vrijeme snažnih epizoda juga pokazala je izraženi porast razine nemira na $T < 1$ s na svim vertikalnim komponentama, kao i visokog vodostaja rijeke Kupe u blizini postaje OZLJ. Za vrijeme ljetne turističke sezone, primijećen je porast razine nemira na $T \approx 0.04 - 0.1$ s na postajama NVLJ, VIRC i PLIT, dok je na postaji ZAG primijećeno smanjenje razine nemira zbog odlaska stanovnika na ljetovanje izvan grada. Također, na postaji ZAG jasno se vidi smanjenje razine nemira nakon proglašavanja zabrane kretanja zbog pandemije COVID-19, dok se slična pojava nazire još i na postajama PLIT i RUJC.

Ključne riječi: razina seizmičkog nemira, dnevne promjene, sezonske promjene, gustoća spektra snage

Ambient seismic noise analysis for nine seismic stations of the Croatian seismic network

Abstract

To determine the noise levels and their time dependency, continuous datasets of nine seismic stations of the Croatian seismic network were analyzed in the time span of 1st January 2018 to 30th July 2020. The applied methods were based on the work of McNamara and Buland (2004), in which the power spectral densities and their probability density functions were calculated. PSDs were calculated for every one-hour-long segments with 50% of overlapping for all three components of each station. Computed PDFs fall between the new low-noise model (NLNM) and the new high-noise model (NHNM), as defined by Peterson (1993), but there is a considerable probability that the PDF exceeds the NHNM at $T > 10$ s on the horizontal components. Analysis of PDFs show the acceptable quality of seismic station. There are two significant peaks in the microseism range ($T \approx 1\text{--}10$ s): the one at the shorter periods is assumed to be a result of the interaction between local sea waves and seashore and seabed and it become closer as the distance from the sea increases to the one at longer periods which is assumed to be a result of the ocean waves. All stations shows diurnal variation of noise level at $T < 1$ s, while some stations even shows diurnal changes at $T \approx 20\text{--}40$ s. Weekly variations were observed at $T < 1$ s as the noise level reduce on weekends, especially on Sundays. The seasonal variation was remarkable in the $T \approx 1\text{--}10$ s and showed the highest noise level during winter. Seismograms recorded during days with strong southern wind (sirocco) shows a rise of noise level at $T < 1$ s on vertical components, as well as high levels of the Kupa river near OZLJ station. During summer touristic season on periods 0.04–0.1 s, noise level rises on NVLJ, VIRC and PLIT station while it drops at ZAG station because many residents leave the city for vacation. On the ZAG station, a significant drop of noise level was observed after the lockdown caused by the pandemic of COVID-19. A similar but smaller drop of noise level was noticed at PLIT and RUJC station.

Keywords: seismic noise level, diurnal change, seasonal change, power spectral density

Sadržaj

1	Uvod.....	1
2	Teorijska pozadina	3
2.1	O seizmičkom nemiru.....	3
2.1.1	Seizmički nemir na kratkim periodima.....	3
2.1.2	Pojas mikroseizmičkog nemira.....	4
2.1.3	Seizmički nemir na dugim periodima	6
2.2	O analizi razine seizmičkog nemira	7
2.2.1	Gustoća spektra snage (PSD).....	7
2.2.2	Funkcija gustoće vjerojatnosti (PDF)	9
2.2.3	Petersonovi modeli	9
3	Metoda i podatci.....	11
3.1	Određivanje razine seizmičkog nemira	11
3.1.1	Program i programski jezik.....	12
3.1.2	Dnevne i sezonske promjene.....	13
3.1.3	Promjena na određenom rasponu perioda.....	14
3.2	Analiza razine seizmičkog nemira prema radu Lecocq et al. (2020).....	14
3.3	Analizirani podatci.....	15
4	Rezultati i diskusija.....	20
4.1	Analiza razine seizmičkog nemira po seizmološkim postajama.....	23
4.2	Vremenske promjene u razini seizmičkog nemira.....	39
4.2.1	Dnevna promjena razine seizmičkog nemira.....	39
4.2.2	Tjedna promjena	42
4.2.3	Godišnje promjene razine seizmičkog nemira.....	47
4.3	Utjecaj snažnih epizoda juga i olujnih uspora na razinu nemira	53
4.4	Utjecaj visokog vodostaja rijeke Kupe na seizmološkoj postaji OZLJ	54
4.5	Utjecaj turističke sezone na priobalnom području	55
4.6	Utjecaj ograničenja kretanja stanovništva za vrijeme pandemije COVID-19 na razinu nemira	57
5	Zaključak	59
	Literatura	60
	Dodatci	63
A	Vrijednosti PDF-a	63
B	Krivulje medijana PSD-a.....	68

C	Dnevni spektrogrami	70
D	Polusatni medijani PSD-a za $T = 20 - 40$ s	75
E	Godišnji spektrogrami	82
F	Dnevne vrijednosti medijana PSD-a	91
G	Usporedba vrijednosti PDF-a danju i noću	97
H	Popis kratica	101

1 Uvod

Neizbježna pojava na svakoj seizmičkoj postaji na svijetu jest seizmički nemir (engl. *seismic noise*). Prema uzroku mogu se podijeliti na „stvarni“ seizmički nemir koji potječe od okoline u kojoj se nalazi postaja (engl. *ambient seismic noise*), te instrumentalni nemir za kojeg se očekuje da je mnogo manji od „stvarnog“ seizmičkog nemira (Havskov i Ottemöller, 2010). Važan korak u smanjenju utjecaja nemira na zapis instrumenta jest odabir prikladne lokacije za smještaj instrumenata kako bi zapisi potresa bili dovoljno kvalitetni za njihovu analizu. Zato se, u pravilu, izvode istraživanja seizmičkog nemira koja prethode odabiru lokacije (Havskov i Alguacil, 2016). Osim samog smanjenja utjecaja na zapis, korisno je poznavanje karakteristika nemira na pojedinim postajama kako bi se mogla procijeniti mogućnost korištenja neke određene seizmološke metode, odnosno analize određene faze seizmičkih valova.

Iako postoje razni izvori seizmičkog nemira koji uzrokuju nemir na različitim frekvencijama, te je potpuno raspoznavanje i razlučivanje izvora nemoguće, korisno je poznavati općenito očekivane vrijednosti razine nemira. Tako su u radu Petersona (1993) prikupljeni zapisi iz cijelog svijeta te su izvedeni tzv. novi model visoke razine šuma (engl. *new high noise model*, NHNM) i novi model niske razine šuma (engl. *new low noise model*, NLNM), koji se ponekad zajedno nazivaju Petersonovim modelom. Krivulje NHNM i NLNM postale su standard prema kojem se procjenjuje razina nemira, odnosno kvaliteta zapisa, na nekoj seizmološkoj stanici.

U članku McNamare i Bulanda (2004) uvodi se nova, danas široko prihvaćena, metoda procjene razine nemira na nekoj seizmološkoj postaji. Nova metoda temelji se na računanju spektra gustoće snage (engl. *power spectral density*), što je ujedno korišteno i za računanje NLNM i NHNM u radu Petersona (1993), te funkcija gustoće vjerojatnosti izračunatih spektara gustoće snage (engl. *probability density function*, PDF). Također su proučavane promjene snage nemira kroz dan, godinu i za različite geografske lokacije.

Mikroseizmički nemir na prostoru Hrvatske proučavao je Marković (1948) u radu *Mikroseizmički nemir u Zagrebu*. U radu je opisan nemir na seizmološkoj postaji Zagreb perioda 6 – 7 s za koji je autor pretpostavio da je uzrokovan djelovanjem jakog

vjetra i oceanskih valova na zapadnoj obali Europe, te nemir perioda 3 – 4 s koji opisuje kao posljedicu djelovanju jakog vjetra i morskih valova u Jadranskom moru. Seizmički nemir proučavan je i u sklopu procjene kvalitete mreže seizmoloških postaja u sklopu projekata AlpArray i AlpArray-CASE prema metodi McNamare i Bulanda (2004) u radovima Molinari et al. (2016, 2018). Zaključeno je da razmatrane seizmološke postaje u Hrvatskoj pokazuju oko 20 dB nižu razinu nemira na horizontalnoj, a 10 dB na vertikalnoj komponenti od NHNM. Izuzetak su horizontalne komponente otočnih postaja, za frekvencije manje od 0.1 Hz ($T > 10$ s), gdje je razina nemira veća od krivulje NHNM.

Budući da je područje Hrvatske pod izravnim utjecajem konvergentnog kretanja Euroazijske i Afričke ploče, te se područje može smatrati umjereno do vrlo seizmički aktivno s rijetkom pojavom jakih potresa (Dasović, 2015 i tamo navedene reference), važno je uspostaviti i održavati kvalitetnu mrežu seizmografa kako bi se uspješno pratila seizmičnost te provodila važna seizmološka istraživanja. U ovom radu proučavani su zapisi u razdoblju između 1. siječnja 2018. i 30. lipnja 2020. godine devet seizmoloških postaja, pri čemu se tri postaje nalaze unutar jednog kilometra od morske obale, tri na srednjoj udaljenosti 20 – 60 km od najbliže morske obale, te tri postaje koje se nalaze dublje u unutrašnjosti Hrvatske. Cilj je bio odrediti razinu seizmičkog nemira, proučiti njihovu dnevnu i sezonsku promjenjivost te provjeriti utjecaj nekih specifičnih događaja na zapise seizmografa.

2 Teorijska pozadina

2.1 O seizmičkom nemiru

Seizmički nemir prisutan je na svakoj seizmološkoj postaji na svijetu. Ovisno od postaje do postaje, razlikuju se izraženi izvori nemira kao i periodi na kojima djeluju. Prema Bormannu i Wielandtu (2013), pod pojmom seizmičkog nemira (engl. *ambient seismic noise*) najčešće smatramo gibanje tla čiji je uzrok prirodan (nemir uzrokovan djelovanjem oceana, mora i vjetra), vibracije uzrokovane ljudskom aktivnosti (industrija, promet i sl.), sekundarni valovi koji su posljedica putovanja valova kroz nehomogeno sredstvo (raspršenje) te učinci sile teže (npr. horizontalno ubrzanje tla zbog nagiba površine i promjena u atmosferi). No nemir može biti uzrokovan i osjetljivošću seizmometra na uvjete u okolini kao što su promjena temperature i tlaka zraka, magnetskog i električnog polja, te zbog tehničke nesavršenosti instrumenata. Uzroci nemira razlikuju se po vrsti izvora i periodu na kojem djeluju, a njihov utjecaj je vrlo zamršen te je nemoguće ukloniti njegov utjecaj iz signala potresa zabilježenog na seizmogramu. Za razliku od potresa, seizmički nemir može se smatrati stacionarnim stohastičkim procesom jer se statistička svojstva seizmičkog nemira ne mijenjaju (znatno) tijekom vremena (Bormann i Wielandt, 2013). Iako je seizmički nemir rezultat bezbroj različitih izvora, istraživanja su pokazala da na određenim rasponima perioda postoje izraženi utjecaji pojedinih vrsta nemira. Tako se nemir na kratkim periodima ($T < 1$ s) pripisuje antropogenom djelovanju, na $T = 2 - 10$ s se pojavljuje tzv. mikroseizmički šiljak (engl. *microseism peak*), dok se na dugim periodima ($T > 10$ s) nemir opisuje promjenama u temperaturi, tlaku zraka i vjetru.

2.1.1 Seizmički nemir na kratkim periodima

Na kratkim periodima, manjima od 1 s, izraženo je antropogeno djelovanje raznih uzročnika: od samog kretanja ljudi, preko prometa pa sve do velikih strojeva tako što se energija njihova gibanja prenosi u tlo. Iako su pojedini utjecaji izvora mali, zajedno mogu imati znatan utjecaj na zapis, pogotovo ako su takvi izvori gusto grupirani na manjoj površini, kao što su gradovi s velikim brojem stanovnika (Bormann

i Wielandt, 2013). Poznato je da nemir uzrokovan ljudskim djelovanjem propagira kroz tlo u obliku visoko frekventnih površinskih valova ($f > 1 - 10$ Hz, $T < 1 - 0.1$ s), te atenuira unutar nekoliko kilometara (McNamara i Buland, 2004; Webb, 2002).

Prema Bormannu i Wielandtu (2013), i tamo navedenim referencama, osim prevladavajućeg utjecaja ljudskih aktivnosti, na malim periodima može se uočiti nemir uzrokovan vjetrom koji se najčešće pojavljuju na pojasu frekvencija od 0.5 Hz s pa do 15 – 60 Hz, a može biti dominantan uzrok na $f \approx 0.5 - 5$ Hz (Webb, 2002). Pretpostavlja se da se energija vjetra prenosi u tlo tako da se stabla, grmlje i ostale strukture pod utjecajem vjetra njišu, odnosno vibriraju, i na taj način prenose energiju svojim gibanjem. Jasna povezanost brzine i snage nemira nije poznata, ali se pokazalo kako se utjecaj vjetra na zapisu može primijetiti za brzine vjetra veće od 3 – 4 m/s, dok drastična promjena nemira dolazi za brzine vjetra iznad 8 m/s kad nemir viših frekvencija, koji inače atenuira brzo s brzinom, doseže u dubine od nekoliko kilometara.

Seizmički nemir izazvan djelovanjem vjetra putuje sredstvom prvenstveno u obliku površinskih valova, dok antropogeni izvori uz površinske valove barem djelomično uzrokuju i poremećaje u obliku prostornih valova (Webb, 2002).

Bormann i Wielandt (2013) navode okvirne smjernice kako umanjiti utjecaj antropogenih i prirodnih izvora nemira na signal postavljanjem instrumenata na područje koje je udaljeno od takvih izvora. Predlažu da postaja bude udaljena 25 km od elektrana ili npr. kamenoloma, 15 km od željeznica, 6 km od autocesta i 1 km od lokalnih cesta. Također sugeriraju da postaja bude udaljena barem 15 km od tekuće vode, odnosno malih brzaca ili vodopada, i 60 km od velikih vodopada i velikih brana. Budući da nemir doseže veću udaljenost u stijenama nego u sedimentnoj podlozi, preporučena udaljenost na sedimentnom području može se smanjiti na 2/3 do polovine predloženih udaljenosti.

2.1.2 *Pojas mikroseizmičkog nemira*

Pojam mikroseizmičkog nemira nije posve jasno definiran jer se ponekad koristi za opis cjelokupnog pozadinskog seizmičkog nemira, odnosno šuma, a ponekad kao

pojam koji opisuje pozadinski nemir nastao djelovanjem morskih valova na određenom frekvencijskom pojasu, najčešće između 0.1 i 0.5 Hz ($T \approx 2 - 10$ s).

Uže značenje mikroseizmičkog nemira odnosi se na nemir koji se u većini slučajeva pojavljuje na periodima između 4 i 16 s, i to u obliku dva frekvencijska šiljka. Na periodima 10 – 16 s najčešće se pojavljuje šiljak jednostruke frekvencije (engl. *single frequency peak*, SF), te je njegova snaga na većini postaja, kao i kod Petersonovih krivulja NHNM i NLNM, manja od šiljka dvostruke frekvencije. Njegovim uzrokom smatraju se oceanski valovi u plitkim vodama u obalnom području koji prenose energiju na kopno udaranjem valova o obalu ili promjenom tlaka na morskom dnu u blizini obale. SF je izražen na postajama u blizini oceanske obale te se brzo prigušuje s udaljenošću od obale (Bormann i Wielandt, 2013 i tamo navedene reference).

Drugi šiljak naziva se šiljak dvostruke frekvencije (engl. *double frequency peak*, DF) koji je sličnog je uzroka kao SF, no nešto drukčijeg načina prijenosa energije na kopno. Pretpostavlja se da je posljedica pojave stojnih težinskih valova u oceanu, koji nastaju interferencijom dolaznih valova i odbijenih valova od obale uzrokovanih atmosferskim djelovanjem područja niskog tlaka zraka nad oceanom. Naziv „dvostruke frekvencije“, kao i pojava na manjim periodima od SF, potječe od toga što pri interferenciji valova dolazi do gibanja upola manjeg perioda, $T \approx 5 - 9$ s, tj. dvostruke frekvencije (Bormann i Wielandt, 2013 i tamo navedene reference). Osim često primijećenog utjecaja oceana koji se pojavljuju u obliku dva frekvencijska šiljka, odnosno SF i DF, na pojačanu razinu nemira može lokalno utjecati i obližnje more. U radu Sevima et al. (2017) je na području Egejskog mora uočeno razdvajanje dvostrukog frekvencijskog šiljka u dva dijela, te smanjenje razine nemira od obalnog područja prema unutrašnjosti na periodima 1.5 – 3 s, što upućuje na to da DF na tim periodima vjerojatno sadrži i lokalni utjecaj Egejskog mora. Slična pojava je uočena u radu od Evangelidisa i Melisa (2012), gdje se veća razina nemira u blizini DF pojavljuje na otočnim postajama, dok je na kontinentalnijim postajama zabilježena manja razina nemira s pomakom šiljka prema dužim periodima, za što zaključuju da je posljedica lokalnog utjecaja mora. Bormann i Wielandt (2013) navode da se period maksimuma šiljka dvostruke frekvencije smanjuje na $T \approx 2 - 4$ s kad je izvor u unutarnjim morima ili velikim jezerima. Također napominju da će periodi izraženog nemira ovisiti o

geometriji obale, a može doći i do razvijanja rezonancijskih fenomena u zaljevima i kanalima, odnosno okidanja seša.

Seizmički nemir izazvan djelovanjem vjetra putuje sredstvom prvenstveno u obliku površinskih valova, dok antropogeni izvori uz površinske valove barem djelomično uzrokuju i poremećaje u obliku prostornih valova (Webb, 2002).

Poznato je kako se spektar oceanskih valova pomiče prema većim periodima i amplitudama s povećanjem udaljenosti zbog nelinearnog prijenosa energije prema većim periodima (Webb 2002). Pri proučavanju seizmičkog nemira, Gutenberg (1951) je uočio kako se periodi lokalnih maksimuma mikrosezmičkog nemira ($T = 1 - 10$ s) produljuju kako se promatrane postaje udaljavaju od obale Atlantskog oceana prema Aziji. Iako se ne može izuzeti postojanje jake apsorpcije kratkih perioda, u radu je pretpostavljeno da postoji velika vjerojatnost povećanja valne duljine s udaljenošću koju valovi prijeđu.

2.1.3 Seizmički nemir na dugim periodima

Za promjene razina nemira na duljim periodima $T > 10$ s, najčešće se kao uzroci pretpostavljaju promjene u atmosferi. Seizmički nemir na frekvencijama 0.2 – 50 mHz povezuje se s promjenom tlaka u atmosferi, gdje je vertikalna komponenta seizmografa pod utjecajem promjene ubrzanja sile teže, kako se ukupna masa atmosfere iznad postaje mijenja s atmosferskim tlakom. U slučaju da seizmometar nije dobro zatvoren i izoliran, može postojati utjecaj prividnog ubrzanja zbog efekta uzgona na masu instrumenta, ili promjene temperature (Bormann i Wielandt, 2013). Na površinskim seizmološkim postajama je poznato da su razine nemira horizontalnih komponenti na dužim periodima veće za 10 – 30 dB od vertikalnih komponenti (Webb, 2002). Takva razlika razine nemira među komponentama može biti posljedica lokalnog nagiba površine (engl. *tilt*) nastalog zbog fluktuacije atmosferskog tlaka, prometa i tlaka vjetra, čiji je utjecaj izraženiji na horizontalnim komponentama. Na vrlo dugim periodima se može primijetiti utjecaj deformacije tla ili zgrade zbog nejednakog zagrijavanja. Postaje koje su loše učvršćene (engl. *coupled*) u tlo znaju imati veću razinu nemira, što može utjecati na duge i kratke periode. Razlog visoke razine nemira na dugim periodima

može biti i strujanje zraka u šahtu u kojem je smješten instrument i ispod seizmografa (Bormann i Wielandt, 2013), što se odnosi i na postaje razmatrane u ovom radu.

Iako je većina antropogenih utjecaja uočena na periodima manjim od 1 s, u pojedinim radovima se spominju tračnice kao izvor antropogenog nemira koji ima utjecaja na frekvencijama 0.01 – 0.05 Hz (Sheen et al., 2009), tj. na 0.008 – 0.05 Hz (Diaz et al. 2017).

2.2 O analizi razine seizmičkog nemira

Pri promatranju seizmičkog nemira, vrlo je važno poznavati koliko je „snažan“ nemir, te da li onemogućuje raspoznavanje signala potresa (Bormann i Wielandt, 2013). Budući da stacionarni šum ima beskonačnu energiju i konačnu snagu, za kvantifikaciju snage seizmičkog nemira koristi se gustoća spektra snage (engl. *power spectral density*, PSD). Općenito, gustoća spektra neke veličine je funkcija frekvencije čiji integral u nekom intervalu frekvencija daje ukupnu količinu te veličine u tom pojasu (Bormann i Wielandt, 2013). Standardni postupak je određivanje razine seizmičkog nemira kao gustoće spektra snage akceleracija u mjernoj jedinici $(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$, a iz gustoću spektra snage brzina dobije se množenjem s $i\omega$. Treba napomenuti da se ovdje ne radi o snazi u fizikalnom smislu s mjernom jedinicom Watt, nego samo srednja vrijednost amplitude akceleracije tla (Bormann i Wielandt, 2013).

2.2.1 Gustoća spektra snage (PSD)

Kad se koristi filtrirani signal određene pojasne širine, može se izračunati samo snaga na tom pojasu. Zato se koristi gustoća spektra snage, kako bi se nemir mogao proučavati na cijelom spektru, neovisno o korištenom filteru (Havskov i Ottemoller, 2010). Za proučavanje svojstva nemira na različitim frekvencijama, koristi se gustoća spektra snage (engl. *power spectral density*, PSD), te je u ovom radu primijenjena metoda računanja PSD prema radu McNamare i Bulanda (2004). Da bi se izračunala gustoća spektra snage, potrebno je izračunati Fourierovu transformaciju seizmograma. Najčešće korišten algoritam za računanje brze Fourierove transformacije (engl. *Fast Fourier Transform*, FFT) je izravna Fourierova transformacija (engl. *direct Fourier*

transform), koja je još poznata kao Cooley-Tukeyjeva metoda (Cooley i Tukey, 1965). FFT je transformacija koja se bazira na razbijanju početnog problema na manje potprobleme, te njezin algoritam ima manji broj operacija množenja nego izravno računanje (Bosner, 2020). Takva karakteristika je poželjna pri obradi velikog broja podataka.

Iz vremenskih podataka $y(t)$ konačne duljine, zadana je Fourierova transformacija oblika

$$Y(f, T_r) = \int_0^{T_r} y(t) e^{-i2\pi f t} dt \quad (1)$$

gdje je T_r duljina vremenskog segmenta, a f je frekvencija.

Kad se analizira diskretni niz s diskretnim vrijednostima frekvencije f_k , Fourierove komponente su definirane kao

$$Y_k = \frac{Y(f_k, T_r)}{\Delta t} \quad (2)$$

za vrijednost $f_k = k/N\Delta t$, kada je $k = 1, 2, \dots, N-1$, a Δt interval između dva uzorka, a $N = T_r/\Delta t$ broj uzoraka u svakom vremenskom nizu.

Iz izračunatih Fourierovih komponenti prema jednadžbama (1) i (2), PSD se definira kao

$$P_k = \frac{2\Delta t}{N} |Y_k|^2. \quad (3)$$

Iz gornje jednadžbe je vidljivo da je P_k jednostavno kvadrat amplitude spektra normiran s $2\Delta t/N$.

Za određivanje razine seizmičkog nemira, odnosno gustoće spektra snage, koriste se zapisi seizmografa konačne duljine, npr. jednosatni nizovi, u nekom duljem razdoblju te se dobije veliki broj krivulja koje se mogu više ili manje razlikovati zbog različitih razloga. Umjesto mnoštva pojedinih krivulja PSD, praktičnije je odrediti funkciju gustoće vjerojatnosti gustoće spektra snage (Bormann i Wielandt, 2013).

2.2.2 Funkcija gustoće vjerojatnosti (PDF)

Za određivanje promjene seizmičkog nemira na određenoj stanici i njihovu praktičnu i jasnu analizu, računa se funkcija gustoće vjerojatnosti gustoće spektra snage (engl. *probability density function*, PDF) iz mnoštva prethodno izračunatih krivulja gustoće spektra snage (PSD). PDF je mjera relativne gustoće vrijednosti PSD, odnosno prikazuje koliko opaženih vrijednosti PSD upada u malo područje grafa (Bormann i Wielandt, 2013). Prema radu McNamare i Bulanda (2004), za prikladno uzorkovanje uzimaju se prosječne vrijednosti cijele oktave u intervalima od 1/8 oktave, čime se zapravo smanjuje broj frekvencija. To rezultira time da je snaga prosjek između kraćeg perioda T_s i dužeg perioda $T_l = 2T_s$ sa središnjim periodom T_c koji je geometrijska srednja vrijednost perioda unutar oktave. Tako dobiveni T_c ravnomjerno su raspoređeni na logaritamskoj skali perioda. Za idući raspon perioda uzima se novi T_s koji je povećan za vrijednost 1/8 oktave, oblika $T_s = T_s \cdot 2^{0.125}$, iz kojeg su također izračunate ostale vrijednosti T_l i T_c . Ponavljanjem postupka kroz cijeli proučavani raspon perioda, te primjenom metode na svaki promatrani jednosatni niz, dobiva se veliki broj izgladenih PSD-krivulja za jednu komponentu analizirane postaje. Slijedi obrada podataka tako da se za svaki određeni period svrstaju snage nemira u histograme (razrede) sa širinom stupaca od 1dB. Tako se s dobivenim vrijednostima računa po jednadžbi

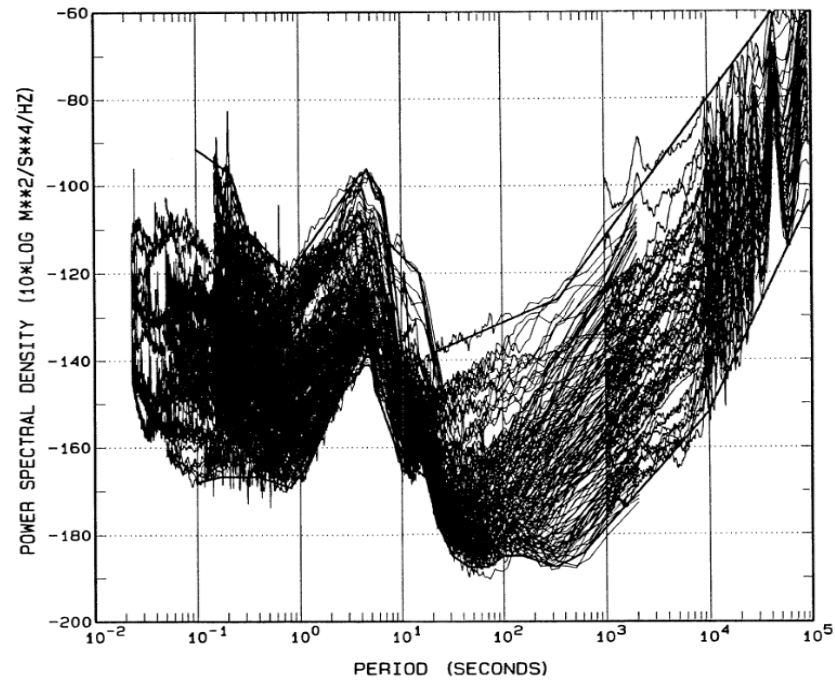
$$P(T_c) = \frac{N_{PTc}}{N_{Tc}}, \quad (4)$$

gdje N_{PTc} označava broj izgladenih PSD-ova koji po snazi nemira spadaju u određeni razred (engl. *bin*) širine 1dB za period T_c , a N_{Tc} označava broj svih izgladenih krivulja (bilo kojeg iznosa snage) s centralnim periodom T_c .

2.2.3 Petersonovi modeli

Peterson (1993) je u svom radu računao gustoću spektra snage na 75 seizmičkih postaja u svijetu, te je analizom svih dobivenih rezultata izveo tzv. novi model visoke razine šuma (engl. *new high noise model*, NHNM) i novi model niske razine šuma (engl. *new low noise model*, NLNM), koji se ponekad zajedno nazivaju Petersonovim modelom. Oni prikazuju najviše i najniže vrijednosti zapisanih gustoće spektra snage kao na slici

(2.1). Krivulje NHNM i NLNM su trenutno općenito prihvaćene u seizmološkoj zajednici kao standard za granične krivulje očekivane i općenito prihvatljive razine seizmičkog nemira na seizmološkoj postaji (Bromann i Wielandt, 2013).



Slika 2.1 Prikaz spektra većine proučavanih postaja s NHNM i NNM krivuljama. Prema Peterson (1993)

3 Metoda i podatci

3.1 Određivanje razine seizmičkog nemira

U ovom radu razina seizmičkog nemira određena je prema metodi opisanoj u radu McNamare i Bulanda (2004), gdje se računaju gustoće spektra snage i funkcije gustoće vjerojatnosti. Metoda računanja gustoće spektra snage dijelom se temelji na radu od Petersona (1993), što omogućuje usporedbu rezultata s krivuljama NHNM i NLNM. U svrhu prikaza spektra nemira, najčešće se koristi spektar ubrzanja gustoće snage nemira $P_a(\omega)$ [dB] koje iznose $1 \text{ (m/s}^2\text{)}^2/\text{Hz}$, pri čemu se razina nemira računa u obliku

$$\text{Razina nemira} = 10 \log[P_a(\omega)/(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}] . \quad (5)$$

Pri usporedbi signala u vremenskoj i frekventnoj domeni, mjerne jedinice nemaju veliki utjecaj pri promatranju međusobnog odnosa. U slučaju kad se uspoređuju rezultati analize signala s Petersonovim krivuljama, prvo je potrebno spektar snage preračunati u akceleraciju (Havskov i Alguacil, 2016).

Za određivanje razine seizmičkog nemira, odnosno gustoće spektra snage, korišteni su kontinuirani zapisi brzine gibanja tla koji su raščlanjeni na jednosatne nizove tako da se međusobno poklapaju za 50 % vremenskog intervala. Nakon toga slijedilo je uređivanje jednosatnih podataka, tako da su jednosatni nizovi dodatno podijeljeni na 13 segmenata s međusobnim preklapanjem od 75 %. Kako bi se smanjio utjecaj dugoperiodičkih oscilacija, uklonjeni su srednjak i linearni trend. Preostalo je skraćivanje signala pomoću funkcije kosinusa (engl. *cosine taper*) oba kraja vremenskog segmenta. Spektar je izračunat pomoću metode izravnog FFT, prema jednadžbama opisanim u poglavlju 2.2.1. Dobivena gustoća spektra snage (PSD) korigirana je s faktorom 1.142857 jer se u pripremi podataka signal skratio pomoću funkcije kosinusa. Na kraju su dobivene vrijednosti podijeljene s transfer-funkcijom instrumenta u frekvencijskoj domeni (dekonvolucija) kako bi se uklonio instrumentalni odziv.

Za dobivanje jedne PSD-krivulje koja odgovara jednosatnom nizu, potrebno je izračunati srednju vrijednost svih 13 PSD krivulja dobivenih primjenom gore

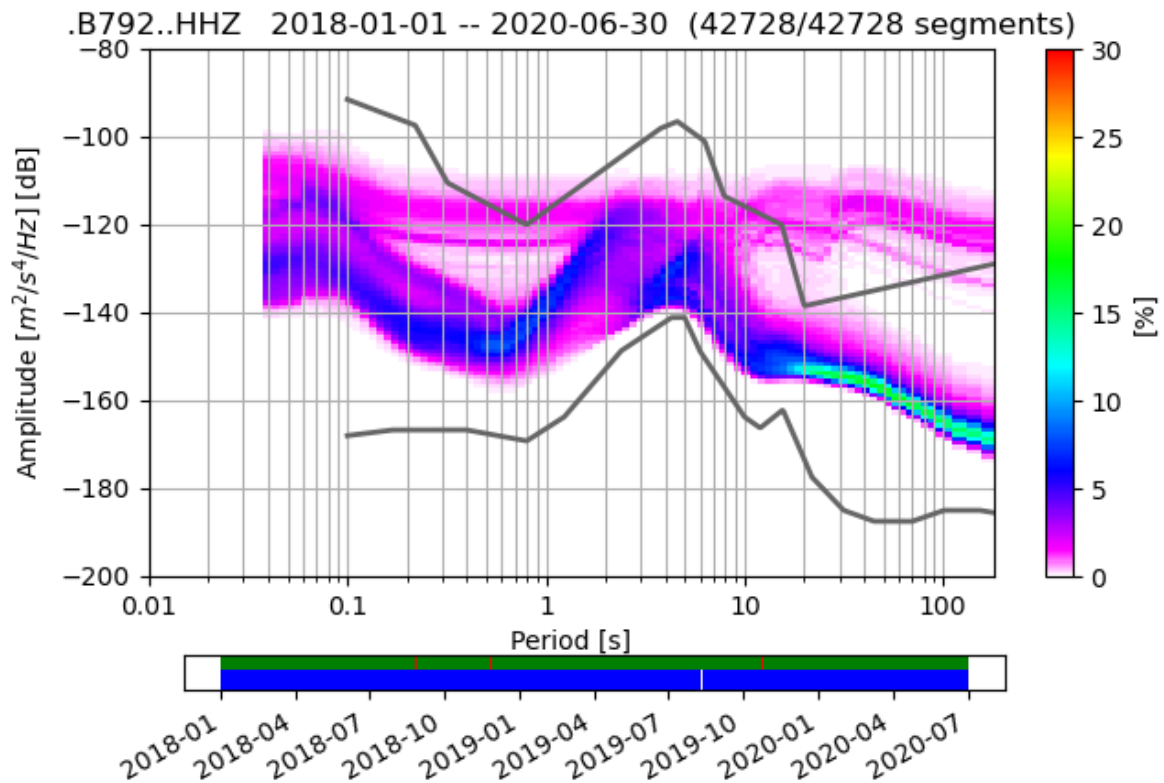
navedenog postupka. Nakon dobivanja mnogobrojnih krivulja gustoće spektra snage, slijedi računanje funkcije gustoće vjerojatnosti kako je opisano u poglavlju 2.2.2.

3.1.1 Program i programski jezik

U radu je korišten programski jezik Python, te library ObsPy što je dio *open-source* projekta. ObsPy sadrži mnoge funkcije za obradu seizmoloških podataka, te je jedna od njih i funkcija PPSD (engl. *probabilistic power spectral densities*), koja računa PDF prema metodi opisanoj u radu McNamare i Bulanda (2004).

Metoda je korištena tako da se podatci prvotno dijele na jednosatne nizove sa preklapanjem od 50%. Funkcija PPSD provodi obradu novih podataka u PSD funkcije nakon svakog dodavanja podataka, koji su predani funkciji za svaki dan odvojeno.

Pri korištenju PPSD funkcije, postoje razne opcije, od kojih je jedna postupanje s nedostacima zapisa u promatranom vremenskom razdoblju. Iako se u konačnom računu nisu uključivale PSD-krivulje za nizove u kojima nedostaju podatci, postoje dva načina prikaza nedostajućih podataka koji prikazuju njihovu vjerojatnost pojave. Kad se u račun uključuje razdoblje za koje ne postoji zapis, vjerojatnost da nestane signala je prikazana s linijom na dnu grafa. Drugi način uključuje zapis koji ima označen nedostajuće podatke, te se tzv. *data drops* pojavljuje kao približno ravna linija gotovo konstantne snage, kao na slici (3.1). U konačnici je prikaz nedostajućih podataka na grafu isključen radi preglednosti. Zbog takvog pristupa se s grafa ne može očitati vjerojatnost nestanka signala, ali je utjecaj premješten na broj PSD krivulja u računu.



Slika 3.1. Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju UDBI vertikalnu komponentu Z s prikazanim krivuljama s nedostajućim podacima.

3.1.2 Dnevne i sezonske promjene

U svrhu proučavanja dnevnih i sezonskih promjena razine nemira na svim periodima, izračunati su medijani krivulja iz svih PSD krivulja određene komponente neke postaje unutar zadanog razdoblja. Za dnevne promjene (slike 4.23 – 4.25), medijan krivulja je izračunat za svaki sat u jednom danu. Za sezonske promjene (slike 4.31 – 4.34), medijan krivulja je izračunat iz svih krivulja PSD-a unutar jednog tjedna kroz promatrano razdoblje.

Za bolje razlučivanje promjena razine nemira za vrijeme radnih sati i tijekom noći, pripremljene su slike kao što je slika 4.26. Na njima se vide dvije PDF krivulje: crvenom bojom označen je PDF za vrijeme radnih sati, dok je zelenom bojom označen PDF izračunat tijekom noći. Kako bi vjerojatnost ostala vidljiva nakon zbrajanja, dva odvojena grafa u crvenoj i zelenoj boji se zbrajaju tzv. *darken only* metodom. Tada

dijelovi krivulja koji se razlikuju u doba noći i dana ostaju u prijašnjim bojama, dok su dijelovi koji su jednaki u radno vrijeme i tijekom noći, tj. koji se preklapaju, označeni sivom bojom.

3.1.3 Promjena na određenom rasponu perioda

Osim grafova koji prikazuju promjene razine nemira na svim periodima, nacrtani su i grafovi na nekim određenim rasponima periodima. Promatran je medijan svih vrijednosti PSD na promatranom rasponu perioda u jednom danu (npr. slika 4.27). Druga vrsta grafa (npr. slika 4.30) prikazuje medijan polusatnih vrijednosti PSD-a na promatranom rasponu perioda: polusatne vrijednosti od ponedjeljka do nedjelje nacrtane u jednom stupcu (dani u tjednu prikazani su na osi y), te se takvi stupci ponavljaju u smjeru osi x (vremenska os) za cijelo promatrano razdoblje. Ovakav graf je praktičan u vizualizaciji dnevne, tjedne i sezonske promjene odjednom na jednoj slici, ali je ograničen jer se prikazuju medijani PSD-krivulja samo u odabranom raspona perioda.

3.2 Analiza razine seizmičkog nemira prema radu Lecocq et al. (2020)

Unutar razmatranog razdoblja u ovom radu, nalazi se i vrijeme početka svjetske pandemije uzrokovane virusom SARS-Cov-2, odnosno bolesti Covid-19. Kao posljedica u sprječavanju širenja zaraze i ograničavanja kretanja stanovništva u mnogim državama, došlo do najvećeg jenjavanja pozadinskog seizmičkog nemira na seizmogramima (Lecocq et al., 2020).

Za računanje promjene nemira, prije i poslije zabrane ili ograničavanja kretanja (tzv. *lockdown*) primijenjena je metoda vrlo slična onoj opisanoj u radu Lecocq et al. (2020). Kao ulazni podatci, uzeti su već izračunati izgladeni PSD-ovi iz funkcije PPSD iz programskog jezika ObsPy, te je pomoću njih određen tzv. *displacement spectral power* (D_{pow}). Veza s PSD vrijednostima u decibelima glasi

$$D_{pow}(f) = \frac{A_{pow}(f)}{(2\pi f)^2} = \frac{10^{\frac{A_{dB}(f)}{10}}}{(2\pi f)^2} . \quad (6)$$

$A_{pow}(f)$ označava snagu spektra ubrzanja, dok $A_{dB}(f)$ predstavlja PSD ubrzanja u decibelima. Vrijednost RMS u vremenskoj domeni se iz gornje relacije dobiva prema

$$d_{rms}(t) = \sqrt{\int_{f_{max}}^{f_{min}} D_{pow}(f) df} . \quad (7)$$

Vrijednosti d_{rms} mogu se računati na raznim frekvencijskim pojasevima, od kojih su autori za većinu postaja odabrali 4 – 14 Hz. Završno se podatci normiraju na 15. i 85. percentil podataka prije ograničavanja kretanja. U ovom radu također je analiziran raspon frekvencija 4 – 14 Hz, jer se prvenstveno očekuje smanjenje antropogenog utjecaja izraženog najviše u ovom frekvencijskom pojasu.

3.3 Analizirani podatci

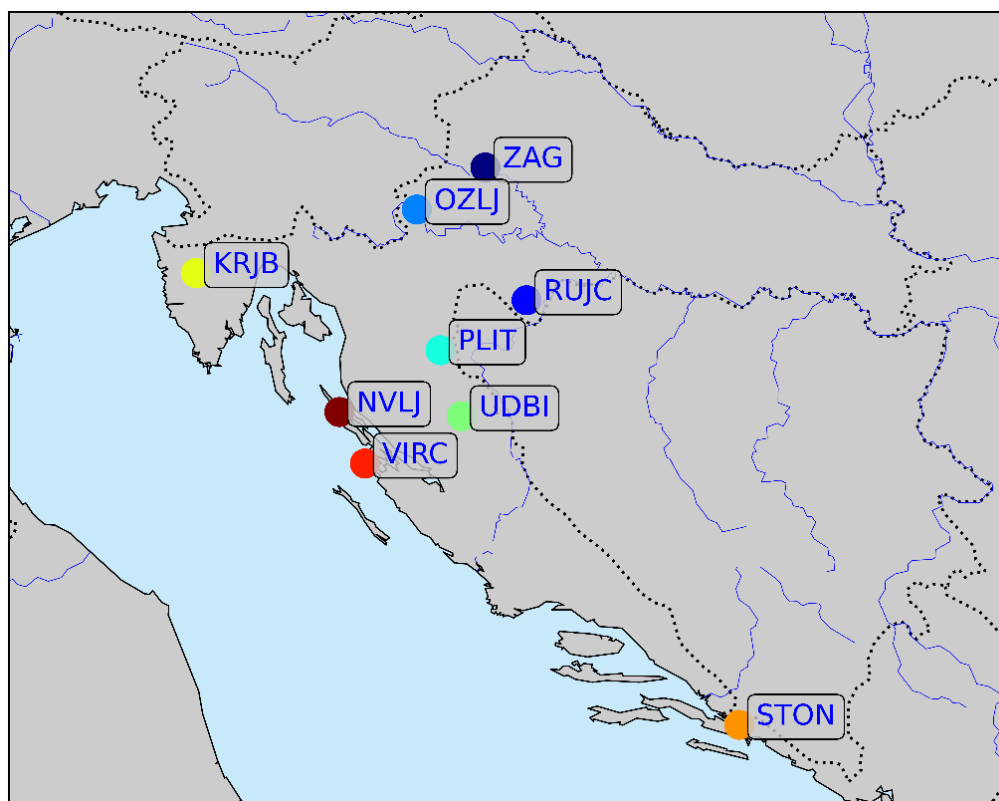
Za proučavanje seizmičkog pozadinskog nemira, korišteni su zapisi s devet seizmoloških postaja u razdoblju od 1. siječnja 2018. do 30. lipnja 2020. godine. Analizirane seizmološke postaje dio su Hrvatske mreže seizmografa (slika 3.2): sedam privremenih seizmoloških postaja (NVLJ, VIRC, STON, KRJB, UDBI, PLIT, RUJC) postavljene su i održavane u okviru znanstvenih projekata Geofizičkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, te dvije stalne seizmološke postaje iz Državne seizmografske mreže (ZAG) i Zagrebačke seizmografske mreže (OZLJ) koje održava Seizmološka služba pri Geofizičkom odsjeku PMF-a. Osnovne informacije o seizmološkim postajama prikazane su u tablici 3.1.

Privremena seizmološka postaja NVLJ se nalazi u gradu Novalji na otoku Pagu u kući za odmor na stijeni od vapnenačke breče (prema mobilnoj aplikaciji GeoCro, <https://www.hgi-cgs.hr/geocro-mobilna-aplikacija/>). Najmanja udaljenost od mora je stotinjak metara, no kako je na otoku s razvedenom obalom, može se pretpostaviti da morski utjecaj dolazi iz različitih smjerova. Na postaji je postavljen instrument tipa Güralp CMG-40T s ravnim instrumentalnim odzivom između 30 s i 50 Hz. Novalja i otok Pag su vrlo popularna turistička odredišta, te se u blizini postaje na udaljenosti od 4 km nalazi i vrlo posjećena plaža Zrće. Na cijelom otoku Pagu primjećuje se veliki porast broja ljudi koji borave u ljetnim mjesecima za vrijeme turističke sezone: otok

broji 9000 stanovnika (samo mjesto Novalja broji oko 2300 stanovnika, Državni zavod za statistiku, 2011), a za vrijeme turističke sezone u 2018. i 2019. godini je zabilježeno oko 2 785 000 noćenja prema *Turizam u brojkama 2019* (2020).

Tablica 3.1 Osnovne informacije devet razmatranih seizmoloških postaja: kod postaje, mjesto u kojem je smještena, geografska širina φ , i dužina λ položaja postaje, tip instrumenta te frekvencija uzorkovanja..

Kod postaje	Mjesto	φ [° N]	λ [° E]	Instrument	f_s [Hz]
ZAG (4748)	Zagreb	45.827084	15.986870	CMG-40TD	50
RUJC (2373)	Rujevac	45.128786	16.266751	CMG-40T	100
OZLJ (1999)	Ozalj	45.615270	15.46726	CMG-40T	50
PLIT (3T15)	Plitvice	44.878389	15.623055	CMG-3ESPCD	50
UDBI (B792)	Udbina	44.531422	15.769351	CMG-40T	50
KRJB (7550)	Karolja	45.292600	13.816700	CMG-40T	100
STON (A103)	Ston	42.871600	17.699900	CMG-40TD	50
VIRC (6772)	Vir	44.292497	15.053954	CMG-40T	50
NVLJ	Novalja	44.563470	14.871050	CMG-40T	50



Slika 3.2 Prikaz seizmoloških postaja na karti.

Privremena seizmološka postaja VIRC smještena je u selu Torovi na otoku Viru, također u spremištu kuće za odmor ukopanom oko 1.5 m ispod površine. Geološka podloga su vapnenačke liburnijske naslage (prema mobilnoj aplikaciji GeoCro). Udaljenost od morske obale je manja od jednog kilometra. Na postaji je postavljen instrument tipa Güralp CMG-40T s ravnim instrumentalnim odzivom između 30 s i 50 Hz. Slično kao i Novalja, otok Vir je popularno turističko mjesto koje ljeti broji oko 714 000 noćenja (prema *Turizam u brojkama 2019, 2020*), dok na otoku živi oko 3000 stanovnika (Državni zavod za statistiku, 2011).

Postaja najbliža moru jest privremena seizmološka postaja STON koja je od mora udaljena nekoliko desetaka metara. Nalazi se izvan samog grada Stona, 3 km sjeverno, na ulazu u uvalu Bistrina na rudistnom vapnencu (prema mobilnoj aplikaciji GeoCro). U blizini se nalazi istoimeni most Bistrina preko kojeg prolazi državna cesta D8. Na postaji je postavljen instrument tipa Güralp CMG-40TD s ravnim instrumentalnim odzivom između 30 s i 50 Hz.

Privremena seizmološka postaja KRJB nalazi se na Istarskom poluotoku na podlozi od vapnenca i dolomita (prema mobilnoj aplikaciji GeoCro). Instrument je postavljen u spremištu mrtvačnice groblja Karojba, koje je od najbliže morske obale udaljeno 20 km, jezera Butonige 10 km, a rijeke Mirne 5 km. Na postaji je postavljen instrument tipa Güralp CMG-40T s ravnim instrumentalnim odzivom između 60 s i 100 Hz. U blizini postaja nalazi se naselje Karojba koje broji oko 1400 stanovnika (Državni zavod za statistiku, 2011), a smješteno je oko 1 km od same postaje.

Privremena seizmološka postaja UDBI postavljena je u spremištu Osnovne škole Kralja Tomislava koju pohađa oko 80 učenika. Geološku podlogu čine sajske i kampilske naslage donjeg trijasa (prema mobilnoj aplikaciji GeoCro). Samo mjesto Udbina broji oko 2000 stanovnika (Državni zavod za statistiku, 2011), te se nalazi u relativnoj blizini vojarne Udbina i državne ceste D1 (oko 510 m). Na postaji je postavljen instrument tipa Güralp CMG-40T s ravnim instrumentalnim odzivom između 30 s i 50 Hz.

Privremena seizmološka postaja PLIT smještena je unutar Nacionalnog parka Plitvička jezera, u zgradi Znanstveno-stručnog centra Dr. Ive Pevaleka. Prema mobilnoj aplikaciji GeoCro, lokacija se nalazi na dolomitskim stijenama. U neposrednoj blizini

nalazi se jezero Kozjak (oko 260 m), najveće jezero u NP Plitvička jezera površine 81.5 ha i najveće dubine 46 m, kao i ostala jezera i vodopadi, te državna cesta D1 (oko 310 m). Na postaji je postavljen instrument tipa Guralp CMG-3ESPCD s ravnim instrumentalnim odzivom između 60 s i 50 Hz.

Seizmološka postaja OZLJ smještena je u kući za odmor na stijenskoj podlozi od karbonatnih klasta i glinovitog vapnenca. U neposrednoj blizini teče rijeka Kupa, te se uz obalu rijeke protežu tračnice Hrvatskih željeznica, dok se nizvodno oko 1 km nalazi mala Hidroelektrana Ozalj. Na postaji je postavljen instrument tipa Guralp CMG-40T s ravnim instrumentalnim odzivom između 30 s i 50 Hz.

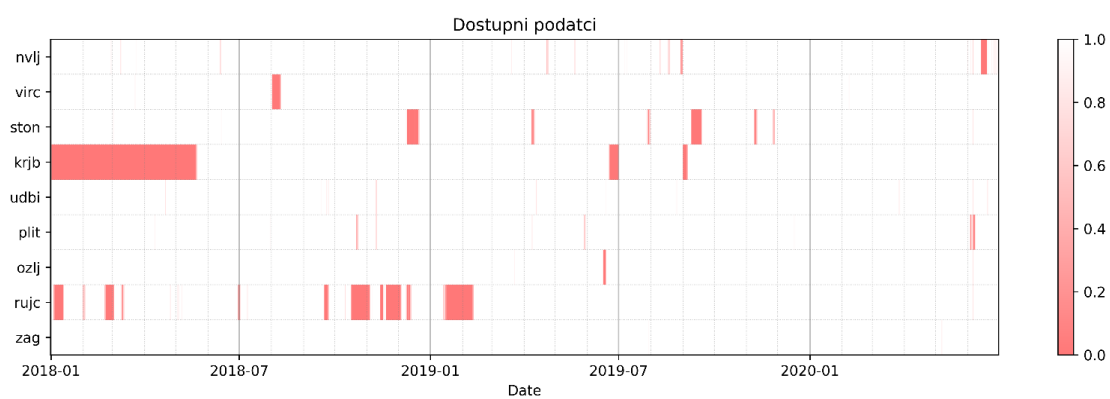
Privremena seizmološka postaja RUJC smještena je u podrumu zgrade Šumarije Rujevac na podlozi od klastičnih i karbonatnih naslaga, u malom mjestu Rujevac sjeverno od Dvora na Uni. Na postaji je postavljen instrument tipa Guralp CMG-40T s ravnim instrumentalnim odzivom između 30 s i 50 Hz.

Seizmološka postaja ZAG nalazi se u podrumu zgrade Geofizičkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu na Horvatovcu u Zagrebu. Zgrada je izgrađena na praporu (prema mobilnoj aplikaciji GeoCro) te se nalazi 2 km od središnjeg zagrebačkog Trga bana Josipa Jelačića. Na postaji je postavljen instrument tipa Guralp CMG-40TD s ravnim instrumentalnim odzivom između 30 s i 50 Hz.

Seizmometri tipa Guralp CMG-40T i CMG-40TD su trokomponentni širokopojasni instrumenti s dinamičkim rasponom od 148 dB na $f = 1$ Hz namijenjeni za praćenje lokalne i regionalne seizmičnosti te za lokacije s umjerenom razinom nemira (<https://www.guralp.com/documents/DAS-040-0001.pdf>). Seizmometar tipa Guralp CMG-3ESPCD trokomponentni je širokopojasni instrument s dinamičkim rasponom većim od 140 dB i niske razine unutarnjeg šuma namijenjen za praćenje regionalne seizmičnosti i praćenje serija naknadnih potres (<https://www.guralp.com/documents/DAS-C3E-0002.pdf>).

Slika 3.3 prikazuje vremenske intervale u kojima nedostaju podatci za analizirane postaje, pri čemu ružičasta boja označava udio količine podataka koji nedostaju u jednom danu. Seizmološka postaja KRJB postavljena je 21. svibnja 2018. i to je razlog duge ružičaste pruge na slici 3.3. Sve seizmološke postaje rade vrlo uredno,

a većih problema u radu u razmatranom razdoblju bilo je jedino na seizmološkoj postaji RUJC kojoj nedostaje nešto više podataka.



Slika 3.3: Udio postojećih podataka u jednom danu na pojedinim postajama.

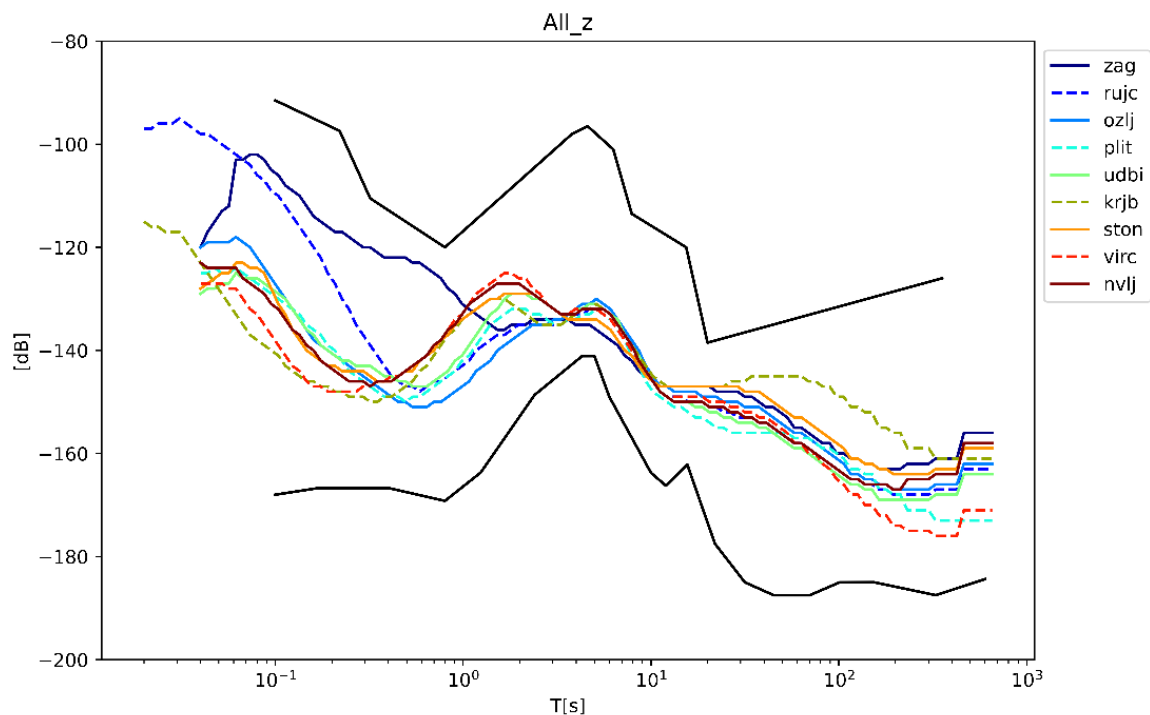
4 Rezultati i diskusija

Razina seizmičkog nemira određena je kao gustoća spektra snage (PSD) za sve tri komponente zapisa brzine gibanja tla (vertikalna Z, horizontalne N i E), prikazane kao PSD akceleracija tla, u razdoblju između 1. siječnja 2018. i 30. lipnja 2020. na devet seizmoloških postaja u Hrvatskoj mreži seizmografa: NVLJ, VIRC, STON, KRJB, UDBI, PLIT, OZLJ, RUJC, ZAG. Analizirano je kako razina seizmičkog nemira ovisi o dijelu dana, tjedna i godišnjem dobu, odnosno sezoni, te neki zanimljivi posebni slučajevi kao što je porast vodostaja rijeke Kupe, jakih epizoda juga i ograničenje kretanja stanovništva za vrijeme pandemije COVID-19 u proljeće 2020. godine.

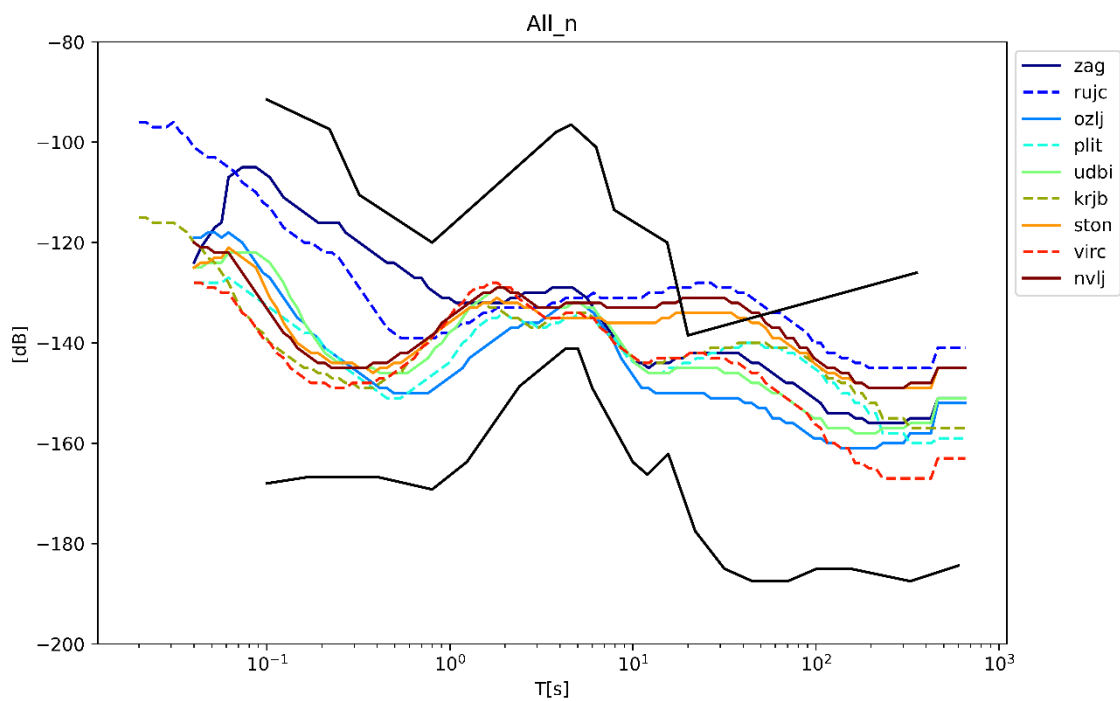
Na slikama 4.1 – 4.3 prikazane su vrijednosti medijana svih krivulja gustoće spektra snage koje su izračunate za cijeli promatrani vremenski raspon za svaku seizmološku postaju. Crne krivulje prikazuju novi model visoke razine šuma (NHNM) i novi model niske razine šuma (NLNM), prema Petersonu (1993).

Slika 4.1 prikazuje krivulje medijana gustoće spektra snage za vertikalnu komponentu i sve se nalaze između NHNM i NLNM kao što je očekivano za kvalitetne seizmološke postaje. Kod horizontalnih komponenata (slike 4.2 i 4.3) je nešto drugačija situacija jer razina nemira za neke postaje (NVLJ, RUJC, STON) premašuje krivulju NHNM na duljim periodima ($T \approx 20 - 100$ s).

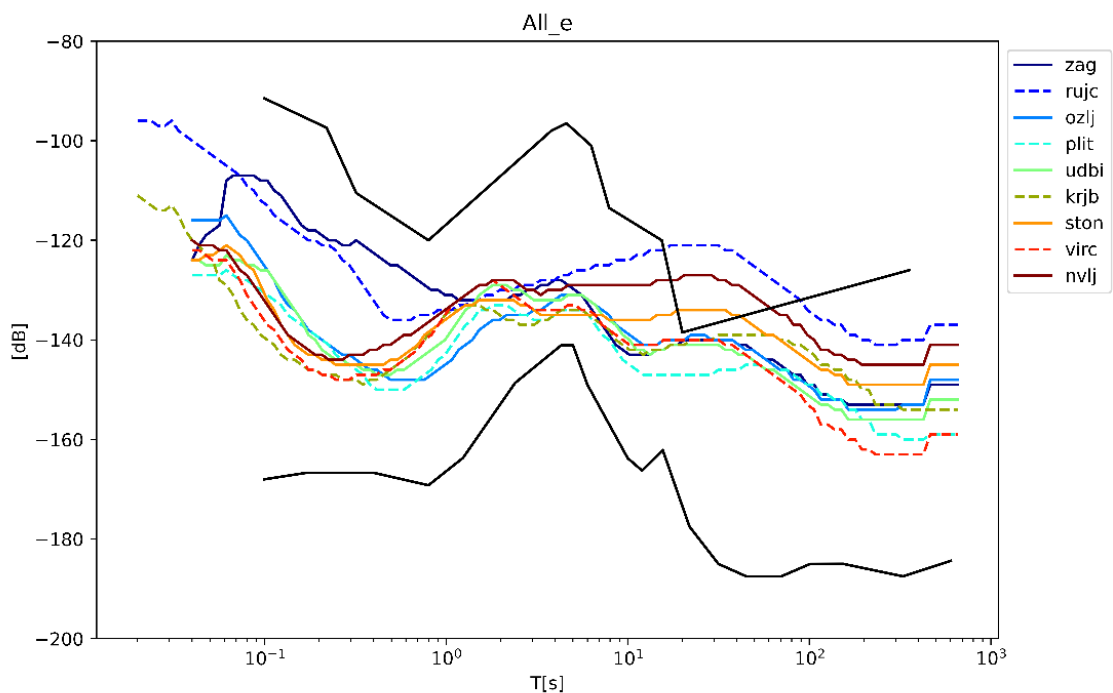
Osim što horizontalne komponente nekih postaja premašuju NHNM na duljim periodima, može se primijetiti da su na svim postajama horizontalne komponente većeg iznosa od vertikalne, osim sjeverne komponente postaje OZLJ koja je približna vertikalnoj komponenti iste postaje.



Slika 4.1 Medijan vrijednosti svih krivulja PSD u cijelom promatranom periodu na vertikalnoj komponenti za sve analizirane seizmološke postaje.



Slika 4.2 Medijan vrijednosti svih krivulja PSD u cijelom promatranom periodu na sjevernoj komponenti za sve analizirane seizmološke postaje.



Slika 4.3 Medijan vrijednosti svih krivulja PSD u cijelom promatranom periodu na istočnoj komponenti za sve analizirane seizmološke postaje.

Promatraju li se kratki periodi ($T < 1$ s), može se uočiti da postaje ZAG i RUJC imaju izraženiju razinu nemira i na horizontalnim i vertikalnoj komponenti. Postaja ZAG smještena je u gusto naseljenom gradu, s razvijenim gradskim prometom i industrijom, što se odrazilo kao jači antropogeni utjecaj na razinu nemira. Ostale postaje imaju razinu nemira koja je manja za više od 20 dB od NHNM, što je poželjan uvjet za seizmološku postaju.

Na periodima većim od deset sekundi, horizontalne komponente imaju veće razlike po postajama. Sa slika 4.2 i 4.3 može se uočiti kako krivulje medijana PSD-a na postajama NVLJ, STON i RUJC premašuju NHNM. Iako su krivulje medijana PSD-a za ostale seizmološke postaje unutar raspona Petersonovog modela, grafovi funkcija gustoće vjerojatnosti PSD-a prikazani u kasnijim poglavljima ukazuju da neke postaje svejedno imaju nešto veću vjerojatnost premašivanja NHNM.

Mikroseizmički šiljci u rasponu $T = 1 - 10$ s najizraženiji su na vertikalnoj komponenti (slika 4.1), gdje se na većini postaja jasno razaznaju dva šiljka. Na svim postajama nalazi se šiljak na $T \approx 5$ s, koji odgovara šiljku dvostruke frekvencije (DF). Drugi skup šiljaka se nalazi na $T \approx 2$ s, iako nije jednako istaknut na svim postajama: otočne postaje, kao što su NVLJ i VIR, imaju najizraženiji šiljak, te je on veći od DF na

tim postajama. Ako se pažljivo promotre krivulje, može se uočiti da priobalne postaje postižu veću vrijednost u šiljku te da je njihov maksimum pomaknut prema manjim periodima, dok kontinentalne postaje imaju manji ili gotovo neprimjetan šiljak čiji je maksimum vrlo blizu samom šiljku DF. Smanjenje razine nemira s udaljenošću, zajedno s povećanjem perioda maksimuma šiljaka na periodima 1.5 – 3 s, može se povezati s Gutenbergovim (1951) radom gdje je slična pojava uočena za Atlantski ocean, te Markovićevim (1948) gdje je uočen utjecaj Jadranskog mora na periodima 3 – 4 s u Zagrebu. Takvo što upućuje na to da je pojava šiljaka na periodima oko 2 s najvjerojatnije povezana uz procese u Jadranskom moru koji uzrokuju seizmičke valove. Na periodima mikroseizmičkog nemira oko 10 s i većima, u teoriji se očekuje pojava šiljka jednostruke frekvencije (SF), ali na promatranim postajama taj šiljak nije vidljiv.

U radu Molinari et al. (2018) proučavane su seizmološke postaje na otocima u Jadranskom moru i njegovom priobalju, te se rezultati mogu usporediti zbog slične metode određivanja razine nemira. Oblici PSD-krivulja iz rada Molinari et al. (2018) imaju sličan oblik krivuljama izračunatim u ovom radu, pogotovo na periodima mikroseizmičkog nemira, gdje se osim DF može uočiti još jedan šiljak oko $T \approx 1.5 - 2$ s – kao i u ovom radu.

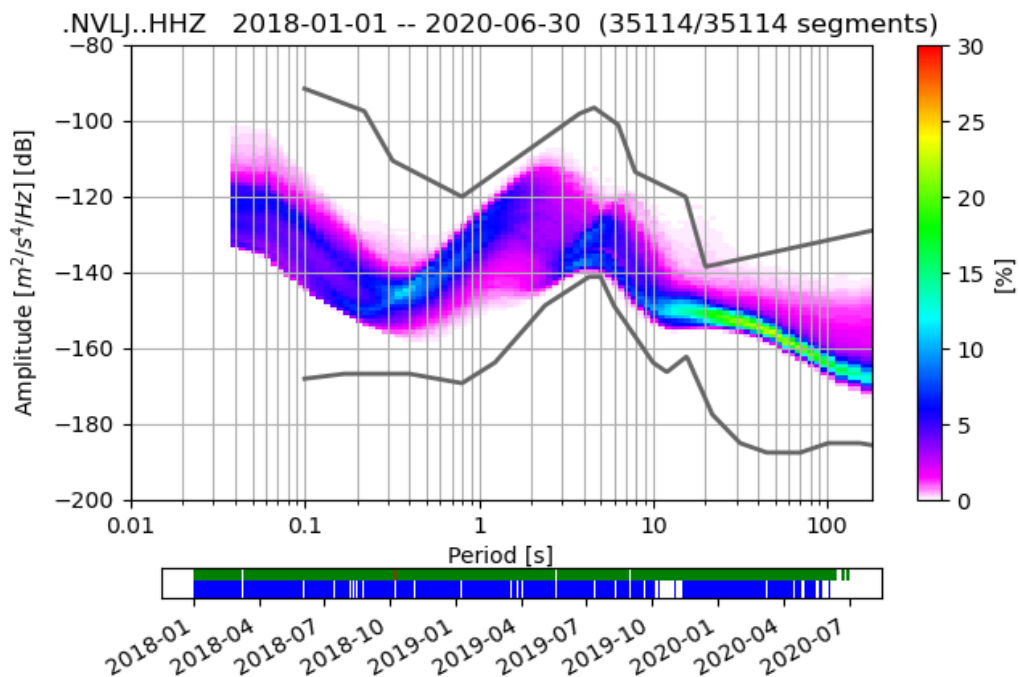
4.1 Analiza razine seizmičkog nemira po seizmološkim postajama

U ovom potpoglavlju prikazane su funkcije gustoće vjerojatnosti (PDF) gustoće spektra snage koje prikazuju vjerojatnost da će na određenom periodu biti određena razina seizmičkog nemira, odnosno da će gustoća spektra snage poprimiti određenu vrijednost, za svaku seizmološku postaju. Za svaku postaju nisu pokazane sve komponente gibanja – one koje nisu prikazane u ovom potpoglavlju, mogu se pogledati u Dodatku A.

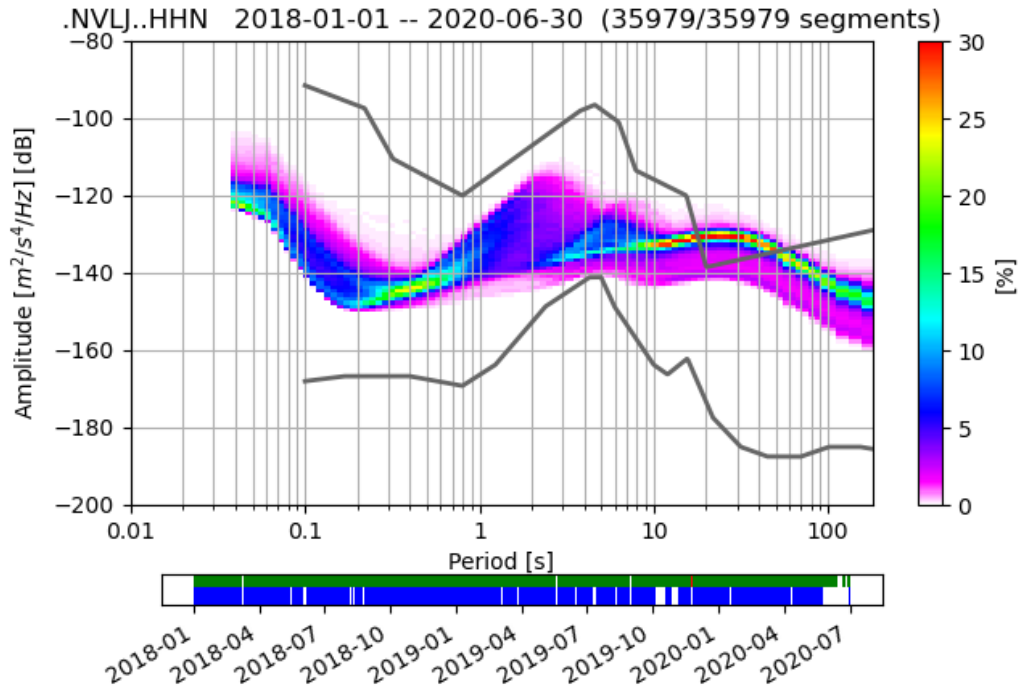
Seizmološka postaja Novalja

Na slikama 4.4 i 4.5 prikazane su funkcije gustoće vjerojatnosti za seizmološku postaju NVLJ. Na vertikalnoj komponenti (slika 4.4), većina krivulja nalazi se između krivulja NHNM i NHLM iz čega se može zaključiti da je razina seizmičkog nemira zadovoljavajuće niska. Na komponenti N i E (slika 4.5) postoji velika vjerojatnost premašivanja NHNM na $T \approx 20 - 50$ s, što bi moglo smanjiti kvalitetu analize

seizmograma potresa na tim periodima zbog pojačane razine seizmičkog nemira. Horizontalne komponente su ujednačenije u razini seizmičkog nemira u odnosu na vertikalnu komponentu, odnosno na širokom rasponu perioda postoji velika vjerojatnost da PDF poprimi određenu razinu nemira. Za sve tri komponente vidljivo je da je razina seizmičkog nemira poprilično konzistentna tijekom cijelog razmatranog razdoblja, osim za periode između 1 i 10 s na vertikalnoj komponenti, gdje se ističu dva lokalna maksimuma, odnosno dva brijega, na periodima oko 2.5 s i 6 s. Radi se o šiljku DF i šiljku uzrokovanom djelovanjem lokalnog mora koji su posljedica međudjelovanja atmosfere i mora, odnosno oceana, s kopnom. Kao što će se vidjeti u dijelu u kojem je analizirana sezonska promjenjivost (poglavlje 4.4), manja konzistentnost razine seizmičkog nemira na ovim periodima posljedica je velikih sezonskih promjena razine nemira. Na DF na $T \approx 4$ s mogu se vidjeti dva izražena područja veće vjerojatnosti s različitim razinama nemira što je posljedica jače razine nemira zimi a slabijeg ljeti. Na periodima oko 2.5 s ne ističe se sezonsko grananje vjerojatno zato što je razina nemira uzrokovana djelovanjem lokalnog mora na tim periodima promjenjiva unutar sezone.



Slika 4.4 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju NVLJ vertikalnu komponentu Z.

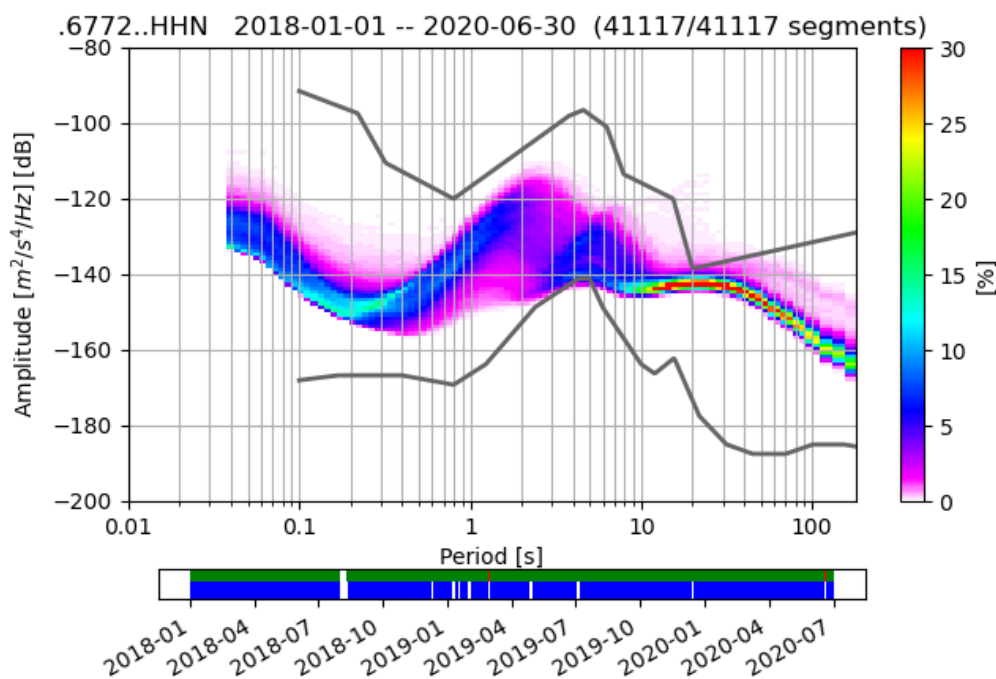


Slika 4.5 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju NVLJ horizontalnu komponentu N.

Seizmološka postaja Vir

Slika 4.6 prikazuje funkciju gustoće vjerojatnosti za komponentu N postaje VIRIC. Oblici krivulja horizontalnih i vertikalnih komponenti na postaji VIRIC (pogledati slike A.2 i A.3 u Dodatku A) ne razlikuju se mnogo osim što vertikalna komponenta ima u prosjeku nižu razinu nemira na $T > 10$ s. Iako je PDF vertikalne komponente najvećim dijelom između krivulja Petersonovog modela, horizontalne komponente imaju nezanemarivu vjerojatnost prelaska krivulje NHNM za nekoliko decibela na periodima između 20 i 50 s.

Za sve tri komponente vidljivo je da je razina seizmičkog nemira poprilično konzistentna tijekom cijelog razmatranog razdoblja, osim za periode između 1 i 10 s gdje se ističu dva lokalna maksimuma, odnosno dva brijega, na periodima oko 2.5 s i 6 s, kao što je uočljivo i na postaji NVLJ.

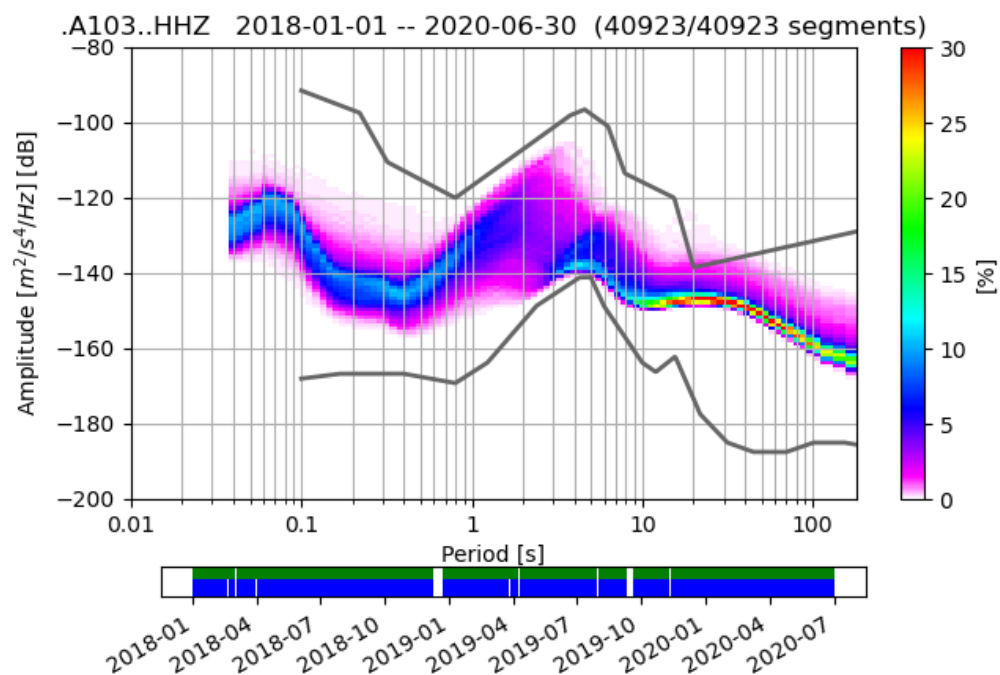


Slika 4.6 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju VIRC horizontalnu komponentu N.

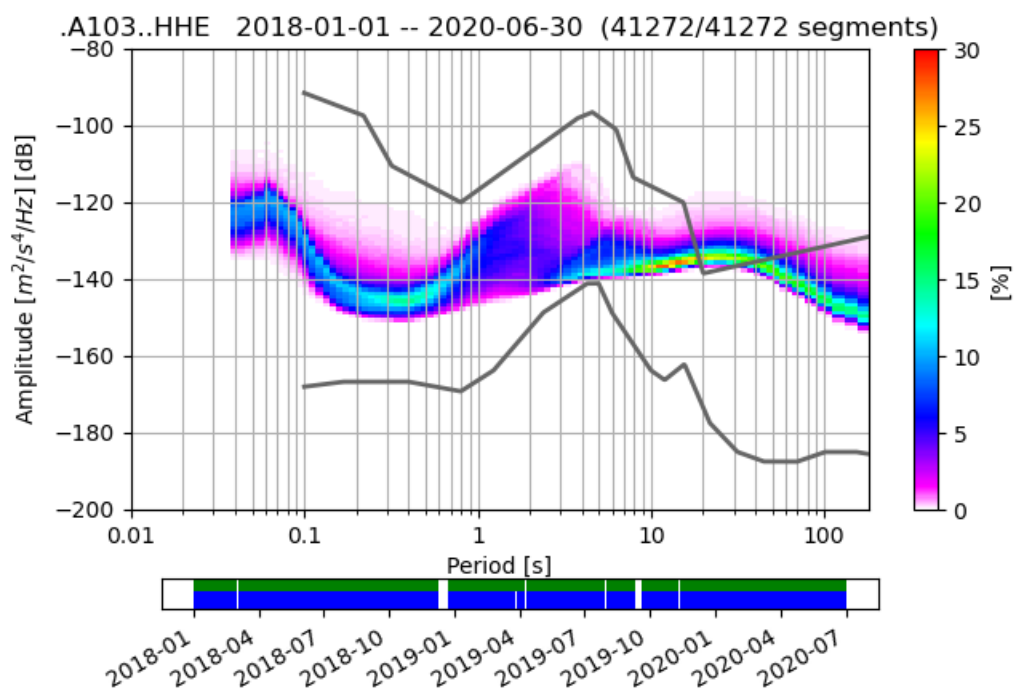
Seizmološka postaja Ston

Na slikama 4.7 i 4.8 prikazane su PDF funkcije vertikalne i istočne komponente postaje STON. Horizontalne i vertikalna komponente su vrlo slične, osim na dužim periodima gdje vertikalna komponenta pokazuje nižu snagu nemira za oko 20 dB od sjeverne i istočne komponente. Na svim komponentama postoji vjerojatnost da razine nemira prijeđu vrijednosti NHNM na $T \approx 20 - 40$ s, ali je razlika što na horizontalnim komponentama razina nemira skoro uvijek premašuje razinu NHNM, dok je na vertikalnoj komponenti vjerojatnije da razina nemira ostane ispod krivulje NHNM.

Na svim komponentama je jasno vidljiv lokalni maksimum oko 2.5 s, te maksimum nešto manjeg iznosa oko 6 s, što ukazuje na maksimum zbog lokalnog utjecaja mora i DF, kao što je vidljivo i na postajama NVLJ i VIRC. Krivulje PDF su poprilično konzistentne, te se vidi da na kratkim i dugim periodima vidi velika vjerojatnost pojave nemira određene prikazane razine. Najveća promjenjivost razine nemira može se očekivati na $T \approx 1 - 4$ s, što su periodi u blizini šiljka uzrokovanog djelovanjem lokalnog mora.



Slika 4.7 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju STON vertikalnu komponentu Z.

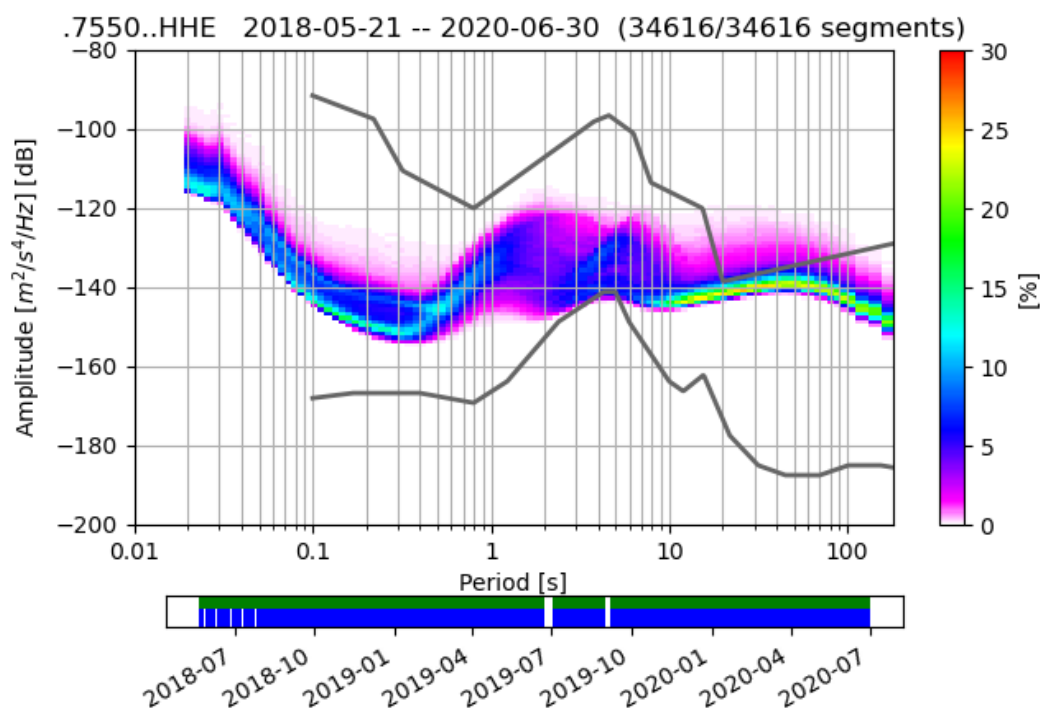


Slika 4.8 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju STON horizontalnu komponentu E.

Seizmološka postaja Karojba

Prema slici 4.9, vidljivo je da je seizmički nemir na seizmološkoj postaji KRJB u središtu Istre poprilično konzistentan, odnosno stabilan, pogotovo na $T < 1$ s i $T > 10$ s, slično kao na prethodno opisanim postajama. Također, horizontalne komponente pokazuju veću razinu nemira na periodima većim od 10 s. Na takvim periodima je vrlo konzistentna razina nemira na granici premašivanje krivulje NHNM pri čemu je medijan svih PSD-krivulja ispod same krivulje NHNM, ali je nezanemariva mogućnost njenog premašivanja. Grananje velike vjerojatnosti razine nemira na manjim periodima ($T \approx 0.04 - 0.6$ s) zapravo je povezano s razlikom razine nemira za vrijeme radnog vremena i noću, što je opisano u dijelu gdje su razmatrane dnevne oscilacije (poglavlje 4.3.1).

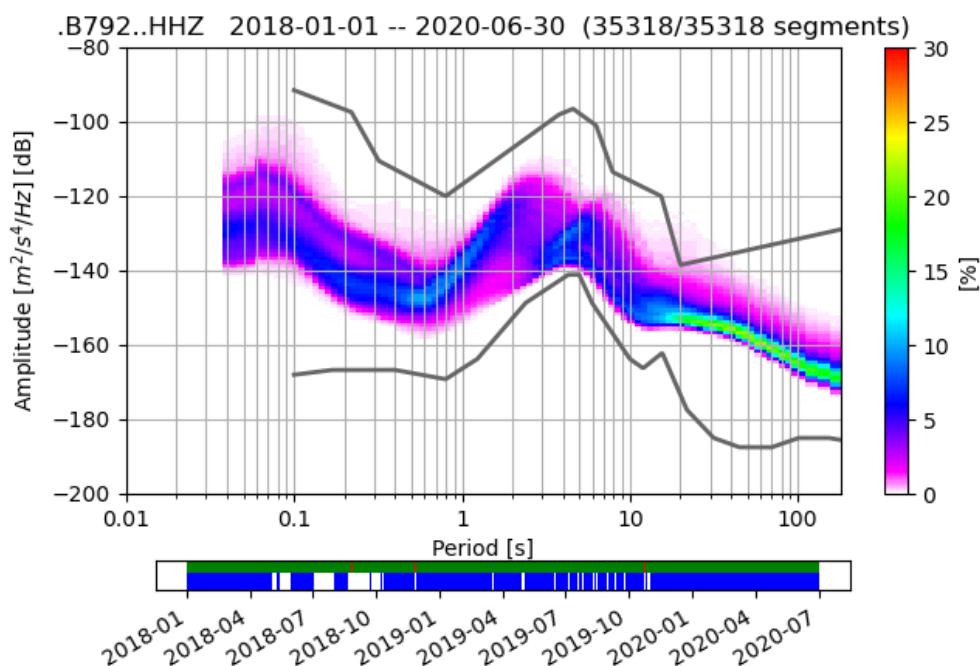
Na svim komponentama je jasno vidljiv lokalni maksimum oko 2.5 s, te maksimum nešto manjeg iznosa oko 6 s, što ukazuje na lokalni maksimum zbog djelovanja Jadranskog mora i DF.



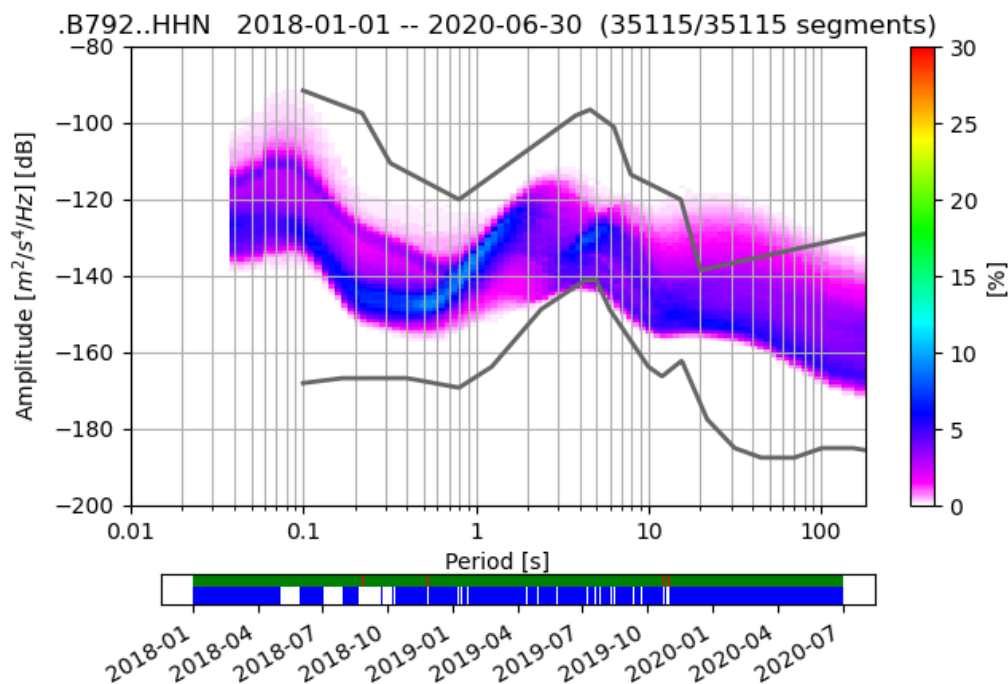
Slika 4.9 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju KRJB horizontalnu komponentu E.

Seizmološka postaja Udbina

Na slici 4.10 vidljivo je da se PDF-funkcija vertikalne komponente postaje UDBI nalazi unutar Petersonovog modela s iznimkom perioda oko 20 s gdje postoji mala vjerojatnost premašivanja razine nemira NHNM. Iako je krivulja sjeverne komponente gibanja na slici 4.11 slična vertikalnoj do perioda 10 s, na duljim periodima može se uočiti velika razlika. Uz smanjenje konzistentnosti, horizontalne komponente imaju veliki raspon promjene razine nemira od 40 dB, gdje polovina tog raspona premašuje krivulju NHNM, što je nepraktično u slučaju proučavanja dugoperiodičkih signala. Na rasponu perioda od 1 do 10 s mogu se primijetiti dva šiljka oko 2.5 s i 6 s koja su vidljiva na svim komponentama, te se smatraju posljedicom međudjelovanja atmosfere i lokalnog mora odnosno oceana. Na $T < 1$ s vidljivo je grananje područja veće vjerojatnosti što je posljedica dnevne promjene u razini seizmičkog nemira, pri čemu je noću nemir manje izražen.



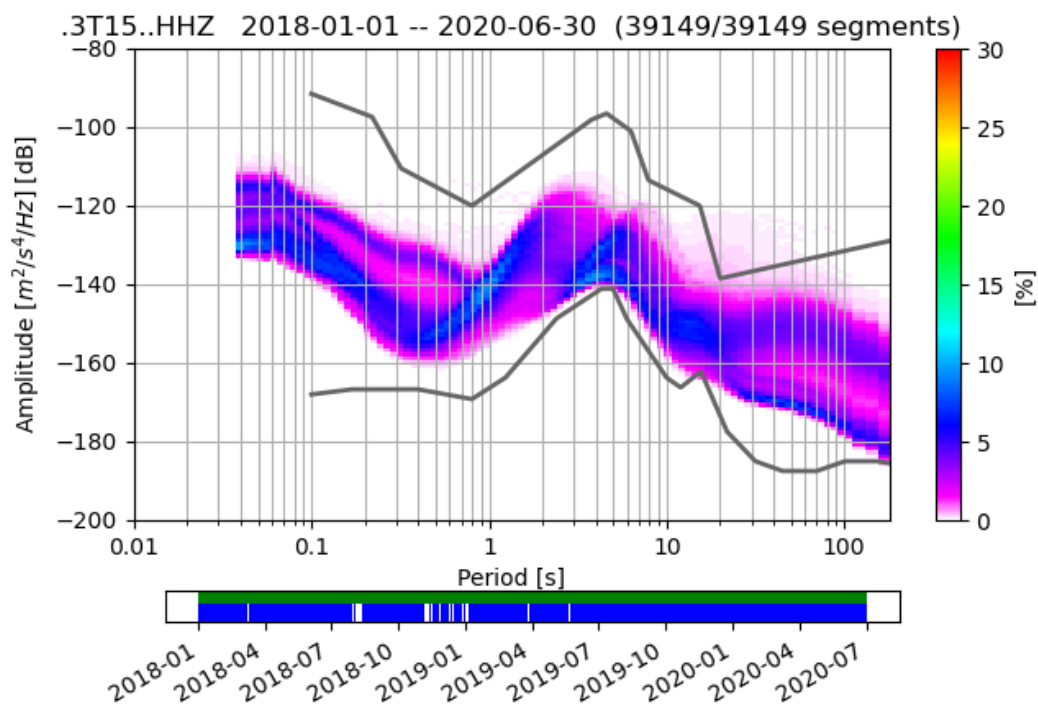
Slika 4.10 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju UDBI vertikalnu komponentu Z.



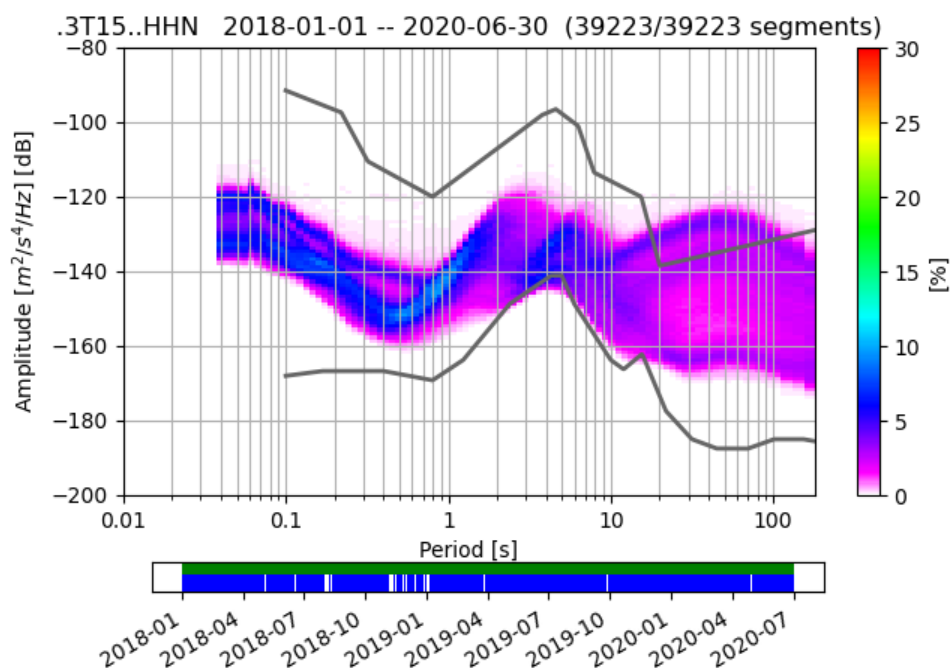
Slika 4.11 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju UDBI horizontalnu komponentu N.

Seizmološka postaja Plitvice

Na slikama 4.12 i 4.13 prikazan je PDF za seizmološku postaju Plitvice. Vidljiva su dva lokalna maksimuma na 2.5 s i 6 s koji su posljedica međudjelovanja atmosfere i lokalnog mora odnosno oceana. Oblici horizontalne i vertikalne komponente seizmograma su slični, osim na duljim periodima kao i na postaji UDBI. Horizontalne komponente imaju vrlo veliki raspon razine nemira od 40 dB na duljim periodima što je posljedica „granjanja“. Grananje područja veće vjerojatnosti je vidljivo na $T < 1$ s i $T > 20$ s i posljedica je dnevne promjene u razini seizmičkog nemira (slika G.6), pri čemu je noću nemir manje izražen. Zbog takve pojave, na horizontalnim komponentama razina nemira nakon 10 s premašuje razinu NHNM.



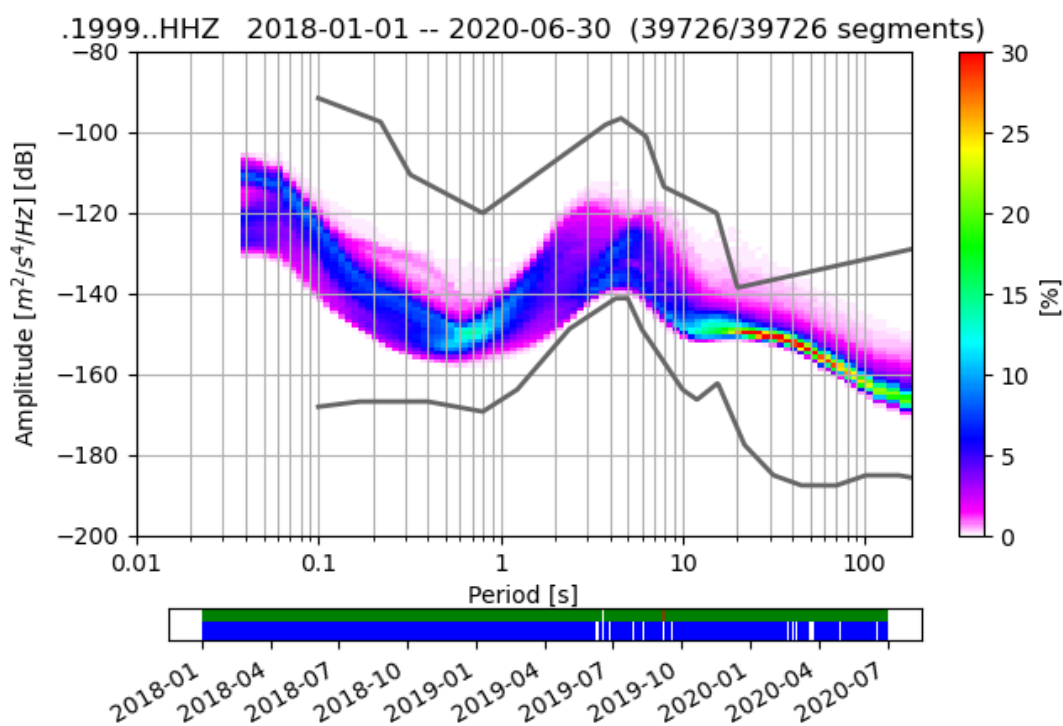
Slika 4.12 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju PLIT vertikalnu komponentu Z.



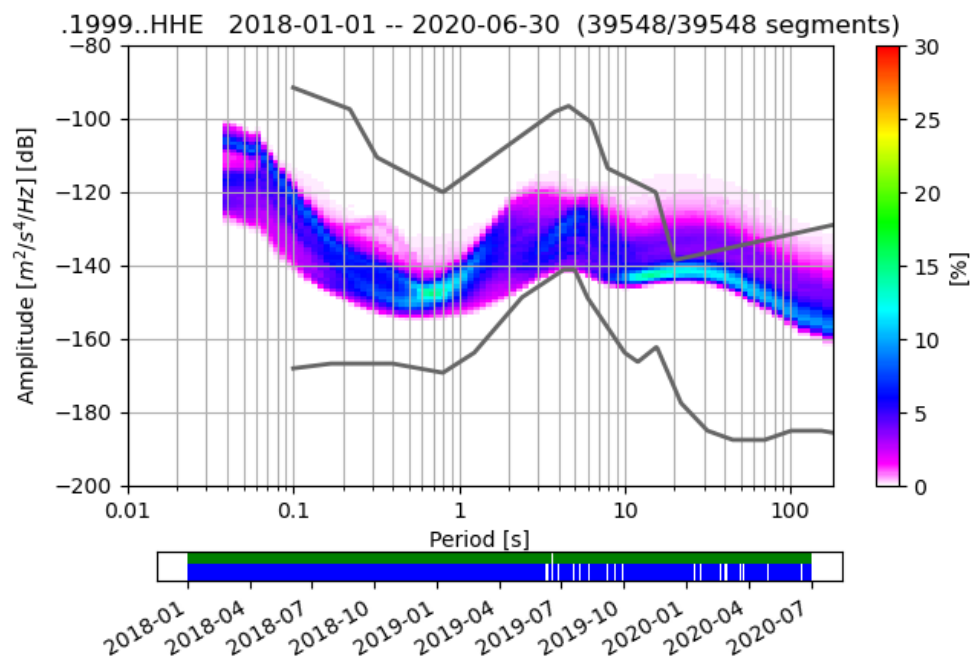
Slika 4.13 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju PLIT sjevernu komponentu N.

Seizmološka postaja Ozalj

Na slikama 4.14 i 4.15 koje prikazuju PDF za seizmološku postaju OZLJ može se primijetiti da na mikroseizmičkim periodima postoje dva šiljka koja su vrlo su blizu jedan drugome te se pomalo stapaju u jedan široki brijeg. Takav jasan pomak lokalnog šiljka, u usporedbi s prijašnjim obalnim postajama, može se povezati s povećanjem udaljenosti od morske obale, tj. izvora nemira, kao što je opisano u radu Gutenberga (1951), gdje se spominje povećanje perioda s povećanjem udaljenosti od izvora. Oblici krivulja za sjevernu i vertikalnu komponente su slični, iako vertikalna komponenta ima veću konzistentnost na duljim periodima. Istočna komponenta seizmograma (slika 4.15) također se razlikuje na duljim periodima gdje ima široki raspon razine nemira od 20 dB, te postoji vjerojatnost da će premašiti NHNM.



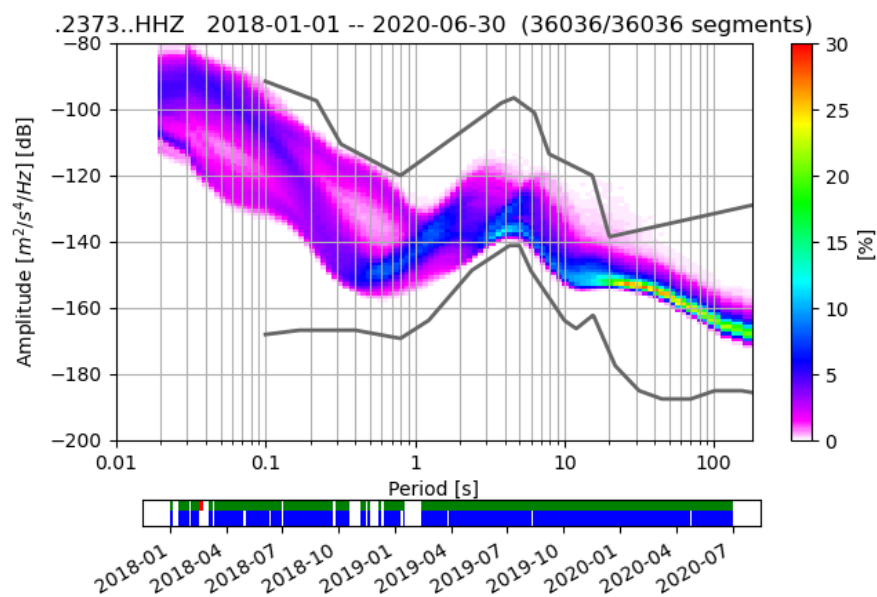
Slika 4.14 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju OZLJ vertikalnu komponentu Z.



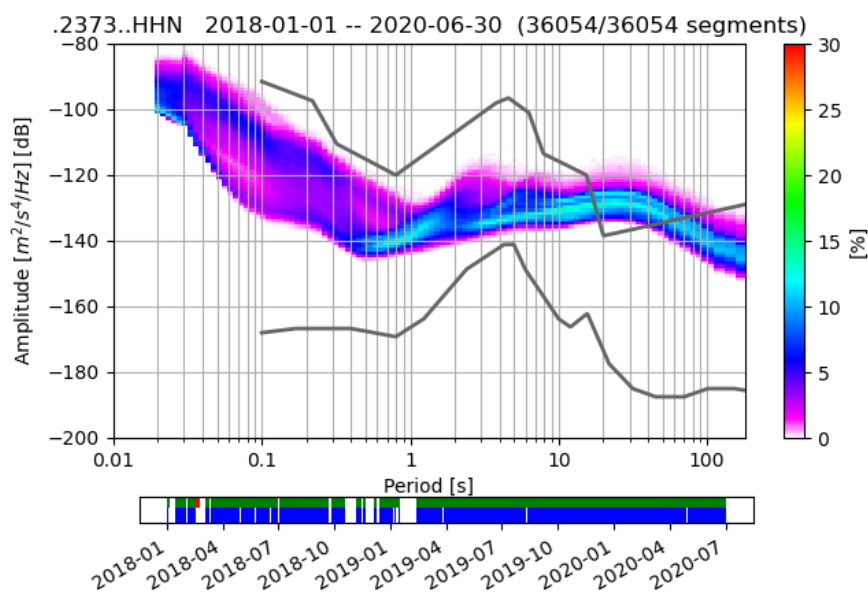
Slika 4.15 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju OZLJ horizontalnu komponentu E.

Seizmološka postaja Rujevac

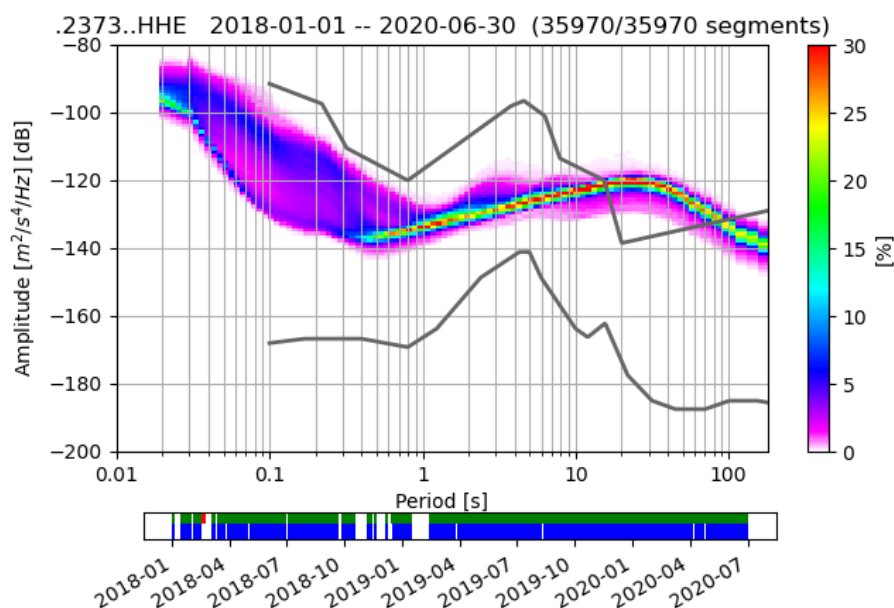
Iz slika 4.16, 4.17 i 4.18 koje prikazuju razinu seizmičkog nemira u obliku krivulja PDF vidljiva je velika razlika između horizontalnih komponenti i vertikalne komponente seizmograma. Iako se na vertikalnoj komponenti naziru dva šiljka, na horizontalnim komponentama dolazi do grananja krivulja većih vjerojatnosti: na jednoj grani se naziru brijegovi mikroseizmičkog nemira, dok ih u drugoj grani nema. Istočna komponenta (slika 4.18) zapravo ima vrlo dobro definirani oblik krivulje za sve periode veće od 1 s, ali za $T > 10$ s prelazi krivulju NHNM. Ovakva razina seizmičkog nemira mogla bi umanjiti kvalitetu analiza seizmograma potresa na ovim periodima. Pogleda li se vertikalna komponenta na slici 4.16, mogu se uočiti dva šiljka oko 3 s i 6 s, što su zapravo šiljci lokalnog utjecaja mora i DF. Kao i postaja OZLJ, moguće je uočiti pomak lokalnog šiljka prema većim periodima, zbog istog razloga kao na postaji OZLJ. Na rasponu $T < 1$ s, vidljiv je veliki raspon razine nemira s time da se nazire grananje zbog antropogenog djelovanja i smještaja instrumenta u podrumu zgrade Šumarije Rujevac.



Slika 4.16 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju RUJC vertikalnu komponentu Z.



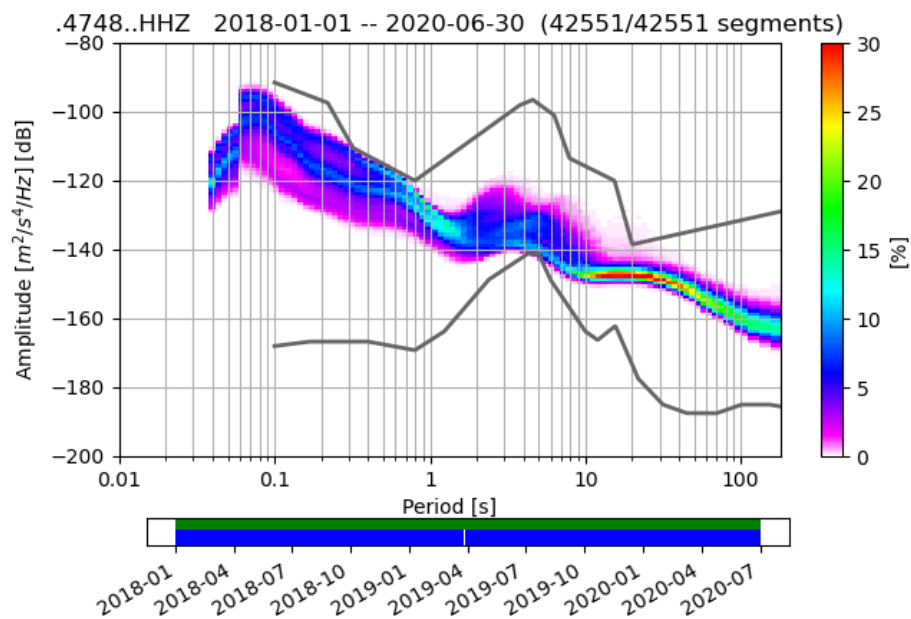
Slika 4.17 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju RUJC horizontalnu komponentu N.



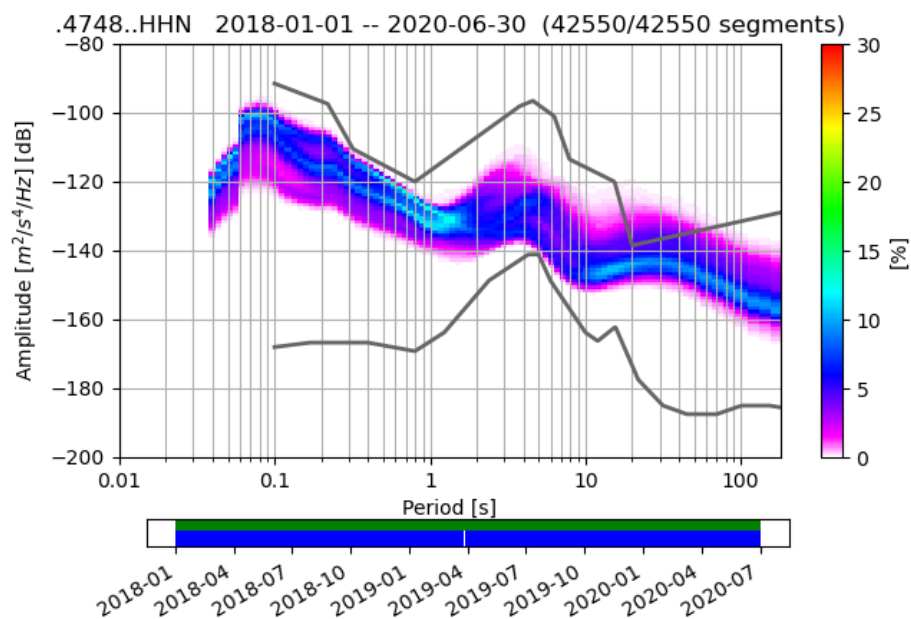
Slika 4.18 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju RUJC horizontalnu komponentu E.

Seizmološka postaja Zagreb

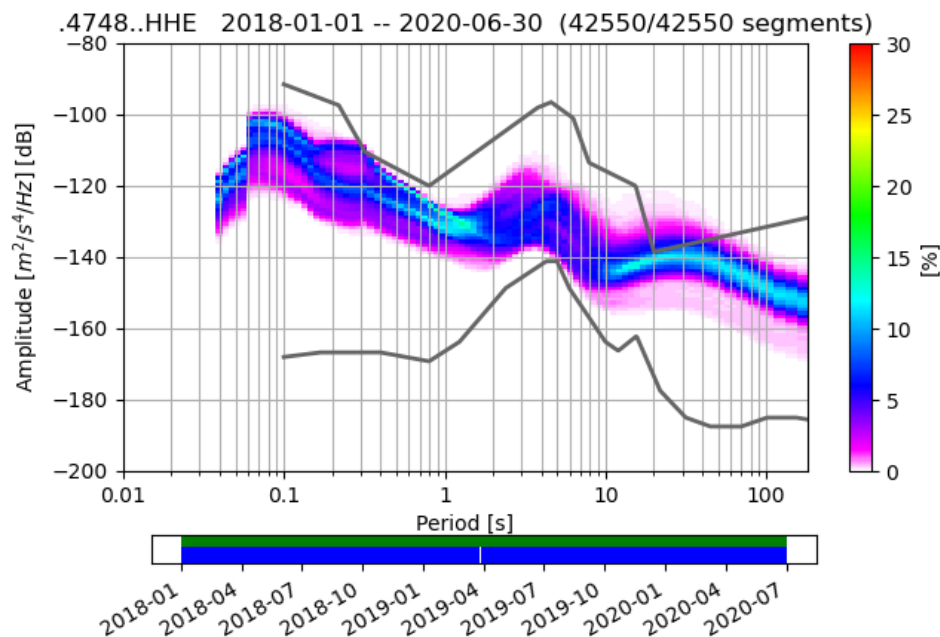
Na slikama 4.19, 4.20 i 4.21 prikazane su krivulje PDF za seizmološku postaju ZAG smještenoj u gradu Zagrebu u podrumu zgrade Geofizičkog odsjeka PMF-a. Na sjevernoj komponenti seizmograma (slika 4.20) može se primijetiti jedan lokalni maksimum na periodima između 1 i 10 s, dok je na vertikalnoj komponenti (slika 4.19) taj maksimum jasnije podijeljen u dva dijela. Blago izraženo grananje u ovom rasponu posljedica je sezonskih promjena. Na seizmološkoj postaji ZAG, najbolje se vidi antropogeni utjecaj na seizmički nemir na $T < 1$ s, koji je najveći od svih analiziranih postaja. Na tim periodima vidljivo je grananje krivulja PDF u dva dijela s velikom vjerojatnošću, posebno za $T \approx 0.2 - 1$ s, što je posljedica dnevne varijacije u razini šuma: razina je veća tijekom radnog dijela dana, a manja noću, o čemu će biti više riječi kasnije. PDF-krivulja vertikalne komponente nalazi se između krivulja Petersonovog modela, iako se na periodima oko 20 s vidi mala vjerojatnost premašivanja razine nemira NHNM. Na nešto kraćim periodima, $T \approx 0.3 - 0.8$ s, iste komponente, može se primijetiti da su vrijednosti PDF-a vrlo bliske krivulji NHNM. Horizontalne komponente se razlikuju najviše na periodima većim od 10 s, gdje imaju lošije definiranu krivulju koja prelazi NHNM, te oko perioda 0.3 s istočne komponente (slika 4.21) može se uočiti blagi premašaj.



Slika 4.19 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju ZAG vertikalnu komponentu Z.



Slika 4.20 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju ZAG sjevernu komponentu N.



Slika 4.21 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju ZAG istočnu komponentu E.

Zaključni osvrt

Može se zaključiti da na svim postajama vrijednosti funkcije gustoće vjerojatnosti na $T < 1$ s pokazuju manju razinu nemira od NHNM. Grananje visoko vjerojatnog djela PDF-krivulje, koje se pojavljuje na nekim postajama, može se povezati s dnevnim promjenom razine nemira što je detaljnije objašnjeno u poglavlju 4.3.1.

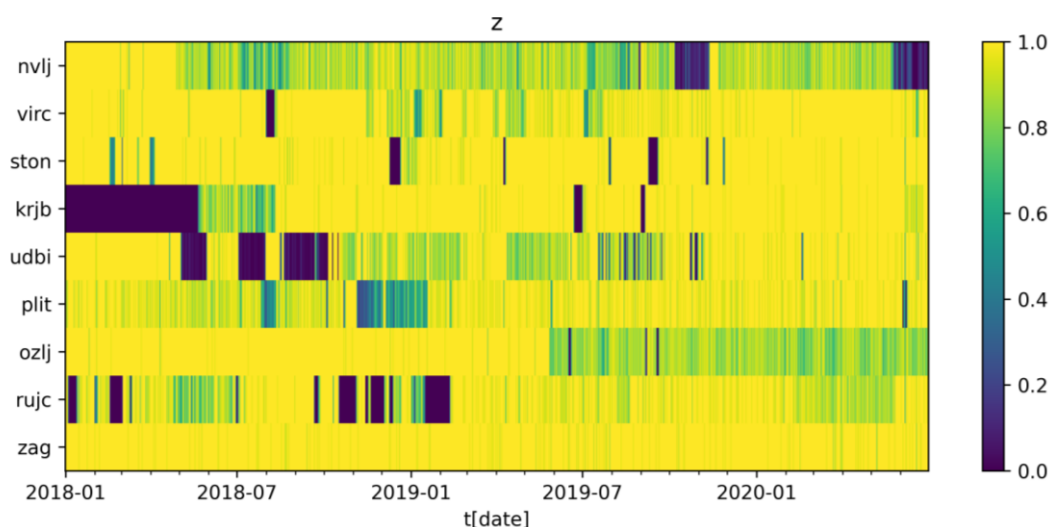
Na srednjim periodima, $T = 1 - 10$ s, na svim postajama se mogu se uočiti dva šiljka, ali ih je na postajama ZAG i RUJC teže razlučiti zbog pomaka šiljka kraćeg perioda prema duljim periodima. Primjetno grananje na periodima oko 6 s veže se uz sezonsku promjenu zbog jače razine nemira zimi nego ljeti, te se može vidjeti na vertikalnim komponentama svih seizmoloških postaja osim na postaji STON. Za drugi jasno izraženi šiljak se može uočiti da je maksimum na priobalnim postajama (NVLJ, STON i VIRC) na kraćim periodima od šiljka na postajama u unutrašnjosti (OZLJ, RUJC i ZAG), što se slaže sa zaključkom u Gutenbergovom radu (1951) da se periodi povećavaju s udaljavanjem od izvora.

Na periodima duljim od 10 s dolazi do značajne razlike u razini nemira horizontalnih i vertikalne komponente. Iako postoji određena vjerojatnost premašivanja NHNM, razina nemira vertikalnih komponenti svih postaja u pravilu se

nalazi između dvije Petersonove krivulje. Sve horizontalne komponente, osim sjeverne komponente postaje OZLJ, imaju veću razinu nemira od vertikalne komponente, čija razlika može iznositi i 30 dB kao na postaji RUJC. Na horizontalnim komponentama postaja RUJC, NVLJ i STON postoji jasno premašivanje visoko vjerojatnog djela PDF-krivulje iznad NHNM, dok postaje PLIT i UDBI inače imaju „razmazan“ oblik krivulje te je vjerojatnost da razina nemira prijeđe NHNM malena ali nezanemariva.

Podatci koji nedostaju

Budući da su pri računanju vrijednosti PDF uklonjene PSD-krivulje koje se pojavljuju kad nedostaju podatci, s grafa koji prikazuje PDF ne mogu se iščitati vjerojatnosti nestanka signala. No postoje informacije koje se mogu uočiti iz broja krivulja PSD koje su izračunane. Na slici 4.22 vidljiv je udio izračunatih krivulja PSD unutar jednog dana, ako se pretpostavi da jedan dan može sadržavati najviše 2820 krivulja. Usporedimo li sa slikom 3.3 koja prikazuje dostupnost podataka, možemo vidjeti neke neočekivane „rupe“ u podacima. Postaja UDBI zapravo ima veliki manjak PSD-krivulja od travnja do srpnja 2018. godine, dok je na NVLJ i OZLJ vidljiv manji manjak od UDBI, ali u duljem razdoblju. Uzrok takvom nedostajanju mnogih povremenih kratkih nizova podataka vjerojatno leži u problemima u prijenosu podataka.



Slika 4.22 Udio postojećih PSD krivulja u jednom danu na vertikalnoj komponenti.

4.2 Vremenske promjene u razini seizmičkog nemira

U prethodnom poglavlju su se proučile pojedine PDF-krivulje za sve seizmološke postaje na cijelom proučavanom vremenskom razdoblju, i one su rezultat višegodišnjih promjena razine nemira. Budući da je seizmički nemir posljedica raznih izvora, antropogenih i prirodnih, koji ne moraju imati jednaki utjecaj u promatranom razdoblju, poželjno je promotriti dnevne, tjedne i godišnje promjene u razine nemira.

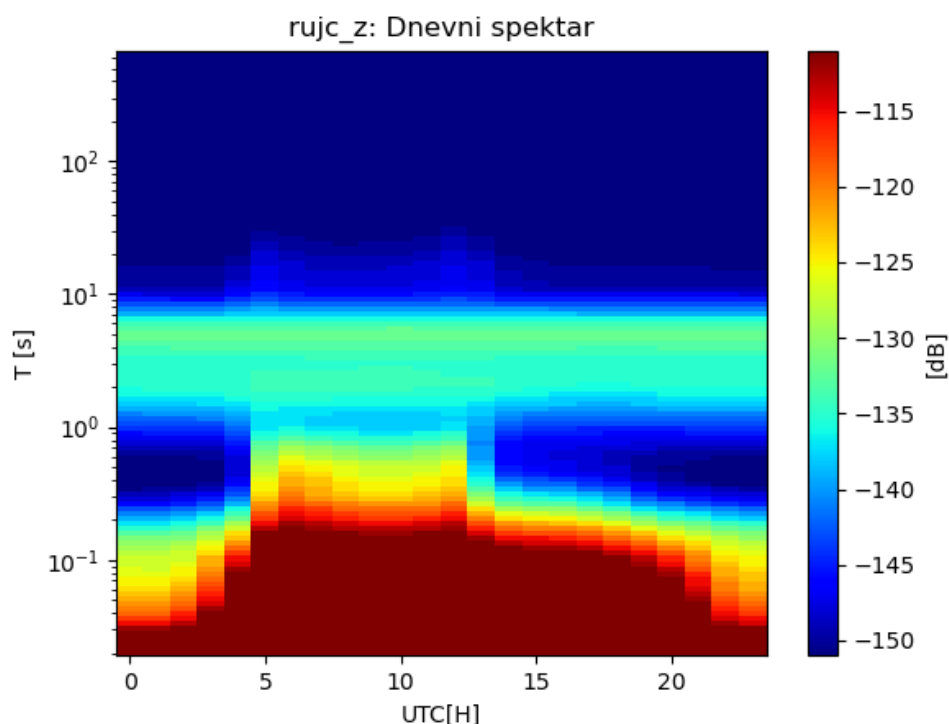
4.2.1 Dnevna promjena razine seizmičkog nemira

Na većini postaja može se primijetiti dnevna promjena nemira bila ona manje ili više izražena. Dnevne promjene najbolje se mogu uočiti na tzv. dnevnim spektrogramima (slike 4.23, 4.24 i 4.25), grafovima na kojima su nacrtani medijani vrijednosti svih PSD-krivulja u nekom određenom satu, te grafovima koji prikazuju polusatne promjene vrijednosti snage na određenom pojasu perioda kroz cijelu godinu (slika 4.30).

Kad se promatra promjena razine nemira kroz dan, praktično je izračunati dnevne spektrograme na kojima će se jasno uočiti promjene razine nemira unutar jednog dana ako postoje. Dobar primjer su spektrogrami vertikalne komponente na seizmološkim postajama RUJC i ZAG (slike 4.23 i C.5) kod kojih se jasno vidi porast razine seizmičkog nemira na kratkim periodima ($T < 1$ s) u radno vrijeme, dakle između 5 h (UTC) i 13 – 14 h (UTC), dok na ostalim periodima promjene tijekom dana gotovo da i nema. Budući da je antropogeni utjecaj izražen na kratkim periodima, može se pretpostaviti da su promjene posljedica ljudskih aktivnosti (Webb, 2002) iako se ne može isključiti mogućnost utjecaja temperaturnih promjena na razinu nemira.

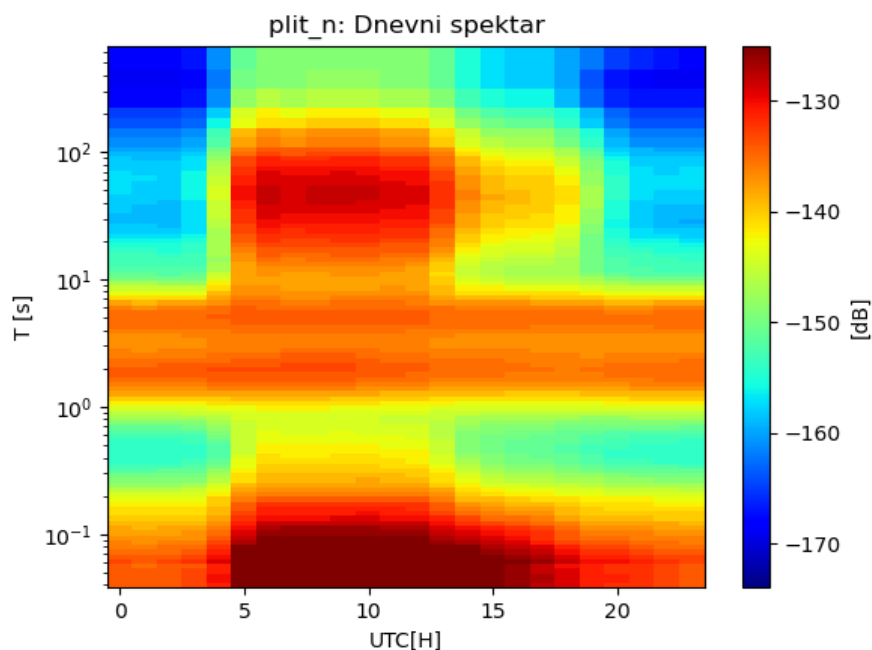
Budući da se seizmološka postaja RUJC nalazi u malenom mjestu u podrumu zgrade Šumarije Rujevac u kojoj tijekom radnog vremena borave zaposlenici (koji stanuju izvan naselje Rujevac) te da zaposlenici dolaze i odlaze automobilima i kamionima, može se pretpostaviti da se tu radi o antropogenom uzroku seizmičkog nemira koji se posebno povećava na početku i kraju radnog vremena, kada je najveće kretanje u samoj zgradi i njenoj okolici. Razlika iznosa najmanje i najveće razine nemira na postaji RUJC seže do 20 dB, što može biti povezano s time što je izvan radnog

vremena, pogotovo noću, u malom mjestu poput Rujevca vrlo malo antropogenih izvora. Slično povećanje razine nemira tijekom radnog vremena se opaža i na dnevnom spektrogramu postaje ZAG, iako je promjena razine nemira na početku i kraju radnog vremena blaža, te je promjena razine nemira oko 10 dB.



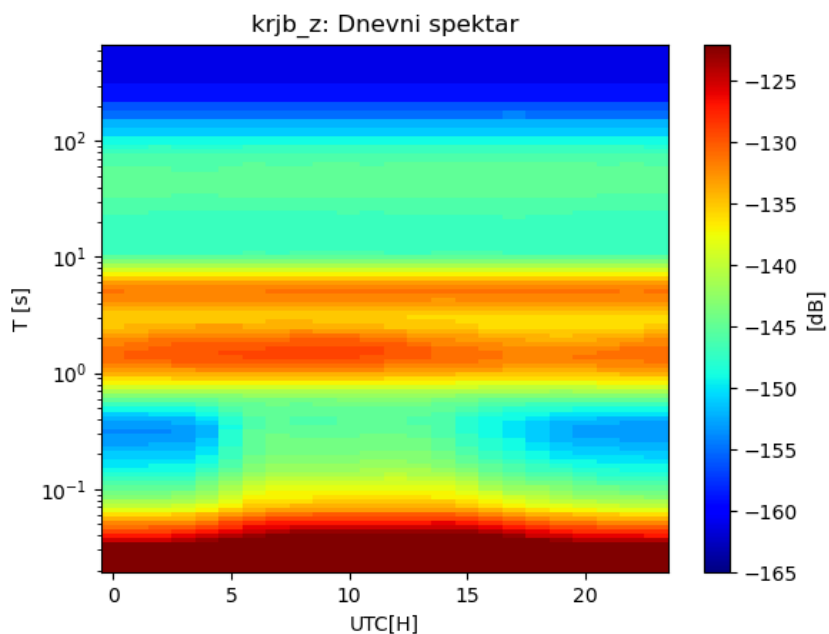
Slika 4.23 Dnevni spektrogram vertikalne komponente postaje RUJC.

Dnevna promjena na kraćim periodima ($T < 1$ s) vidljiva je na svim komponentama svih postaja, no promjena na $T > 10$ s kao na slici 4.24, koja prikazuje dnevni spektrogram komponente N na seizmološkoj postaji PLIT, vidljiva je na barem jednoj horizontalnoj komponenti na svim postajama osim na postaji NVLJ. Budući da dnevni spektrogram prikazuje satne medijane vrijednosti PSD svih proučavanih dana, na njima se ne može uočiti dnevna promjena razine nemira kroz tjedan što bi bila korisna informacija. U poglavlju 4.2.2. prikazane su i takve promjene, pa je vidljivo da se postaje i komponente mogu podijeliti u dvije skupine: onu kod koje se dnevne promjene razine nemira smanjuju za vikend i onu kod koje promjene tokom tjedna nisu izražene.



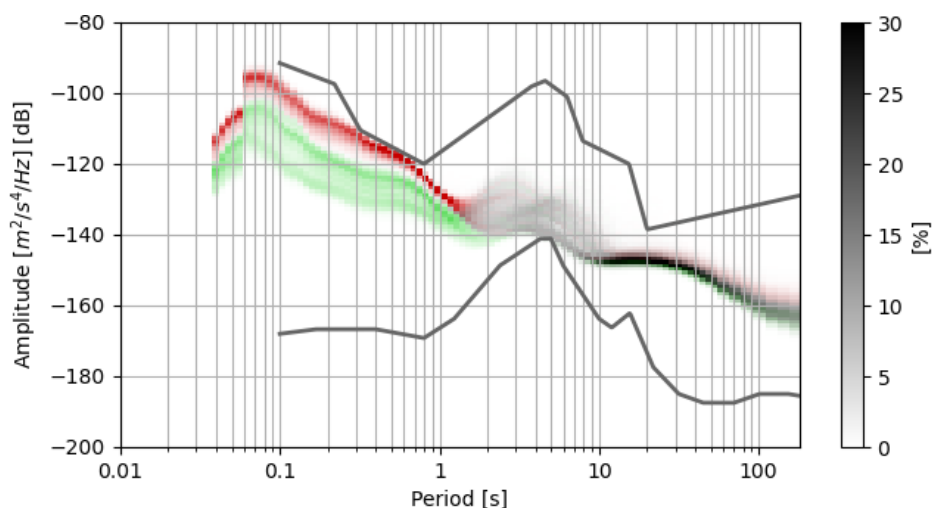
Slika 4.24 Dnevni spektrogram sjeverne komponente postaje PLIT.

Za razliku od slika 4.23. i 4.24, pogleda li se dnevni spektar vertikalne komponente postaje KRJB na slici 4.25, može se uočiti vrlo slabo izražena dnevna promjena na $T < 1$ s. Budući da se takvi periodi povezuju najviše sa antropogenim izvorima, logično je da postaja KRJB koja je postavljena u mrtvačnici groblja malog naselja ima malu promjenu uzrokovanu ljudskim djelovanjem.



Slika 4.25 Dnevni spektrogram sve vertikalne komponente postaje KRJB.

Pojava grananja velike vjerojatnosti na grafovima PDF-a koja su opažene za $T < 1$ s na većini postaja u poglavlju 4.1 najčešće je posljedica jače razine nemira za vrijeme radnog dijela dana i manje za vrijeme noćnih sati. To se lako može opaziti kad se promotri graf koji ima vrijednosti PDF-a prikazane različitim bojama za PSD izračunane danju (crvena boja) i noću (zelena boja), kao na slici 4.26.



Slika 4.26: Preklopljeni PDF graf za vrijeme radnih sati i noću za seizmološku postaju ZAG. Crvena boja označava dnevnu razinu šuma, dok zelena boja označava razinu nemira tijekom noći. Jači intenzitet prikazuje veću vrijednost funkcije gustoće vjerojatnosti PSD-a.

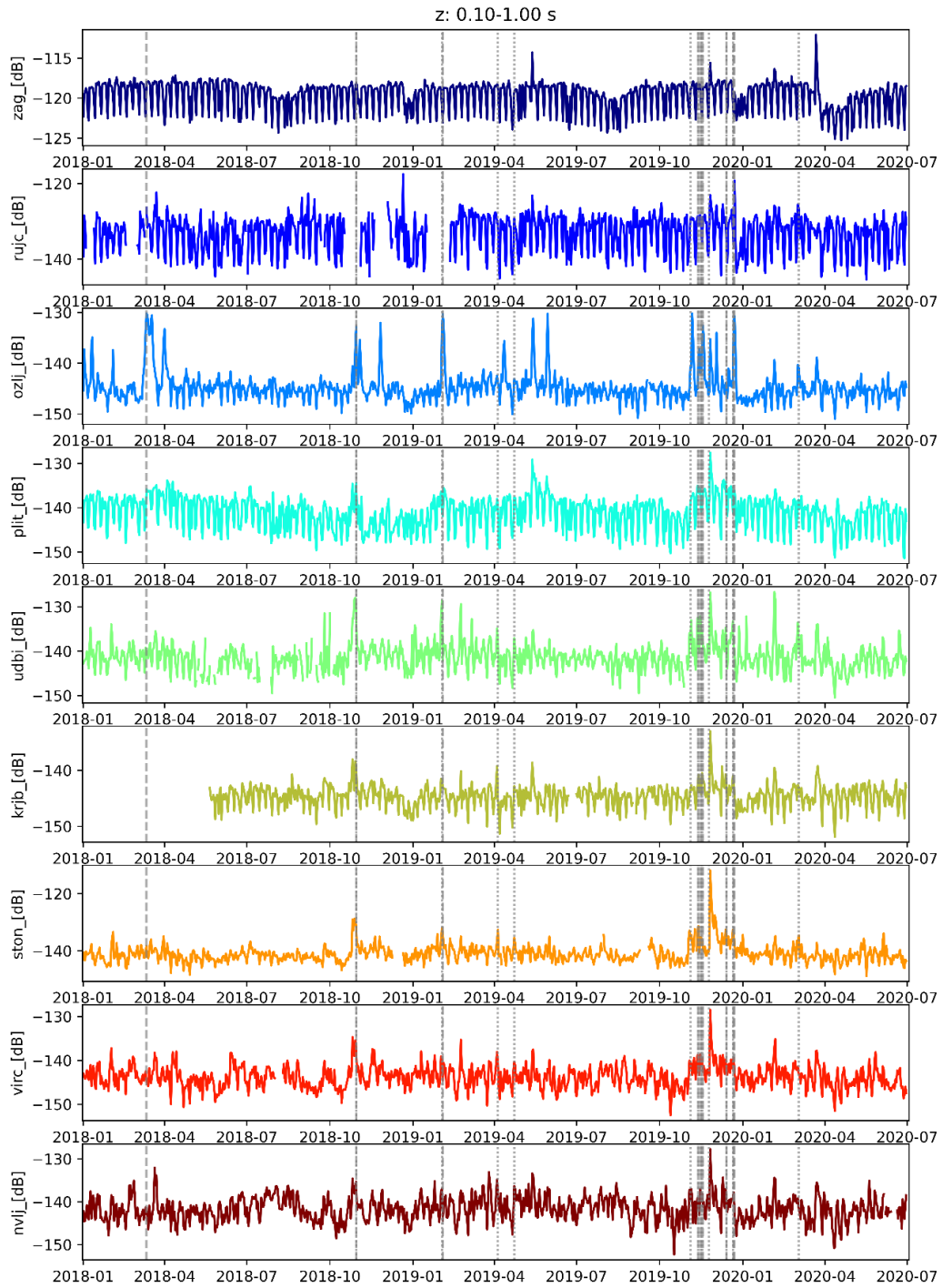
4.2.2 Tjedna promjena

Kao značajna antropogena tjedna promjena ne može se izostaviti pad razine nemira na kraćim periodima ($T < 1$ s) u naseljenom području za vrijeme vikenda, kakve su primijećene i u Barceloni i drugim gradovima svijeta (Diaz et al. 2017; Lecocq et al. 2020).

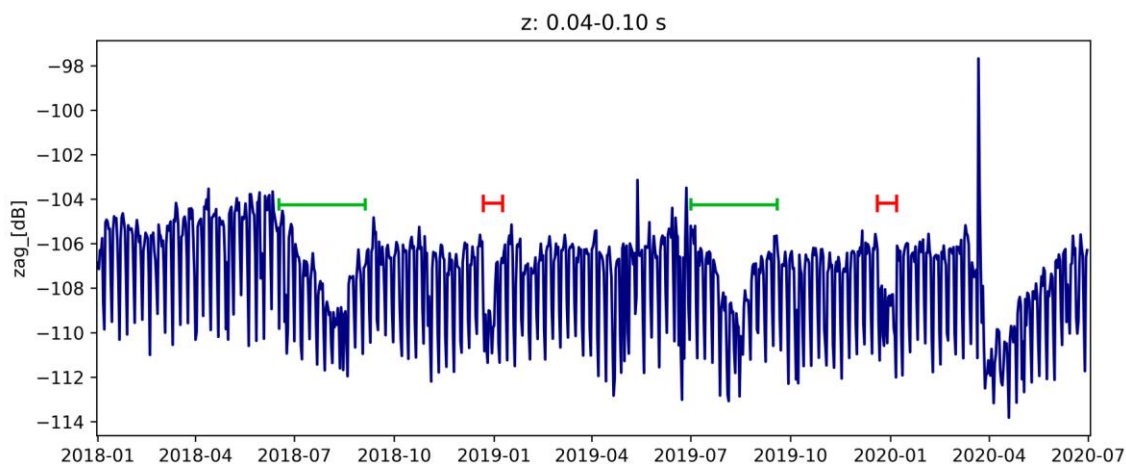
Promotri li se slika 4.27 koja ima nacrtane vrijednosti medijana svih PSD za $T = 0.1 - 1$ s svakog dana, možemo vidjeti karakterističan oblik krivulje u obliku češlja. Češljasta krivulja može se uočiti na seizmološkim postajama ZAG, RUJC, PLIT, KRJB, OZLJ i STON na $T < 1$ s te se nazire na postaji UDBI. To smanjenje razine nemira koje pada upravo na dane vikenda bolje se vidi na slici 4.29, kad se smanji kretanje ljudi. Osim promjene aktivnosti ljudi u gradu i njegovoj okolini, ne smije se zaboraviti da aktivnost unutar same zgrade također ima utjecaj na zapis na postajama ZAG, PLIT,

RUJC i UDBI, koje se nalaze u zgradama koje su radna mjesta ili obrazovne institucije, te je razumno da za vrijeme neradnih dana opada nemir jer se u njima ne boravi niti kreće.

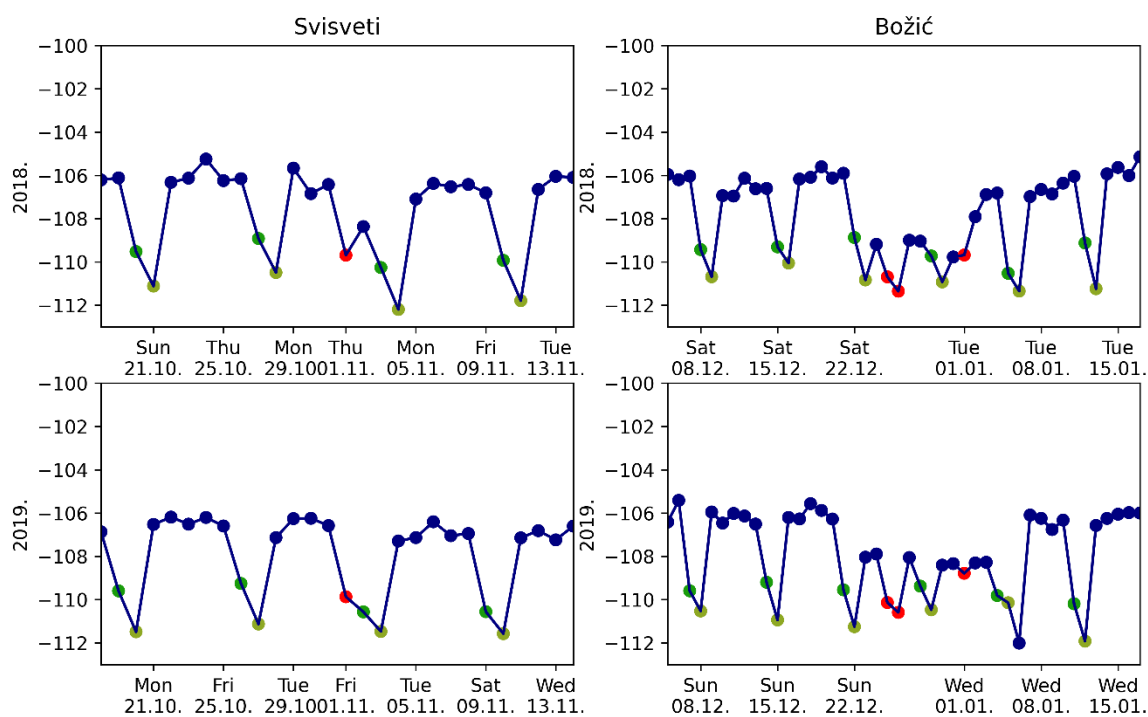
Promatra li se tjedna promjena dnevne razine nemira u Zagrebu kao na slici (4.28 i 4.29), mogu se uočiti razne promjene u razini nemira. Osim smanjenja razine nemira vikendom, mogu se uočiti smanjenja za vrijeme Božića i zimskih praznika, ljetnih praznika, te ograničenja kretanja zbog *lockdowna* kad se i tijekom noći smanjio nemir. Dan prije proglašenja ograničenja kretanja, 22. ožujka 2020. 5:24 UTC godine je dogodio se potres s epicentrom kod Zagreba, koji je započeo seriju naknadnih potresa, koji se također vidi na slici 4.28 u obliku šiljka.



Slika 4.27: Promjena razine nemira za $T = 0.1 - 1$ s za cijelo razmatrano razdoblje na svim postajama. Sive linije označavaju početak epizode jakog juga i olujnog uspora.



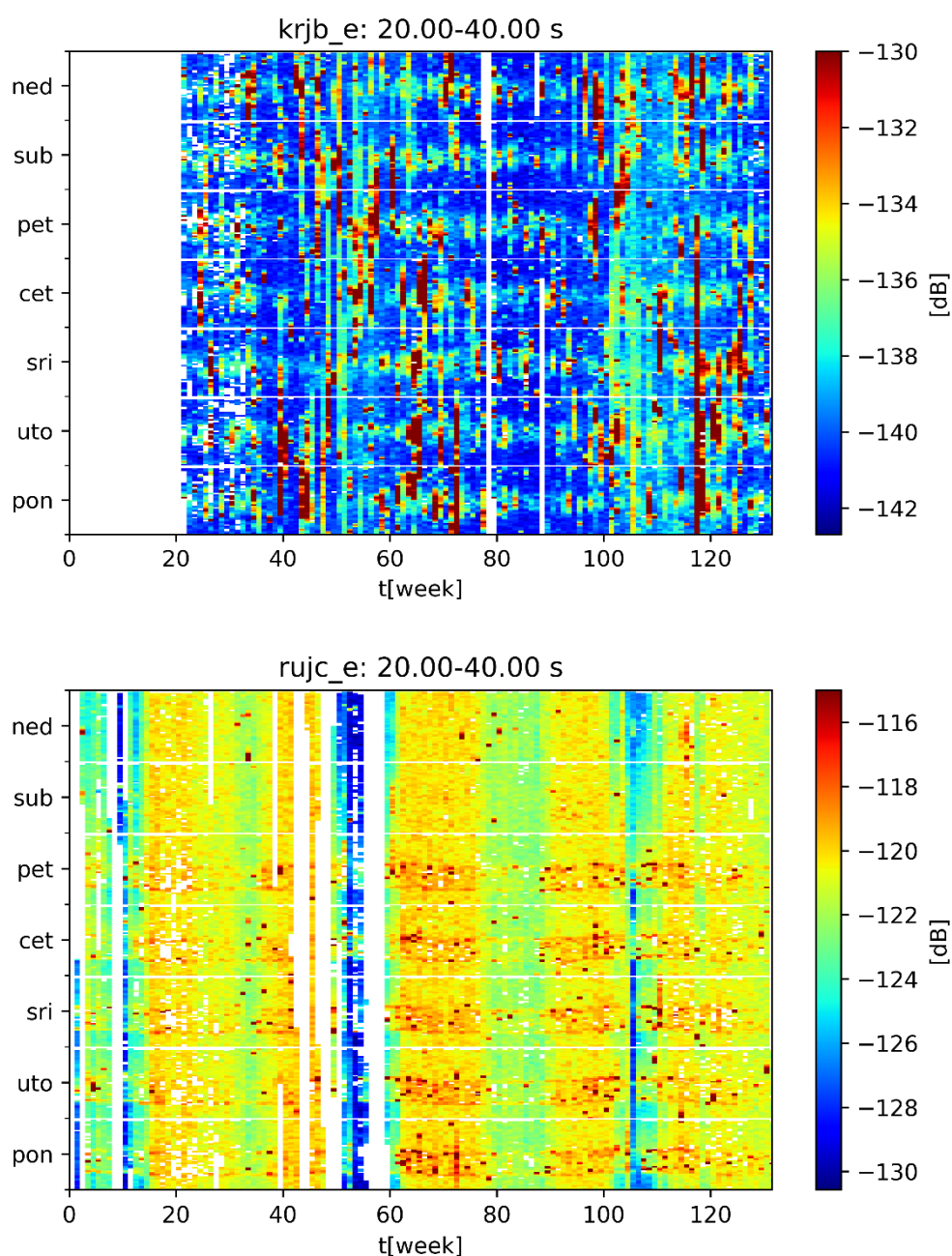
Slika 4.28 Promjena razine nemira za $T = 0.1 - 1$ s vertikalne komponente postaje ZAG, u blizini blagdana Svih svetih (crveno) te Božića i zimskih praznika (zeleno).



Slika 4.29 Promjena razine nemira za $T = 0.1 - 1$ s u blizini blagdana Svih svetih i Božića na vertikalnoj komponenti postaje ZAG. Zelenom bojom su označene subota i nedjelja, a crvenom neradni dani,

Na dnevnim spektrogramima su se mogle uočiti promjene razine nemira tijekom dana na periodima manjim od 1 s koje su vidljive na svim postajama, te na $T > 10$ s koje su uočljive samo na horizontalnim komponentama nekih postaja. Iako se dnevna promjena razine nemira na $T < 1$ s može lako povezati s antropogenim

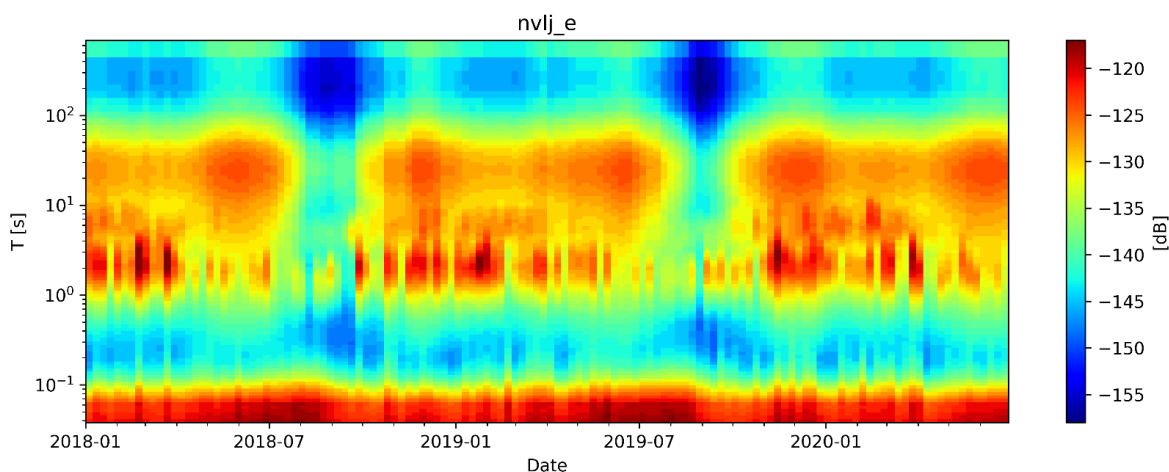
utjecajem zbog češljastog oblika na tjednoj skali, dnevne promjene na $T > 10$ s nemaju češljasti oblik te je potrebno malo bolje proučiti istovremeno dnevne i tjedne promjene. Kako bi se bolje proučile promjene nemira, nacrtane su slike 4.30 za $T = 20 - 40$ s koje prikazuju ujedno promjenu satne razine nemira kroz cijelo promatrano razdoblje. Na slici su prikazani medijani polusatnih vrijednosti svih PSD-krivulja za $T = 20 - 40$ s, koji su poredani tako da svaki stupac u smjeru y -osi predstavlja jedan tjedan, a na x -osi prikazan je broj tjedna počevši od 1. siječnja 2018. godine. Prema njima, može se opaziti da na postajama koje imaju dnevne promjene razine nemira postoje dvije vrste porasta nemira danju. Na postajama KRJB, OZLJ, STON i UDBI, porast nemira po danu se pojavljuje neovisno o danu u tjednu, a na postajama RUJC, ZAG i PLIT jači porast nemira za vrijeme radnih dana. Iako se ne može u potpunosti isključiti utjecaj prirodnih pojava, za postaje RUJC, ZAG i PLIT se može reći da na ovim duljim periodima postoji antropogeni utjecaji koji nije zanemariv. Za postaje KRJB, OZLJ STON i UDBI je primjetna jednaka dnevna promjena razine nemira tijekom cijelog tjedna, te je teško govoriti isključivo o antropogenom utjecaju. Postoji mogućnost da je dnevna promjena razine nemira posljedica antropogenog utjecaja koji se ne mijenja tokom tjedna, ali je također moguće da je uzrok tomu prirodna pojava kao što je dnevna promjena temperature koja također može imati značajan utjecaj, posebno zbog toplinski nedovoljno dobro izoliranih instrumenata.



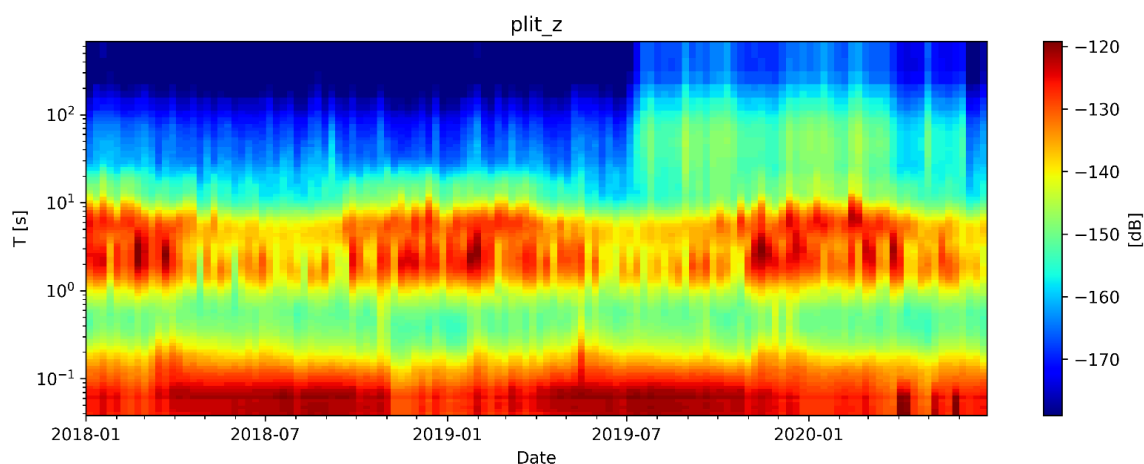
Slika 4.30 Polusatna promjena medijana razine nemira na periodima od 20 do 40 s kroz tjedan i promatrano vremensko razdoblje na istočnoj komponenti postaja KRJB i RUJC.

4.2.3 Godišnje promjene razine seizmičkog nemira

Sezonske promjene u razini seizmičkog nemira prikazane su na spektrogramima koji prikazuju vrijednosti tjednog medijana svih krivulja gustoća spektra snage (slike 4.31 i 4.32).



Slika 4.31 Spektrogram tjednih vrijednosti gustoće spektra snage za horizontalnu komponentu E seizmološke postaje NVLJ.



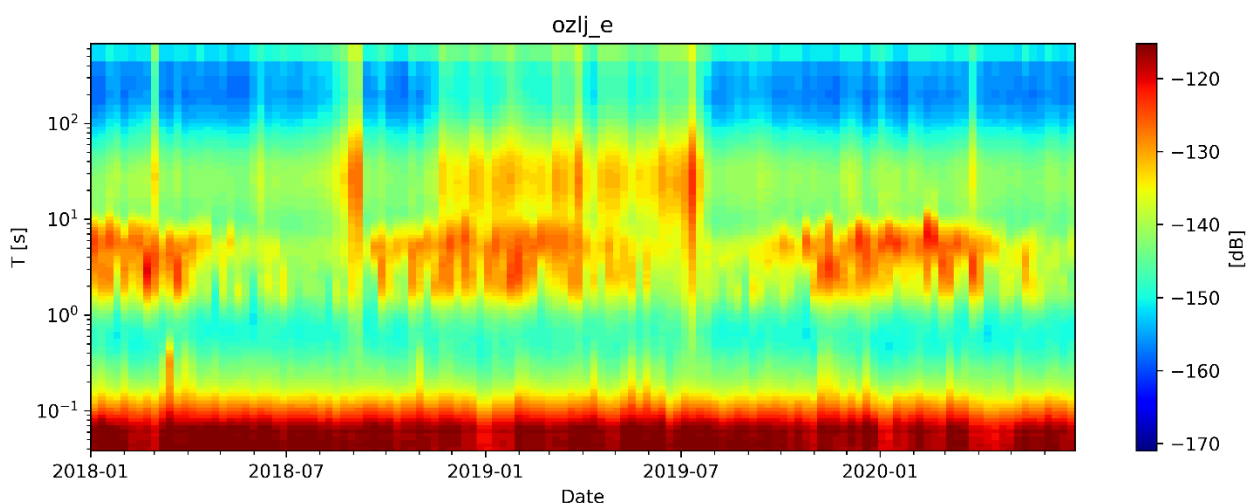
Slika 4.32 Spektrogram tjednih vrijednosti gustoće spektra snage za vertikalnu komponentu Z seizmološke postaje PLIT.

Sezonske promjene na $T < 1$ s vidljive su na nekim postajama (npr. PLIT i NVLJ). Budući da su na periodima manjim od 1 s dominantni antropogeni utjecaji i da se razina nemira povećava ljeti na postajama PLIT i NVLJ, tu pojavu možemo povezati s ljetnom turističkom sezonom kad se znatno povećava broj ljudi i promet u pojedinim mjestima. Takva pojava je detaljnije obrađena u poglavlju (4.8).

Sezonske promjene pojavljuju se i na periodima otprilike 20 – 40 s na horizontalnim komponentama postaja STON i NVLJ. Na istočnoj komponenti NVLJ (slika 4.33), može se uočiti najviša razina nemira u otprilike prosincu i lipnju, a najmanja u kolovozu. U proljetnim mjesecima razina nemira je nešto veća nego u jesenskim. Iako je na istoj postaji, sjeverna komponenta (slika E.1) ima najmanji nemir u prosincu i lipnju, dok je pojačan nemir u kolovozu, listopadu, veljači i travnju. Na

postaji STON (slika E.3) je nešto jednostavnija situacija jer postoji maksimum razine nemira na sjevernoj komponenti u kolovozu. Budući da se promjene pojavljuju na većim periodima sezonski, postoji mogućnost da je posljedica prirodne pojave kao što su promjena temperature zraka, morski valovi ili vjetar.

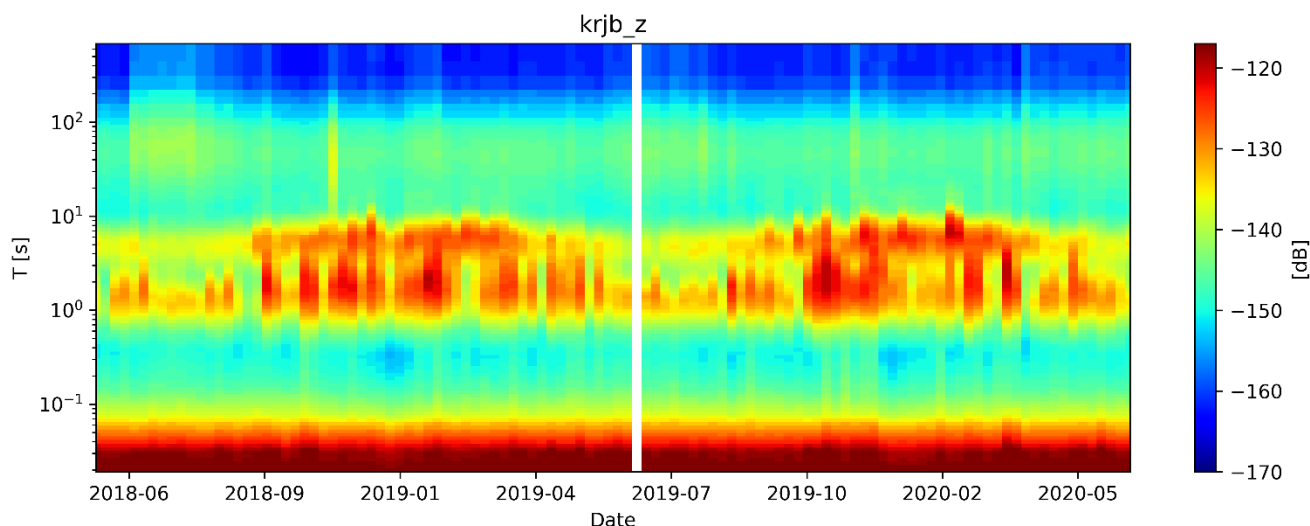
Neke seizmološke postaje imaju izražene promjene razine nemira koje se ne ponavljaju na godišnjoj razini, no traju od nekoliko dana do nekoliko mjeseci. Postaja OZLJ samo na istočnoj komponenti (slika 4.33) ima izraženu razinu nemira na periodima oko 30 s koji traje od sredine studenoga 2018. do početka srpnja 2019. godine. Slična pojava na vrlo sličnim periodima može se opaziti na vertikalnoj komponenti na postaji PLIT (slika 4.34) no u drugom razdoblju, od sredine srpnja 2019. do sredine lipnja 2020. godine. Da bi se otkrio uzrok tim promjenama trebalo bi provesti dodatna istraživanja što je izvan opsega istraživanja ovog rada.



Slika 4.33 Spektrogram tjednih vrijednosti gustoće spektra snage za istočnu komponentu E seizmološke postaje OZLJ.

Na rasponu perioda između 1 s i 10 s, gdje se pojavljuju mikroseizmički šiljci (šiljak dvostruke frekvencije DF i šiljak od djelovanja lokalnog mora), vidljiva je sezonska promjena razine nemira na svim postajama pri čemu je snaga nemira jača zimi a slabija ljeti (slikama 4.31 – 4.34). Ovisno o postajama, može se primijetiti stapanje ili jasno odvajanje ova dva brijega, odnosno lokalna maksimuma: tako se npr. na postaji KRJB jasno razlikuju dva šiljka (slika 4.34), dok su na postaji OZLJ šiljci gotovo spojeni (slika 4.33). Kako bi se jasnije prikazale sezonske promjene za ova dva intervala perioda, nacrtani su grafovi koji prikazuju dnevne vrijednosti medijana

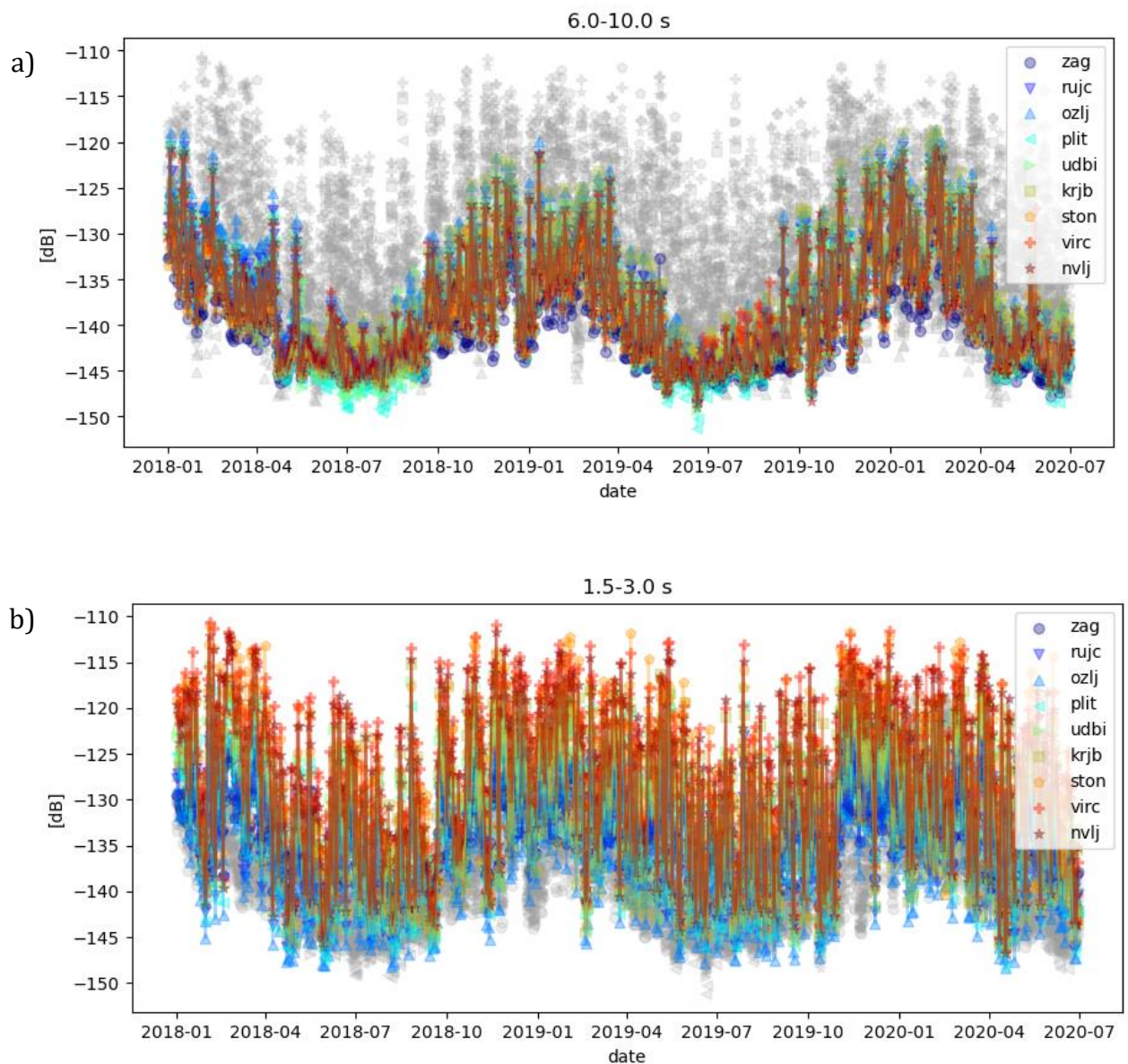
gustoće spektra snage za $T = 1.5 - 3.0$ s i $T = 6.0 - 10.0$ s (slika 4.35). Na njima se može primijetiti sinusoidni oblik podataka na oba raspona perioda te očito pojačanje razine nemira za vrijeme zimskih mjeseci. Usporede li se dva grafa međusobno, pojas nižih perioda, 1.5 – 3.0 s, pokazuje veći raspon vrijednosti između postaja, s većom snagom nemira kroz cijelu godinu, pogotovo za vrijeme ljetnih mjeseci.



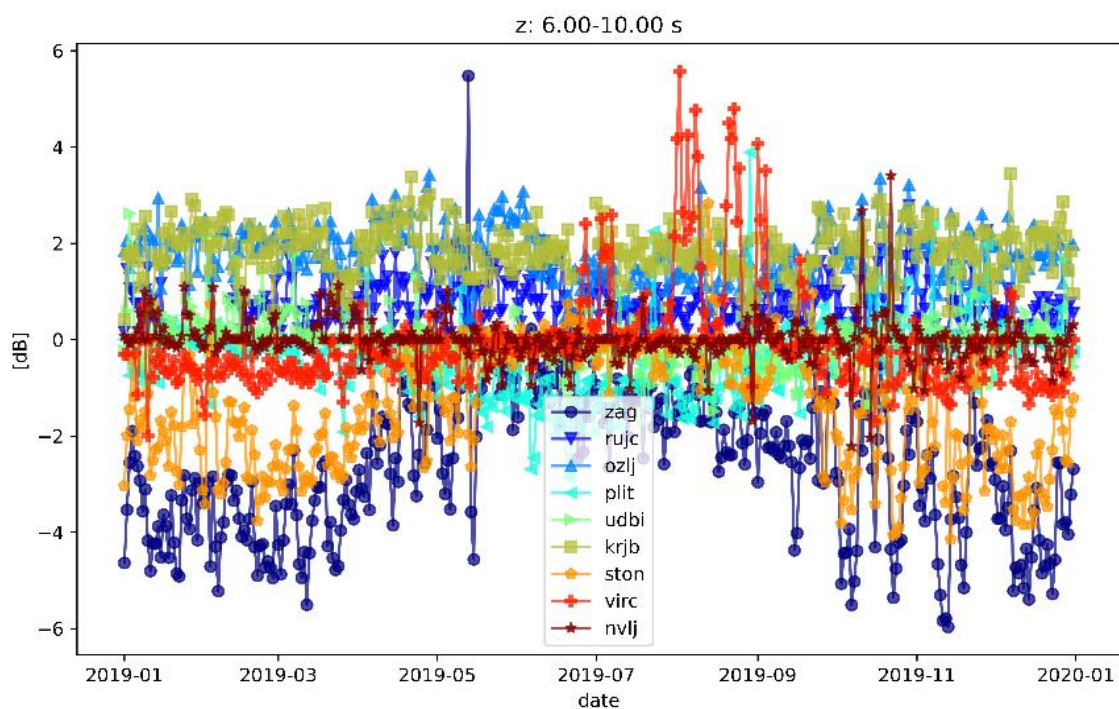
Slika 4.34: Spektrogram tjednih vrijednosti gustoće spektra snage za vertikalnu komponentu Z seizmološke postaje KRJB.

Za lakše proučavanja samog odnosa snaga na postajama služe grafovi na slikama 4.36 i 4.37 na kojima su prikazane vrijednosti odstupanja dnevnih vrijednosti medijana PSD-a za vertikalnu komponentu seizmograma od medijana svih dnevnih vrijednosti PSD-a svih seizmoloških postaja u jednom danu tijekom 2019. godine. Može se primijetiti da za $T = 1.5 - 3.0$ s (slika 4.37) otočne postaje VIRC i NVLJ pokazuju u pravilu najveći nemir, dok postaje dublje u unutrašnjosti (OZLJ, RUJC i ZAG) imaju u pravilu najmanji nemir. Takvo ponašanje usporedivo je s rezultatima u radu Sevima et al. (2017) u kojem se navodi da je razina seizmičkog nemira u ovom intervalu perioda često pod utjecajem lokalnog mora (u ovom radu Jadranskog mora), ako se pretpostavi da razina nemira opada s udaljenošću od izvora. Za $T = 6 - 10$ s (slika 4.36) najjači nemir pokazuju KRJB i OZLJ, a najmanji STON i ZAG. Pretpostavlja se da je za promatrani raspon perioda nemir posljedica djelovanja oceanskih valova Atlantskog oceana na obližnju obalu. Potrebno je napomenuti kako je kod seizmoloških postaja postavljenih dublje u unutrašnjosti kopna teže odvojiti dva maksimuma u pojasu perioda 1 – 10 s, te je moguće da se razina nemira uzrokovana procesima u Jadranskom

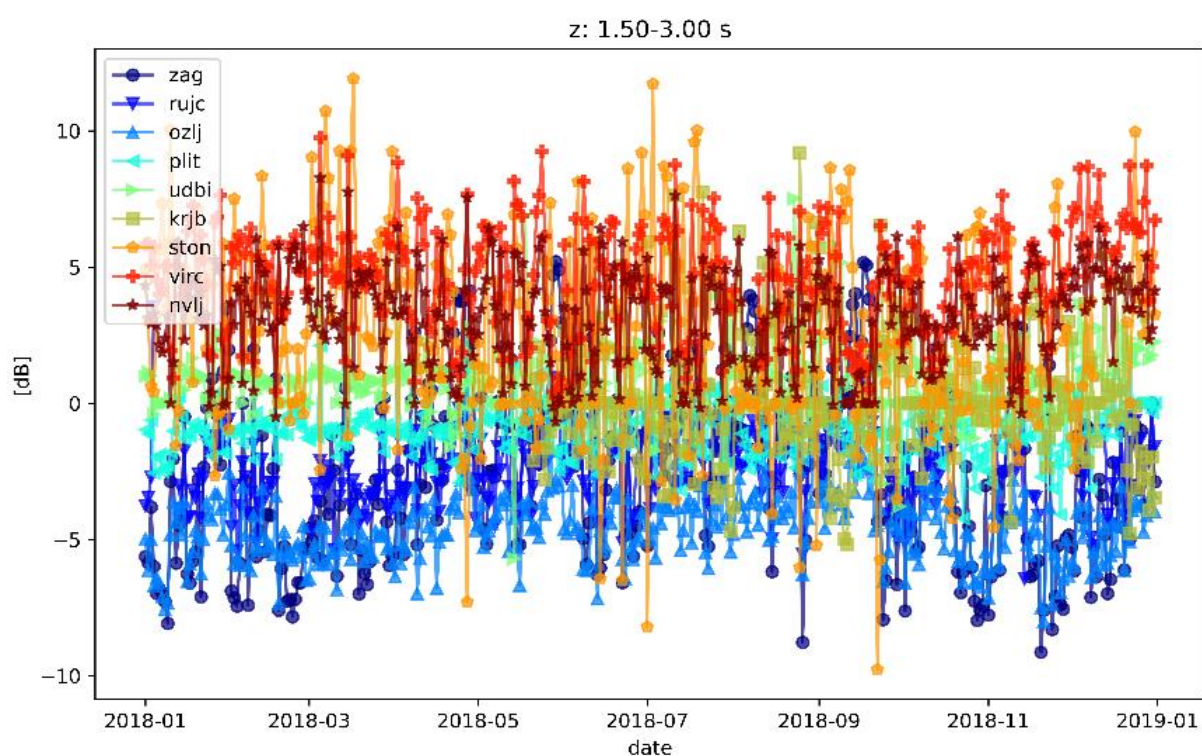
moru „premjestila“ s kraćih perioda na dulje periode proporcionalno s udaljenošću od Jadrana, kao što je predviđeno Gutenbergovim (1951) modelom. Prema slici 4.36, KRJB kao najzapadnija postaja ima često najjači nemir. Zatim slijede OZLJ i RUJC koje su kontinentalne postaje na bliskim geografskim dužinama kao ostale postaje. STON kao najistočnija i najjužnija postaja se nalazi pri dnu, no postaja s najmanjom razinom nemira na ovim periodima je zapravo ZAG koja je najsjevernija.



Slika 4.35: Dnevne vrijednosti medijana na a) $T = 6 - 10$ s i b) $T = 1.5 - 3$ s za vertikalnu komponentu svih postaja. Sivom bojom su označeni podatci drugog perioda za usporedbu.



Slika 4.36 Odstupanja dnevnih vrijednosti medijana PSD-a pojedinih vertikalnih komponenti postaja na periodima 6 – 10 s od medijan vrijednosti PSD-a svih postaja.



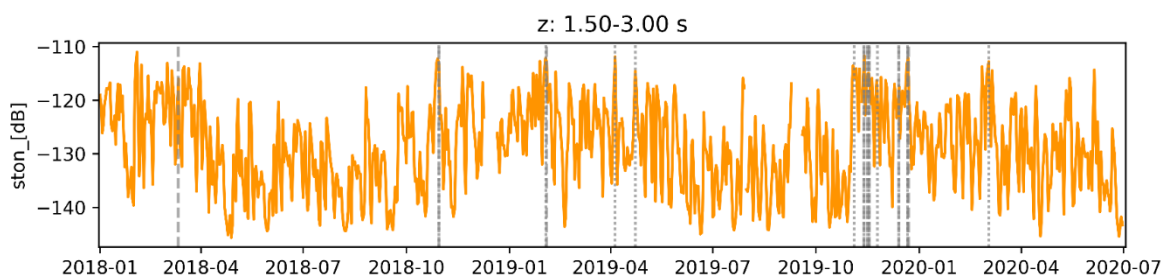
Slika 4.37 Odstupanja dnevnih vrijednosti medijana PSD-a pojedinih vertikalnih komponenti postaja na periodima 1.5 – 3 s od medijan vrijednosti PSD-a svih postaja.

4.3 Utjecaj snažnih epizoda juga i olujnih uspora na razinu nemira

Pri proučavanju utjecaja epizoda vrlo snažnog juga i olujnih uspora na razinu seizmičkog nemira, korišteni su podatci visokih rezidualnih vodostaja u Bakru u razdoblju 2018. – 2019. godine, te podatci vjetra iz jugoistočnog kvadranta čija srednja brzina iznad Jadrana prelazi 10.5 m/s u promatranom razdoblju (model ERA5; C3S, 2017). Podatci su dobiveni u osobnoj komunikaciji s dr. sc. Ivom Međugorac s Geofizičkog odsjeka PMF-a.

Promjene razine nemira na kraćim periodima ($T < 1$ s) prikazane su na slici (4.27). Na slici se mogu uočiti povećanja razine nemira za vrijeme juga i visokog vodostaja koji su naznačeni vertikalnim linijama. Najizraženiji šiljak vidi se 29. listopada 2018. kad se javlja visoki vodostaj i jugo u isto vrijeme. Drugi lako izraženi šiljak opaža se 26. studenoga 2019. i pojavljuje se dva dana nakon pojave jakog juga. Utjecaji juga i vodostaja zapravo se mogu uočiti na većini postaja osim ZAG i RUJC na kojima ovaj fenomen nije izražen, vjerojatno zbog veće udaljenosti od obale, i na kojima je antropogeni utjecaj općenito izražen.

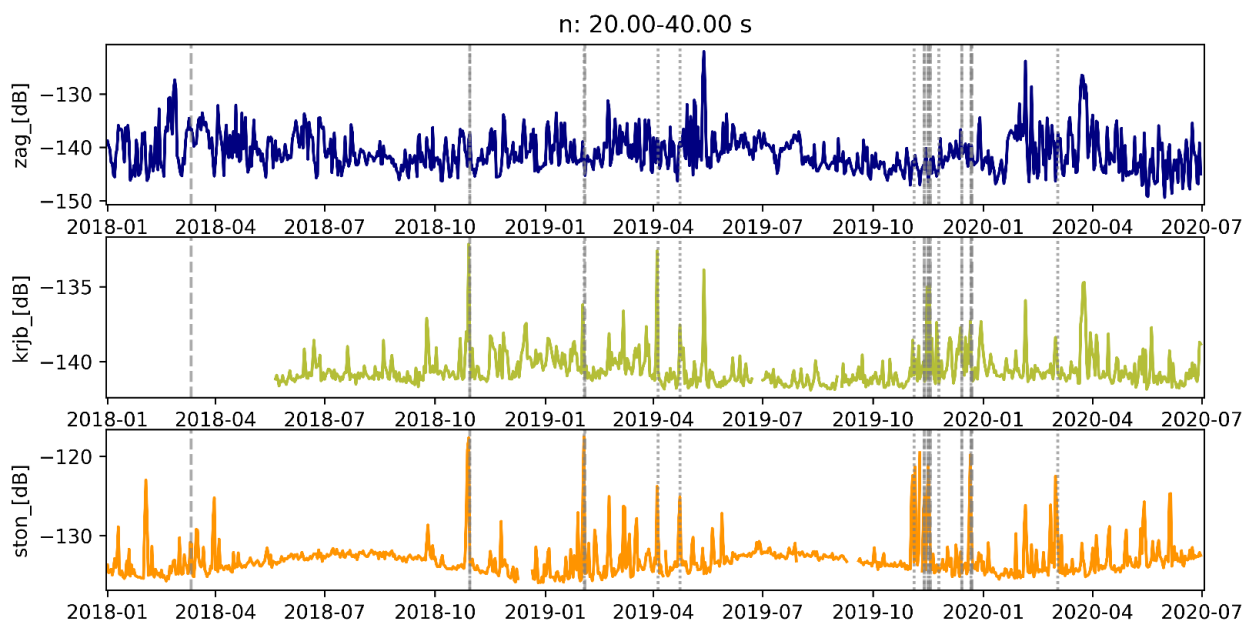
Promjene razine nemira na srednjim periodima, $T = 1.5 - 3.0$ s, prikazane su na slici 4.38. Budući da grafovi svih postaja horizontalnih komponenti poprimaju slične oblike na ovim periodima, prikazana je samo postaja STON. Na slici se može uočiti da je razina nemira uvijek visoka za vrijeme juga i visokog vodostaja, no visoke razine nemira se također mogu uočiti i za druge dane. Ovdje su ciljano razmatrani utjecaji samo epizoda jakog juga i olujnog uspora, te nisu razmatrane ostali mogući uzroci i pojave.



Slika 4.38: Dnevni medijani razine nemira na seizmološkoj postaji STON. Isprekidane linije prikazuju visoku razinu mora, a točkaste linije označavaju snažne epizode juga.

Razine nemira na periodima 20 – 40 s izražene su na horizontalnim komponentama, i to samo na postajama KRJB i STON. Na slici (4.39) mogu se vidjeti

postaja ZAG na čijem se zapisu ne vidi povezanost razine nemira i juga ili razine mora. S druge strane, postaje KRJB i STON imaju vrlo izražene šiljke kad se pojavljuje vrlo jako jugo.



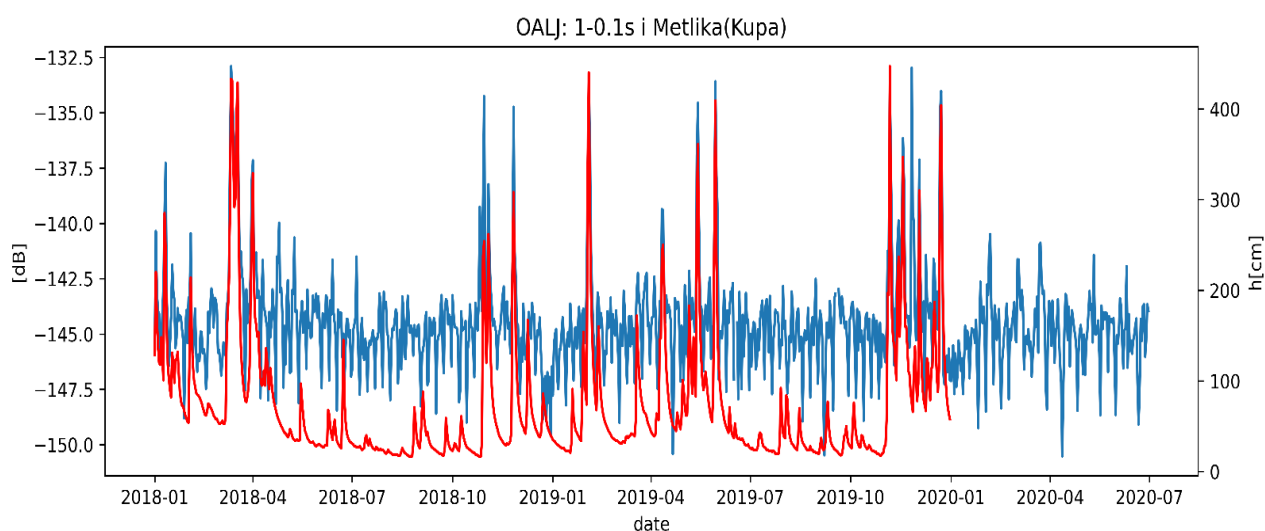
Slika 4.39: Dnevni medijani razine nemira na seizmološkim postajama ZAG, KRJB i STON. Isprekidane linije prikazuju visoku razinu mora, a točkaste linije označavaju snažne epizode juga.

Utjecaji epizoda vrlo snažnog juga i povećanog vodostaja mogu se opaziti na raznim periodima, s drukčijim utjecajem na razinu seizmičkog nemira na postajama. Razine nemira na periodima 0.1 – 3 s su pod utjecajem juga i visokog vodostaja na svim komponentama i na većini postaja. Na periodima 20 – 40 s utjecaj se može primijetiti prvenstveno na horizontalnim komponentama postaja KRJB i STON, dok se na nekim postajama samo naziru utjecaji.

4.4 Utjecaj visokog vodostaja rijeke Kupe na seizmološkoj postaji OZLJ

Pažljivo proučavanje grafa koji prikazuje dnevne promjene razine nemira za $T = 0.1 - 1$ s na seizmološkoj postaji OZLJ na slici 4.27, ukazuje na šiljke visoke razine nemira koji su specifični za ovu postaju. Budući da se postaja nalazi neposredno uz obalu rijeke Kupe, na slici 4.40 prikazane su usporedno visine vodostaja rijeke Kupe u obližnjem mjestu Metlika uzvodno od postaje (prema slobodno dostupnim podacima Agencije za

zaštitu okoliša Republike Slovenije, http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php?p_vodotok=Kolpa&p_postaja=4860&p_let=2018&b_arhiv=Prika%C5%BEi), s dnevnim medijanom vrijednosti razine nemira vertikalne komponente seizmograma na postaji OZLJ za cijelo razmatrano razdoblje. Vidljivo je kako se pri vrlo visokom vodostaju Kupe pojavljuje i znatan porast razine nemira, što se slaže s opažanjem da gibanje vode može imati utjecaj na razinu nemira na periodima ispod 2 s (Webb, 2002). Očito je povećanje razine nemira povezano uz porast vodostaja rijeke, odnosno uz povećani protok vode. No treba uzeti u obzir da se nizvodno od postaje nalazi i hidroelektrana i brana te da njihov način djelovanja možda može utjecati na pojačani nemir. Povećanje vodostaja je nerijetko vezano uz veliku količinu oborina i nevrijeme, pa treba imati na umu da možda postoji i utjecaj atmosferskog djelovanja na povećanje nemira



Slika 4.40: Dnevna vrijednost medijana vertikalne komponente na $T = 0.1 - 1$ s (plava linija) i vodostaj rijeke Kupe u Metliki (crvena linija).

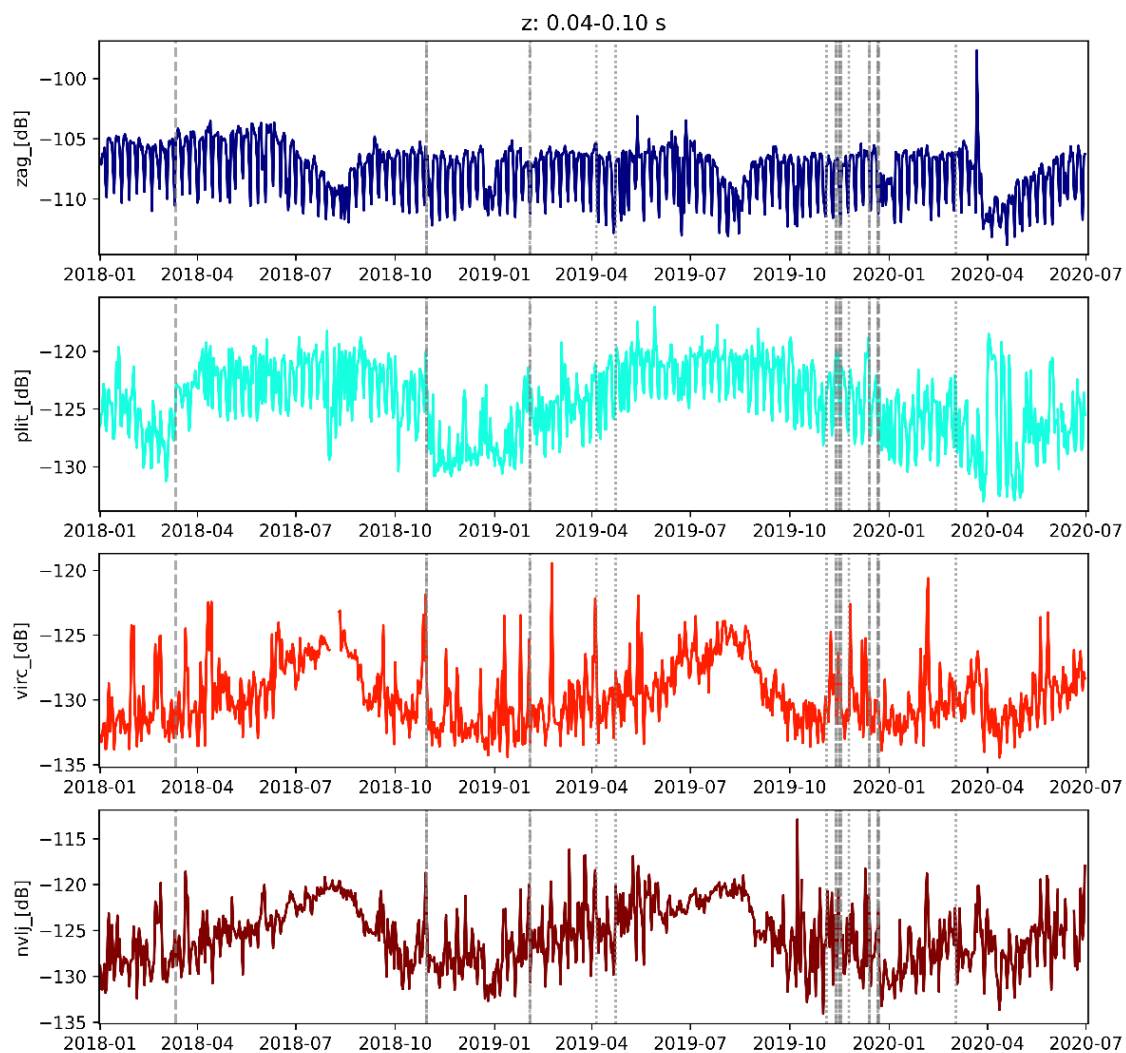
4.5 Utjecaj turističke sezone na priobalnom području

Porast razine seizmičkog nemira na kratkim periodima ($T < 1$ s) vidljiv je za vrijeme ljetnih mjeseci na postajama NVLJ i VIRG (slike 4.42), u Novalji na otoku Pagu i na otoku Viru, dvije lokacije koje su vrlo posjećene turističke lokacije u ljetnim mjesecima. Osim porasta razine nemira na tim postajama, može se uočiti da, iako se znatno povećao broj ljudi, zapravo u vrijeme turističke sezone nema jasne uobičajene tjedne promjene, tj. smanjenja razine nemira za vrijeme vikenda. Treba napomenuti da

je ljudima na ljetovanju najčešće nebitno koji je dan u tjednu te se smanjuje kolektivno kretanje koje se može odraziti na razinu nemira. Čak promet zna biti pojačan vikendom zbog smjene turista.

Nacionalni park Plitvička jezera, gdje je smještena i seizmološka postaja PLIT, također je vrlo posjećeno turističko odredište u Hrvatskoj. Budući da se seizmograf nalazi u zgradi u kojoj rade ljudi, vidljivo je smanjenje nemira za vrijeme vikenda, te općeniti porast nemira za vrijeme ljetnih mjeseci (slika 4.42). Za razliku od obalnog turističkog područja, na grafu je vidljiv nešto blaži porast nemira od travnja pa do listopada. Iako nije primijećena jasna promjena kao na postajama NVLJ i VIRC, treba napomenuti da Nacionalni park bilježi 80 % posjetitelja u razdoblju od svibnja do rujna (*Plan upravljanja NP Plitvička jezera 2019. – 2028.*, 2018), pri čemu se u srpnju i kolovozu bilježi najviše posjetitelja s dnevnim brojem posjetitelja koji ponekad premašuje 14000 (<https://www.poslovni.hr/hrvatska/broj-posjetitelja-na-plitvicama-isti-kao-i-prosle-godine-355505>).

Za razliku od porasta razine nemira na NVLJ i VIRC, na seizmološkoj postaji ZAG tijekom ljeta primjetno je smanjenje razine seizmičkog nemira (slika 4.42), posebno za $T < 1$ s na kojima je dominantni uzrok nemira ljudska aktivnost. Iako je Zagreb unazad nekoliko godina postao i turističko odredište, tijekom ljeta ipak vrlo veliki broj građana svoj godišnji odmor provodi izvan grada, stoga se znatno smanjuje broj ljudi u gradu kao i intenzitet gradskog prometa, što tada uzrokuje i smanjenje razine seizmičkog nemira zabilježenog na postaji ZAG.

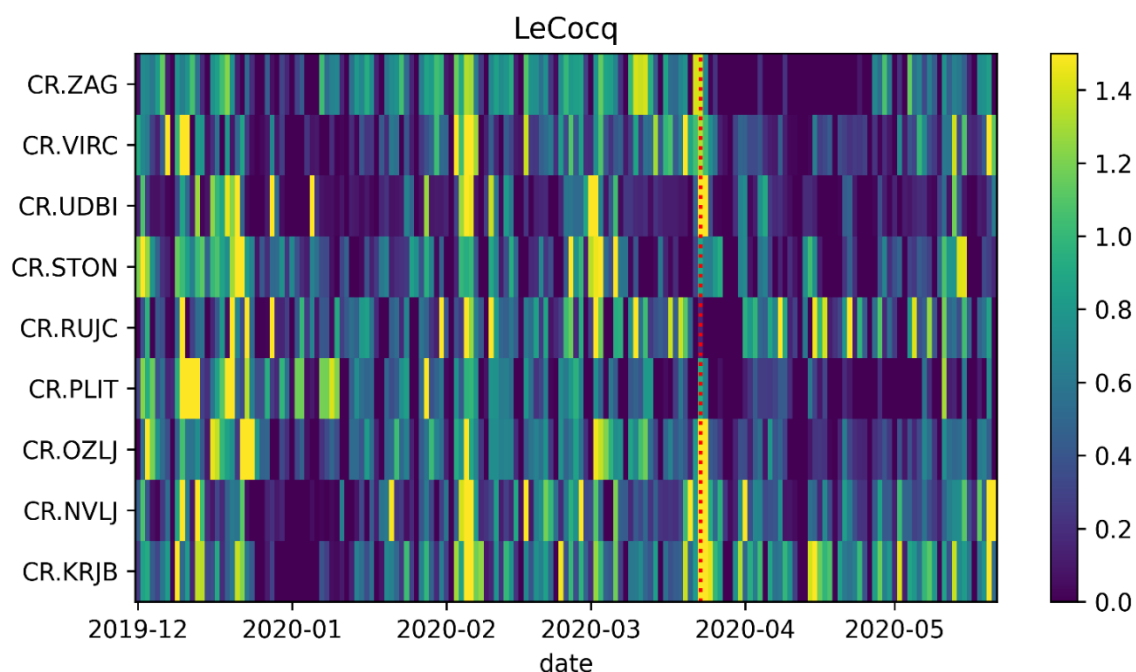


Slika 4.41 Dnevna vrijednost medijana vertikalne komponente na $T = 0.04 - 0.1$ s za postaje ZAG, PLIT, VIRC i NVLJ

4.6 Utjecaj ograničenja kretanja stanovništva za vrijeme pandemije COVID-19 na razinu nemira

Provedena je analiza promjene razine nemira na proučavanih devet postaja za razdoblje između 1. prosinca 2019. i 30. lipnja 2020. prema metodi opisanoj u radu Lecocq et. al. (2020) kako bi se razmotrio utjecaj ograničenja kretanja stanovništva za vrijeme pandemije COVID-19 na razinu seizmičkog nemira. Na svakoj postaji je, po uzoru na spomenuti rad, promatran nemir na frekvencijama od 4 do 14 Hz, te je dobiven rezultat prikazan na slici 4.34. Budući da je cilj bio promatranje promjene antropogenog utjecaja, uzete su frekvencije na kojima se vide takve promjene.

Na seizmološkoj postaji ZAG je vidljivo smanjenje razine nemira za vrijeme zimskih praznika i vikenda, odnosno uzorak izmjene jačeg i slabijeg nemira tijekom tjedna, a nakon uvođenja ograničenja kretanja stanovništva zbog pandemije COVID-19, tzv. *lockdowna*, jasno se opaža izostanak „tjednog“ uzorka i općenito smanjenje snage nemira. Na grafu se može općenito primijetiti jasno smanjenje razine seizmičkog nemira nakon 22. ožujka 2020. godine, kad je uveden tzv. *lockdown* na razini cijele države. Na seizmološkoj postaji PLIT se također može uočiti pad razine nemira, no ta promjena nije izražena kao kod postaje ZAG. Na postaji RUJC postoji smanjenje razine nemira tijekom nekoliko dana, no relativno brzo se vraća razina nemira u uobičajeno stanje. Za ostale postaje, ta promjena nije toliko izražena jer se ipak radi o slabije napučenim sredinama gdje seizmički nemir uzrokovan ljudskom aktivnosti nije toliko izražen. Jedino je grad Zagreb gusto naseljeno područje s razvijenom industrijom i intenzivnim gradskim prometom kao potencijalnim izvorima nemira, što se može jednostavno uočiti ako takve aktivnosti izostanu.



Slika 4.42: Dnevna razina nemira izračunata prema poglavlju (3.3)

5 Zaključak

Kako bi se odredila razina seizmičkog nemira i proučile neke njene karakteristike, analizirani su zapisi seizmografa devet seizmoloških postaja Hrvatske seizmografske mreže u razdoblju između 1. siječnja 2018. i 30. lipnja 2020. godine. Za proučavanje razine nemira primijenjena je metoda opisana u radu McNamare i Bulanda (2004), koja razinu seizmičkog nemira opisuje gustoćom spektra snage (PSD) te funkcijom gustoće vjerojatnosti (PDF). Analizirana je dnevna, tjedna i sezonska promjenjivost razine seizmičkog nemira kao i utjecaj epizoda vrlo jakog juga i olujnih uspora, ljetne turističke sezone te ograničavanja kretanja stanovništva zbog pandemije bolesti COVID-19.

Rezultati su pokazali da se razina seizmičkog nemira na svim seizmološkim postajama u pravilu nalazi između krivulja NLNM i NHNM. Iznimke su samo razine nemira na horizontalnim komponentama postaje NVLJ, PLIT, RUJC, STON na $T > 10$ s gdje postoji nezanemariva vjerojatnost premašivanja razine NHNM. Dnevne promjene razine seizmičkog nemira postoje kod svih postaja i komponentata na $T < 1$ s, te na pojedinim komponentama nekih postaja na $T \approx 20 - 40$ s. Tjedne promjene razine nemira su vidljive na $T < 1$ s i to kao smanjenje razine nemira za vrijeme vikenda, pogotovo nedjelje. Sezonske promjene su vidljive na srednjim periodima 1 – 10 s. U tom rasponu perioda na svim proučavanim postajama izražena su dva šiljka, za koja se pretpostavlja da su posljedica djelovanja oceanskih valova (Atlantski ocean) i valova lokalnog mora (Jadransko more), čija se razina nemira povećava zimi, a smanjuje ljeti. Također, šiljak uzrokovan djelovanjem lokalnog mora pomiče se prema većim periodima uz smanjenje razine nemira što je postaja udaljenija od morske obale. Osim periodičkih pojava, moglo se uočiti da se razina nemira na $T < 1$ s povećava na svim postajama pri snažnim epizodama juga te na postaji OZLJ pri visokom vodostaju rijeke Kupe koja protječe u blizini. Porast razine nemira na $T \approx 0.04 - 0.1$ s za vrijeme ljetne turističke sezone primjetan je na postajama smještenima u turističkim odredištima (NVLJ, VIRC i PLIT), te na postaji u Zagrebu gdje se razina nemira tada smanjuje zbog odlaska ljudi na odmor izvan grada. Na nekim postajama, prvenstveno ZAG, uočeno je smanjenje razine nemira nakon proglašavanja zabrane kretanja zbog pandemije COVID-19.

Literatura

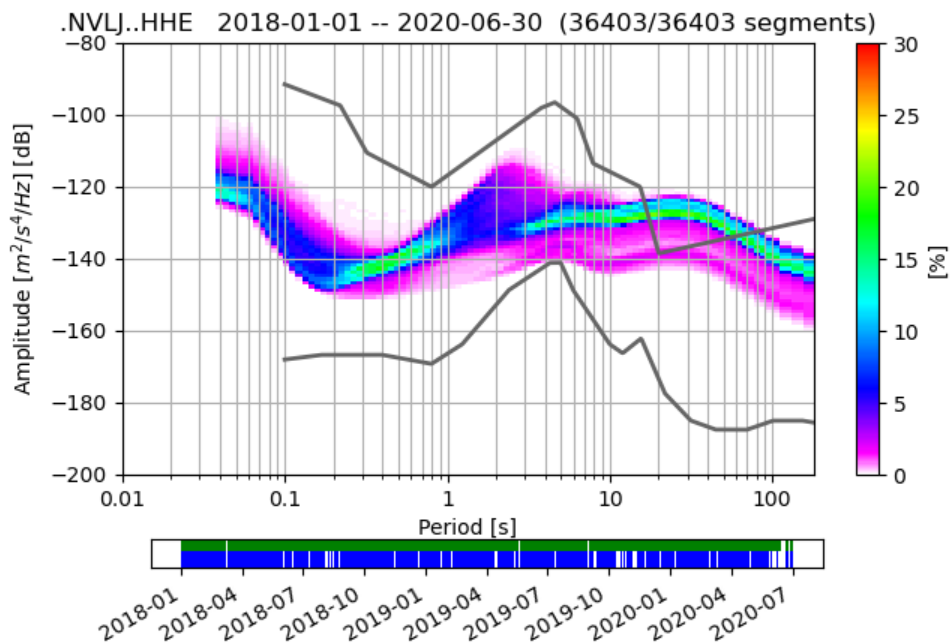
- Bormann, P., Wielandt, E. (2013) Seismic Signals and Noise. U: Bormann, P. (ur.), *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*, Postdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 1-62.
- Bosner, N. (2020) 4. dio Diskretna Fourierova transformacija. Dostupno na: <https://web.math.pmf.unizg.hr/~nela/zr2.html> [30. ožujka 2021.]
- Cooley, J.W., Tukey J.W. (1965) An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of Computation* 19, 297 - 301.
- Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017) ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS)
- Dasović, I. (2015) *Atenuacija seizmičkih valova u području Dinarida*. Doktorski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet.
- Díaz, J., Ruiz, M., Sánchez-Pastor, P.S., Romero, P. (2017) Urban Seismology: on the origin of earth vibrations within a city. *Scientific Reports* 7, 15296.
- Državni zavod za statistiku (2011) Popis stanovništva, kućanstava i stanova 2011. Dostupno na: <https://www.dzs.hr/hrv/censuses/census2011/censuslogo.htm> [23. ožujak 2021.]
- Evangelidis, C. P., Melis, N. S. (2012): Ambient Noise Levels in Greece as Recorded at the Hellenic Unified Seismic Network. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102 (6), 2507 – 2517.
- Godišnji turistički promet na području grada Novalje (2020) Dostupno na: <https://visitnovalja.hr/statistika> [12. ožujka 2021.]
- Gutenberg B. (1951) Observations and theory of microseisms. U: Malone, T. F. (ur.), *Compendium of meteorology*. Boston; Massachusetts: American meteorological society, str. 1303 – 1311.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.-N. (2020) The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020; 146: 1999– 2049.

- Krischer, L., Megies, T., Barsch, R., Beyreuther, M., Lecocq, T., Caudron, C., Wassermann, J. (2015) ObsPy: a bridge for seismology into the scientific Python ecosystem. *Computational science & discovery*, 8, 014003
- Lecocq, T., Hicks, S. P., Van Noten, K., van Wijk, K., Koelemeijer, P., De Plaen, R. S. M., Massin, F., Hillers, G., Anthony, R. E., Apoloner, M.-T., Arroyo-Solórzano, M., Assink, J. D., Büyükkapınar, P., Cannata, A., Cannavo, F., Carrasco, S., Caudron, C., Chaves, E. J., Cornwell, D. G., Craig, D., den Ouden, O. F. C. , Diaz, J., Donner, S., Evangelidis, C. P., Evers, L., Fauville, B., Fernandez, G. A., Giannopoulos, D., Gibbons, S. J., Girona, T., Grecu, B., Grunberg, M., Hetényi, G., Horleston, A., Inza, A., Irving, J. C. E., Jamalreyhani, M., Kafka, A., Koymans, M. R., Labedz, C. R., Larose, E., Lindsey, N. J., McKinnon, M., Megies, T., Miller, M. S., Minarik, W., Moresi, L., Márquez-Ramírez, V. H., Möllhoff, M., Nesbitt, I. M., Niyogi, S., Ojeda, J., Oth, A., Proud, S., Pulli, J., Retailleau, L., Rintamäki, A. E., Satriano, C., Savage, M. K., Shani-Kadmiel, S., Sleeman, R., Sokos, E., Stammler, K., Stott, A. E., Subedi, S., Sørensen, M. B., Taira, T., Tapia, M., Turhan, F., van der Pluijm, B., Vanstone, M., Vergne, J., Vuorinen, T. A. T., Warren, T., Wassermann, J., Xiao, H. (2020): Global quieting of high-frequency seismic noise due to COVID-19 pandemic lockdown measures. *Science*, 369, 1338 – 1343.
- Marković, B. (1948): Mikrozeizmički nemir u Zagrebu. *Rad geofizičkog zavoda u Zagrebu*, 2, 1.
- McNamara, D.E. , Buland R. P. (2004) Ambient noise levels in the continental United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94, 4, 1517 – 1527
- Ministarstvo turizma Republike Hrvatske (2020) *Turizam u brojkama 2019*, Zagreb, Ministarstvo turizma Republike Hrvatske. Dostupno na : <https://www.htz.hr/hr-HR/informacije-o-trzistima/analize-s-podrucja-turizma/turizam-u-brojkama> [24. siječnja 2021]
- Molinari, I., Clinton, J., Kissling, E., Hetényi, G., Giardini, D., Stipčević, J., Dasović, I., Herak, M., Šipka, V., Wéber, Z., Grácz, Z., Solarino, S., the Swiss-AlpArray Field Team, and the AlpArray Working Group (2016) : Swiss-AlpArray temporary broadband seismic stations deployment and noise characterization. *Advances in Geosciences*, 43, 15 – 29.
- Molinari, I., Dasović, I., Stipčević, J., Šipka, V., Jarić, D., Kissling, E., Clinton, J., Salimbeni, S., Prevolnik, S., Giardini, D., Wiemer, S., et. al. (2018): Investigation of the central Adriatic lithosphere structure with the AlpArray-CASE seismic experiment. *Geofizika*, 35(2), 103 – 128.
- Peterson, J. (1993) Observations and modeling of seismic background noise. *U.S. Geological Survey Open-File Report*. 93-322, 1–95.
- Plan upravljanja NP Plitvička jezera 2019. – 2028. (2018) Dostupno na: <https://np-plitvicka-jezera.hr/wp-content/uploads/2019/01/Nacrt-Plan-upravljanja-NPPI-2019-2028.pdf> [23. ožujak 2021.]

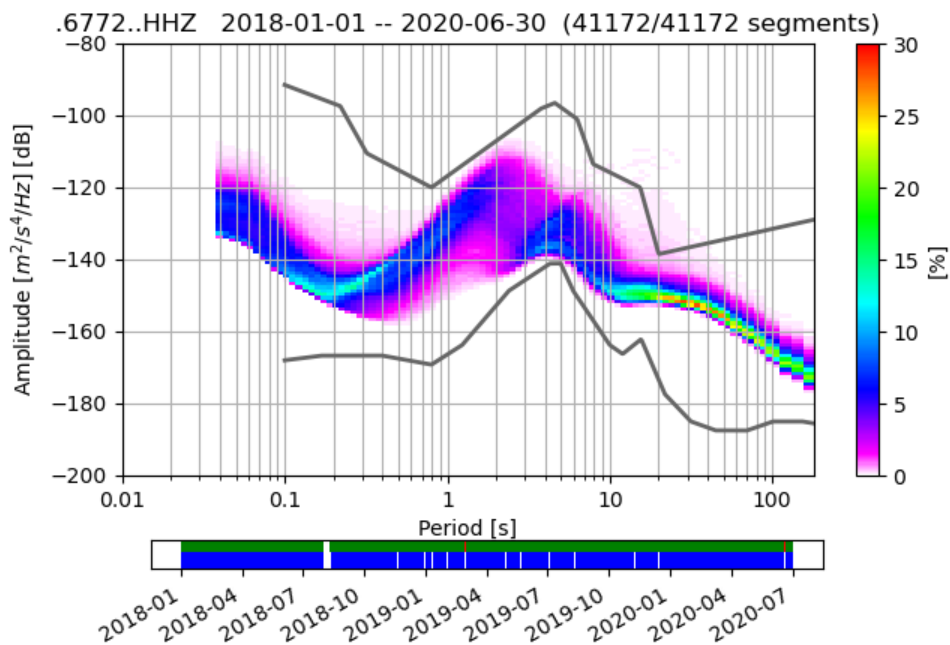
- Sevim, F., Zor, E., Açıkgöz, C., Tarancıoğlu, A. (2017) Ambient noise levels and characterization in Aegean region, Turkey. *Journal of Seismology*, 22, 499–518.
- Sheen, D.-H., Shin, J. S., Kang, T.-S., Baag, C.-E. (2009) Low frequency cultural noise. *Geophysical research letters*, 36, 17
- Stanovništvo prema starosti i spolu po naseljima, popis 2011. (2011) Dostupno na: https://www.dzs.hr/Hrv/censuses/census2011/results/htm/H01_01_01/H01_01_01.html [12. ožujka 2021.]
- Webb S.C (2002) Seismic noise on land and on the sea floor. U: Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C., Kisslinger, C. (ur.), *International handbook of earthquake and engineering seismology*. Amsterdam; Boston; London: Elsevier, str. 305 – 318.

Dodatci

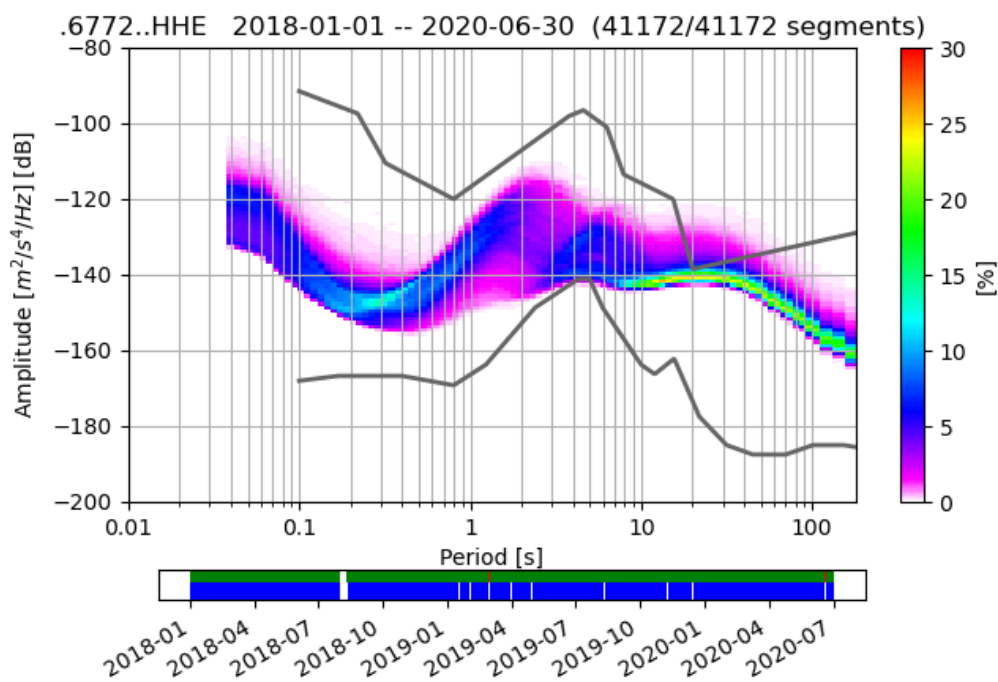
A Vrijednosti PDF-a



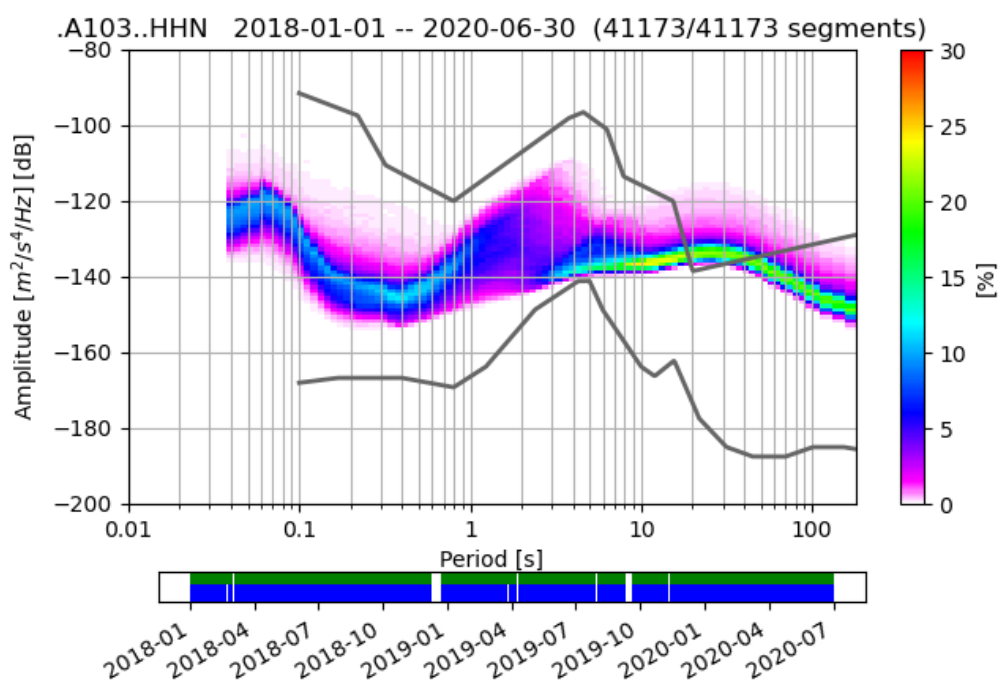
Slika A.1 Funkcija gustoće vjerojatnosti PDF za seizmološku postaju NVLJ horizontalnu komponentu E.



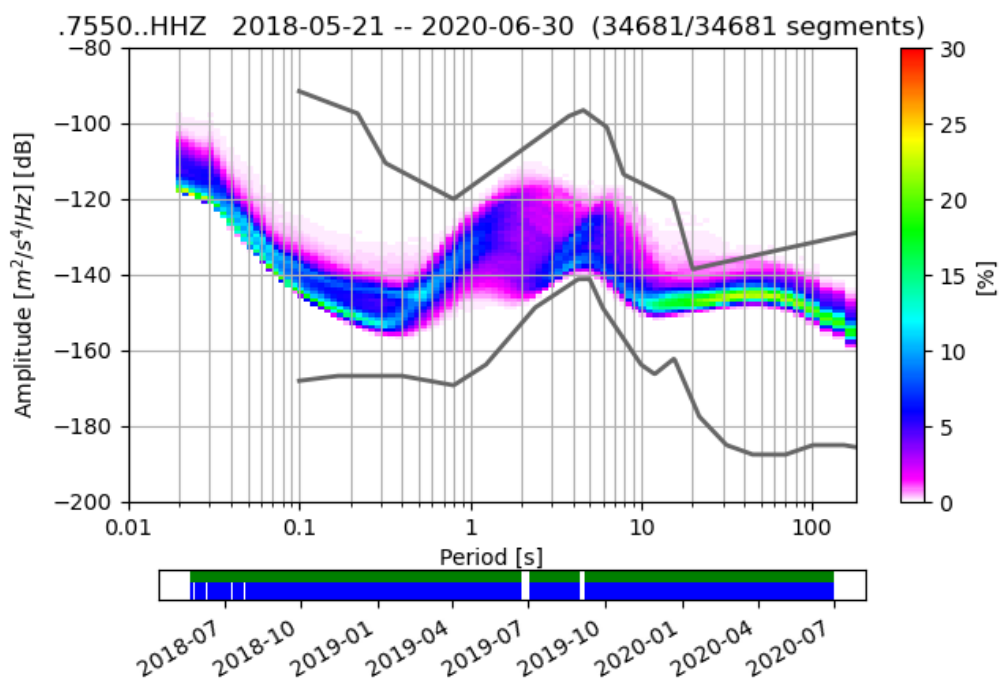
Slika A.2 PDF funkcija za seizmološku postaju VIRC vertikalnu komponentu Z.



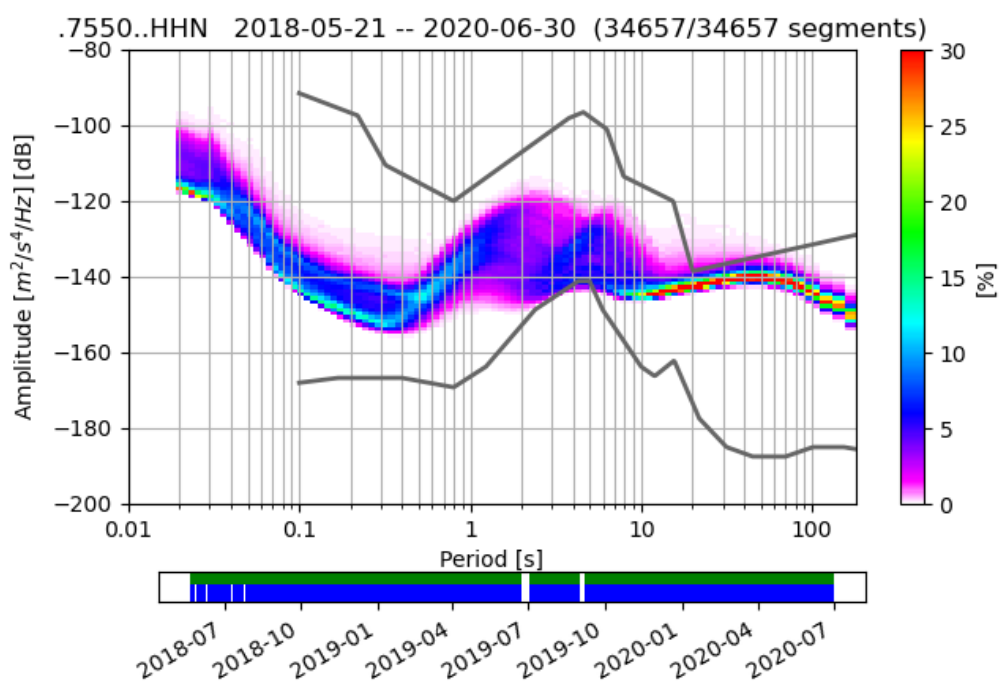
Slika A.3 PDF funkcija za seizmološku postaju VIRC horizontalnu komponentu E.



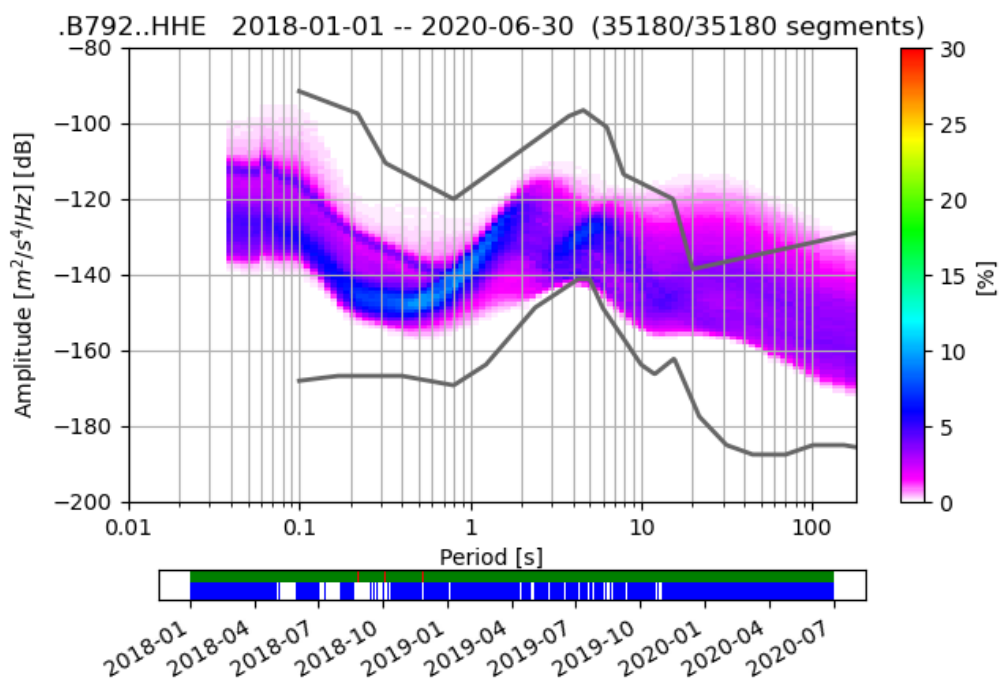
Slika A.4 PDF funkcija za seizmološku postaju STON horizontalnu komponentu N.



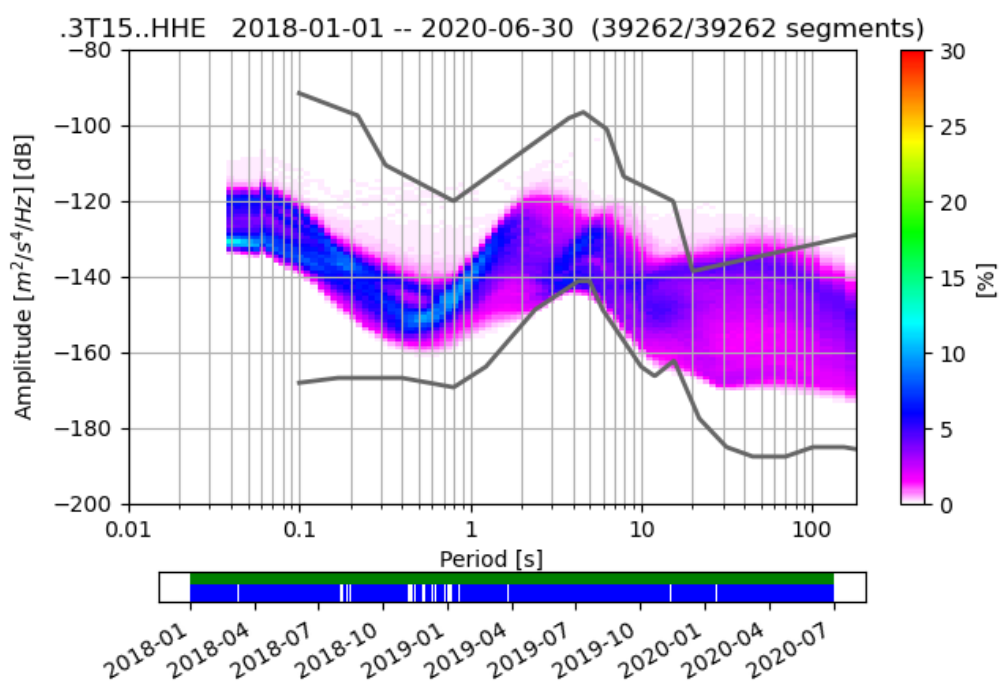
Slika A.5 PDF funkcija za seizmološku postaju KRJB vertikalnu komponentu Z.



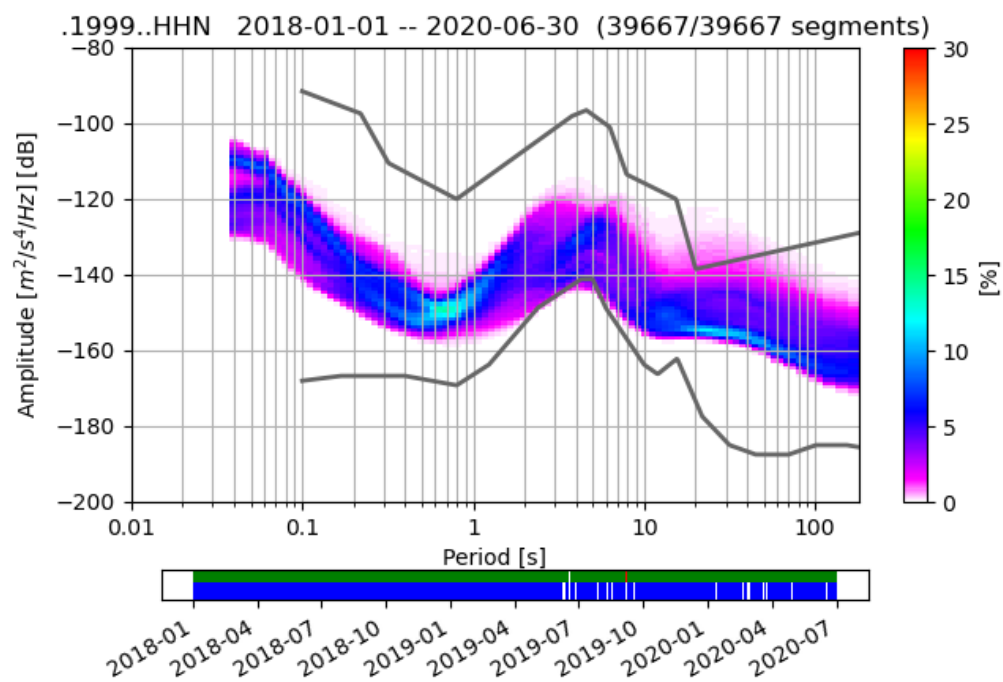
Slika A.6 PDF funkcija za seizmološku postaju KRJB horizontalnu komponentu N.



Slika A.7 PDF funkcija za seizmološku postaju UDBI horizontalnu komponentu E.

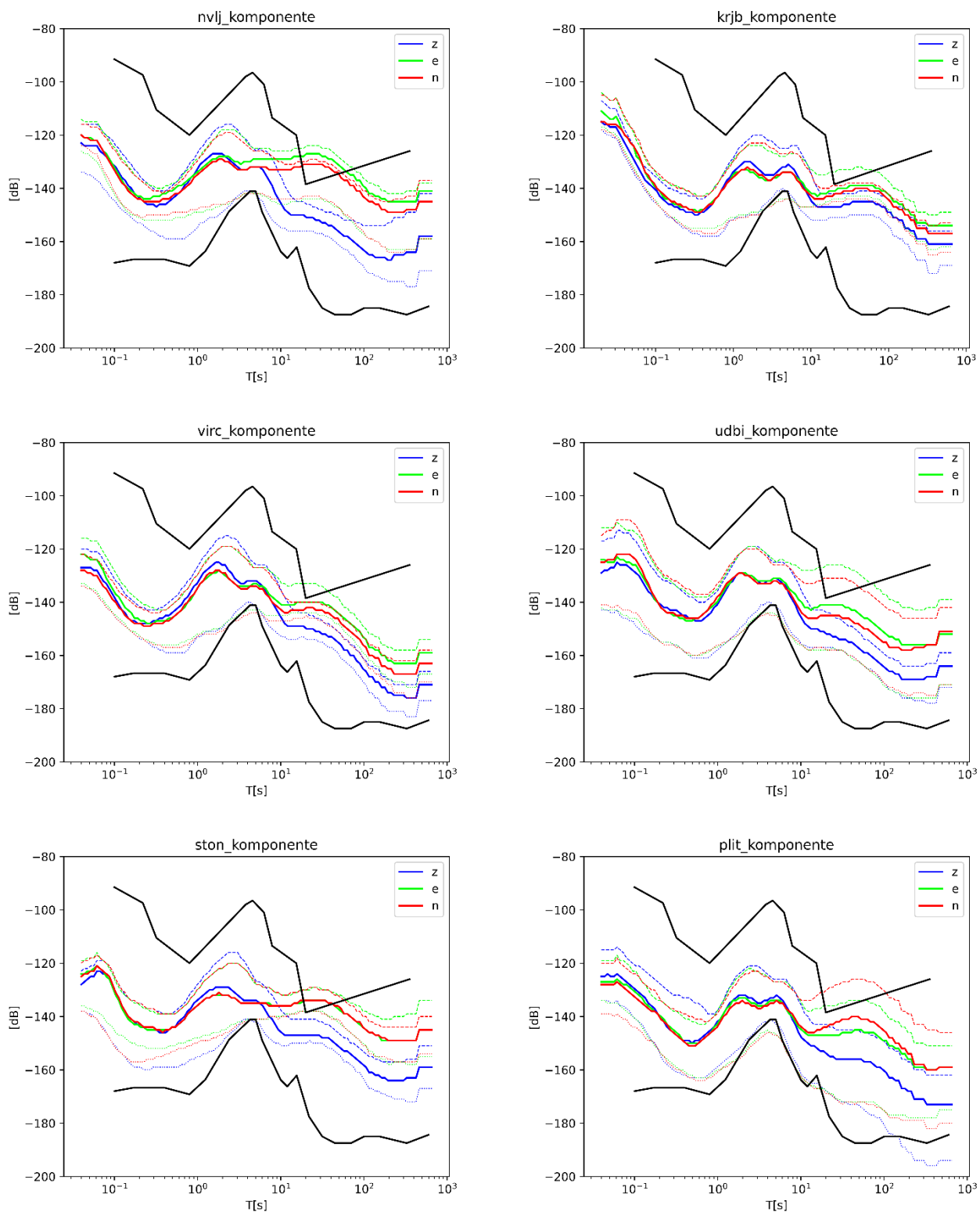


Slika A.8 PDF funkcija za seizmološku postaju PLIT horizontalnu komponentu E.

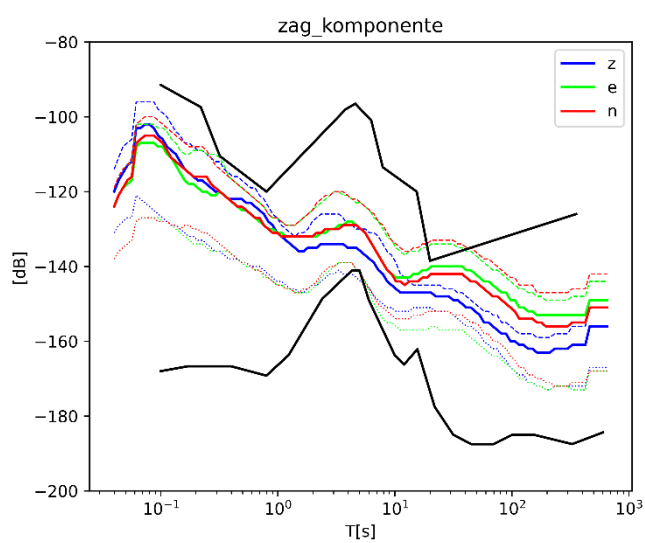
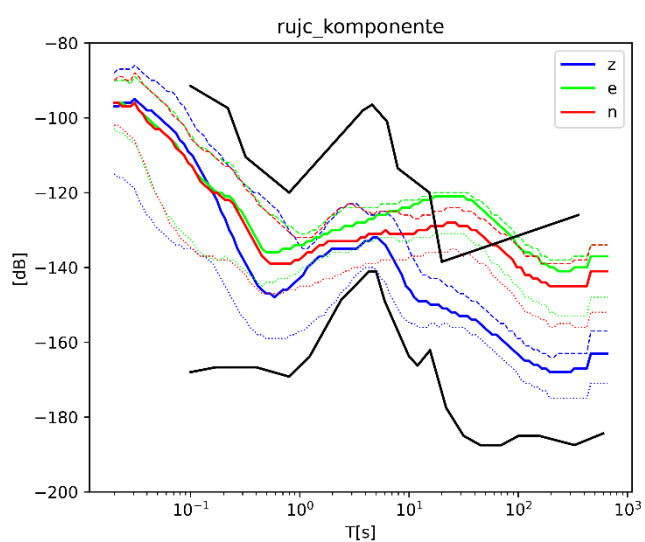
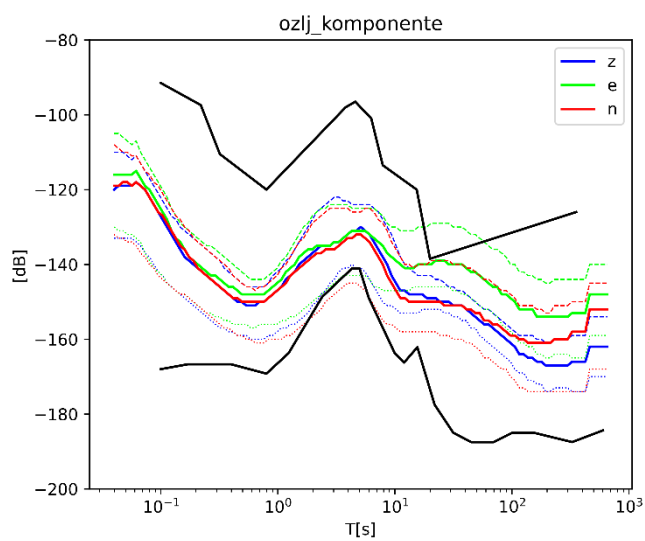


Slika A.9 PDF funkcija za seizmološku postaju OZLJ horizontalnu komponentu N.

B Krivulje medijana PSD-a

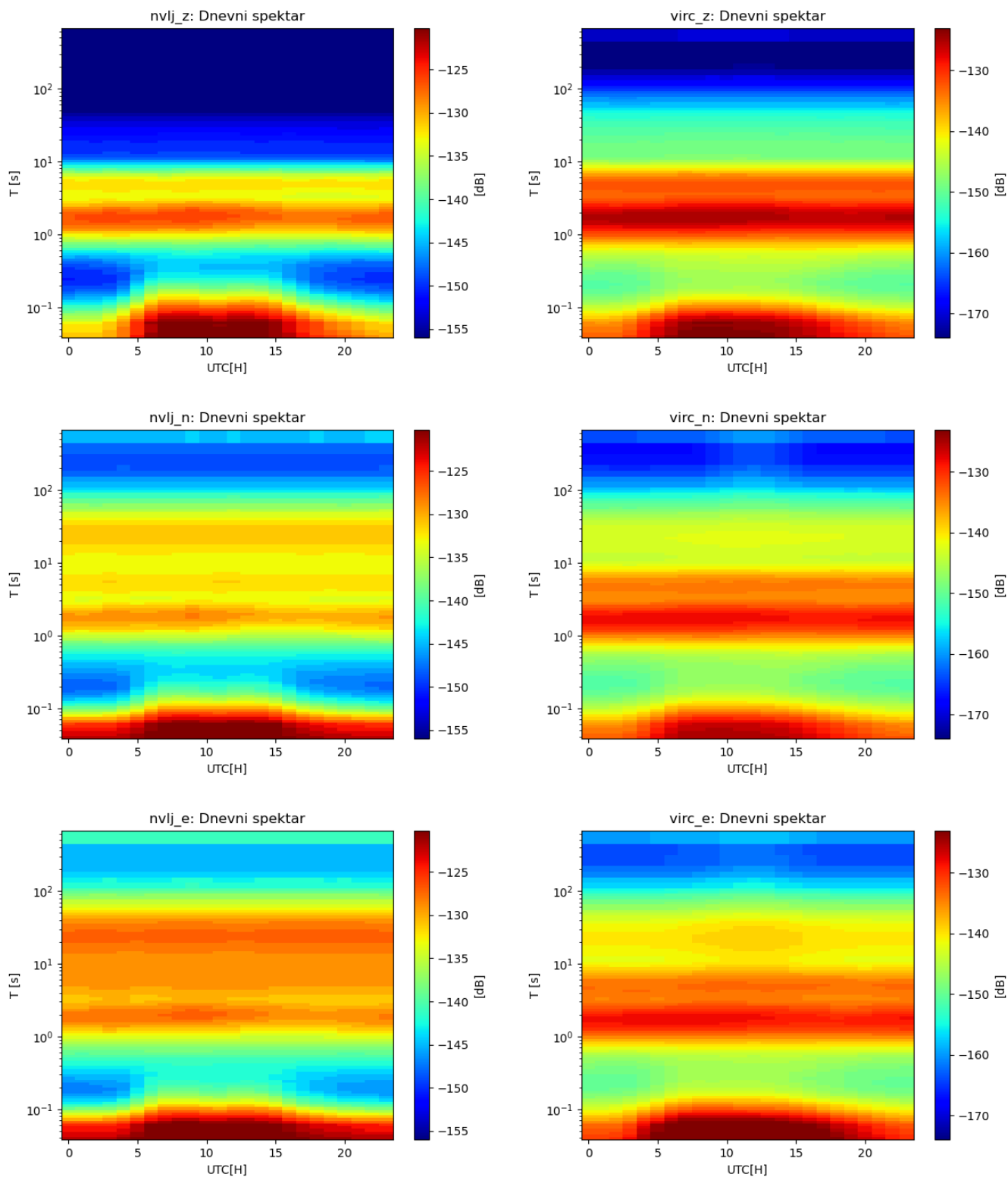


Slika B.1 Medijani PSD funkcija pojedinih komponenti za postaje NVLJ, KRJB, VIRC, UDBI, STON i PLIT

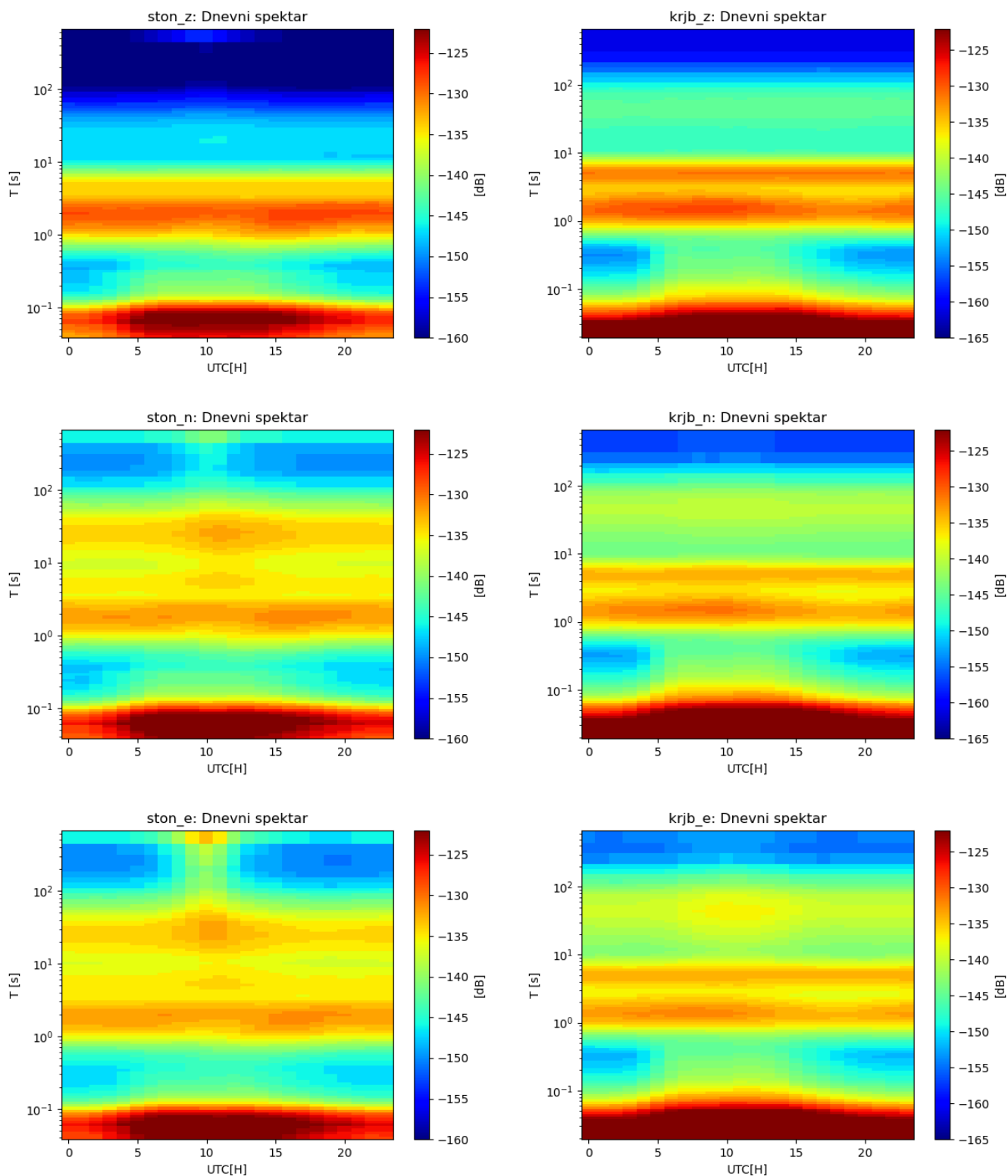


Slika B.2 Medijani PSD funkcija pojedinih komponenti za postaje OZLJ, RUJC i ZAG

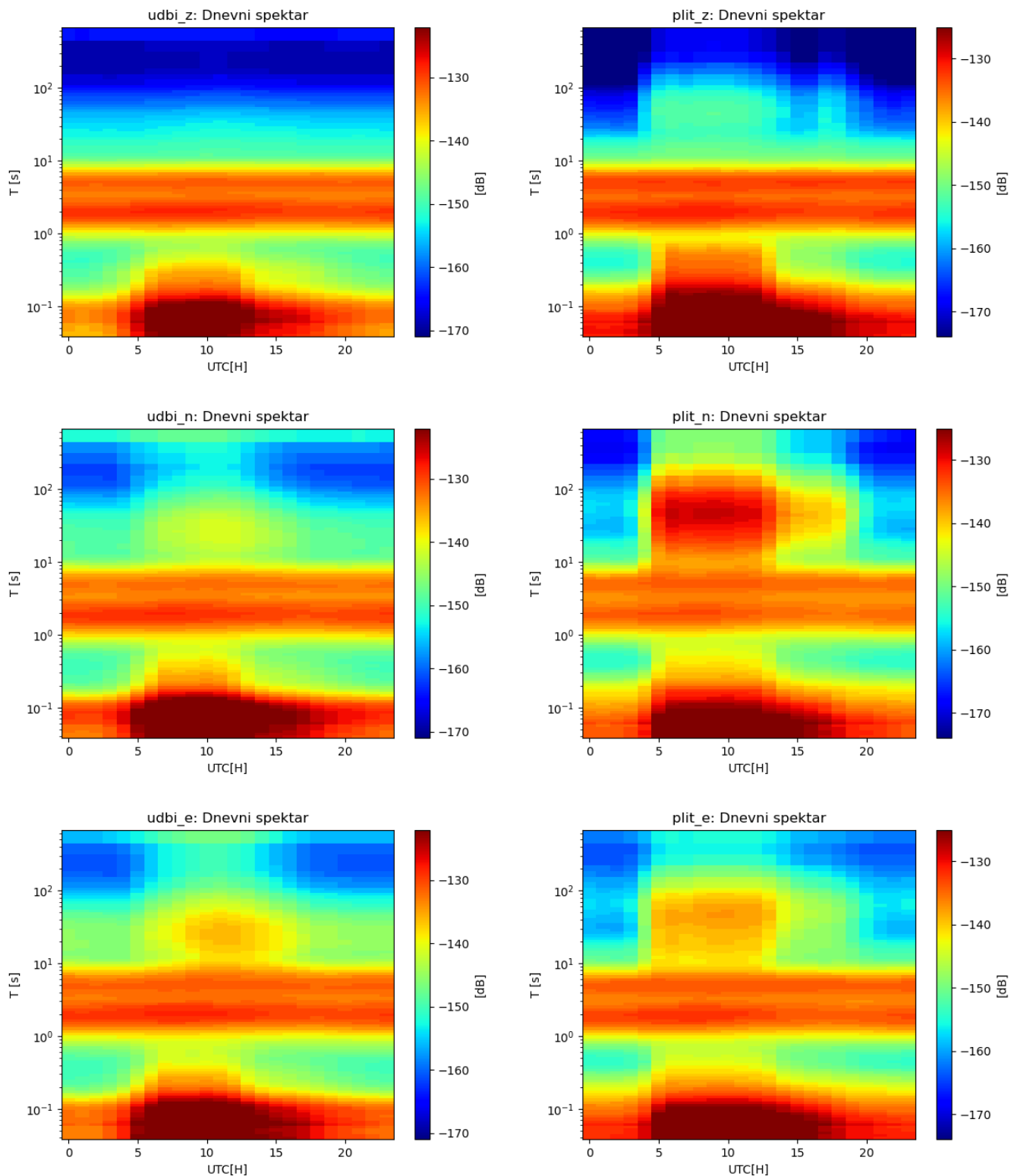
C Dnevni spektrogrami



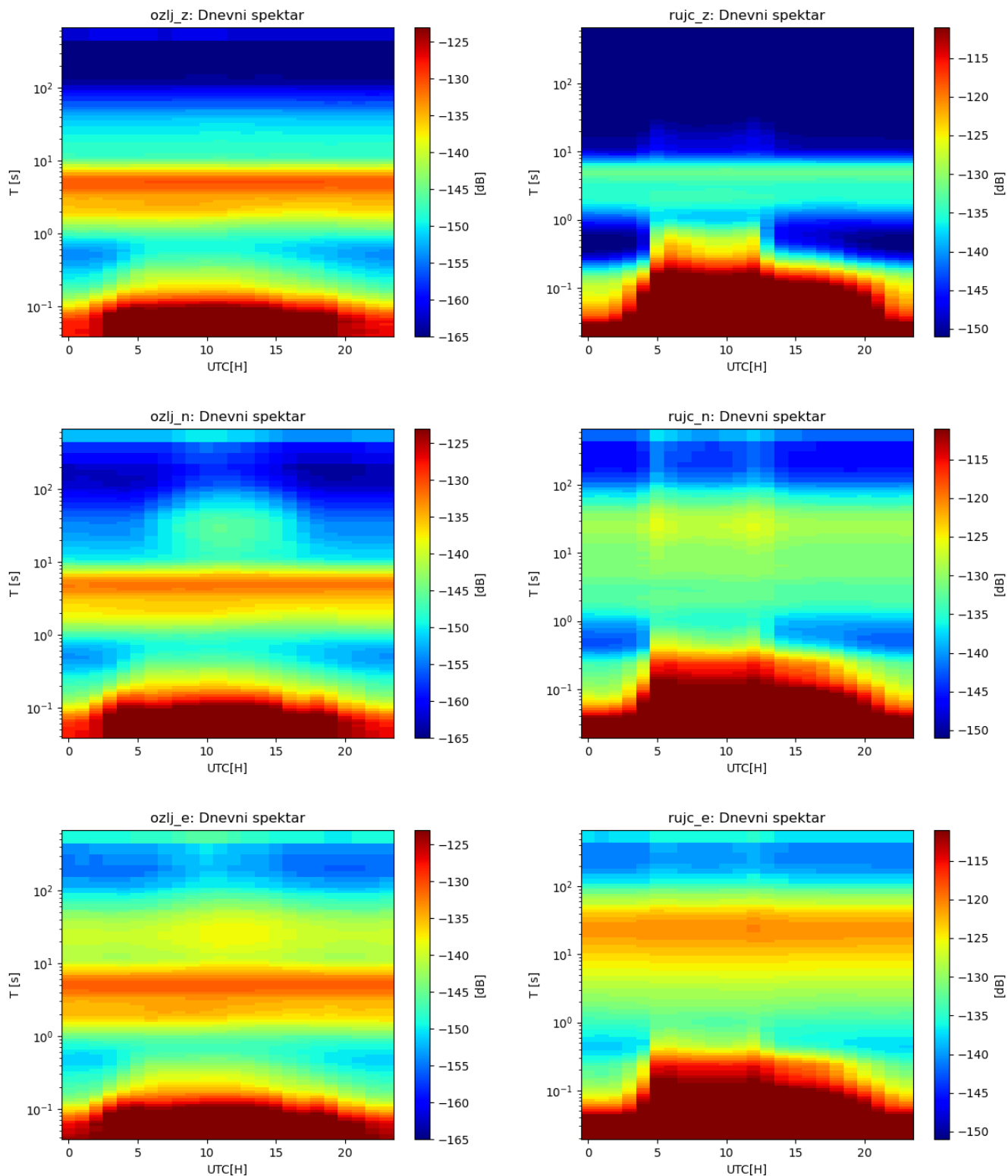
Slika C.1 Dnevni spektrogrami svih komponenti postaje NVLJ i VIRC



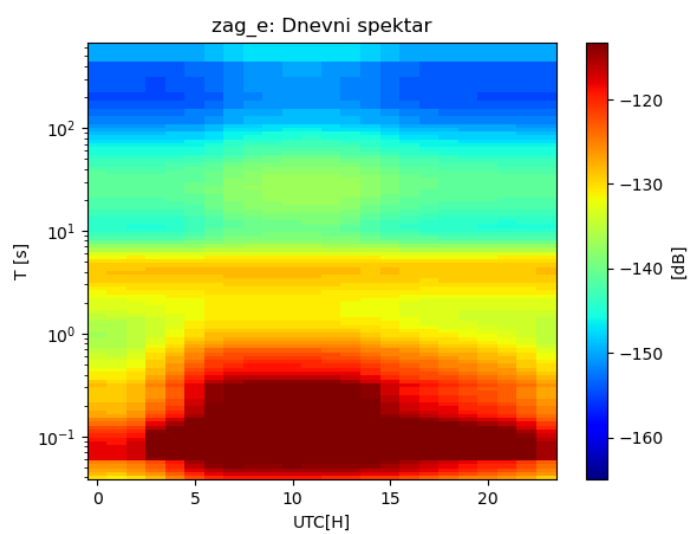
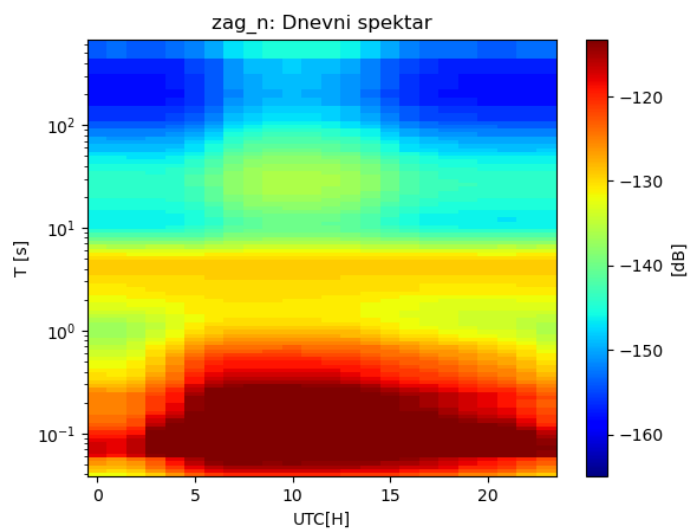
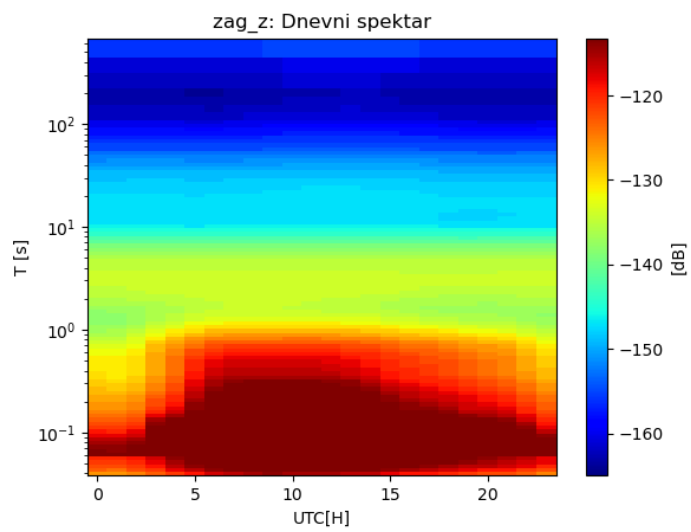
Slika C.2 Dnevni spektrogrami svih komponenti postaje STON i KRJB



Slika C.3 Dnevni spektrogrami svih komponenti postaje UDBI i PLIT

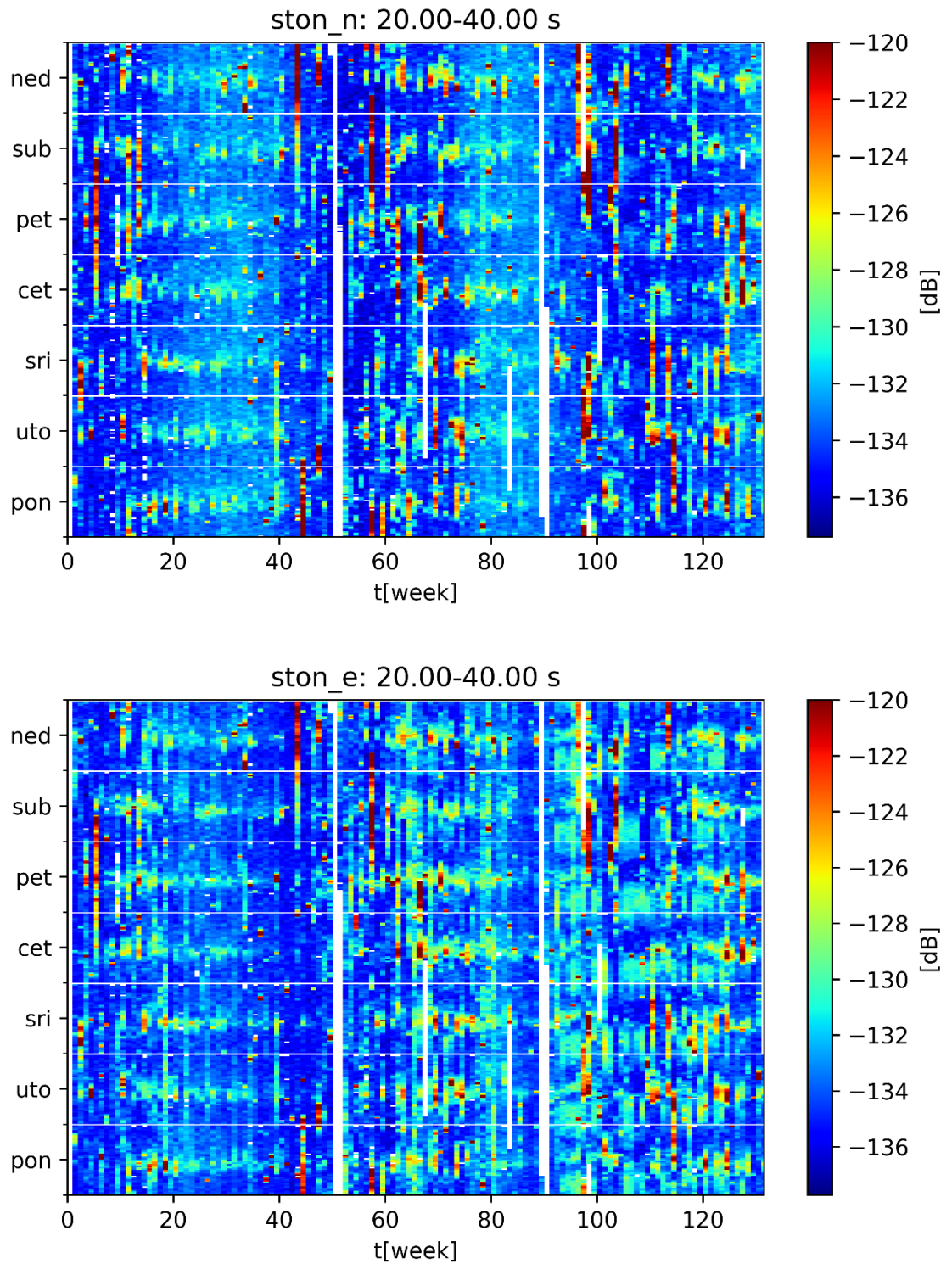


Slika C.4 Dnevni spektrogrami svih komponenti postaje OZLJ i RUJC

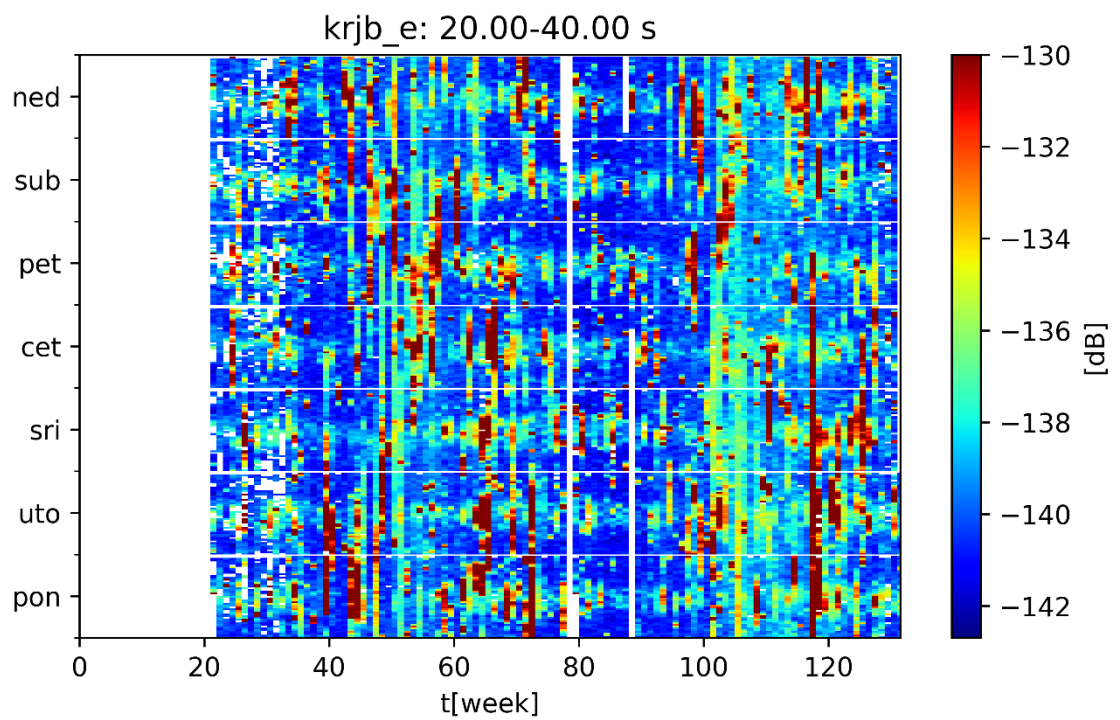
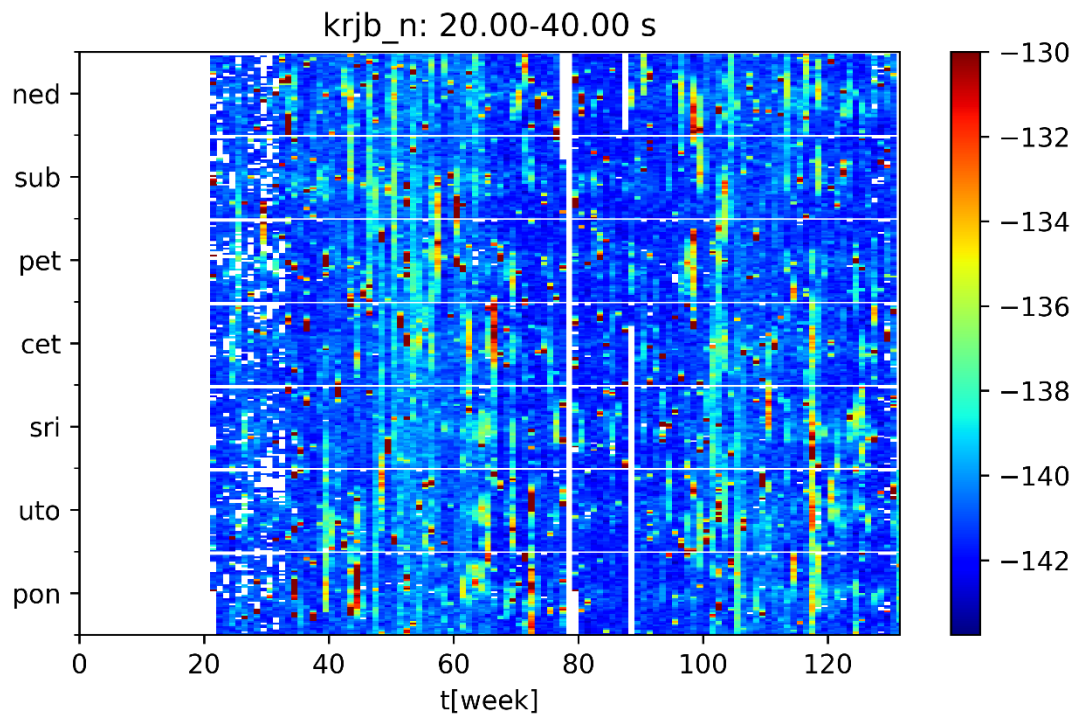


Slika C.5 Dnevni spektrogrami svih komponenti postaje ZAG

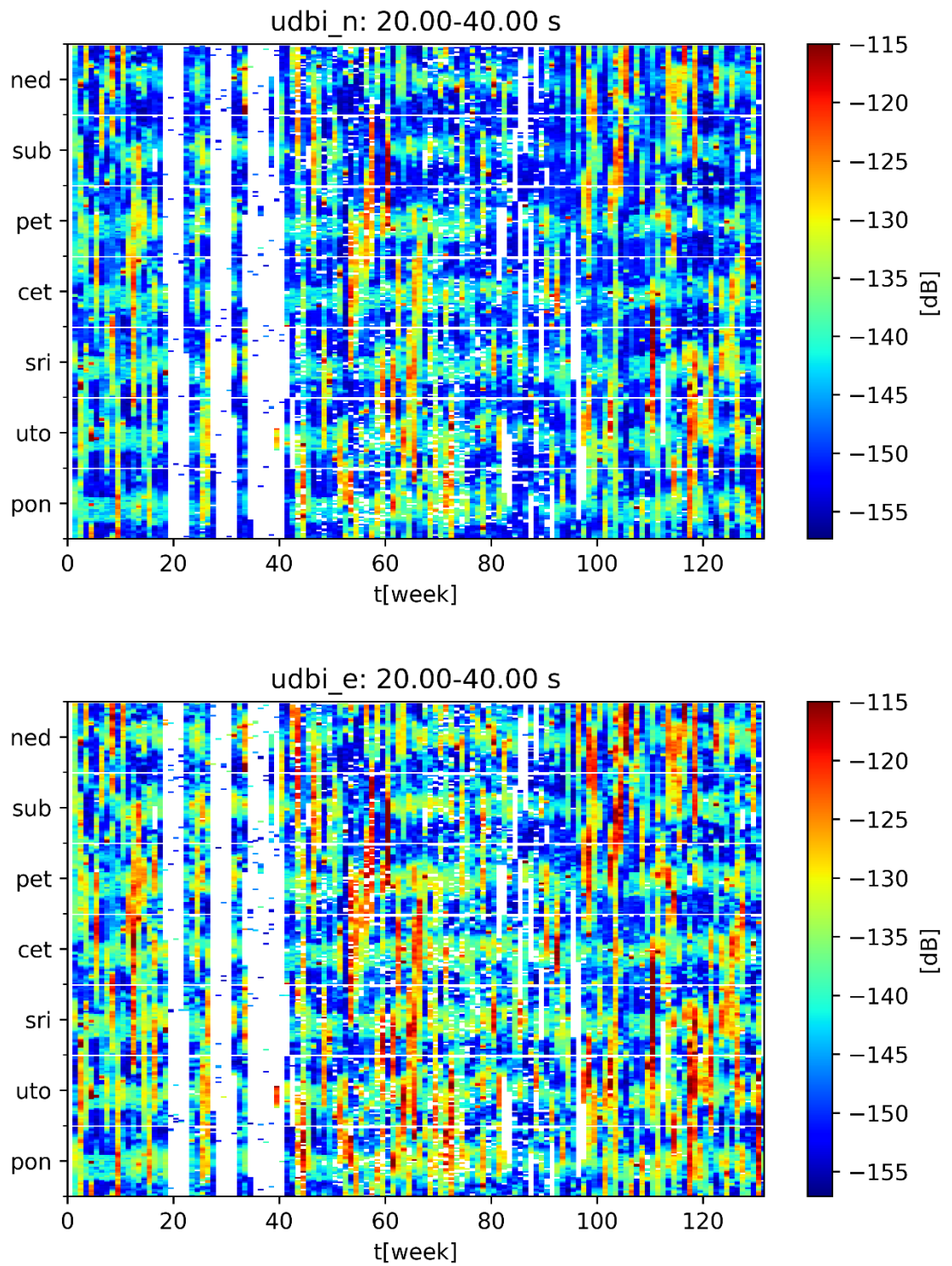
D Polusatni medijani PSD-a za $T = 20 - 40$ s



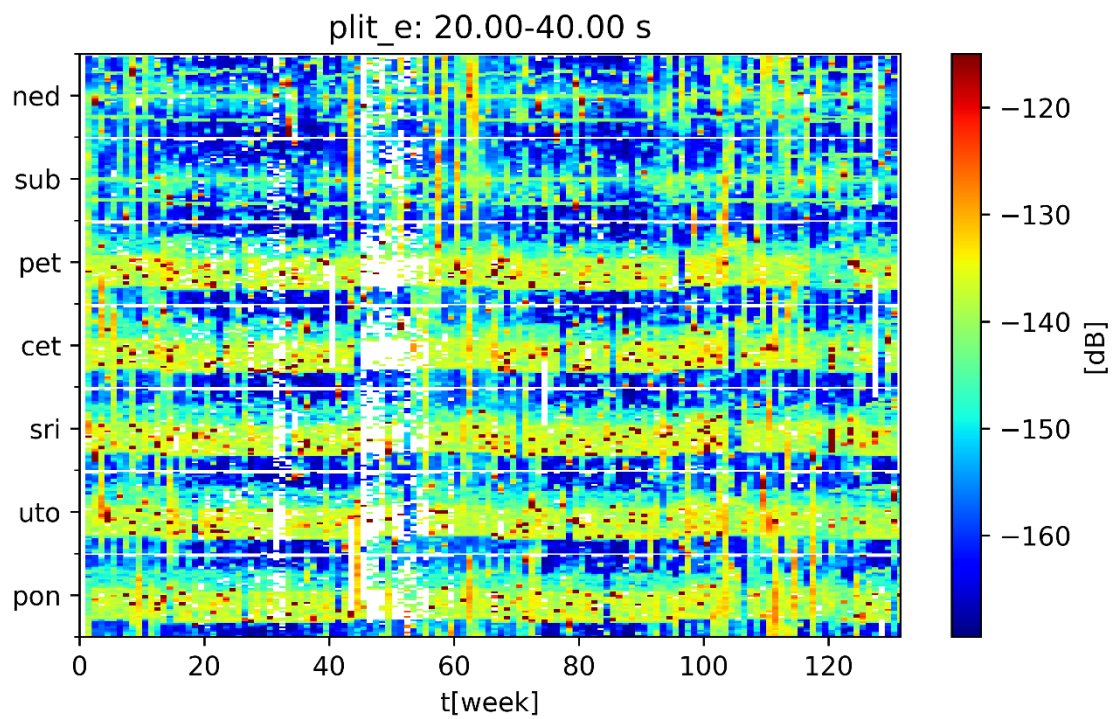
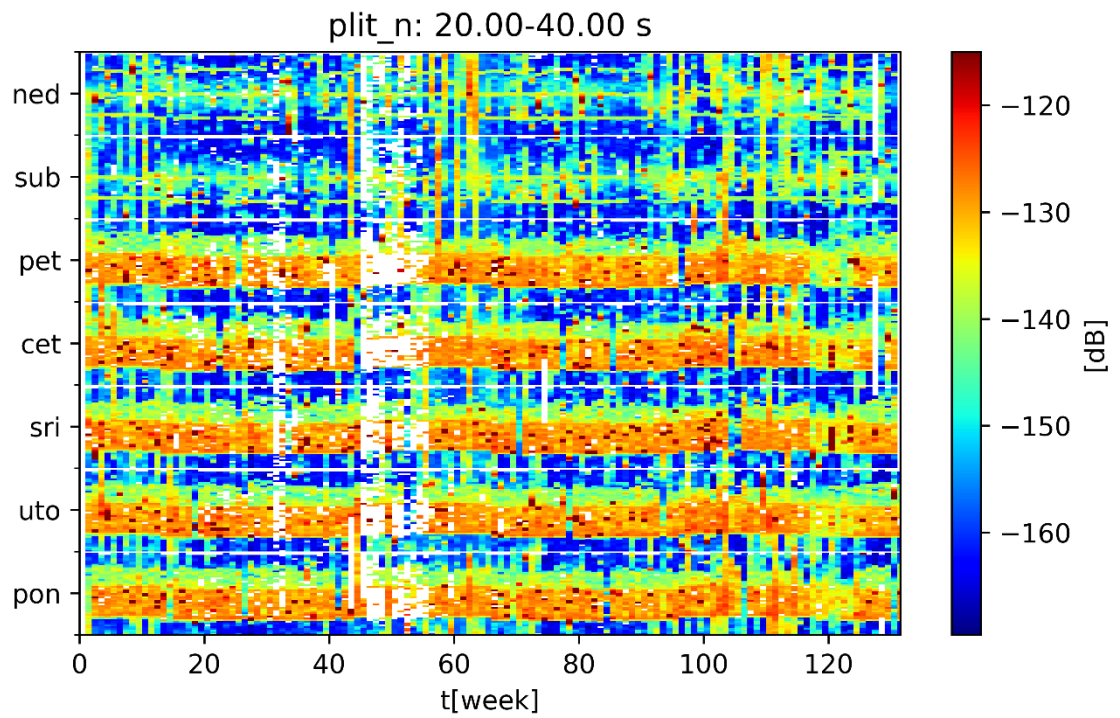
Slika D.1 Polusatna promjena medijana razine nemira na periodima od 20 do 40 s kroz tjedan i promatrano vremensko razdoblje na postaji STON horizontalnih komponenti.



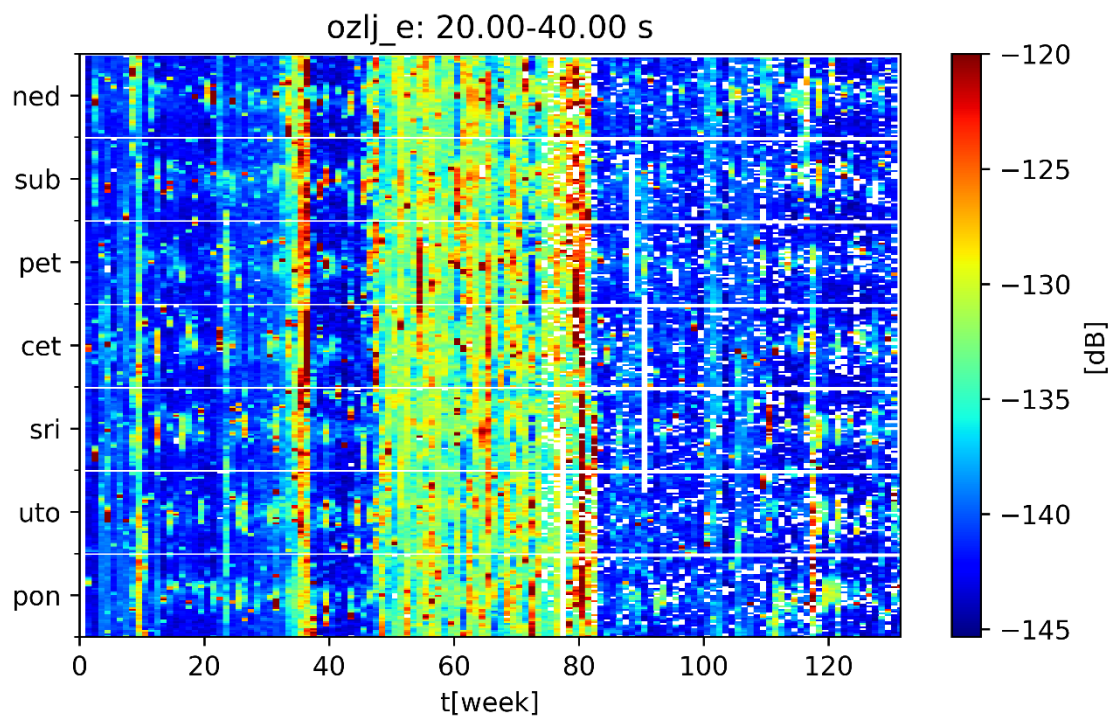
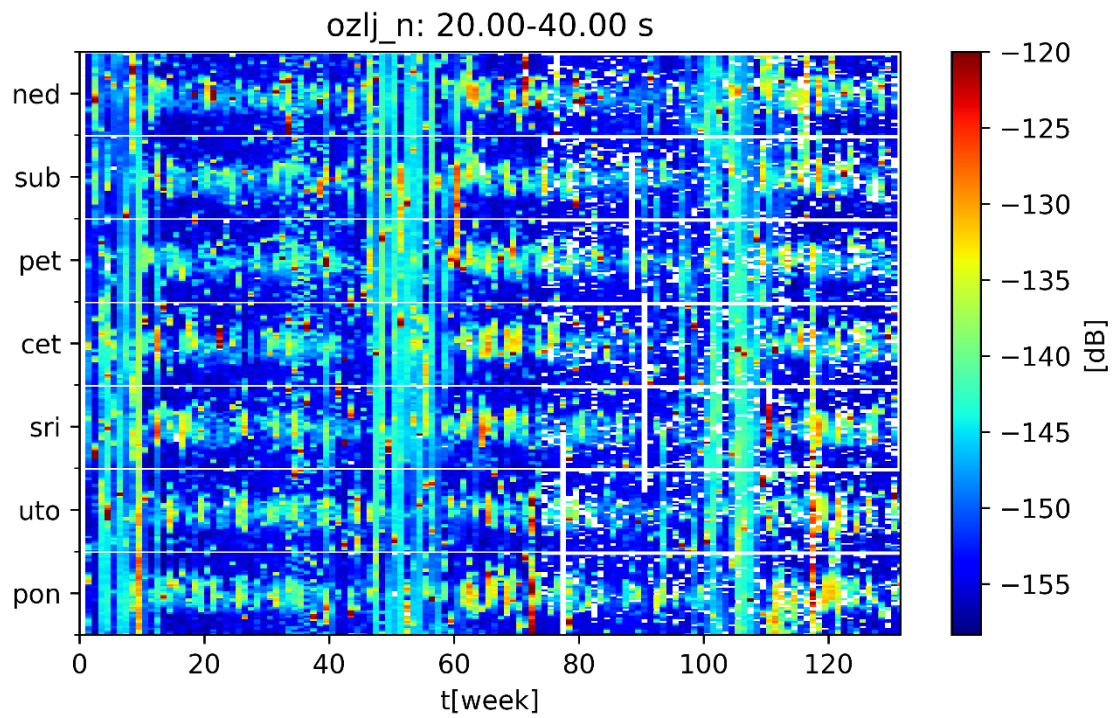
Slika D.2 Polusatna promjena medijana razine nemira na periodima od 20 do 40 s kroz tjedan i promatrano vremensko razdoblje na postaji KRJB horizontalnih komponenti.



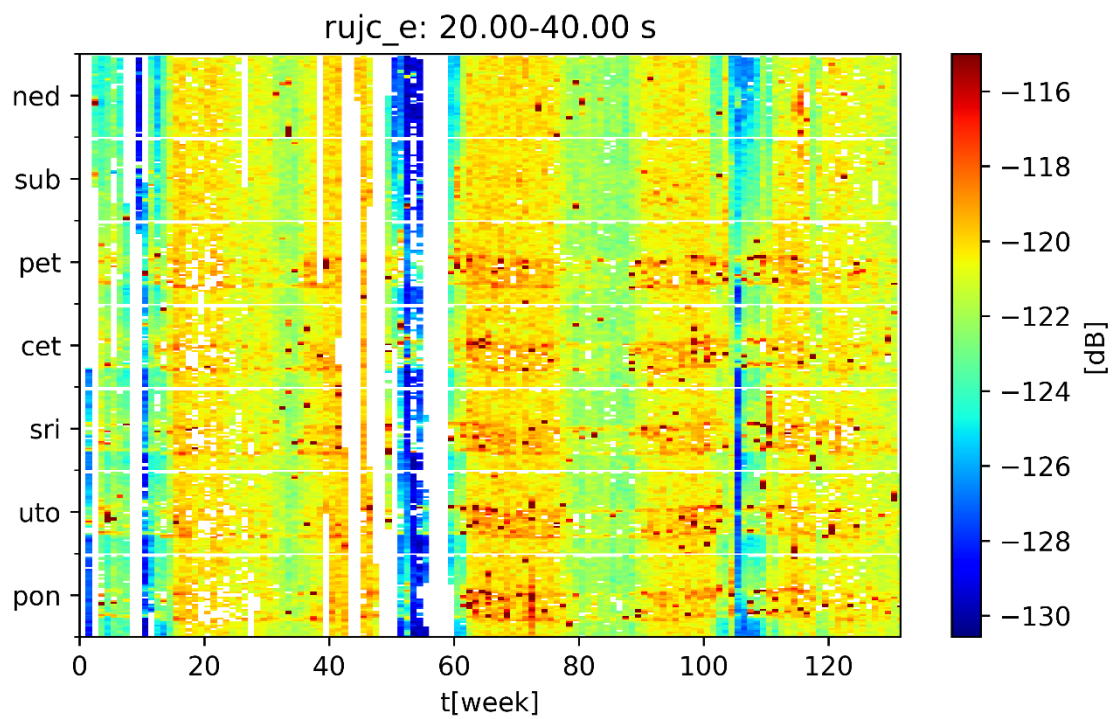
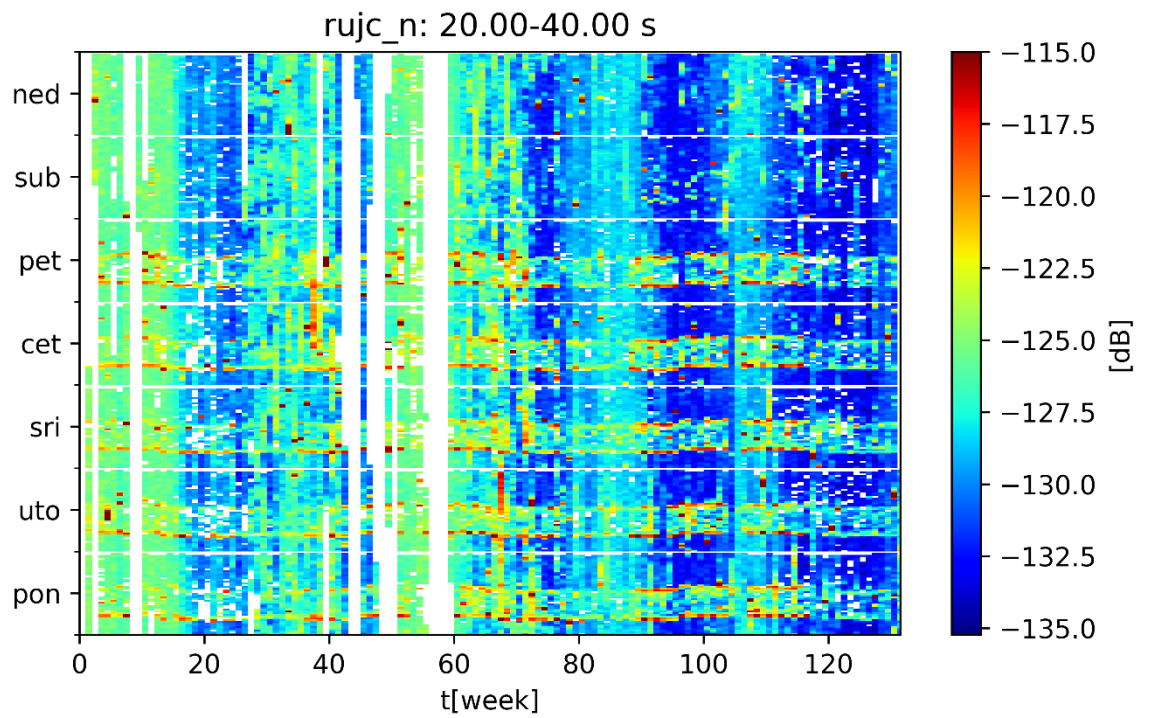
Slika D.3 Polusatna promjena medijana razine nemira na periodima od 20 do 40 s kroz tjedan i promatrano vremensko razdoblje na postaji UDBI horizontalnih komponenti.



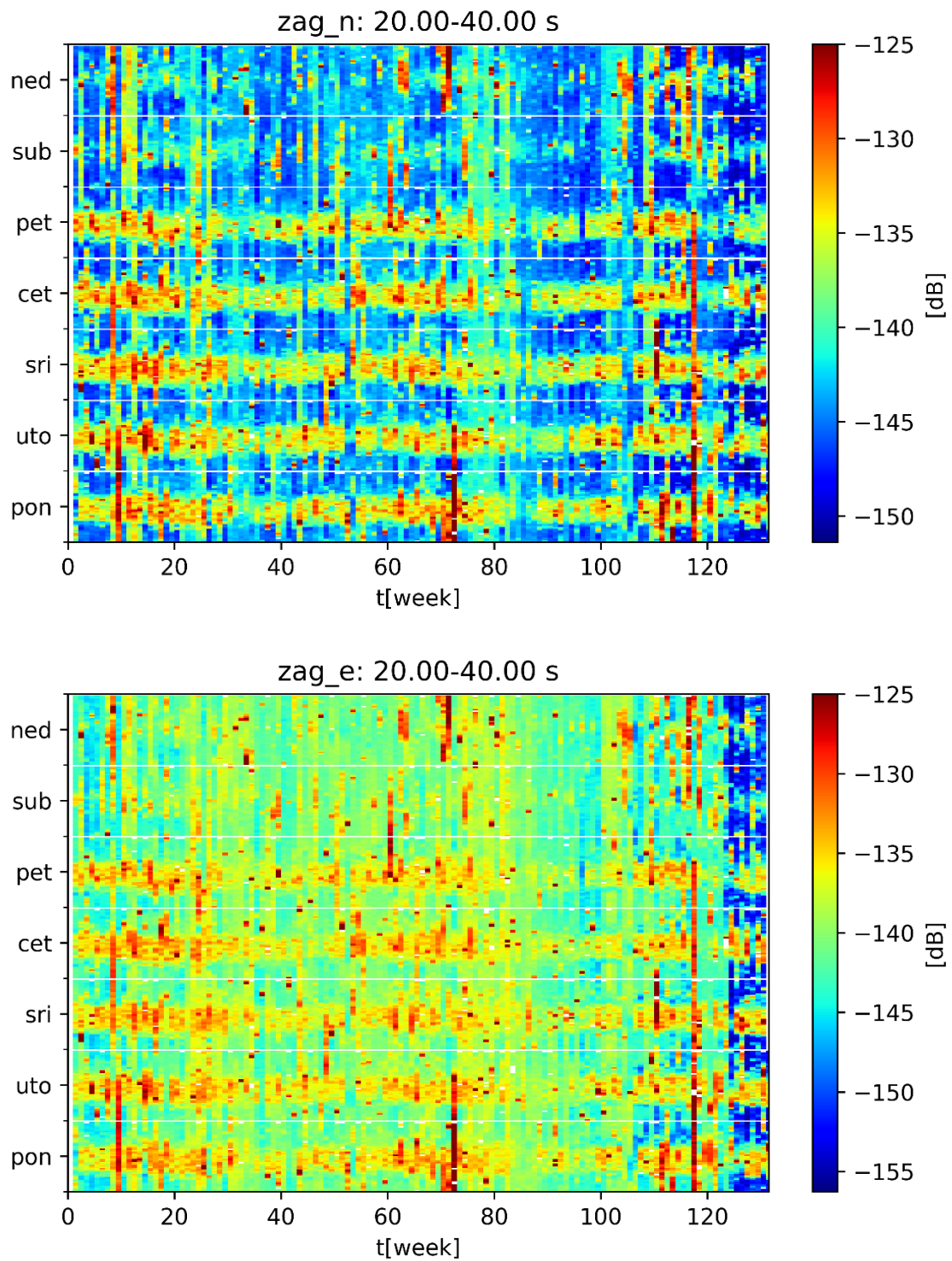
Slika D.4 Polusatna promjena medijana razine nemira na periodima od 20 do 40 s kroz tjedan i promatrano vremensko razdoblje na postaji PLIT horizontalnih komponenti.



Slika D.5 Polusatna promjena medijana razine nemira na periodima od 20 do 40 s kroz tjedan i promatrano vremensko razdoblje na postaji OZLJ horizontalnih komponenti.

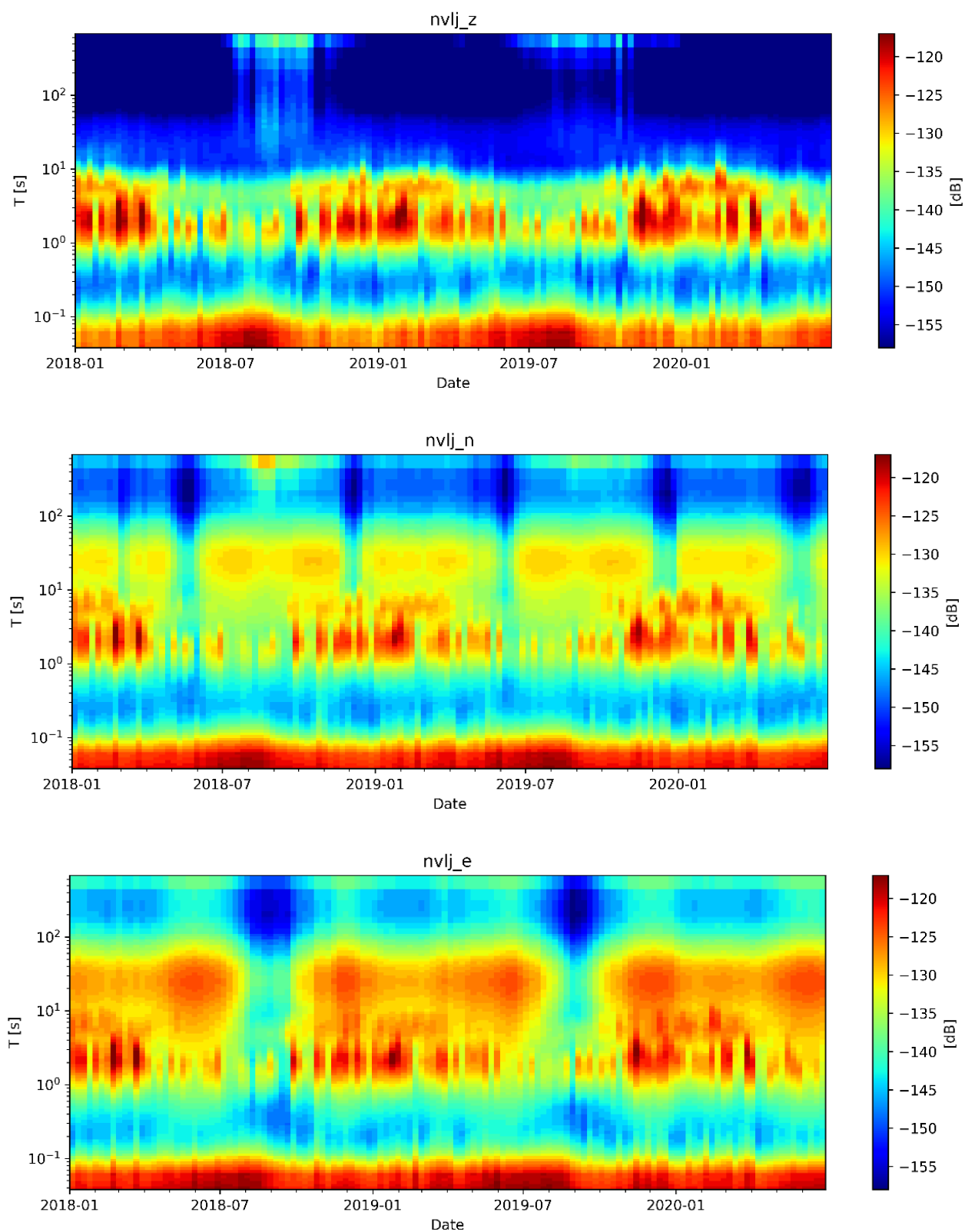


Slika D.6 Polusatna promjena medijana razine nemira na periodima od 20 do 40 s kroz tjedan i promatrano vremensko razdoblje na postaji RUJC horizontalnih komponenti.

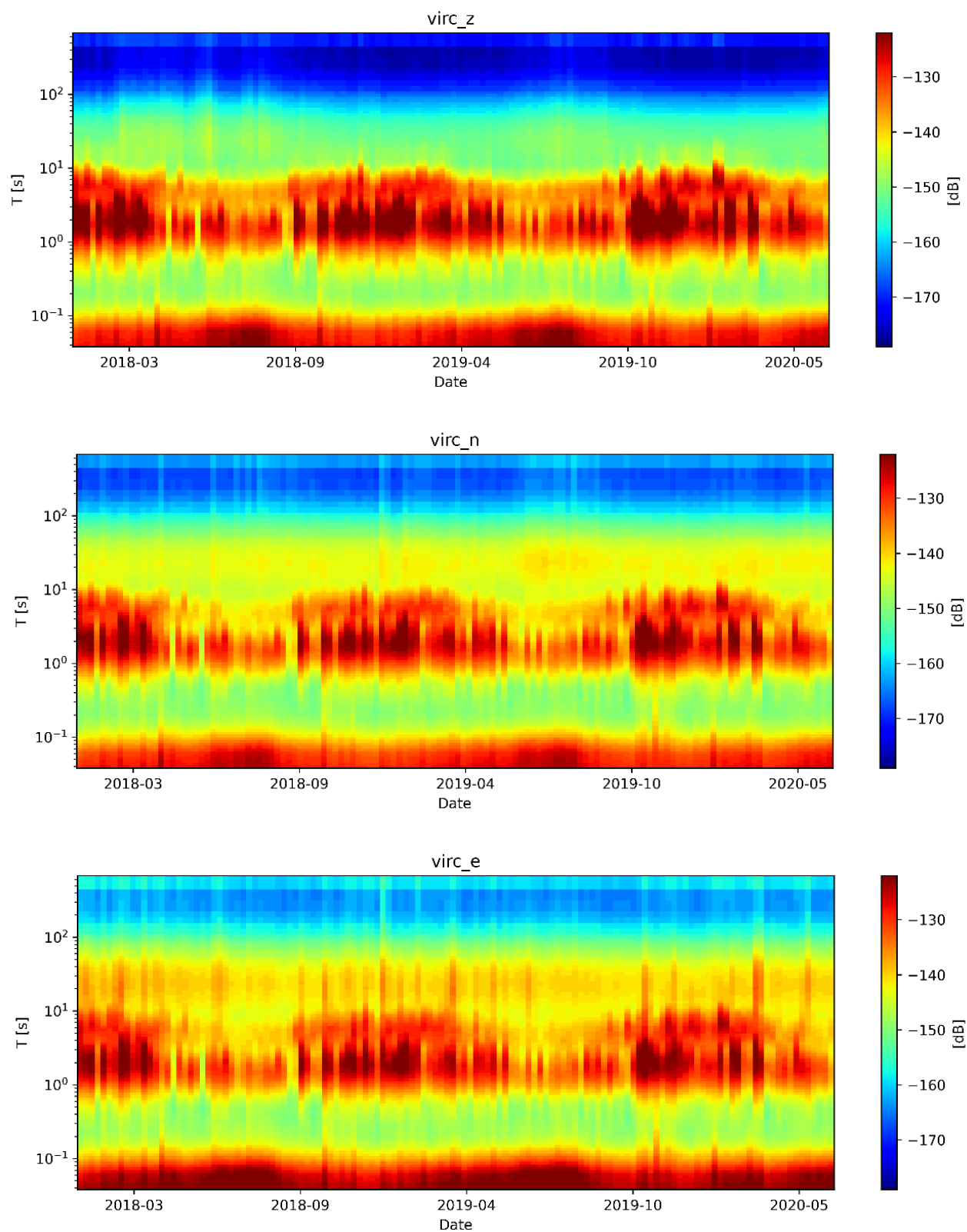


Slika D.7 Polusatna promjena medijana razine nemira na periodima od 20 do 40 s kroz tjedan i promatrano vremensko razdoblje na postaji ZAG horizontalnih komponenti.

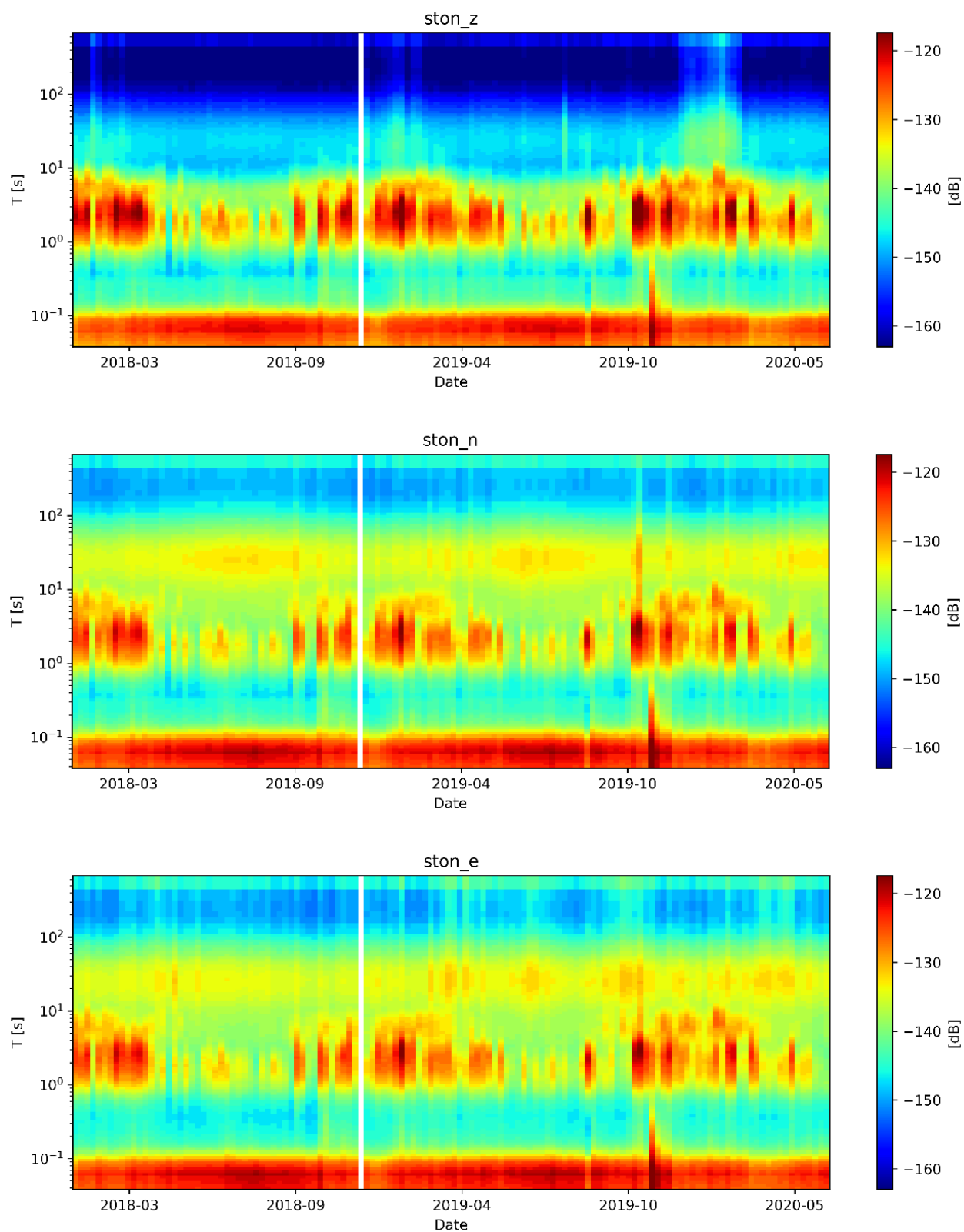
E Godišnji spektrogrami



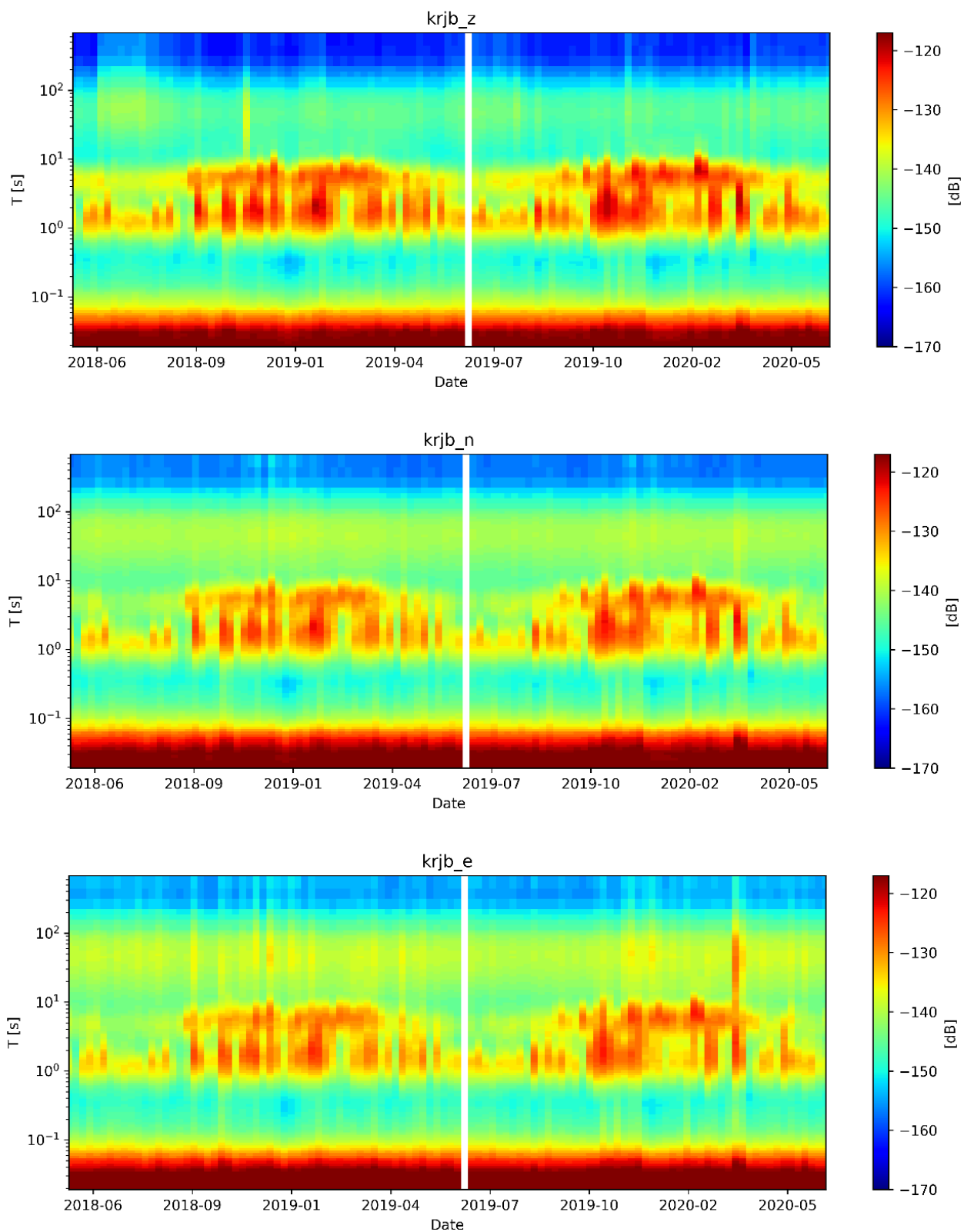
Slika E.1 Godišnji spektrogrami svih komponenti postaje NVLJ



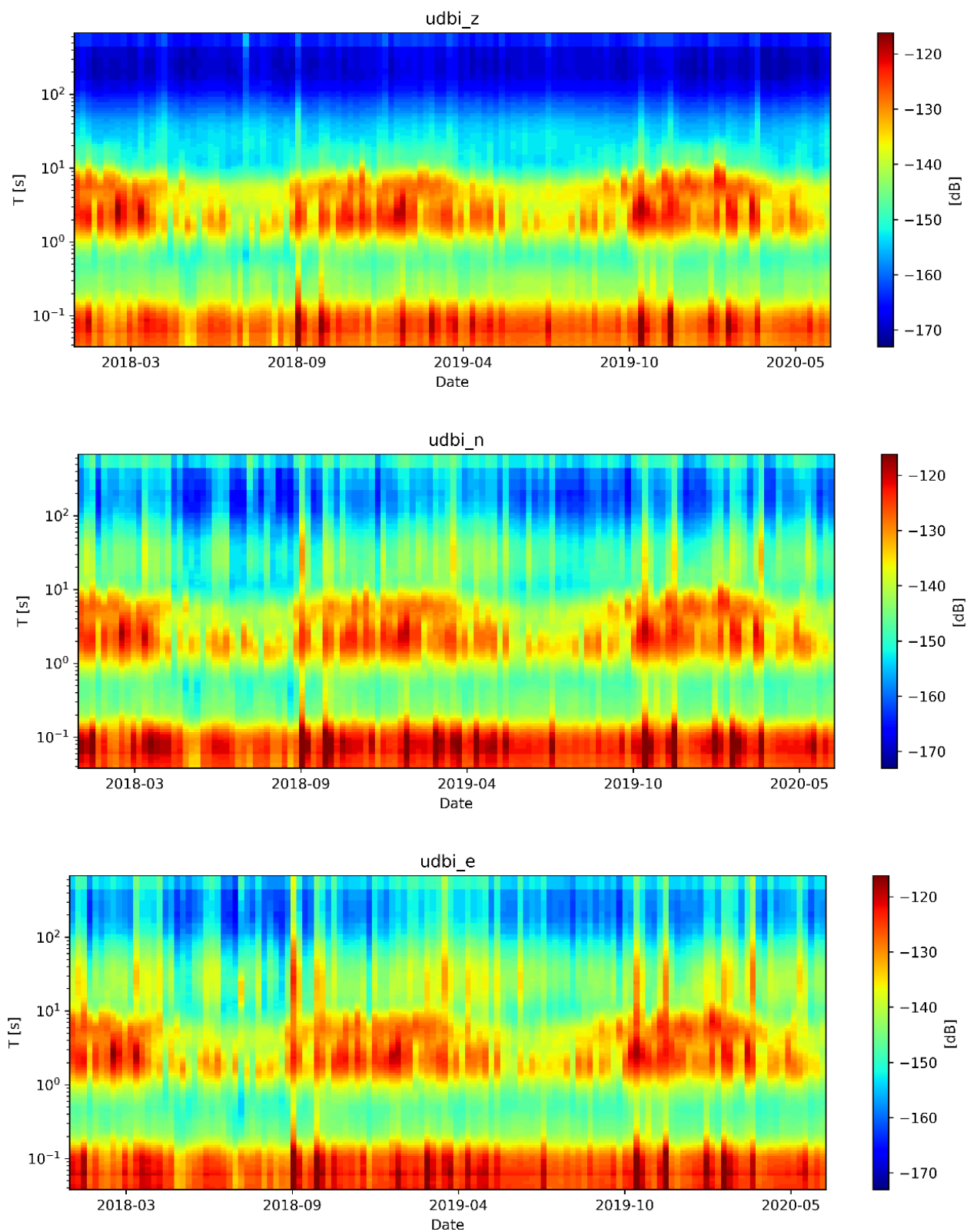
Slika E.2 Godišnji spektrogrami svih komponenti postaje VIRC



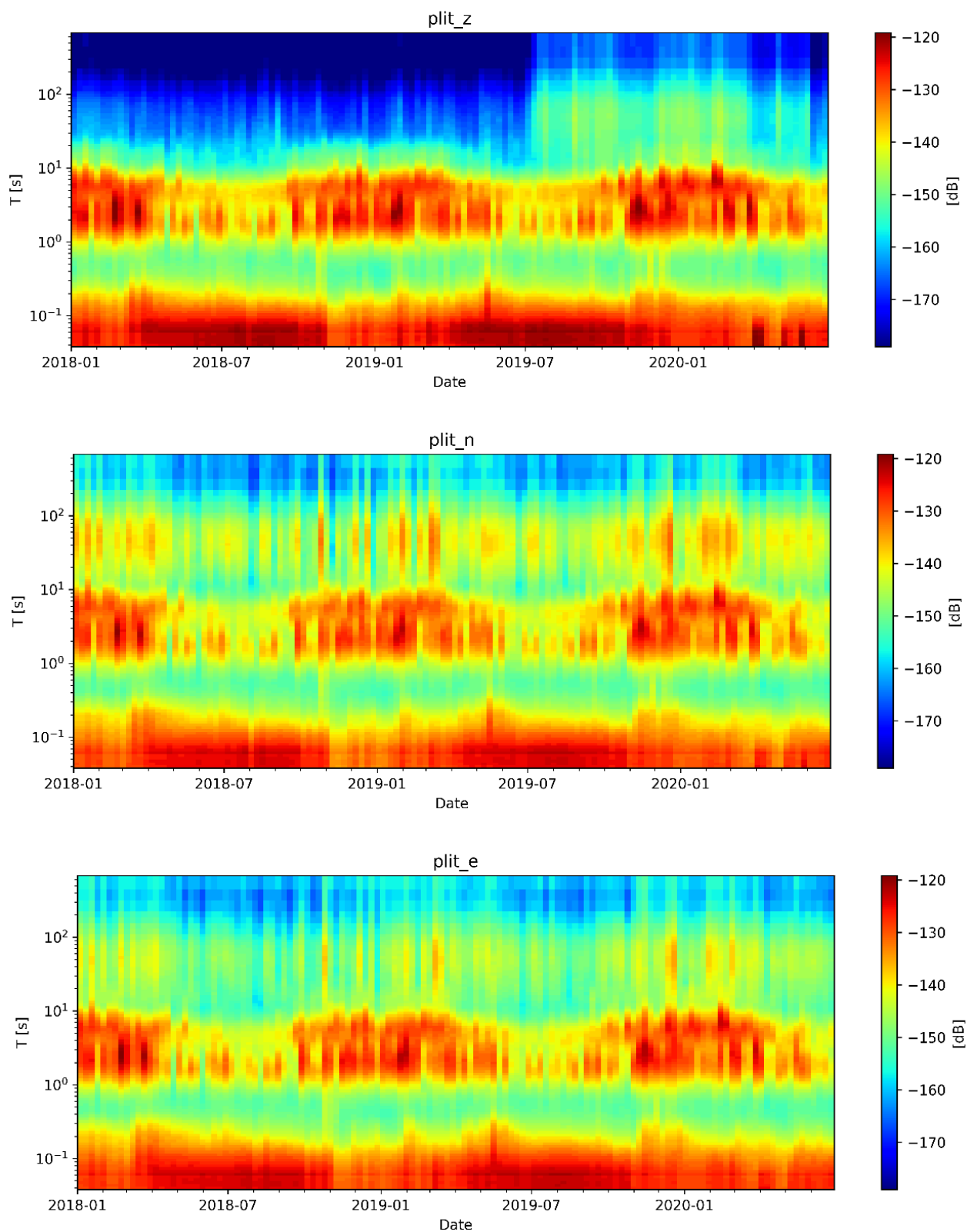
Slika E.3 Godišnji spektrogrami svih komponenti postaje STON



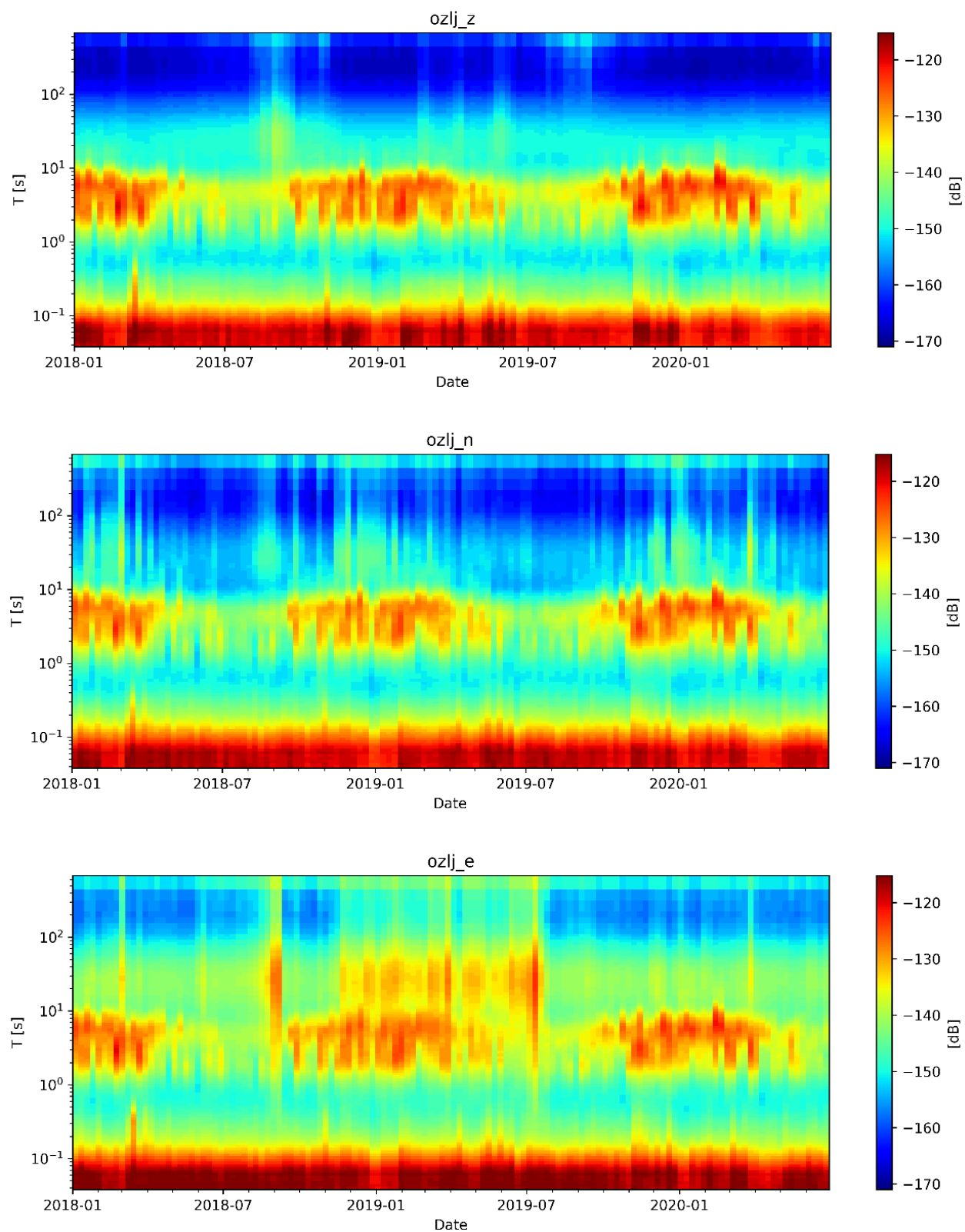
Slika E.4 Godišnji spektrogrami svih komponenti postaje KRJB



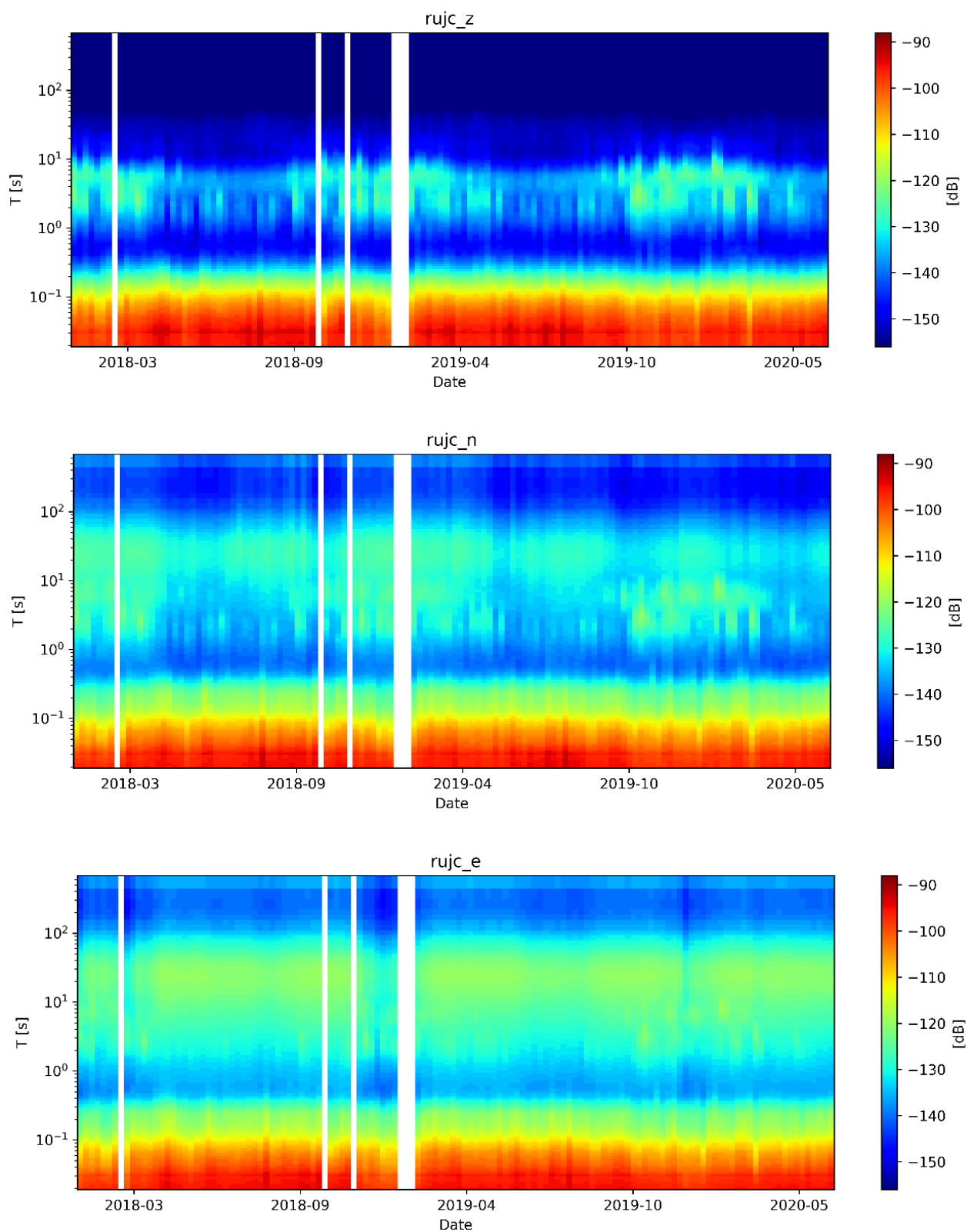
Slika E.5 Godišnji spektrogrami svih komponenti postaje UDBI



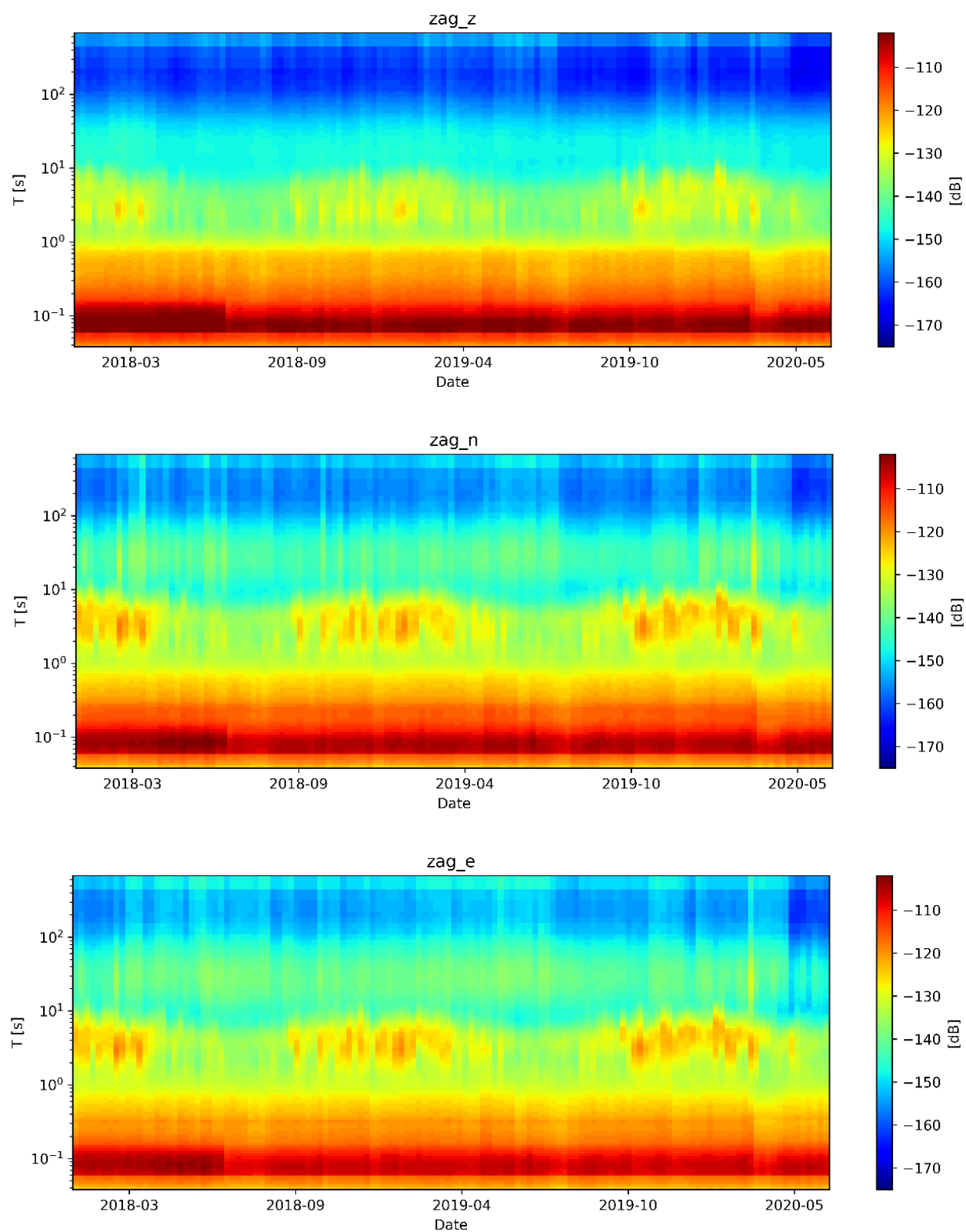
Slika E.6 Godišnji spektrogrami svih komponenti postaje PLIT



Slika E.7 Godišnji spektrogrami svih komponenti postaje OZLJ

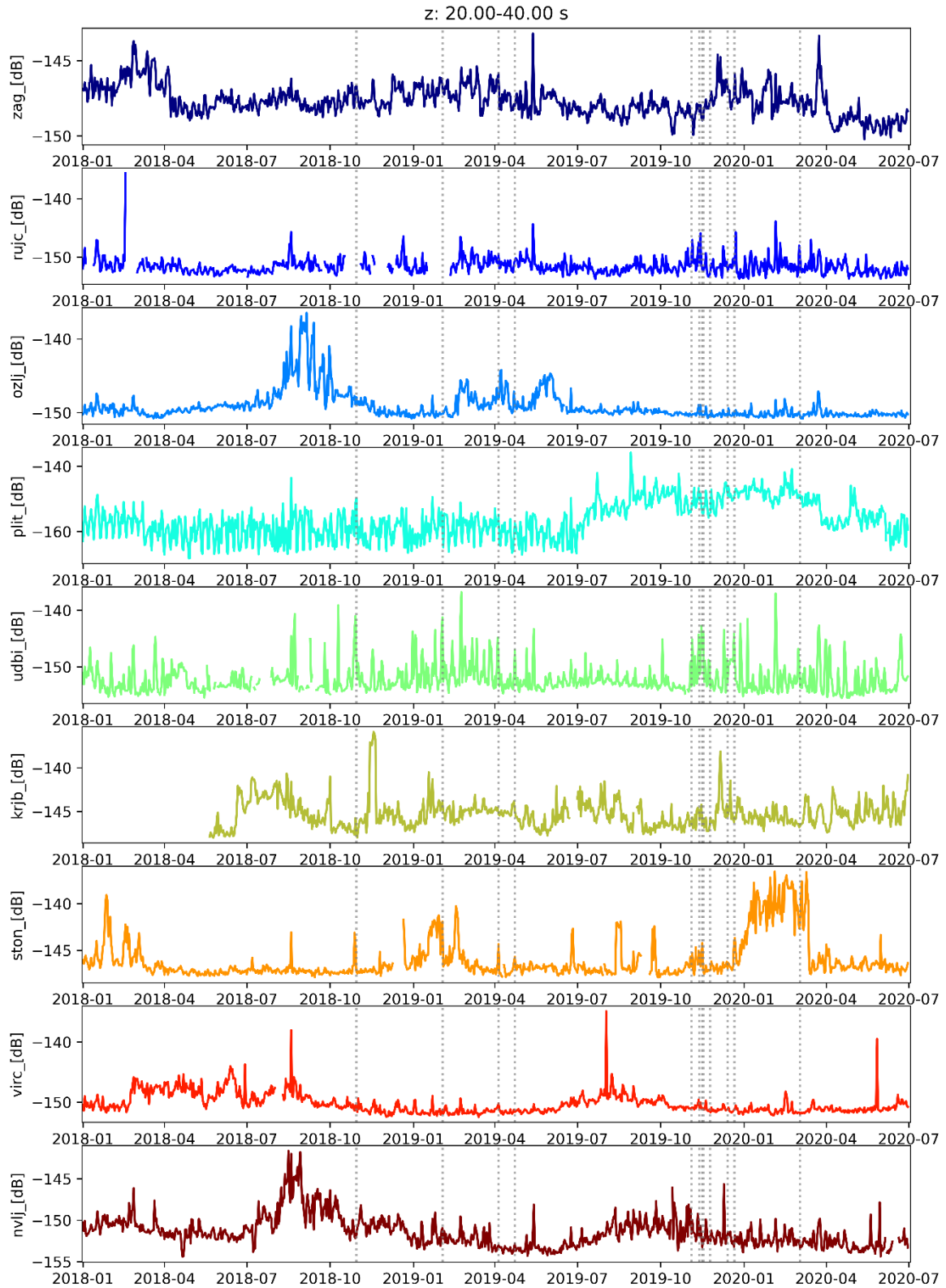


Slika E.8 Godišnji spektrogrami svih komponenti postaje RUJC

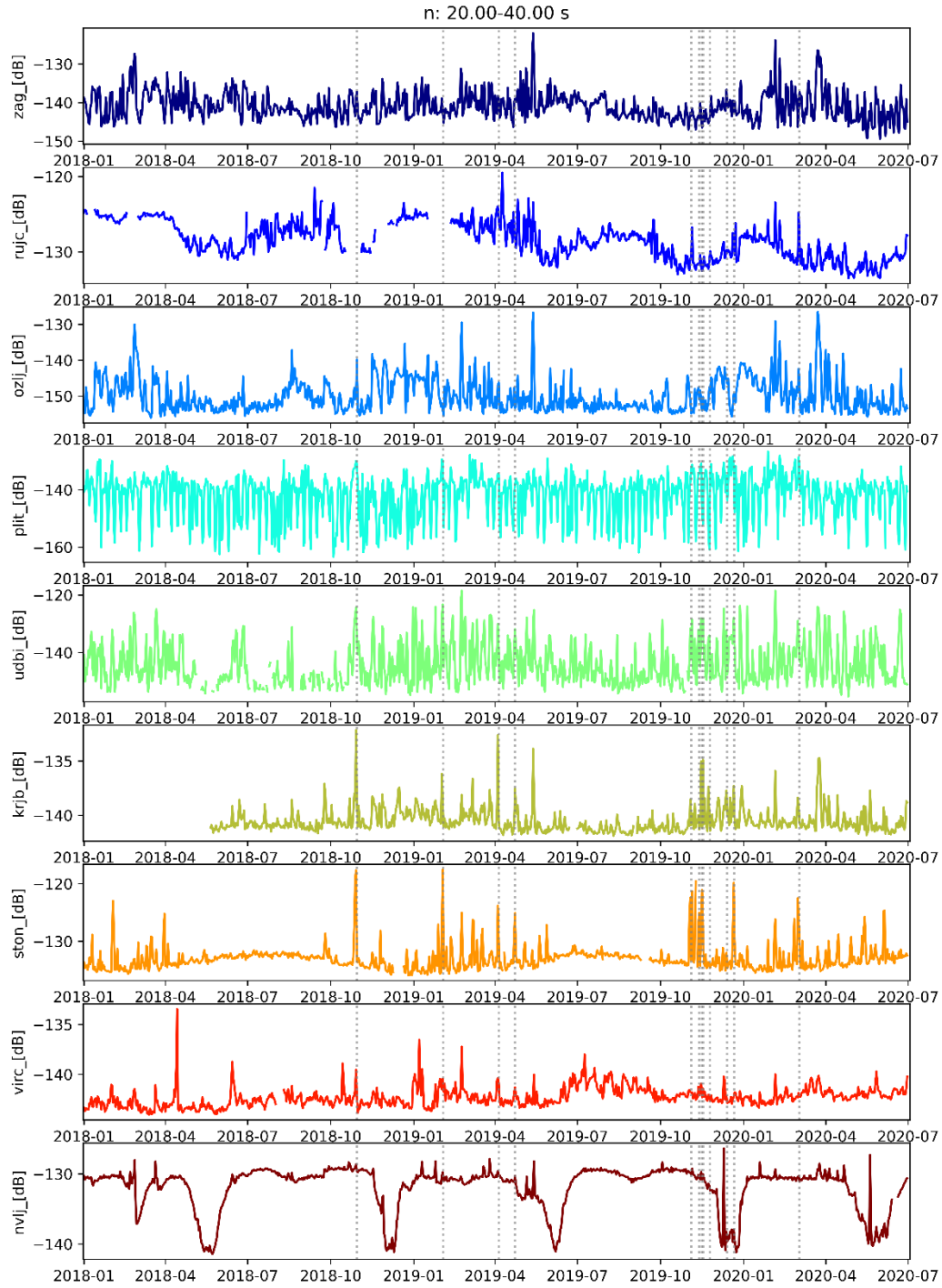


Slika E.9 Godišnji spektrogrami svih komponenti postaje ZAG

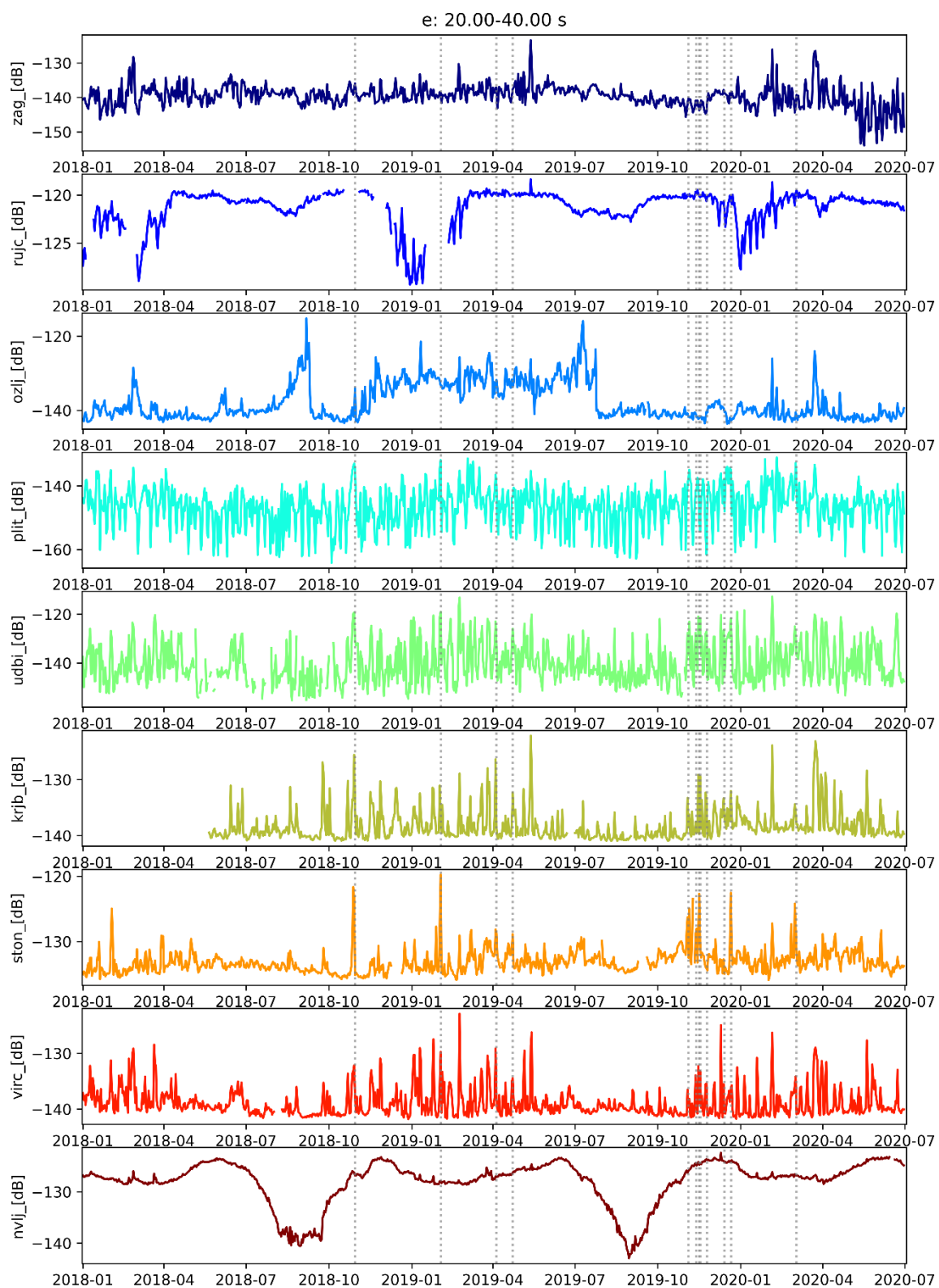
F Dnevne vrijednosti medijana PSD-a



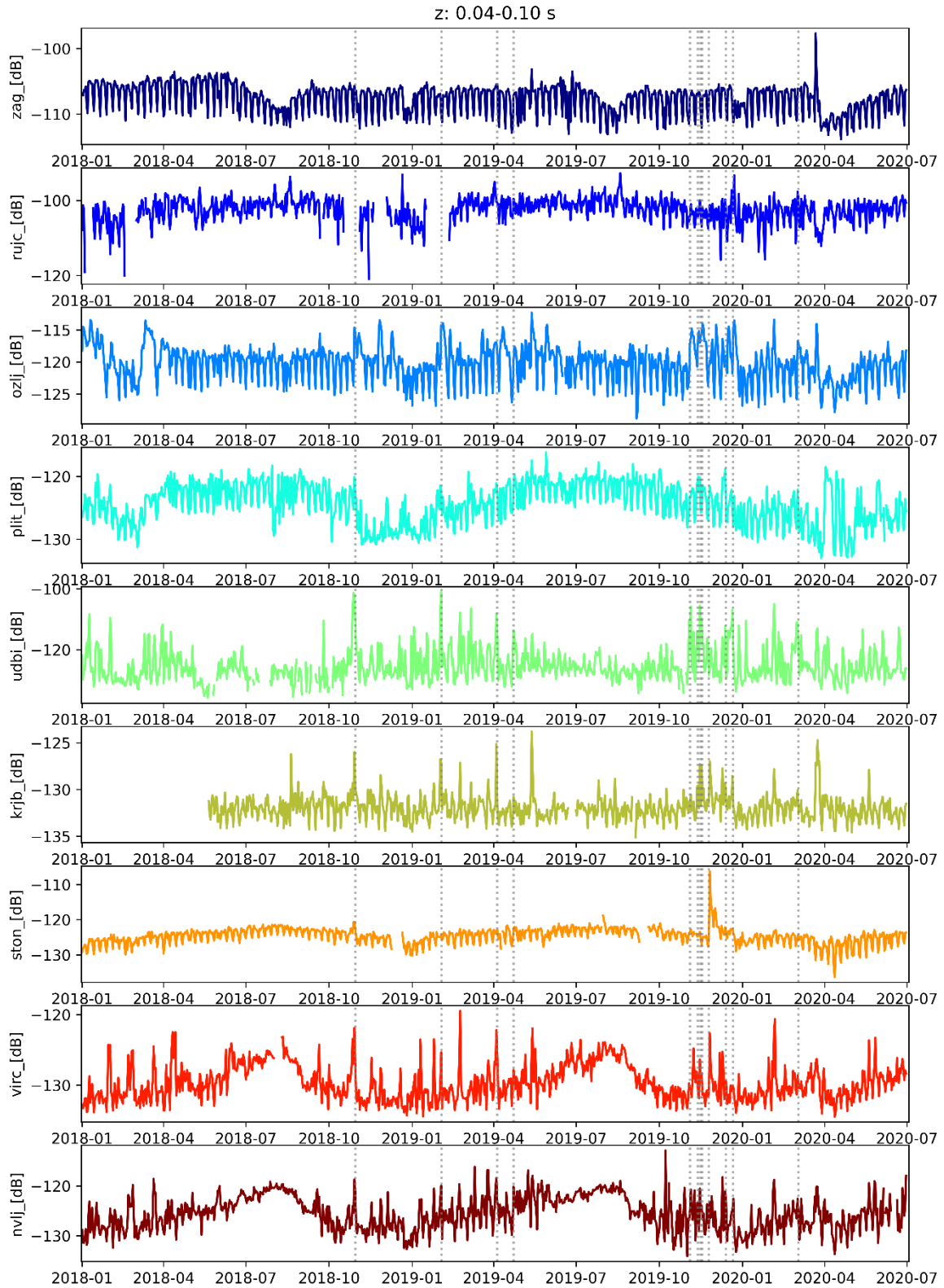
Slika F. 1 Promjena razine nemira vertikalne komponente za $T = 20 - 40$ s za cijelo razmatrano razdoblje na svim postajama. Sive linije označavaju početak epizode jakog juga.



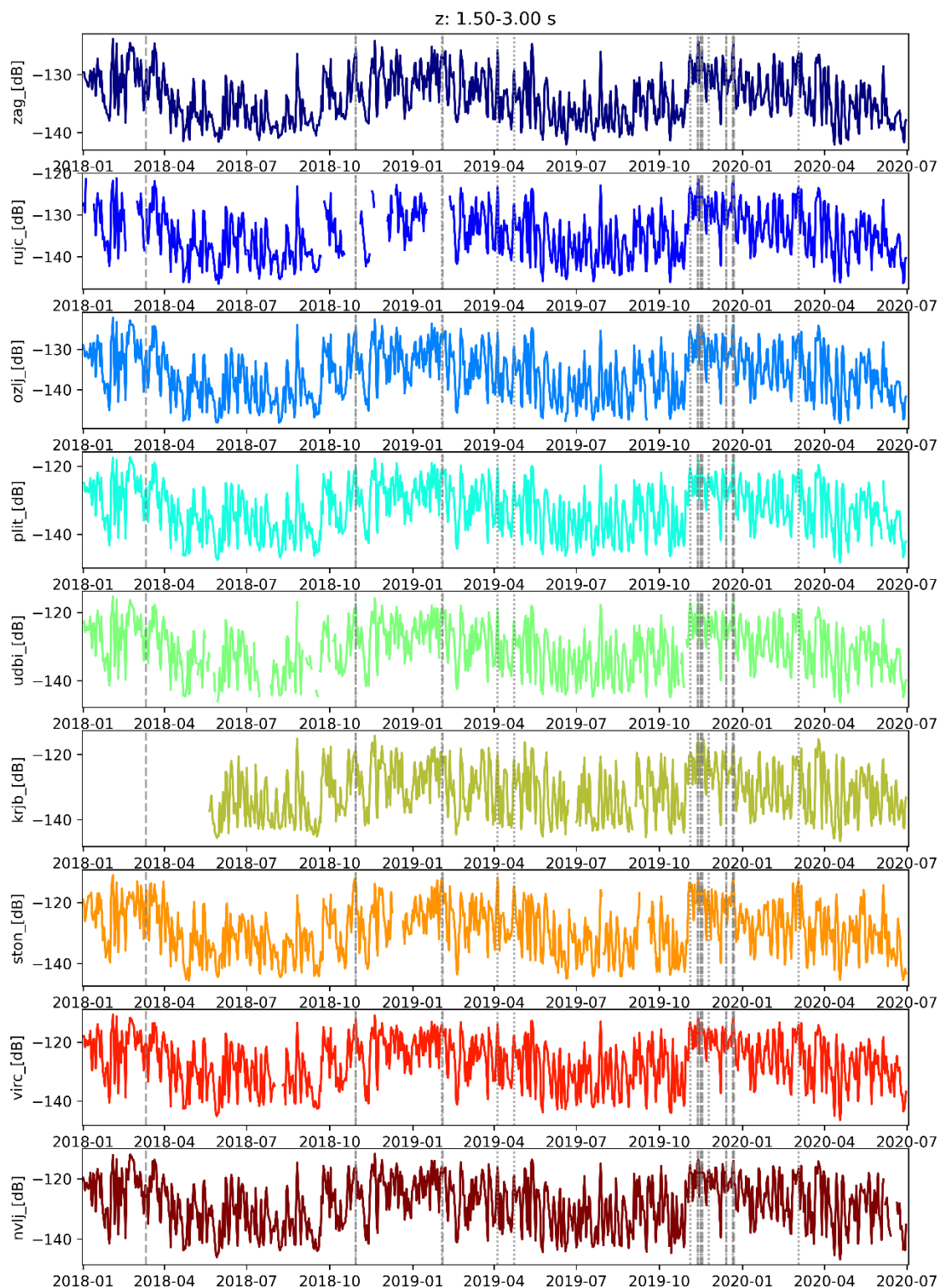
Slika F.2 Promjena razine nemira sjeverne komponente za $T = 20 - 40$ s za cijelo razmatrano razdoblje na svim postajama. Sive linije označavaju početak epizode jakog juga.



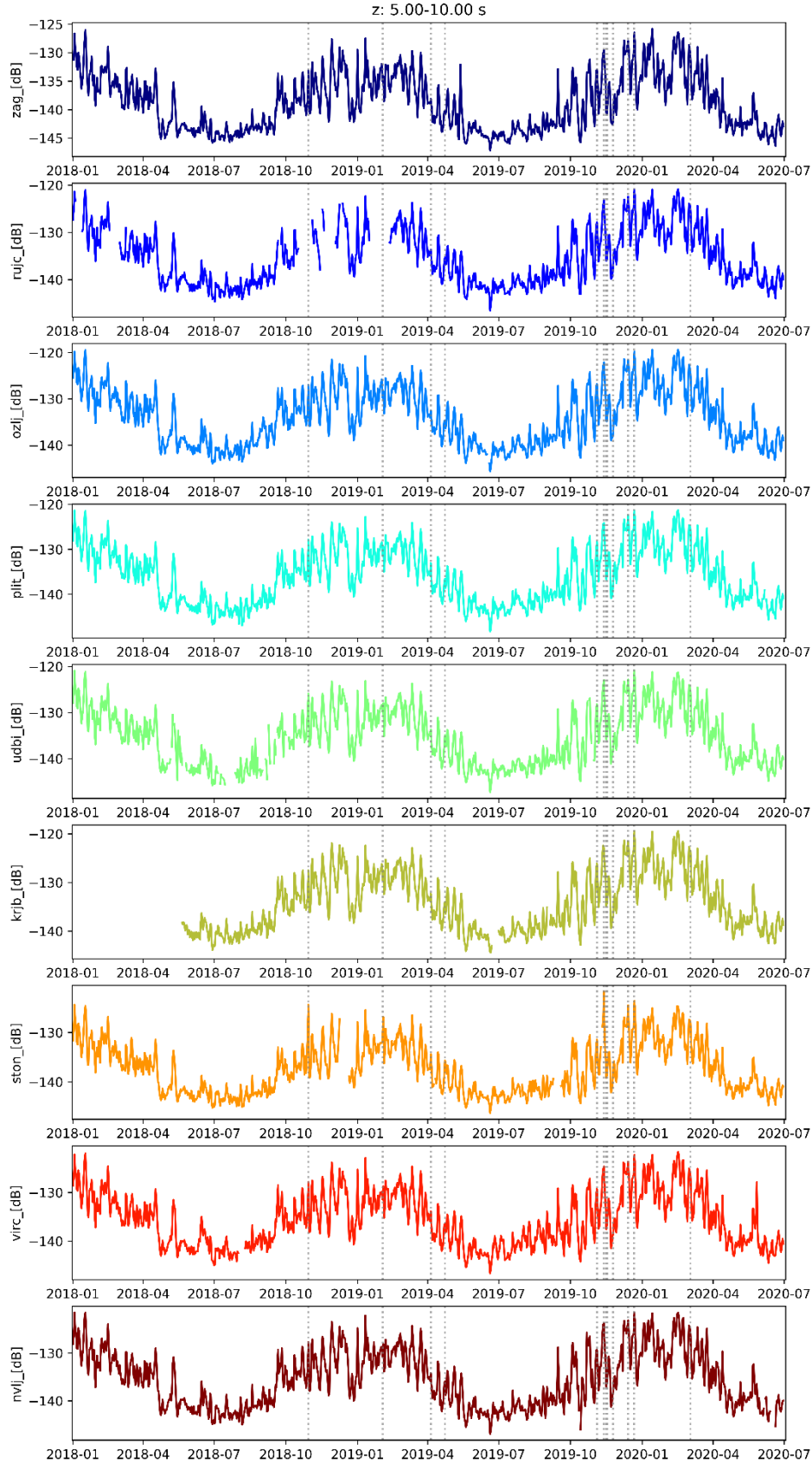
Slika F.3 Promjena razine nemira istočne komponente za $T = 20 - 40$ s za cijelo razmatrano razdoblje na svim postajama. Sive linije označavaju početak epizode jakog juga.



Slika F.4 Promjena razine nemira vertikalne komponente za $T = 0.04 - 0.1$ s za cijelo razmatrano razdoblje na svim postajama. Sive linije označavaju početak epizode jakog juga.

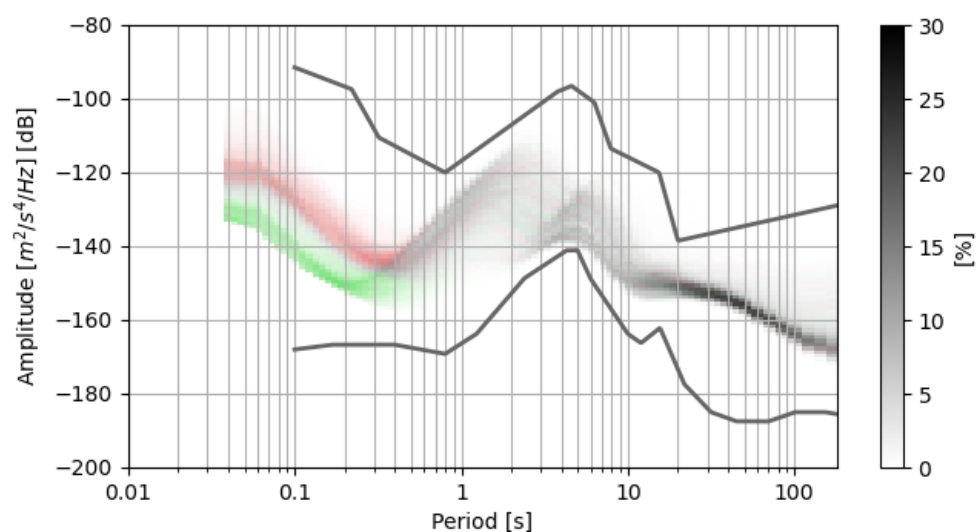


Slika F.5 Promjena razine nemira vertikalne komponente za $T = 1.5 - 3$ s za cijelo razmatrano razdoblje na svim postajama. Sive linije označavaju početak epizode jakog juga i olujnog uspora.

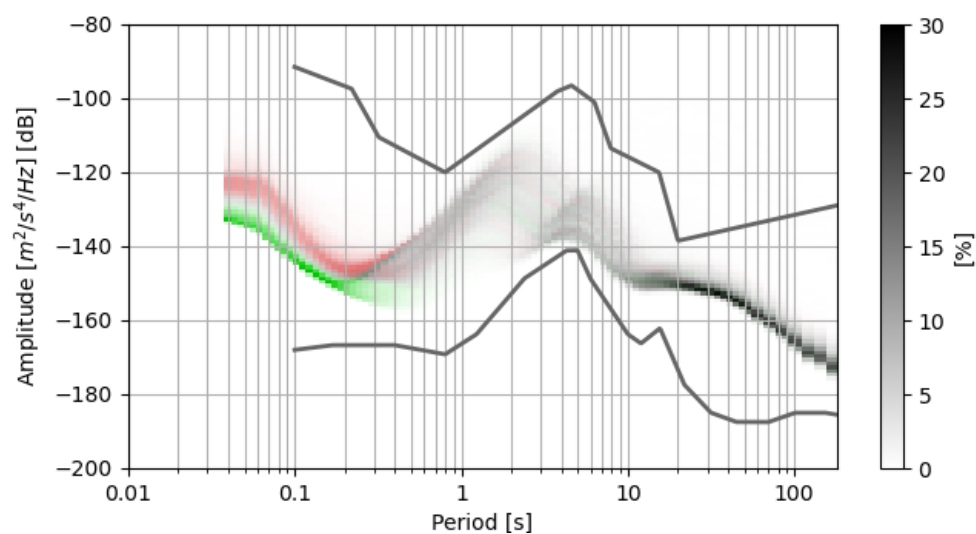


Slika F.6 Promjena razine nemira vertikalne komponente za $T = 5 - 10$ s za cijelo razmatrano razdoblje na svim postajama. Sive linije označavaju početak epizode jakog juga.

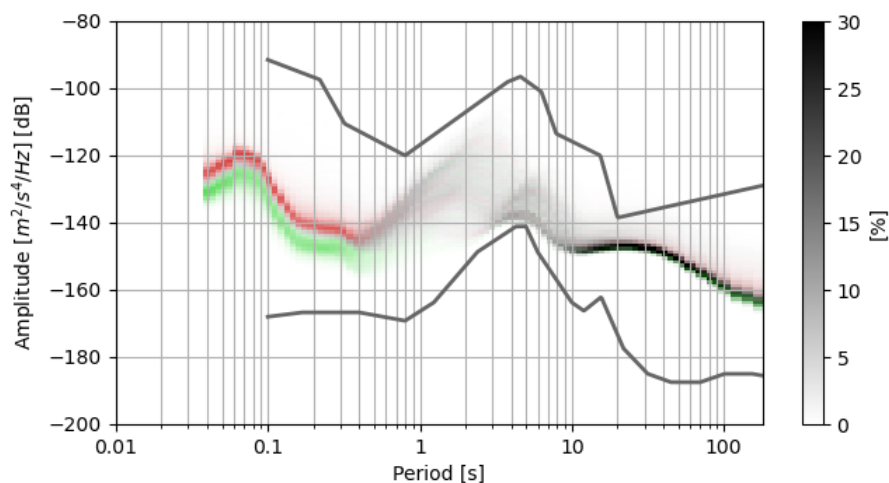
G Usporedba vrijednosti PDF-a danju i noću



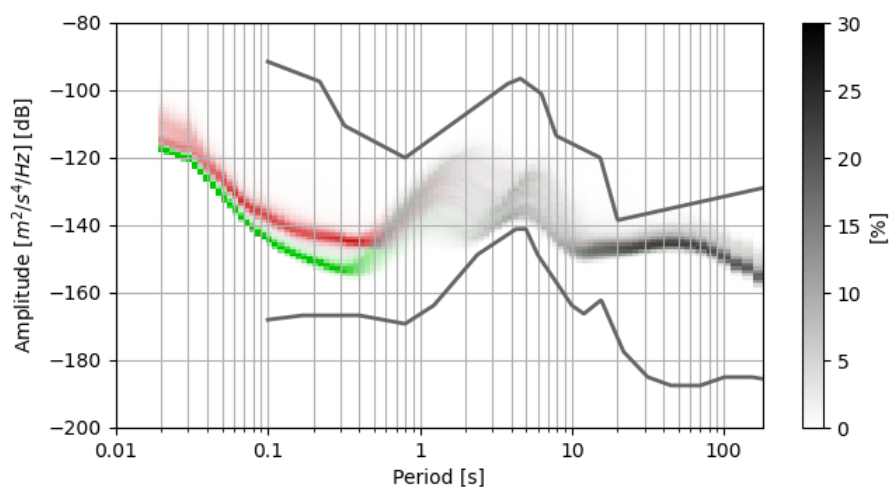
Slika G.1 Preklopljeni PDF graf za vrijeme radnih sati (5 – 15 UTC) označenog sa crvenom i noću (19 – 3 UTC) označenog sa zelenom bojom za seizmološku postaju NVLJ.



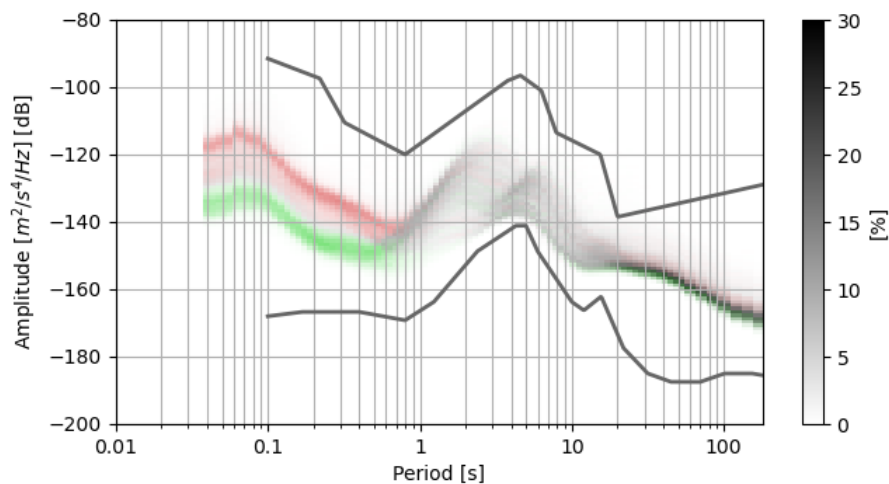
Slika G.2 Preklopljeni PDF graf za vrijeme radnih sati (5 – 15 UTC) označenog sa crvenom i noću (19 – 3 UTC) označenog sa zelenom bojom za seizmološku postaju VIRG.



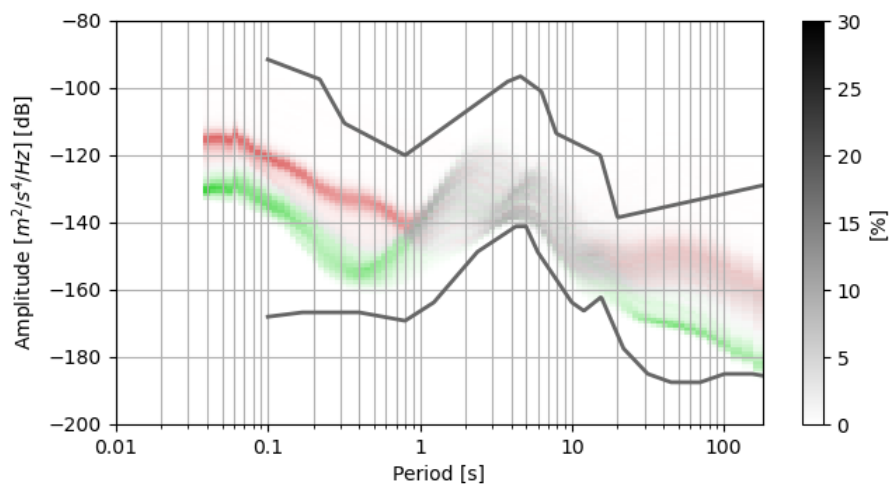
Slika G.3 Preklopljeni PDF graf za vrijeme radnih sati (5 – 15 UTC) označenog sa crvenom i noću (19 – 3 UTC) označenog sa zelenom bojom za seizmološku postaju STON.



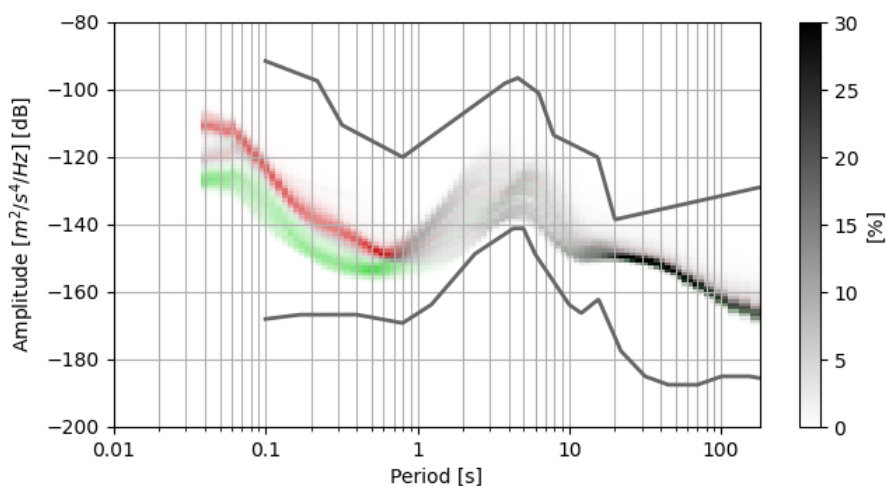
Slika G.4 Preklopljeni PDF graf za vrijeme radnih sati (5 – 15 UTC) označenog sa crvenom i noću (19 – 3 UTC) označenog sa zelenom bojom za seizmološku postaju KRJB.



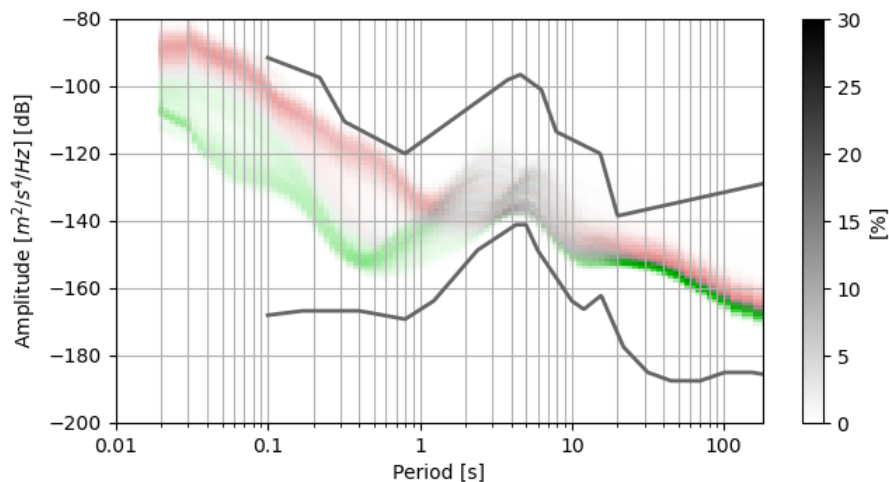
Slika G.5 Preklopljeni PDF graf za vrijeme radnih sati (5 – 15 UTC) označenog sa crvenom i noću (19 – 3 UTC) označenog sa zelenom bojom za seizmološku postaju UDBI.



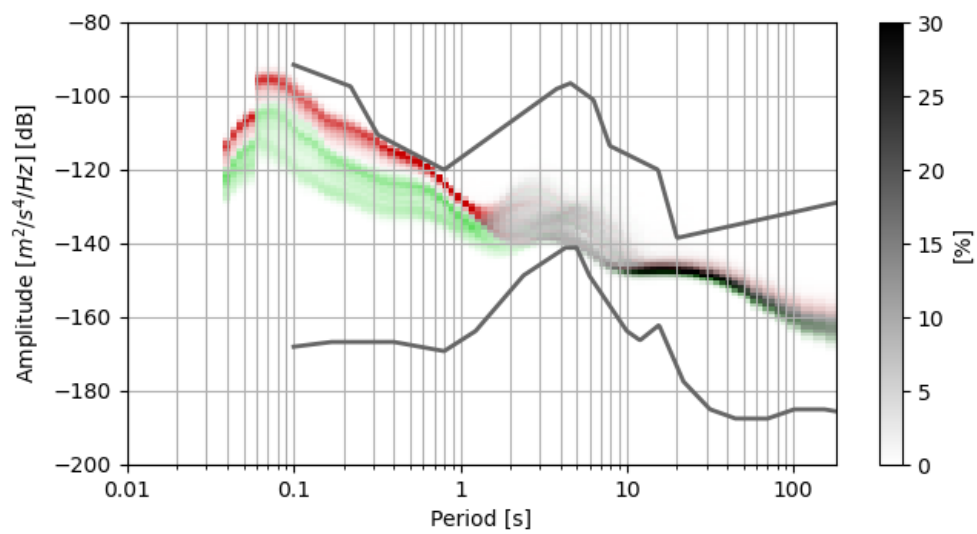
Slika G.6 Preklopljeni PDF graf za vrijeme radnih sati (5 – 15 UTC) označenog sa crvenom i noću (19 – 3 UTC) označenog sa zelenom bojom za seizmološku postaju PLIT.



Slika G.7 Preklopljeni PDF graf za vrijeme radnih sati (5 – 15 UTC) označenog sa crvenom i noću (19 – 3 UTC) označenog sa zelenom bojom za seizmološku postaju OZLJ.



Slika G.8 Preklopljeni PDF graf za vrijeme radnih sati (5 – 15 UTC) označenog sa crvenom i noću (19 – 3 UTC) označenog sa zelenom bojom za seizmološku postaju RUJC.



Slika G.9 Preklopljeni PDF graf za vrijeme radnih sati (5 – 15 UTC) označenog sa crvenom i noću (19 – 3 UTC) označenog sa zelenom bojom za seizmološku postaju ZAG.

H Popis kratica

DF	šiljak dvostruke frekvencije (engl. <i>double frequency peak</i>)
NHNM	novi model visoke razine šuma (engl. <i>new high noise model</i>)
NLNM	novi model niske razine šuma (engl. <i>new low noise model</i>)
PDF	funkcija gustoće vjerojatnosti (engl. <i>probability density function</i>)
PSD	gustoća spektra snage (engl. <i>power spectral density</i>)
SF	šiljak jednostruke frekvencije (engl. <i>single frequency peak</i>)