

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
Национален институт по геофизика, геодезия и география

гл. ас. Мария Стефанова Стойчева-Шамати

**„ВАРИАБИЛНОСТИ НА МАГНИТНОТО ПОЛЕ НА ЗЕМЯТА В
ULF ДИАПАЗОН. ИДЕНТИФИЦИРАНЕ ИЗТОЧНИЦИТЕ НА
СМУЩЕНИЯ.“**

Научна специалност: 4.4. Науки за земята
(01.04.08 “Физика на океана, атмосферата и околоземното пространство”)

АВТОРЕФЕРАТ

*на дисертация за присъждане на образователна и научна степен
„ДОКТОР“*

Научен консултант:
проф. дфн Петко Неновски

СОФИЯ

2014

Благодаря на проф. дфн Петко Неновски за това, че ме въведе в тази интересна и важна тематика и за съвместната работа през годините.

Благодаря на проф. дфн Дора Панчева за консултациите, напътствията и за подкрепата, която ми оказва.

Благодаря на проф. д-р Наталия Килифарска, доц. д-р Борислав Андонов, гл. ас. Пламен Мухтаров за проведените дискусии.

Съдържание:

Обща характеристика на дисертационния труд.....	3
Актуалност на изследванията	3
Цели и задачи на дисертационния труд	4
Структура и обем на дисертационния труд	4
ГЛАВА 1.....	5
Вариации на електричното и магнитното поле.....	5
Геомагнитни вариации.....	5
Генериране на електрични и електромагнитни сигнали.....	5
ULF наблюдения на магнитното поле	6
ГЛАВА 2.....	7
Методи за анализ	7
Дисперсионен анализ.....	7
Спектрален анализ	7
Метод на Хърст	8
Флуктуационен анализ с елиминиране на хода (detrended fluctuation analysis (DFA))	8
ГЛАВА 3.....	9
Изследване на електротелурични шумове.....	9
Теоретична обосновка.....	9
Спектрални характеристики на електротелуричен шум, регистриран в сеизмична станция „Крупник”	10
ГЛАВА 4.....	18
Вариабилности на магнитното поле. Скейлинг характеристики.	18
Основни резултати	30
Приноси на дисертационния труд:	31
Авторски публикации, включени в дисертационния труд:	32
Цитирания:	32
Авторски публикации извън дисертационния труд:	33
Участие в научни форуми (конференция/конгрес):	33
Участие в проекти:	34
Библиография:	34

Обща характеристика на дисертационния труд

Актуалност на изследванията

Изучаването на ULF спектъра (0.001-10 Hz) на електричното и магнитното полета на Земята, техните локални фрактални структури, спектрални и поляризационни характеристики са важен аспект от темата, касаеща идентифицирането на причинителите на смущения в тях. През последните петнадесет - двадесет години анализът на ULF спектъра на електричното и магнитното полета е особено актуален, тъй като се смята, че такива емисии, най-вероятно, се генерират директно от зоната на подготовка на геодинамични процеси (Fraser-Smith et al., 1990; Molchanov et al., 1992; Hayakawa et al., 1996). В по-голяма част от всички докладвани случаи на такива емисии, регистрирани от приземни измервания, става дума за сигнали, които нямат литосферен произход, а са свързани с взаимодействието на слънчевия вятър със земната магнитосфера. Тези процеси, имащи магнитосферен произход, се регистрират на Земята и заедно с йоносферните и имащите локален характер такива оформят електромагнитния шум в дадена точка на регистрация. Сигналите, имащи литосферен произход, са трудни за идентифициране на фона на общия електромагнитен шум. Поради тази причина, различните автори използват различни методи за анализ на тези ULF емисии, както класически, така и по-нетрадиционни: метод на директно търсене (Kopytenko et al., 1993; Ismaguilov et al., 2001; Prattes et al., 2008; Li et al., 2013), поляризационен метод (Hayakawa et al., 1996; Prattes et al., 2008), определяне на принципните компоненти и

сингулярен спектрален анализ (Principal component analysis and singular spectral analysis) (Serita et al., 2005), Power spectrum analysis, monofractal and multifractal analysis (Gotoh et al., 2003; Varotsos et al., 2003; Varotsos et al., 2009; Ida et al., 2005), DFA (detrended fluctuation analysis) (Chamati et al., 2009; Varotsos et al., 2009; Chamati et al., 2011; Nenovski et al., 2013) и класически статистически методи.

Подготовката на геодинамични процеси в литосферата, от електромагнитна гледна точка, не са добре изследвани. За изучаването на вариациите на магнитното поле, измерени в приземния слой, е необходимо цялостно изследване на комплекса от физически явления, възникващи при подготовката на геодинамичните процеси.

Цели и задачи на дисертационния труд

Основната цел на тази работа е да бъдат идентифицирани, чрез намиране на локалните им спектрални и скейлинг характеристики, възможните причинители на смущения във вариациите на електричното и магнитното поле на Земята, регистрирани в станция Крупник, България и станциите от магнитометричната мрежа SEGMA (Италия, Унгария, България) при ниска геомагнитната активност.

1. Изследване на електротелуричен шум (ULF диапазон), регистриран в СС“Крупник“, посредством намиране на неговите спектрални характеристики.
2. Изследване на локални и глобални характеристики на скейлинг индекса α , получен чрез прилагане на DFA (detrended fluctuation analysis) върху данни за ULF вариациите на магнитното поле, получени от магнитометричната мрежа SEGMA (South European GeoMagnetic Array in the frame of the *DEMETER* project).
3. Изследване на влиянието на геомагнитната активност върху поведението на скейлинг индекса.
4. Влияние на точката на измерване върху скейлинг индекса.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд се състои от увод, 4 глави, получени основни резултати и приноси, справка за авторски публикации, цитати, участия в научни форуми и проекти и библиография, обединени в 119 страници

В *увода* е направен кратък анализ на актуалността на проблемите, свързани с причинителите на смущения в магнитното поле на Земята.

В *първа глава* са дискутирани видовете вариации на електричното и магнитното поле на Земята, генерирането на електрични и електромагнитни сигнали и е направен обстоен обзор върху ULF наблюденията на магнитното поле и неговите локални и глобални вариации във връзка с геодинамични процеси.

Втора глава е посветена на методите за анализ, използвани в дисертацията.

В *трета глава* посредством проведен FFT анализ са изследвани спектралните характеристики на ULF електротелуричен шум, регистриран в СС“Крупник“ по време на периоди от 2003 – 2004 г. с ниска геомагнитна активност. Намерено е разпределението на спектралната плътност на сигнала в седем честотни интервала и е проследено влиянието на геомагнитната активност върху тях. Посредством проведен дисперсионен анализ са намерени дни с аномално поведение на електротелуричния сигнал и са дискутирани възможните източници на смущения.

Четвърта глава е посветена на вариационностите на магнитното поле в ULF (0.001 – 1 Hz) диапазона и изследване на неговите глобални и локални скейлинг характеристики,

чрез нелинеен метод за анализ DFA. Проследено е поведението на скейлинг индекса в различни времеви скали и влиянието на геомагнитната активност върху неговата динамика за хоризонталната и вертикалната компоненти на магнитното поле. Изследвано е влиянието на точката на измерване върху скейлинг индекса. Намерени са и са дискутирани уникални геомагнитни пулсации.

В **заключението** са представени основните резултати и приноси на дисертационния труд.

ГЛАВА 1

Вариации на електричното и магнитното поле

Геомагнитни вариации

В дисертцията накратко са описани познатите вариации на магнитното поле на Земята, причинени от външни за нея източници.

Генериране на електрични и електромагнитни сигнали

Геофизическите процеси и явления, включително и електромагнитните, представляват цялостно отражение на изменението на напрегнато-деформационните състояния в земната кора. Те са подложени на влиянието на много фактори. Електросъпротивлението на скалите до голяма степен се мени в зависимост от налягането и степента на соленост на разтворите, съдържащи се в скалите. Общоприети са няколко механизма на генерация на електрически сигнали в литосферата: електрокинетичен, пиезомагнитен и дислокация на дефектите в кристалната структура на скалите, който бива съпътстван с електрическа поляризация. При тези механизми се генерират силни електрични полета, които частично проникват до повърхността на Земята.

Друг важен аспект при изучаването на регулярните електротелурични токове, имащи магнитосферен-йоносферен генезис, е намирането на измененията на техните поляризационни характеристики.

Сигналите, свързани с литосферни процеси, могат да се класифицират като:

1. *Квазистатични полета*

- 1.1. Вариации на магнитното поле с продължителност около година, свързани с пиезомагнитни ефекти;
- 1.2. Вариации на електричното поле, свързани с динамиката на разтворите в скалите т.е. електрокинетичен произход;
- 1.3. Съпротивление на скалните породи с продължителност дни, месеци, години

2. *Променливи електромагнитни полета*

- 2.1. Електрични и магнитни импулси в честотния диапазон 0.001 - 1 Hz. Появата им трае от няколко дни до няколко седмици, като техен основен предполагаем източник са поляризационни ефекти при дислокация на дефектите в кристалната структура на скалите, електрокинетични ефекти и образуване на микропукнатини;
- 2.2. VLF/ULF емисии в честотния интервал 0.1 Hz -10 kHz. Биват генерирани от микропукнатини и/или електрокинетични ефекти;
- 2.3. Радиоизлъчвания в диапазона 0.2 kHz – 20 MHz. Дължат се основно на механизма на микропукнатините.

VLF-компонента на сигналите (до няколко десетки дори стотици kHz), свързана с литосферен произход, е по-обстойно изследвана, за разлика от тяхната ULF-компонента. Произходът ѝ се свързва основно с генерацията на микропукнатини в зоната на подготовка на земетресение. За съжаление тази компонента не винаги може да бъде

регистрирана на повърхността на Земята, защото затихването ѝ е много голямо. Обикновено се регистрира вторична VLF компонента. Изследването на ULF-компонента има предимство пред VLF, защото затихва по-бавно, поради голямата си скин дълбочина. На този етап тази компонента не е добре проучена. Отделянето и идентифицирането на ULF сигнали с различен генезис се осъществява на базата на вече изучените спектрални и поляризационни характеристики на геомагнитните пулсации с магнитосферен произход и локалните излъчвания от тектонично активни среди. Сложната във физическо отношение среда, както и съчетаването на локалните особености и глобалния характер на процесите, налагат единно разглеждане и отчитане на факторите, формиращи специфичните особености на наблюдаваните на земната повърхност ULF сигнали (Гулельми, 1989; Strakhov et al., 1994; Pilipenko et al., 1999; Hayakawa, 1999; Hayakawa et al., 2001).

Пулсациите с литосферен произход се отличават от тези с магнитосферен такъв по поляризационните си характеристики. Разработени са критерии и методи за определяне на произхода на ULF сигналите, които се основават на някои специфични черти на сеизмичните сигнали и по-точно, че в зависимост от съпротивлението на дадена среда и според това как се разпространяват нискочестотните вълни в средата, може да се определи техния произход (Pilipenko et al., 1999, 2003; Бойчев и Неновски, 2003).

Цялостно изследване на произхода на ULF сигнали може да бъде осъществено с анализ на фазовите и поляризационните им характеристики, както и с прилагането на градиентни методи, респективно с определяне на принципните компоненти. Комплексни и едновременни измервания на електричното и магнитното поле в геомагнитни обсерватории на високи и ниски ширини и от спътници позволява да се следи пространственото разпределение на полето на геомагнитните пулсации, техния енергиен баланс и връзката им със състоянието на магнитосферата. Такава диагностика позволява да се изследват механизмите за генерация на ULF вълни и процеси в околоземното пространство и на земната повърхност.

ULF наблюдения на магнитното поле

ULF спектърът на магнитното поле представлява интерес за световната научна общност вече няколко десетилетия. Смята се, че такива нискочестотни/дълговълнови процеси биха могли да бъдат генерирани в литосферата и успешно регистрирани на земната повърхност. Възможен смутител на магнитното поле могат да бъдат процеси, имащи йоносферен/магнитосферен, литосферен и такива от битово-индустриален характер.

Подобни изследвания са проведени и публикувани от много автори, а също така са проведени много научни конференции, симпозиуми и т.н. на тази тема.

Докладвани са нарастващи и намаляващи амплитуди на геомагнитното поле още през средата на '60-те години (Moore, George W., 1964; Park et al., 1993).

Разбира се, голямо значение за идентифициране на тези аномални сигнали (вариации), през годините, е изиграло и развитието на научната апаратура, което е дало по-добра възможност да бъдат изолирани и разграничени „фалшивите“ от тези с природен произход смутители. Park et al., (1993), са показали в диаграма, която включва периода 1890 – 1990г., как с подобряване качеството (прецизността) на научната апаратура и изобщо на научното познание по тази тема, рязко спада броят на „аномалните“ амплитуди на тектоно-геомагнитни събития, след като смущенията от йоносферен/магнитосферен произход са били идентифицирани и изключени. С навлизането на протонните магнитометри качеството на експерименталните данни става много по-добро.

По-нататък в дисертацията е направен обстоен литературен обзор, касаещ локалните вариации на магнитното поле на Земята и тяхната връзка с подготовката на геодинамични процеси, обхващащ литературни източници до 2014 г.

ГЛАВА 2

Методи за анализ

Дисперсионен анализ

Дисперсионният анализ е широко разпространен класически метод за изследване поведението на времеви редове за определен интервал от време. Дисперсията на случайна величина е мярка за нейното разпределение. Методът се състои от няколко стъпки.

Определя се стандартната девиация σ на времевия ред:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

където x_i е измерената стойност, $\bar{x}$ е средната стойност, а n е броят на измерванията. Определя се статистическата грешка. Използваният подход в Глава III е базиран на пресмятането на стандартните девиации σ_i за N равни последователни интервали от време (3600 сек.) Вzeti заедно, те формират целия изследван времеви интервал. За аномални стойности на времевия ред, може да се говори тогава, когато стандартната девиация се отклонява от средната си стойност с $\pm \sigma$.

Спектрален анализ

Спектралният анализ е метод за определяне вида на корелациите на флуктуациите във времевите редове. Спектърът на времевия ред $X(t)$, с дължина N , се получава посредством стандартен Фурие анализ в резултат на пресмятане на дискретната Фурие трансформация:

$$S(f) = \sum_{t=0}^{N-1} X(t) e^{-2\pi i f t}.$$

В нашите изследвания се използва FFT, което редуцира значително времето необходимо за извършване на изчисленията. Спектърът описва как се разпределят амплитудите на времевия ред по честоти и от поведението му може да направи извод за периодичността на реда. Фракталността на времевия ред се определя от зависимостта на спектъра от честотата по степенен закон

$$S(f) \sim f^{-\beta},$$

Скейлинговата (спектралната) експонента β е мярка за мощността и вида на структурата на времевите корелации, скрита във флуктуациите на реда. При $\beta = 0$, времевите флуктуации са чисто случайни, типични за процеси без корелации, свързани с бял шум. Случаят $\beta > 0$ отговаря на наличие на флуктуации във времето, при които измененията в реда с даден знак се последват от такива с подобен знак, с други думи, положителните изменения биват последвани от положителни и обратно. Обрания случай ($\beta < 0$) е свързан с последователност на изменения от различни знаци.

При нееквидистантни редове, такива за които поради една или друга причина не са регистрирани данни през определен период от време се използват специални техники за

пресмятане на FFT. Тези методи се базират на пресмятане чрез използване на периодограми.

Метод на Хърст

Методът на Хърст (Hurst, 1951) е предложен първоначално за решаване на проблемите, свързани с водните запаси на река Нил. В наши дни той намира широко приложение в изследването на редица природни явления, имащи нерегулярно поведение във времето.

Статистиката на Хърст цели да намери фракталната структура на нелинейни времеви редове.

Флуктуационен анализ с елиминирание на хода (detrended fluctuation analysis (DFA))

През последните години се популяризира и утвърди един сравнително нов и модерен метод за анализ на нестационарни, нелинейни времеви редове, а именно detrended fluctuation analysis (DFA) (Peng et al., 1995; Buldyrev et al., 1995; Kantelhardt et al., 2001; Kantelhardt et al., 2002).

Процедурата по прилагане на метода се състои от няколко основни стъпки:

- (1) Определяне на „профила“ на времевия ред x_k с дължина N :

$$Y(i) = \sum_{k=1}^i [x_k - \langle x \rangle], \text{ където } \langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k.$$

- (2) Профилът $Y(i)$ се разделя на незастъпващи се равни части $N_s \equiv \text{int}\left(\frac{N}{s}\right)$ с дължина s .

Поради това, че дължината на интервала N не винаги е кратна на s , то е възможно в края на профила да остане малък интервал, който да не бъде обхванат и анализиран. За да не се допусне това, се повтаря същата процедура, но с начало другият край на времевия ред.

- (3) Пресмята се локалният ход за всеки $2N_s$ сегмент по метода на най-малките квадрати и се определя сумата:

$$F^2(v, s) \equiv \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y[(v-1)s + i] - y_v(i)\}^2, v = 1, \dots, N,$$

където $y_v(i)$ е подходящ полином за сегмента v . Могат да се използват линейни, квадратични, кубични и други полиноми в зависимост от това кой апроксимиращ полином ще е най-подходящ за елиминирането на локалния ход:

$$F^2(v, s) \equiv \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y[N - (v - N_s)s + i] - y_v(i)\}^2, \text{ за } v = N_s + 1, \dots, 2N_s.$$

- (4) Сумира се по всички сегменти до получаването на флуктуационната функция:

$$F(s) \equiv \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} F^2(v, s) \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

За да се добие представа за поведението на функцията $F(s)$ като функция на s , то трябва да се повторят стъпките от 2 до 4 многократно за различни стойности на параметъра s . Определя се поведението на флуктуационната функция в различните времеви скали, изобразено в логаритмична скала по двете направления:

$$F(s) \sim s^\alpha.$$

Стойността на α определя вида на флуктуациите във времевия ред:

- $0 < \alpha < 0.5 \Rightarrow$ редуване на кратко и дългоживущи събития
- $\alpha = 0.5 \Rightarrow$ бял шум
- $0.5 < \alpha < 1 \Rightarrow$ корелация

- $\alpha = 1 \Rightarrow 1/f$ шум (pink noise)
- $\alpha > 1 \Rightarrow$ нестационарност, случайност
- $\alpha \approx 1.5 \Rightarrow$ Браунов шум

За много големи времеви скали, $s > \frac{N}{4}$, $F(s)$ става статистически ненадеждна, тъй като броят на сегментите N_s за всяко сумиране от стъпка 4 става много малък. Поради тази причина, обикновено, се изключват скали по-големи от $N/4$ при процедурата за определяне на α . Освен това системните грешки /отклонения в скейлинг поведението на $F(s) \sim s^\alpha$, които могат да бъдат коригирани, се срещат в много малки времеви скали.

ГЛАВА 3

Изследване на електротелурични шумове

Изучаването спектралните и честотните характеристики на електромагнитния шум е важна и трудна част от задачата за идентифициране на неговите вариации, които все още не са добре изучени.

Слънчевата активност и слънчевия вятър са тези, които контролират геомагнитната активност. Геомагнитните пулсации от магнитосферата могат неочаквано да проникват през йоносферата и атмосферата, достигайки земната повърхност. Техните характеристики дават пълна информация за регионите, през които проникват. Затова те могат да бъдат добър инструмент, даващ доста пълна представа за електромагнитната обстановка. От друга страна литосферните процеси също дават принос за богатия спектър на електромагнитния шум (Ralchovsky and Komarov, 1988; Varotsos and Lazaridou, 1991), но е изключително трудно те да бъдат отделени от нискочестотния електромагнитен шум от магнитосферен произход. Още повече трудности произлизат от това, че до сега няма нито един модел, който да дава задоволително обяснение на това по какъв механизъм ULF емисиите проникват от литосферата до повърхността на Земята, имайки предвид техните много ниски амплитуди от порядъка на 0.1 nT.

Използвани са и различни методи за анализ на ULF шума: спектрални, поляризационни, фрактални, wavelet (Hayakawa et al., 1996; Hayakawa et al., 1999; Alperovich et al., 2003). Поляризационният метод, свързан с търсене на повишено съотношение между вертикалната и хоризонталната компонента на полето. При фракталния анализ се прави оценка на фракталната размерност, базирана на наклона на спектъра. Wavelet анализа е подходящ за сигнали, за които могат да се предвидят „скокове“, резките промени на сигнала.

Теоретична обосновка

Експерименталните данни за ULF телуричните вариации показват, че тяхната честота $f = \omega/2\pi$ може да варира от няколко mHz до над 1 Hz. Тези вариации могат да бъдат обяснени с това, че полето на ULF прониква през вътрешността на Земята и отслабва с коефициент $\kappa = (k^2 + i\omega\mu_0\sigma_{crust})^{1/2} \cong k$ където k е вълновото число, σ_{crust} е проводимостта на земната кора и μ_0 е магнитната проницаемост (Boychev and Nenovski, 2003).

Електричното и магнитното ULF полета са взаимосвързани. През последните години са изследвани ефектите от разпределението/разпространението на тези полета в различни геоложки райони (Boychev and Nenovski, 2003; Pilipenko et al., 2003). Показано е, че ULF пулсации от различен произход могат да бъдат разграничавани по техните поляризационни характеристики.

При отсъствие на вертикален електрически ток в атмосферата е валидна следната зависимост (Boychev and Nenovski, 2003; Boychev et al., 2003):

$$|B_{x,y}| \cong \mu_0 \sigma_{crust} |\varphi|,$$

където $B_{x,y}$ е магнитуда на магнитното поле в хоризонталното направление, а φ е земният електричен потенциал (ЕЕР). За проводимост на земната кора 10^{-2} S/m (повърхностен почвен слой) магнитуда на магнитното поле ще бъде $4\pi \times 10^{-9} \varphi$ [T].

При стойност на регистрирания сигнал 0.01 [V], за магнитуда на магнитното поле се получава стойност $1 \cdot 10^{-10}$ [T], което съответства на геомагнитни пулсации в диапазона на РСЗ (период $T = 10 - 45$ секунди).

За проводимости, отговарящи на скали с проводимост 10^{-4} S/m, ще се наблюдават по-големи амплитуди на електро-телуричното поле, индуцирано от магнитното поле. За електрично поле с литосферен произход ще следва, че ULF сигналите ще имат относително по-големи амплитуди по хоризонтална компонента, която при преминаване през по-слабо проводящи слоеве ще затихва по-слабо, което я прави достатъчно подходяща за анализ. Продължителността на литосферните квазистатични апериодични сигнали варира от минути до няколко часа. ULF сигналите с магнитосферен произход имат много по-големи честоти от тези с литосферен произход и тази тяхна характеристика дава възможност, в повечето случаи, те да бъдат разграничени.

Спектрални характеристики на електротелуричен шум, регистриран в сеизмична станция „Крупник“

Изследвано е разпределението на ULF електротелуричния шум в честотния диапазон 1 mHz – 2.5 Hz при спокойни, геофизични условия („нормален” ULF електротелуричен фон);

За намирането на това разпределение са използвани статистически методи върху данни, получени при спокойни геофизични условия ($K_p \leq 3$, $A_p < 28$) и отсъствие на сеизмични събития с магнитуд $M \geq 3.5$ в района на СС „Крупник”, разположена в сеизмично активен район (Boychev et al., 2003; Nenovski et al., 2005b; Nenovski et al., 2005a; Boychev et al., 2006). Анализирани са данните за вариациите на хоризонталната компонента на електричното поле за времето от 22:00 до 05:00 локално време. Статистическият анализ на всички данни е проведен за 95% доверително ниво.

Основните фактори, които влияят на динамиката на ULF шума са: а) антропогенната активност и индустриалният шум, главно през дневните часове; б) геомагнитната активност; в) атмосферни процеси; г) литосферни процеси.

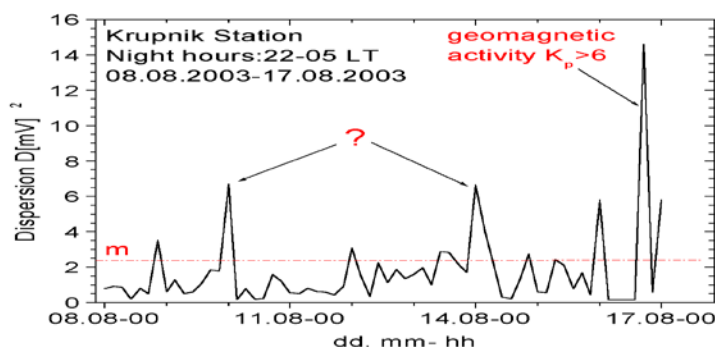
За проследяване динамиката на ULF шума са анализирани всички данни от денонощието. Тук са представени нощните часове от 00:00 – 05:00 локално време тъй като това е часовият интервал, през който шумът от външни източници е с най-ниско ниво и също така влиянието на токовите системи, образуващи се в йоносферата през светлата част от денонощието (токове на Хол) се свежда до минимум. Проследени са и останалите часове от денонощието и са анализирани и някои, представляващи интерес, сигнали от други часове на денонощието.

Посредством проведен дисперсионен анализ, са открити някои аномално високи стойности на дисперсията за периода 24.07.2003 – 31.08.2003г. Дисперсионният анализ показва няколко аномални пика в нискочестотната електротелурична активност, които значително надвишават нейната средна стойност, изчислена за целия период. Най-високият пик се наблюдава на 13 август 2003г. За периода 1 - 12 август 2003г. през нощните часове дисперсията остава стабилна, като се доближава до средното си ниво. На 13 август тя бележи възходящ ход и достига максимална стойност, която продължава до 14 август и надвишава около два и половина пъти средната стойност, и не кореспондира с геомагнитната активност. На фигура 1 детайлно е показана дисперсията

на ULF сигнала за периода 08 – 17 август 2003 г. , от където добре може да се види нейния възходящ ход на 13 август 2003г.

На 13-ти август дисперсията има най-високи стойности, които са валидни за целия ден и те нямат очевидна пряка връзка с геомагнитната активност, която може да бъде причинител на смущения в регистрирания електротелуричен сигнал. Предвид изказаните в литературата предположения (Глава I), че геодинамичните процеси и в частност сеизмичната дейност също би могла да бъде причинител на смущения в електромагнитния фон, бяха взети под внимание и по-значимите сеизмични събития, регистрирани в близост до станция Крупник (в радиус около 50 км) и тези, случили се в района на Балканския полуостров с магнитуди по-големи от 5.5: М6.3 на остров Лефкада в Йонийско море (на около 400 км. от Крупник) на 14 август 2003 г. в 05:14 GMT.

Единственото по-значимо локално сеизмично събитие с магнитуд М3.2 се е случило на 15 август 2003 г. в 09:34:19 LT на разстояние около 10 км западно от сеизмична станция „Крупник“ и има координати 41.86 N/ 22.87 E. Други възможни причинители на смущения в електричното поле биха могли да бъдат индустриално-битова дейност, и/или други непознати/неидентифицирани литосферни процеси.



Фигура 1. Дисперсия на ULF електротелуричен шум за периода 08.08.2003 – 17.08.2003 за часовете от 22:00 – 05:00 LT

Посредством приложен спектрален анализ (FFT, виж Глава II) върху времеви редове без пропуски, са намерени два широки времеви интервала на повишено ниво на ULF шум: 28 юли - 5 август 2003 г. и 17 - 21 август 2003 г., които добре корелират с повишената геомагнитна активност, регистрирана през тези периоди. На фигури 2, 3 и 4 е представено разпределението във времето на спектралната плътност на земния електричен потенциал за хоризонталната му компонента, определена чрез FFT анализ, в честотните диапазони 0.001 - 0.003 Hz, 0.003 - 0.008 Hz и 0.008 - 0.02 Hz съответно. Изследваният времеви интервал е 24 юли 2003 г. - 30 август 2003 г. по време на нощните часове в интервала 22:00 – 05:00 локално време.

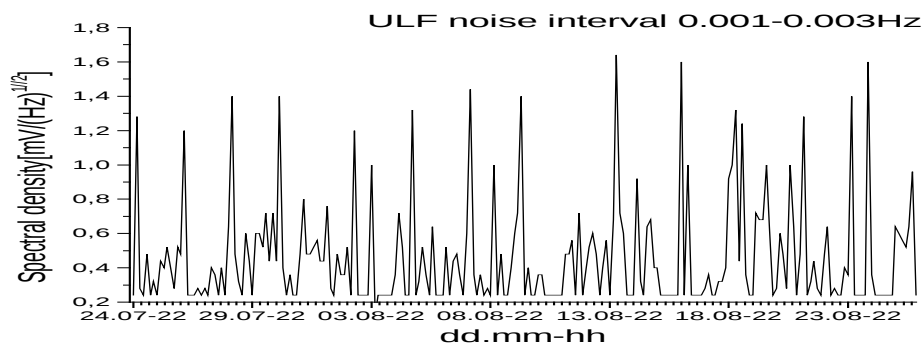
От фигурите, на които е представена спектралната плътност на нискочестотния електротелуричен шум (фиг. 2, 3, 4), се вижда, че той е фокусиран предимно в интервала 0.001 - 0.003 Hz, където ъгълът β (power exponent)(изчисленията за спектралната експонента β не са представени в дисертацията), на Фурие спектъра, има стойност, надвишаваща единица. Той променя своите стойности за различните честоти, но обикновено лежи в интервала 0.001 - 0.01 Hz. От направения Фурие анализ се различават два наклона на ULF шум, където най-ниските честоти имат най-стръмен наклон и съответно най-големи стойности на β . И в трите честотни диапазона се наблюдава устойчив електротелуричен шум преди 8 август 2003 г. и за периода 17 - 21 август 2003 г., през който период това се дължи на геомагнитна буря (18.08.2003) и дни с висока

геомагнитна активност. Скоковете в амплитудите на честотите са разпределени по-скоро хаотично, но прави впечатление, че най-високите амплитуди се наблюдават в честотния диапазон $0.001 - 0.003 \text{ Hz}$, а най-ниски в $0.008 - 0.02 \text{ Hz}$, което подрежда тезата, че магнитосферните ефекти в регистрирания сигнал, се проявяват най-добре в диапазона $0.001 - 0.003 \text{ Hz}$ и имат по-високи амплитуди в сравнение с ефектите, имащи литосферен произход (Boychev and Nenovski 2003). Някои оформят два интервала с различна ширина, а други имат максимални нива на амплитудите докато тяхната ширина намалява. Всички покриват честотния диапазон до 0.01 Hz .

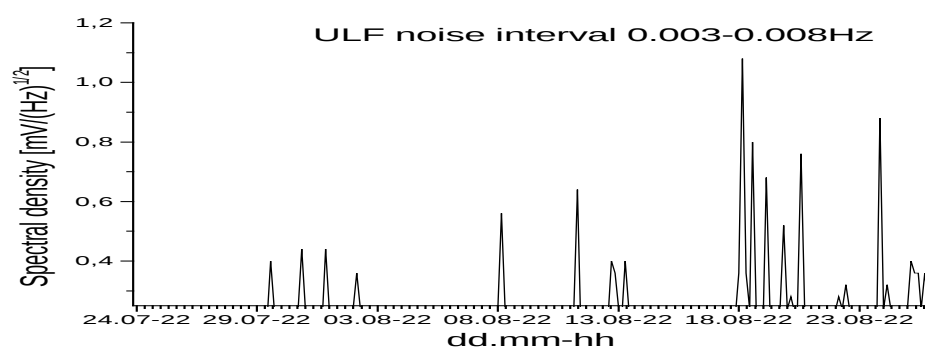
На фигурите 2, 3 и 4 се наблюдават няколко пика в амплитудите на електротелуричния шум, които съответстват по време на тези, идентифицирани посредством дисперсионния анализ, представен горе, и които не кореспондират с магнитосферни, йоносферни и атмосферни събития, като периода 08 - 17 август 2003 г. Познаването на амплитудните и честотните характеристики на магнитосферните/йоносферните причинители на смущения в електричното и магнитното поле дава и по-добра възможност за разпознаване на други причинители на смущения, имащи природен и неприроден произход.

Направеният спектрален анализ (фиг.5), посредством FFT метод, дискутиран във II глава, показва, че спектърът на електротелуричния сигнал има специфично разпределение на 13 август 2003 г., което не се наблюдава през никой друг ден от периода 24.07.2003 – 31.08.2003 г. Неговата основна честота бавно се измества от ниски към по-високи честоти в продължение на целия ден и около 0.1 Hz в последния час от 13 август 2003 г. изчезва.

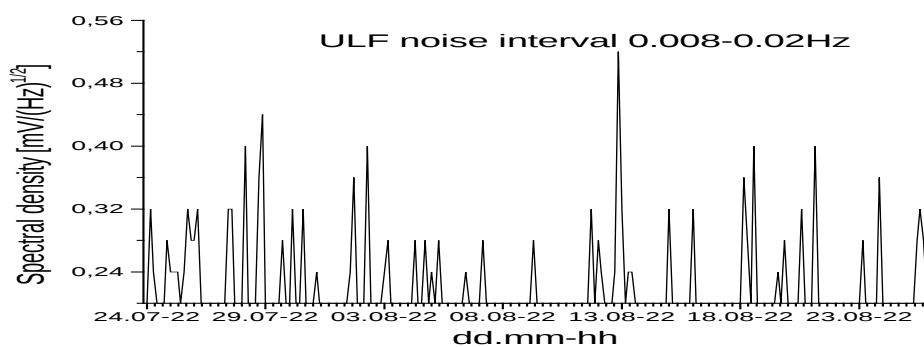
Периодът 8 - 17 август 2003 г. е необичаен от гледна точка на концентрацията на интензивността на нискочестотния електротелуричен шум. Най-вероятно този шум е свързан с литосферни процеси, имайки предвид спектралните му характеристики (Boychev and Nenovski, 2003) и отсъствието на най-нискочестотните компоненти на шума. Изчезването и на най-високочестотната компонента може би се дължи или на затихването на сигнала с нарастването на разстоянието от източника на шума до точката на измерване или на собствени честоти.



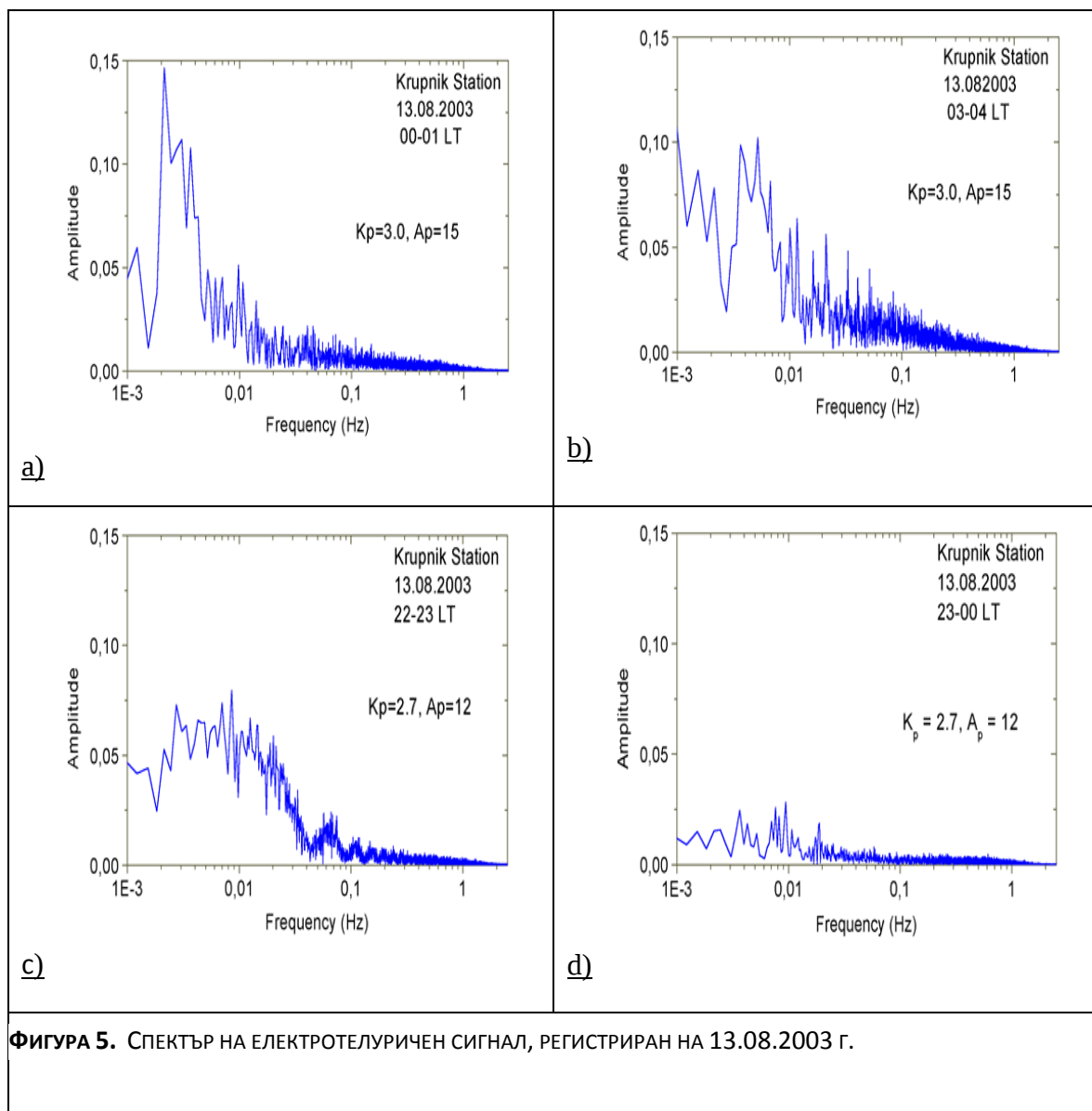
ФИГУРА 2. СПЕКТРАЛНА ПЛЪТНОСТ НА ЗЕМНИЯ ЕЛЕКТРИЧЕН ПОТЕНЦИАЛ В ЧЕСТОТЕН ДИАПАЗОН 0.001 – 0.003 Hz, 24.07.2003 – 31.08.2003.



ФИГУРА 3. СПЕКТРАЛНА ПЛЪТНОСТ НА ЗЕМНИЯ ЕЛЕКТРИЧЕН ПОТЕНЦИАЛ В ЧЕСТОТЕН ДИАПАЗОН 0.003 – 0.008 Hz, 24.07.2003 – 31.08.2003.

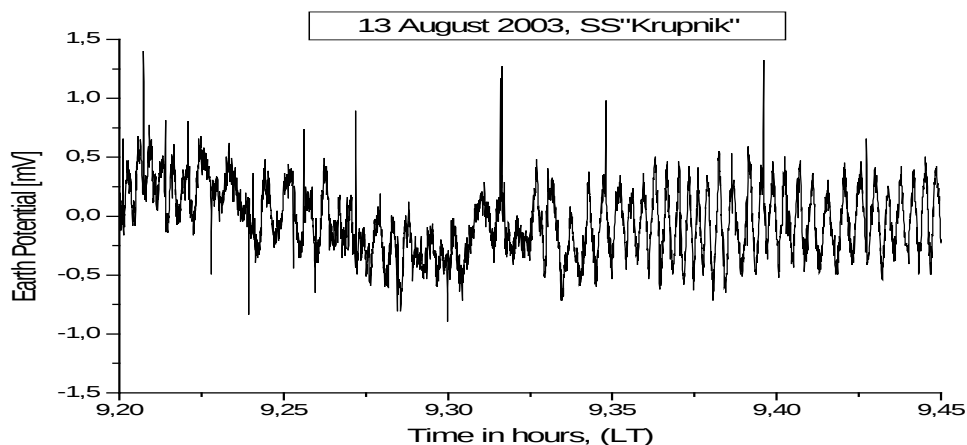


ФИГУРА 4. СПЕКТРАЛНА ПЛЪТНОСТ НА ЗЕМНИЯ ЕЛЕКТРИЧЕН ПОТЕНЦИАЛ В ЧЕСТОТЕН ДИАПАЗОН 0.008 – 0.02 Hz, 24.07.2003 – 31.08.2003.

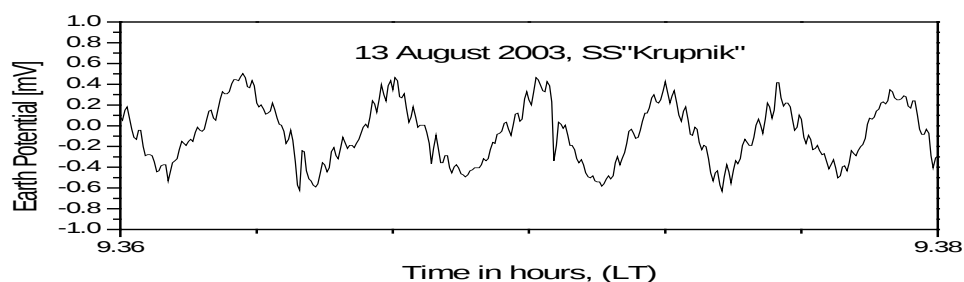


На фигура 6 е представена хоризонталната компонента на земния електричен потенциал за 13 август 2003 г от 09:20 – 09:45 локално време. На графиката се наблюдават едновременно нерегулярни ULF вариации и един „пакет“ от периодични вариации на хоризонталната му компонента.

Нерегулярните вариации показват широк спектър от честоти, обикновено, по-малки от 0.1 Hz. Регулярните вариации са наблюдавани от 09:35 до 09:45 локално време и имат период около 14 - 15 сек. в Pc3 диапазона, а в последните шест минути тези вариации имат вълнова форма. Големината на размаха на тези периодични вариации е около 1mV от пик до пик (от минимум до максимум), което означава, че измереното ULF електрично поле има амплитуда около 6μV/m. Част от периодичния сигнал (2 мин.) е показан на фигура 7.



ФИГУРА 6. ВАРИАЦИИ НА ХОРИЗОНТАЛНАТА КОМПОНЕНТА НА ЗЕМНИЯ ЕЛЕКТРИЧЕН ПОТЕНЦИАЛ, 13.08.2003г., 09:20 – 09:45 LT.



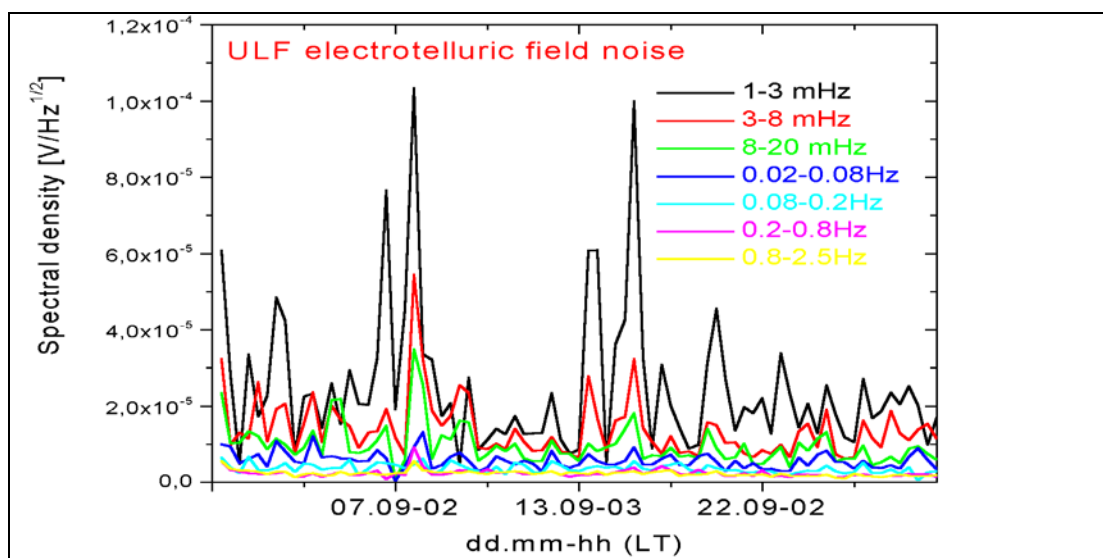
ФИГУРА 7. ВАРИАЦИИ НА ХОРИЗОНТАЛНАТА КОМПОНЕНТА НА ЗЕМНИЯ ЕЛЕКТРИЧЕН ПОТЕНЦИАЛ, 13.08.2003г., 09:36 – 09:38 LT.

Според формулата на Доброволски за радиуса на зоната за подготовка на земетресение (Dobrovolsky et al. 1979) $\rho = 10^{0.43M}$ км., може да се пресметнат евентуалните честоти, които биха се регистрирали на земната повърхност. Например за средна проводимост на земната кора $\sigma_{\text{crust}} \sim 10^{-2}$ S/m, най-ниската честотна компонента за магнитуд 3.2 би била ~1-2 Hz, а за магнитуд 7 – около 0.001 Hz. Този резултат може теоретично да обясни защо само за земетресения с магнитуд по-големи от 6 биха могли да бъдат регистрирани електромагнитни емисии с честота 1mHz. Аналогично, земетресенията с магнитуд по-малки от 4, ще генерират високочестотни електромагнитни емисии, които затихват много по-бързо в сравнение с по-нискочестотните и не могат да бъдат регистрирани на големи разстояния. Изчисленията показват, че честоти около 0.01 Hz, ще кореспондират с магнитуд между 5.5 – 6.

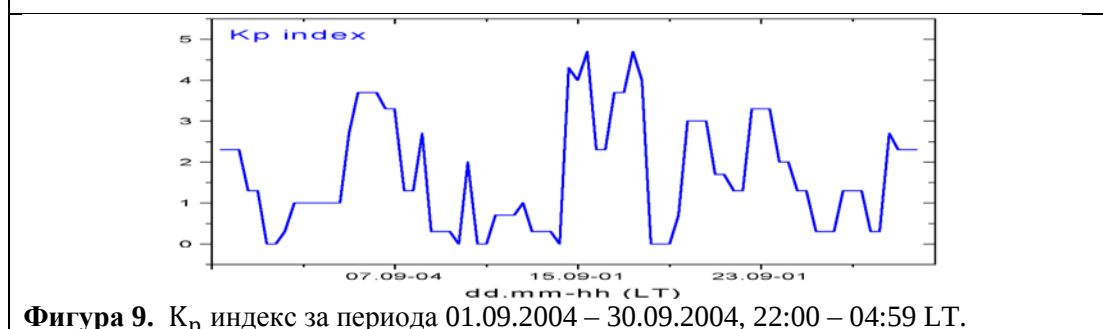
От казаното до тук няма достатъчно основания да се предположи, че наблюдаваният на фигура 6 и фигура 7 периодичен сигнал има пряка връзка със земетресението на 15 август 2003г. в близост до Крупник, тъй като то е твърде слабо (М3.2), за да генерира електромагнитен сигнал с честота 0.01 Hz, каквато се регистрира на 13 август 2003г. От друга страна земетресението на о. Лефкада, Гърция (14. 08.2003 г.) е достатъчно мощно да генерира такава честота, но неговият епицентър е на достатъчно голямо отстояние от измервателната апаратура в Крупник (~400 км., фиг.13), за да може да се твърди, че именно то е източник на този периодичен сигнал, тъй като от теоретична гледна точка, електромагнитният сигнал би трябвало да затихне на около 330 км. от епицентралната зона.

Намерени са и още два периода, белязани от ниска геомагнитна активност с малки изключения на дни с повишена такава, а именно септември и ноември 2004 година. Посредством извършен спектрален анализ по FFT метод, е получено спектралното разпределение на регистрирания ULF сигнал през месец септември 2004 година. Получено е честотното разпределение на сигнала за седем честотни интервала: 1 – 3 mHz, 3 – 8 mHz, 8 – 20 mHz, 20 – 80 mHz, 0.08 – 0.2 Hz, 0.2 – 0.8 Hz и 0.8 – 2.5 Hz, представени на фигура 8.

Сравнявайки разпределението в горните честотни спектри (фиг. 8) с геомагнитната активност (фиг. 9) се забелязва, че предимно сигналът в честотния спектър 1 – 8 mHz се влияе най-силно от геомагнитната активност. За честоти по-големи от 0.01 Hz се вижда, че влиянието на геомагнитната активност на практика е слабо, което прави тези честотни интервали по-надеждни за търсене на нискочестотни сигнали, с предполагаем източник литосферата. Такива сигнали са изключително трудни за идентифициране, поради това, че те имат значително по-малки амплитуди и по-тесен честотен спектър в сравнение с тези от магнитосферен произход (Boychev and Nenovski 2003). Получената зависимост между геомагнитната активност и спектралното разпределение на електротелуричния шум може и да се дължи на ниското ниво на геомагнитната активност за септември 2004 г., което с изключение на 15 и 16 септември има стойности под четири ($K_p < 4$).



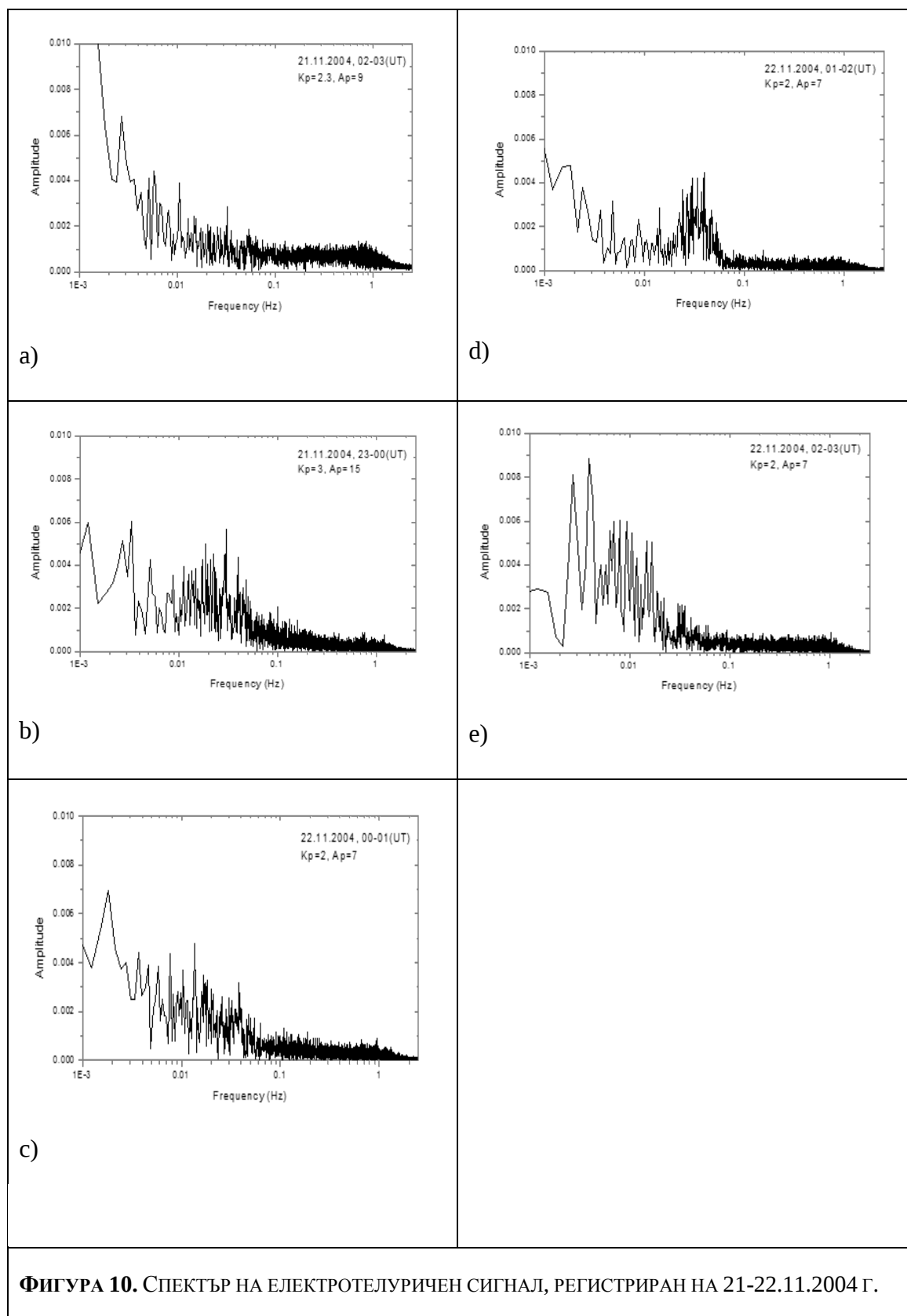
Фигура 8. Спектрална плътност на земния електричен потенциал за периода 01-30 септември 2004г. в честотните диапазони: 1 – 3 mHz, 3 – 8 mHz, 8 – 20 mHz, 20 – 80 mHz, 0.08 – 0.2 Hz, 0.2 – 0.8 Hz и 0.8 – 2.5 Hz.

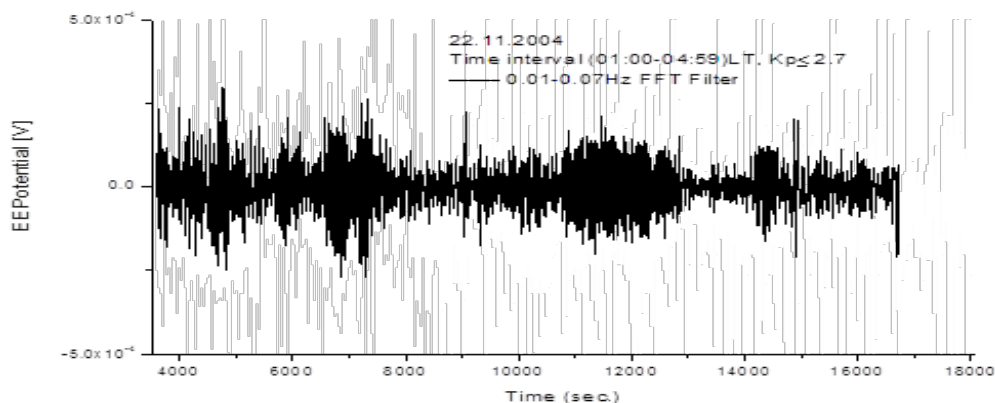


Фигура 9. K_p индекс за периода 01.09.2004 – 30.09.2004, 22:00 – 04:59 LT.

Приложен е FFT анализ и върху данните за месец ноември 2004 г. Намерени са необичайни сигнали, имащи аperiodичен характер, регистрирани на 22 ноември 2004 г., които започват около 01:00 (LT) и имат продължителност около 3 часа (фиг.10). Подобно на 13 август 2003 г., пикът започва от най-ниските честоти и мигрира към по-

високите, като достига стойност 0.03 Hz. ULF сигналът завършва с квазипериодичен ход и има продължителност около 40 минути (фиг. 11).





Фигура 11. Земен електричен потенциал. Хоризонтална компонента, 0.01 - 0.07 Hz, 22.11.2004г., 01:00 - 04:59 (LT).

Единственото значимо сеизмично събитие, разглеждано като възможен източник на електромагнитни смущения в нискочестотния диапазон, е регистрирано на 23.11.2004г. е регистрирано в района на гръцко-албанската граница (40.39N/20.48E) и има магнитуд $M=5.2$ в 02:26:15.7 UT и дълбочина 20 километра и неговия епицентър на разстояние около 260 км. от Крупник. Подобни геомагнитни осцилации, имащи продължителност от 10 минути до няколко часа са докладвани от Alperovich et al.(2006). По всяка вероятност пулсациите, регистрирани на 13 август 2003 г. и 22 ноември 2004 г. имат локален характер и не са свързани с магнитосферни, йоносферни или атмосферни процеси. Не е изключено те да отразяват директно или индиректно тектонски процеси или процеси, свързани с локалните геоложки особености. Категоричност в това предположение не може да има, тъй като преди 2003 г. в югозападна България не са извършвани подобни наблюдения за нискочестотния спектър на електричното или магнитното поле на Земята и няма база за сравнение на спектъра на електротелуричния шум на локално ниво.

ГЛАВА 4

Вариабилности на магнитното поле. Скейлинг характеристики.

В тази глава са изследвани локалните ULF вариабилности и скейлинг характеристики на земното магнитно поле на базата на приложен нелинеен метод за анализ DFA (detrended fluctuation analysis), представен в Глава II, върху данни от многоточкови измервания.

Анализирани са данни за периодите 01.06.2004 г. – 28.02.2005.г. , 01.01.2007г. – 30.04.2007г., 01.01.2008г. – 30.04.2008 г., 01.01.2009г. – 30.04.2009г. и 01.01.2010г. – 30.04.2010г., получени от магнитометричната мрежа SEGMA (South European GeoMagnetic Array in the frame of the *DEMETER* project) (виж картата). Станциите NCK, CST, RNC и AQU са оборудвани с трикомпонентни fluxgate магнитометри, а станция AQU (част от L'Aquila University) разполага и с трикомпонентен индукционен магнитометър (search coil). В станция Панагюрище (PAG) е инсталиран трикомпонентен индукционен магнитометър (search coil), който не е идентичен с този в станция AQU, но е със сходни характеристики. Данните за всички магнитометри от мрежата се регистрират със стъпка 1 секунда. Върху получените от тези станции данни за магнитното поле е приложен флукутационен анализ с елиминиране на тренда (detrended fluctuation analysis DFA), с цел намиране на устойчиви самонаподобяващи процеси и вариабилности на магнитното поле от локален произход (Chamati et al., 2009; Chamati et

al., 2011; Nenovski, P. et al., 2011 Nenovski et al., 2013). Този нелинеен метод за анализ (Peng et al., 1995; Buldyrev et al., 1995) на нестационарни времеви редове подробно е описан в Глава II на дисертацията.

За периода юни 2004 г. – февруари 2005 г. са анализирани данни за ULF диапазона (0.001 - 1 Hz) на магнитното поле, получени от станциите NCK, CST, RNC, AQU, като за станция AQU са използвани данни от два трикомпонентни магнитометъра – flux gate и search coil (август 2004 – февруари 2005). Анализирани са едночасови времеви интервали (3600 секунди) за нощните часове (00:00-01:00), като целта да се анализират тези часови интервали е да се сведе до минимум влиянието на токовите системи в йоносферата през светлата част от денонощието и на антропогенния фактор.



Приложен е DFA анализ и е получен скейлинг индексът α (DFA index) за времевите скали $T=10$ - 180 сек. и $T=10$ – 900 сек. за вертикалната (Z) и хоризонталната (H) компоненти на магнитното поле за всички изследвани станции, представен на фигури 12, 13, 14 и 15. Скейлинг индекса, изчислен за данни получени от search coil магнитометъра в станция AQU (август 2004 – февруари 2005) е представен в дисертацията.

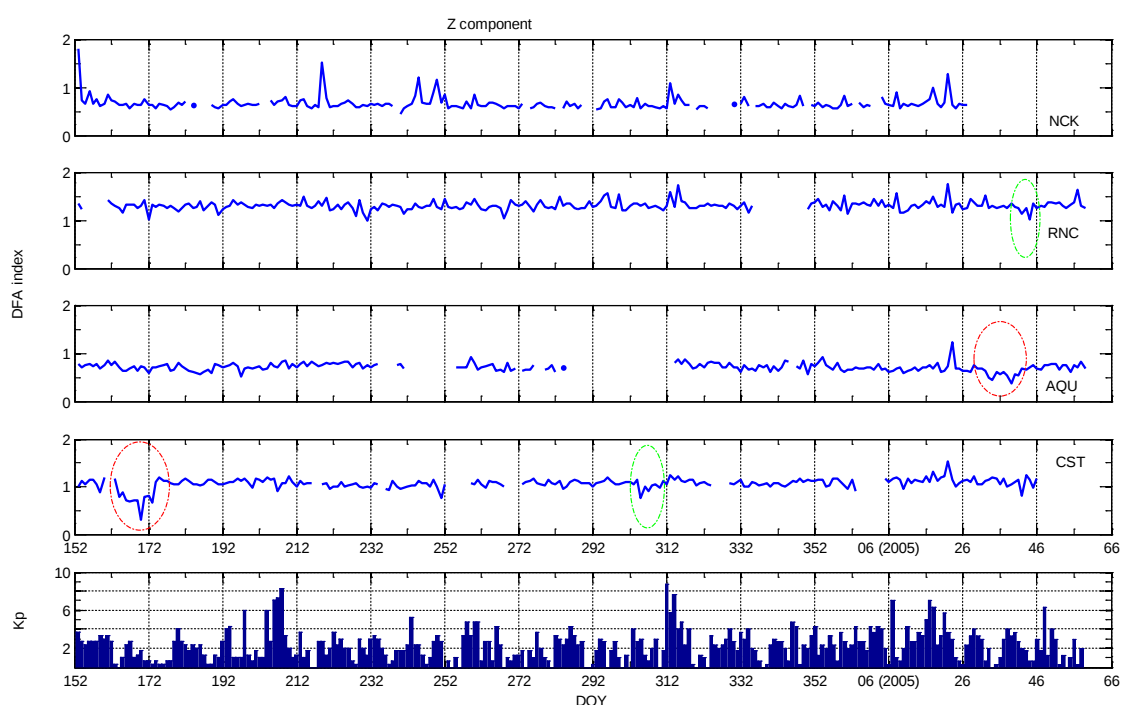
Сравнявайки вариациите на скейлинг индекса α , пресметнат за вертикалната и хоризонталната компоненти на магнитното поле в двете времеви скали 10 - 180 сек. (фиг.12, фиг. 13) и 10 - 900 сек. (фиг.14, фиг.15) се вижда, че той има по-малки магнитуди при вертикалната компонента за целия изследван период. Наблюдавани са специфични особености в магнитудите на скейлинг индекса α , както за вертикалната (Z), така и за хоризонталната (H) компоненти. Някои особености се наблюдават едновременно в двете компоненти на магнитното поле, а други само в едната. Също така са забелязани особености в поведението на скейлинг индекса α , характерни само за една станция. От четирите фигури (12, 13, 14 и 15), отнасящи се за данните, получени от flux-gate магнитометрите, могат да се разграничат две основни черти в поведението на скейлинг индекса, които ще бъдат детайлно дискутирани в тази глава, а именно:

- *глобалните ефекти (магнитосферни/йоносферни) се изразяват чрез аномално повишение на неговите стойности спрямо средната му такава. Това се наблюдава по едно и също време във всички точки (станции) на измерване на ULF вариациите на магнитното поле. По-ясно са изразени при хоризонталната му компонента и във времевата скала 10-900 секунди. Тези повишения на стойностите на скейлинг индекса обикновено следват поведението на K_p индекса. При висока геомагнитна активност и геомагнитни бури скейлинг индексът нараства значително спрямо средната си*

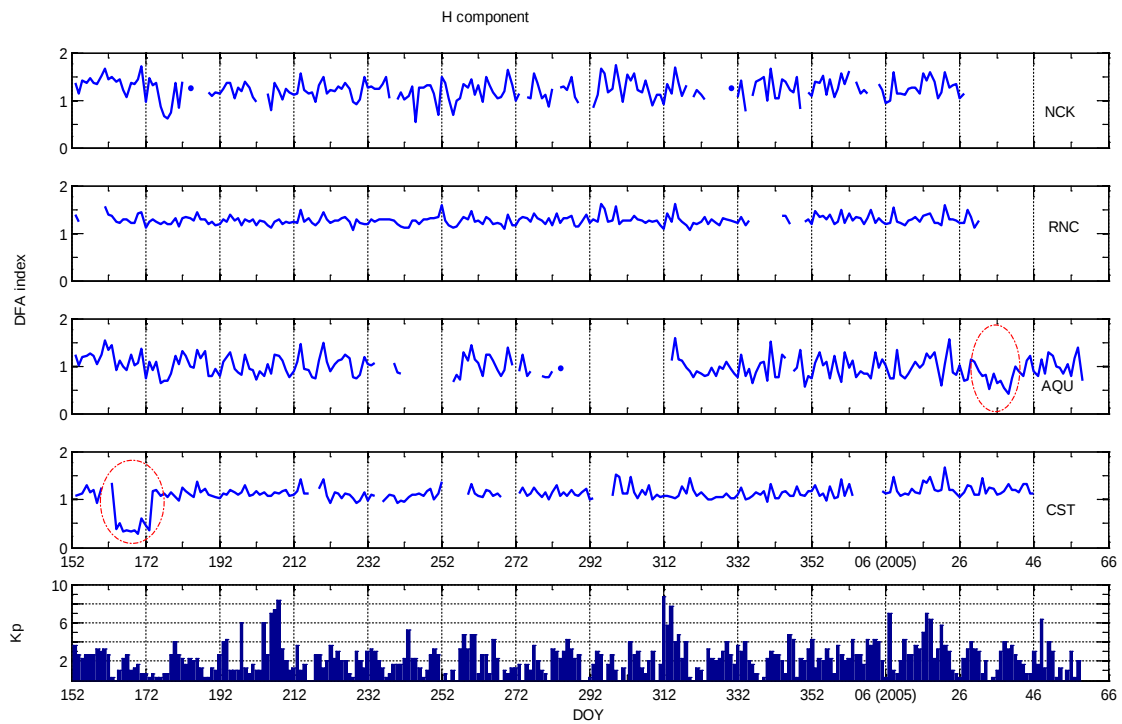
стойност за всички станции, за хоризонталната и вертикалната компоненти и за различните времеви скали.

- локалните ефекти се изразяват най-често чрез аномално понижение на стойностите на скейлинг индекса спрямо неговата средна стойност, което се наблюдава в различните точки на измерване (станции) по различно време и е най-ясно изразено при вертикалната компонента на магнитното поле за времевата скала 10-180 секунди. Тези аномалии траят от 2 - 4 дни, с изключение на две, несъвпадащи по време, регистрирани в станция CST и станция AQU. В станция NCK локалните ефекти в поведението на скейлинг индекса се изразяват в значително нарастване спрямо средната стойност в 220-я и около 244-я ден на 2004г. за времевата скала 10-180 секунди и вертикалната компонента на магнитното поле.

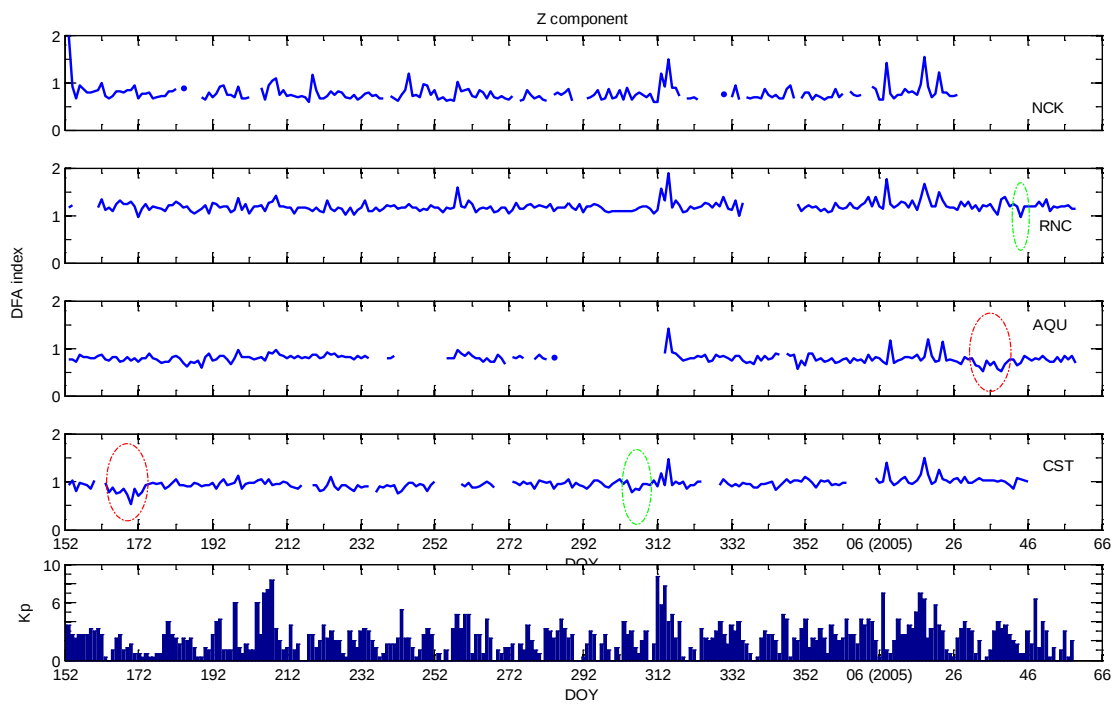
Средните стойности на скейлинг индекса, изчислени за вертикалната компонента на магнитното поле, за различните точки на измерване са различни и са дадени в таблица 1 заедно със стандартното им отклонение, пресметнато за 95% доверително ниво. Станция RNC има по-високи средни стойности в сравнение с останалите станции. Това различие в средните стойности на скейлинг индекса за различните станции, изчислени за вертикалната компонента на магнитното поле, е израз на локалните особености на магнитното поле в точката на измерване и предполага, че фракталните структури на ULF емисиите са чувствителни на състоянието на проводимостта в земната кора (Chamati et al. 2009).



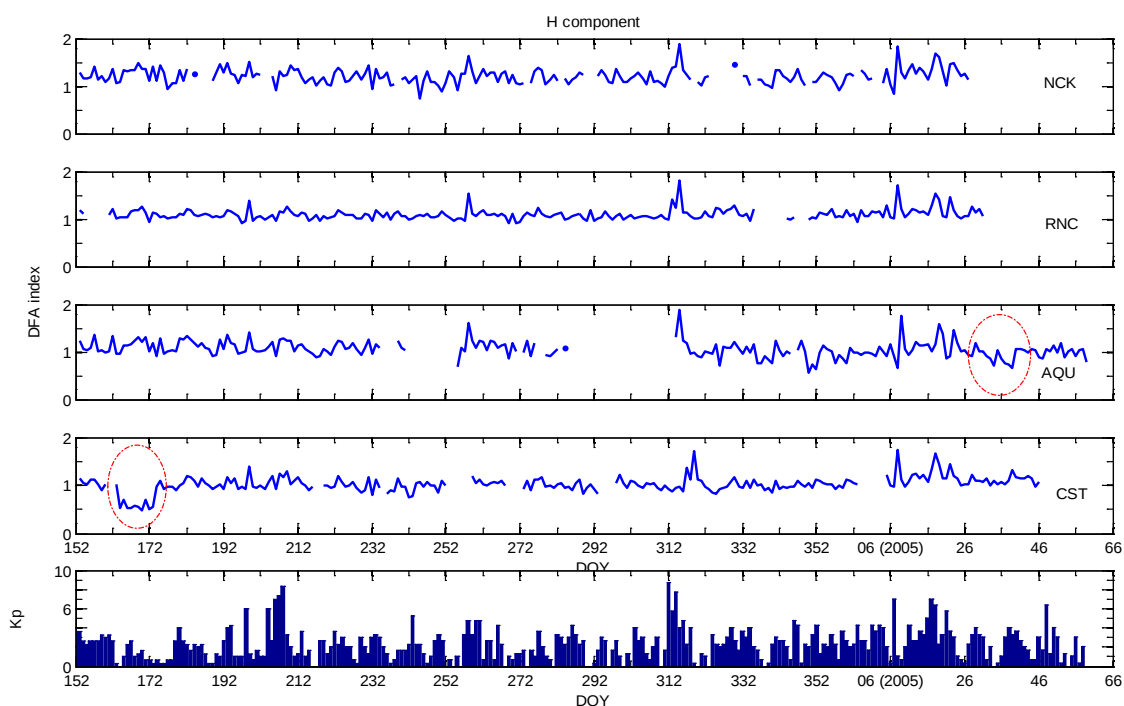
ФИГУРА 12. СКЕЙЛИНГ ИНДЕКС α ЗА ВРЕМЕВА СКАЛА $T=10 - 180$ СЕК., Z КОМПОНЕНТА.



ФИГУРА 13. СКЕЙЛИНГ ИНДЕКС α ЗА ВРЕМЕВА СКАЛА $T=10 - 180$ СЕК., Н КОМПОНЕНТА.



ФИГУРА 14. СКЕЙЛИНГ ИНДЕКС α ЗА ВРЕМЕВА СКАЛА $T=10 - 900$ СЕК., Z КОМПОНЕНТА.



ФИГУРА 15. СКЕЙЛИНГ ИНДЕКС α ЗА ВРЕМЕНА СКАЛА $T=10 - 900$ СЕК., Н КОМПОНЕНТА.

Station	Mean $T = 10 - 900$ sec.	Sd $T = 10 - 900$ sec.	Mean $T = 10 - 180$ sec.	Sd $T = 10 - 180$ sec.
AQU	0.786	0.105	0.707	0.092
RNC	1.187	0.117	1.304	0.103
CST	0.967	0.102	1.077	0.088
NCK	0.764	0.157	0.655	0.123

ТАБЛИЦА 1.

Тук ще бъдат представени само някои от локалните ефекти, изразяващи се чрез поведението на скейлинг индекса.

От юни 2004г. до февруари 2005г. се наблюдават няколко периода с понижена стойност на индекса α в станция CST. Първият локален минимум (от фигури 12 и 13) в поведението на α е регистриран за периода 11 - 21 юни 2004г., като за времевата скала 10 – 180 секунди и за вертикалната и за хоризонталната компонента на магнитното поле стойностите на индекса варират от 0.5 до 1, с изключение на 19 юни 2004 г., когато за времевата скала 10 - 180 секунди, достигат най-ниската си стойност от 0.3 за хоризонталната компонента на магнитното поле. Такава ниска стойност на индекса α , в границата между 0 и 0.5, предполага намесата на друг процес, освен геомагнитната активност, който контролира поведението на времевия ред (Peng et al. 1995). Аномалията е по-ясно изразена във времевата скала 10-180 секунди в сравнение със скалата 10 - 900 секунди. Геомагнитната активност в тези дни е била от слаба до умерена. В

дисертацията е показан (на фиг.33 от дисертацията) и сигналът за първите 3600 секунди на 15 юни 2004 г., където се вижда, че вертикалната компонента има много по-динамичен ход от хоризонталната. Това означава, че вертикалната компонента се контролира от други процеси, които не са от магнитосферен/йоносферен източник, а най-вероятно имат литосферен произход. Апериодични вариации във вертикалната компонента са наблюдавани през целия период на аномално поведение на DFA индекса α (11-21 юни). Единственото значимо земетресение, което се е случило в региона е било на разстояние около 150 км. от станция CST на 12 юли 2004 г. с $M=5.5$ и дълбочина около 6 км. в района на Бовек, Словения. Тази аномалия в магнитния сигнал, регистриран в станция CST е дискутирана в работа на Prattes et al. (2008). За нейното идентифициране е приложен поляризационен анализ. Авторите предполагат, че тя има природен произход. Подобни, но не идентични аномални прояви във вариациите на електричното и магнитното поле на Земята, са докладвани от Varotsos & Lazaridou (1991); Bleier et al. (2009), като авторите предполагат тяхната свързаност с природни процеси от литосферен произход.

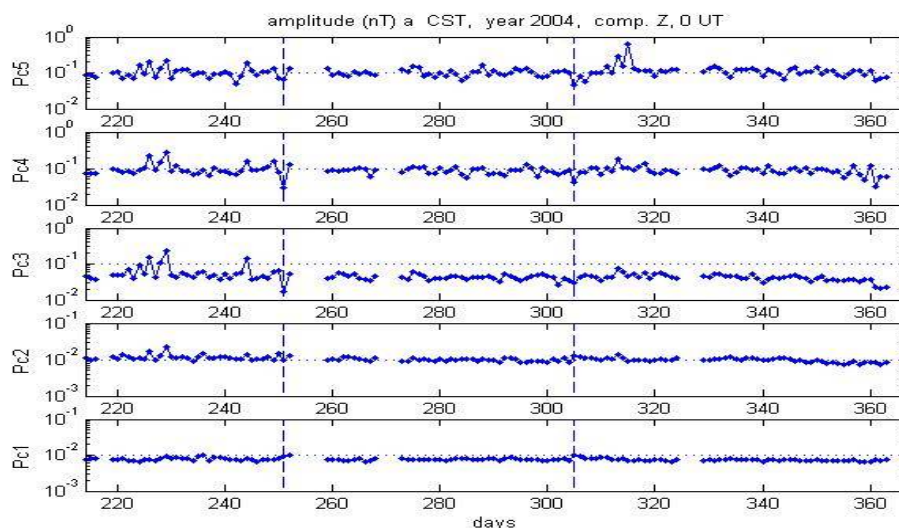
Следващите кратковременни минимума в поведението на α , наблюдавани само в станция CST са регистрирани на 05.09.2004 г. (250-ти ден, за ~ 4 дни) и на 31.10.2004 г. (303-ти ден, за ~ 10 дни) за времевата скала 10 - 180 секунди по вертикалната компонента на магнитното поле. Тези смущения, на базата на дотук дискутираните свойства на скейлинг индекса, предполагат наличието на геодинамичен процес с локален характер, въздействащ върху магнитния сигнал. На фигура 16 е представена спектралната плътност за диапазона Pc1 – Pc5 за станция CST за вертикалната Z компонента на магнитното поле за времеви интервал 00 - 01 UT. По хоризонталата са номерирани дните от 2004 година, а по вертикалата са представени амплитудите на сигнала в nT . С пунктирна линия са маркирани 05.09.2004 г. и 31.10.2004 г. за които се наблюдават минимума в спектралната плътност на амплитудите на сигнала за интервала Pc3 – Pc5.

Във времевата скала 10 - 900 сек. (от фиг. 14 и 15) не се наблюдава понижение на скейлинг индекса за тези два дни. Когато намалява α , това означава, че фракталната размерност D_0 нараства. Връзката между фракталната размерност и скейлинг експонентата се намира от формулата на Berry, изразяваща връзката между фракталната размерност и спектралната експонента β : $D_0 = (5 - \beta)/2$ и $\beta = 2\alpha - 1$ (Berry 1979; Turcotte 1995; Turcotte 1997), от където следва, че $D_0 = 3 - \alpha$. Изследвайки земното електрично поле, но прилагайки фрактален анализ върху данни с резолюция една минута, подобни понижения в стойностите на скейлинг индекса α са получени от Varotsos et al. (2003).

Получените резултати предполагат две възможни обяснения:

- *Повишение на високочестните флуктуации в интервала 0.01 – 0.5 Hz в сравнение с нискочестотните компоненти (< 0.01 Hz).*
- *Относително подтискане на спектралната плътност на нискочестотните компоненти в сравнение с високочестните ULF компоненти (0.01 – 0.5 Hz).*

В литературата има и изказани предположения, че се наблюдава тенденция скейлинг индексът α да намалява преди земетресения (Hayakawa et al., 1999). На този етап от изследвания на локални характеристики на магнитното поле, аз смятам, че все още не е натрупана добра база от изследвания в тази посока, която да потвърди или отрече това предположение, независимо от това, че докладваните в дисертацията резултати по-скоро са в подкрепа предположението на Hayakawa et al. (1999).



ФИГУРА 16. СПЕКТРАЛНА ПЛЪТНОСТ ЗА ДИАПАЗОНА PC1 – PC5. СТАНЦИЯ CST, Z КОМПОНЕНТА, 210 -365 ДЕН ОТ 2004Г., 00 - 01 UT.

Тъй като аномалията, наблюдавана в стойностите на α , изчислен за вертикалната компонента на магнитното поле за времевата скала 10 - 180 секунди на 31 октомври 2004 г. (фиг.12 и фиг.16), явно не се дължи на магнитосферни/йоносферни ефекти, то тогава не може да се изключи и вероятността тя да има литосферен произход от непознат източник (тектонски движения, микропукнатини, флуиди, специфични проводимости в земната кора).

От направения до тук анализ може да се направи извода, че индексът α варира в „положителна“ посока при високи стойности на K_p , като следва неговия ход по двете компоненти на магнитното поле за двете времеви скали. При ниска геомагнитна активност, вертикалната компонента на магнитното поле, особено във времевата скала 10 - 180 сек. не се контролира от нея, а по-скоро е отражение на локалните литосферни процеси. Индексът α , получен за тази времева скала, за различните точки на измерване на вертикалната компонента на магнитното поле, има различни стойности, в един и същи момент от време при еднакви магнитосферни/йоносферни условия (за сравнително тесен географски регион на средни ширини), т. е. има локален характер.

Изследвани са и скейлинг характеристиките на данните за магнитното поле, получени от станциите на магнитометричната мрежа SEGMA за периодите януари - април от 2007 -2010 година (Nenovski et al. 2013) и януари 2008 – април 2009 година за станция AQU.

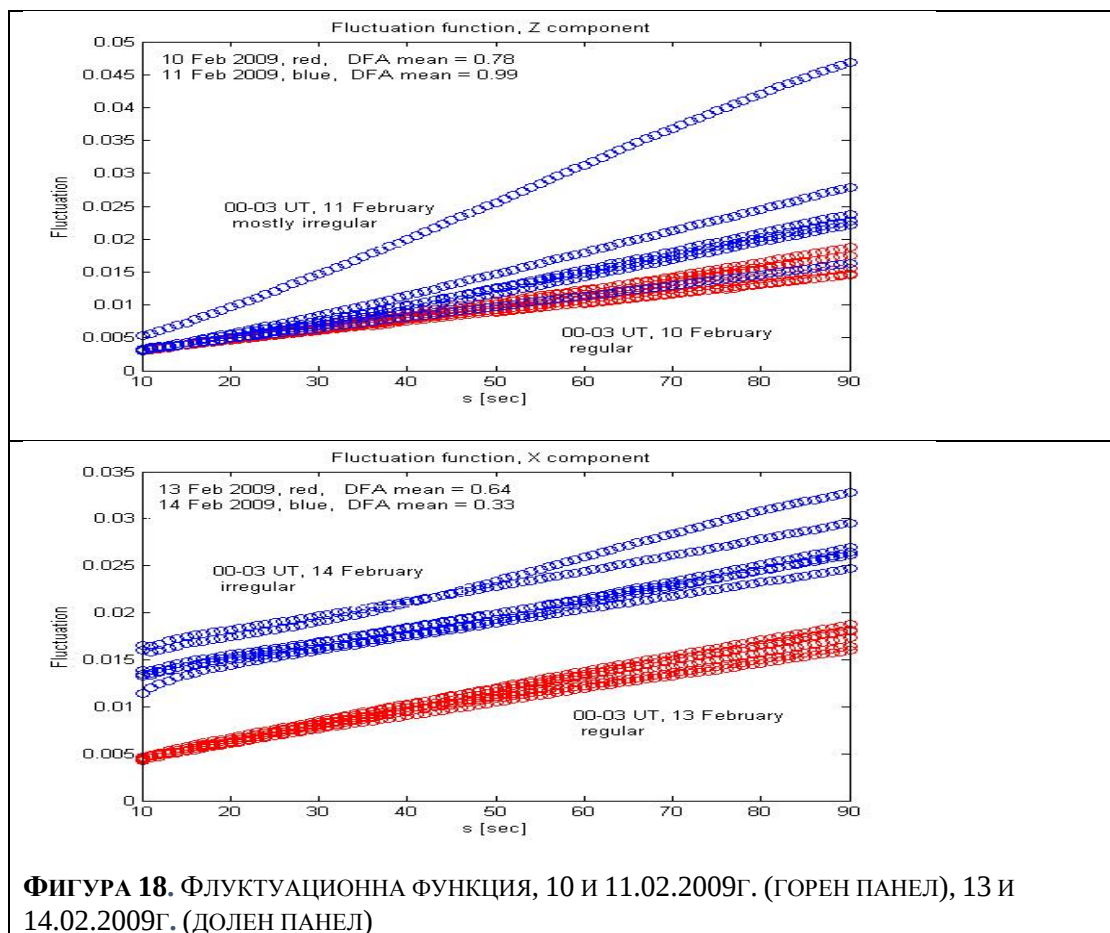
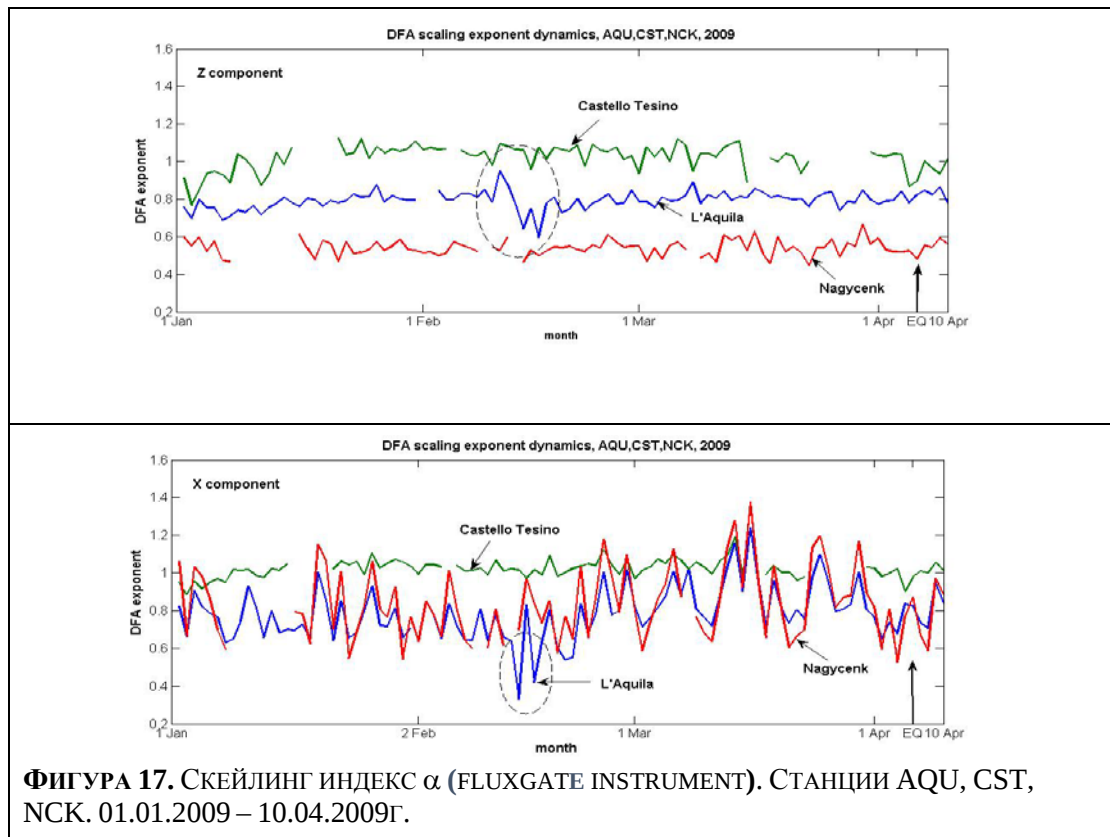
За периода януари – април (2007-2010) са анализирани вертикалната и хоризонталната компонента на магнитното поле за времето 00-03 UT (01-04 LT), разделен на 6 половинчасови подинтервали) за времевата скала 10 - 90 сек. (0.1-0.011 Hz), като върху данните, получени от магнитометричната мрежа SEGMA е приложен MFDFA анализ. Обикновено, индексът α , пресметнат за вертикалната и хоризонталната компоненти на магнитното поле, следва сходно поведение във времето за двете компоненти (Masci 2010) и съотношението между стойностите му по двете компоненти се стреми към константа, когато магнитните вариации са контролирани от магнитосферни процеси. Подобие то в поведението на скейлинг индекса α се наблюдава във всички изследвани станции, което е ясно доказателство за това, че

далекодействащите корелации в магнитното поле имат магнитосферен/ионосферен произход.

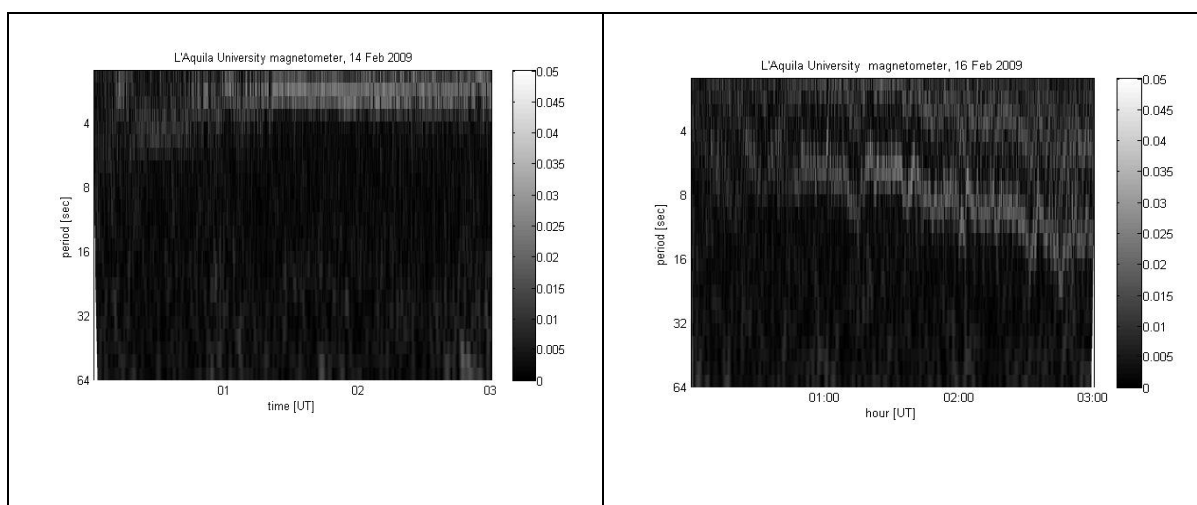
Особен интерес за изследване на локалните вариабилности на магнитното поле представлява периодът януари-април 2009 година, станция AQU, тъй като на 6 април 2009 година (01:32:39 UT, 42.33N/13.33E) там се случва голямо и разрушително земетресение с магнитуд $M_w 6.3$, при което загиват над 300 човека, а от тях около 50 студенти (Villante et al., 2010).

Върху данните от fluxgate магнитометъра за станции AQU, CST, NCK е приложен DFA анализ и резултатите от него са представени на фигура 17, от където се вижда необичаен, значително отклоняващ се от средното ниво, минимум в стойностите на α в дните 14 и 16 февруари 2009 година, регистриран само от станция AQU. Скейлинг параметърът α показва наличие на специфични особености едновременно в хоризонталната и вертикалната компоненти около средата на месец февруари. Аномалното поведение на α , изчислено за вертикалната компонента, предшества минимума по хоризонталната с три дни (започва на 11.02.2009). Скейлинг експонентата α по вертикалното направление първоначално започва да нараства ($\alpha \sim 1$) и след това има намаляващ ход едновременно с хоризонталната компонента, като аномалията е най-ясно изразена на 14 и 16 февруари 2009г., а на 20 февруари изчезва.

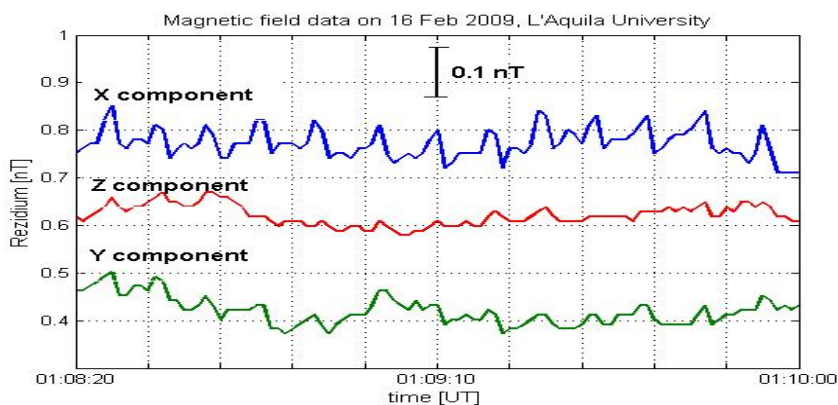
DFA анализът за двата типа магнитометри (тук са представени само данните от fluxgate магнитометъра) показва значително понижение в стойностите на α за хоризонталната и за вертикалната компонента на магнитното поле на 14 февруари ($\alpha < 0.5$) за хоризонталната компонента. Съгласно теорията, този резултат е в съгласие с това, че динамиката на хоризонталната и вертикалната компоненти са под въздействието на източник на смущение или процес, което ги извежда от устойчиво поведение. Това преминаване от устойчиво към неустойчиво поведение е демонстрирано с флукуационната функция (фиг.18), която е пресметната за 10 и 11, 13 и 14 февруари за хоризонталната компонента на магнитното поле. На 13 февруари 2009 г. скейлинг експонентата α има стойност 0.64 (долен панел на фиг.18). На 14 февруари флукуационните криви имат по-интензивна динамика и техния наклон намалява т.е. $\alpha < 0.5$, което дава основание да се предположи неустойчиво поведение на флукуационната функция и респективно на изследвания времеви ред. В подкрепа на това предположение, на горния панел на фигура 18 е показано поведението на флукуационната функция, пресметната за вертикалната компонента на магнитното поле на 10 и 11 февруари 2009 година. На 10 февруари стойността на $\alpha \approx 0.78$ и флукуационната функция има стабилен регулярен ход, за разлика от 11 февруари, когато тя има много по-стръмен наклон ($\alpha \approx 0.99$). Стойности на α близки до единица, според мултифракталния анализ, означават динамика от типа „flicker” шум (спектр от типа $1/f$).



Наблюдавано е необичайно поведение в динамиката на скейлинг индекса α и за вертикалната, и за хоризонталната компонента на магнитното поле. Анализирани са и данните, получени от flux gate магнитометъра на INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (Rome, Italy), <http://www.ingv.it/it/>), инсталиран в станция AQU. Показани са динамичните спектри, получени от два независими flux gate магнитометъра (споменати горе) за 14-ти и 16-ти февруари 2009 година: flux gate на L'Aquila University (фиг.19) и flux gate на INGV, инсталиран в същия град, но в различна точка на измерване (дисертацията, фиг.43). На тях се виждат пулсации с период ~ 3 секунди, които изчезват на 15-ти февруари 2009 г. и на 16-ти се появяват отново, като спектърът на периодите им се разширява до 16 секунди. Динамичните спектри и на двата flux gate магнитометъра на 14-ти и 16-ти февруари 2009 г. показват почти идентични трендове. За flux gate магнитометъра на INGV съотношението сигнал-шум е по-лошо в сравнение с това от flux gate на L'Aquila University и това ясно се вижда на фигурите. Двата магнитометъра са разположени на около 200 метра един от друг, което изключва възможността те да се смущават помежду си. Наблюдаваните нерегулярни вариации в поведението на скейлинг индекса α , изчислен за хоризонталната и вертикалната компоненти на магнитното поле, имат външноапаратурен произход: природен, антропогенен или смесен. Пулсациите, регистрирани на 16-ти февруари 2009 г. в магнитния сигнал, са представени на фигура 20. Те имат най-големи амплитуди в хоризонталната компонента на магнитното поле (~ 0.05 nT), като присъстват и по вертикалното направление, и по направлението изток-запад.



ФИГУРА 19. ДИНАМИЧНИ СПЕКТРИ, 14 И 16 ФЕВРУАРИ 2009Г., L'AQUILA UNIVERSITY MAGNETOMETER.



ФИГУРА 20. ЗАПИС НА ВАРИАЦИИТЕ НА МАГНИТНОТО ПОЛЕ, РЕГИСТРИРАНИ НА 16.02.2009Г. В СТАНЦИЯ AQU.

Допълнително е направен фрактален анализ и за времевите скали 10 - 180 сек. и 10 - 900 сек. върху данните от flux gate магнитометъра, получени от станция AQU (L'Aquila University, SEGMA array). Анализът е извършен за едночасови интервали от време 00 – 01 (UT), за периода 01.01.2008 – 10. 04.2009г. със стъпка на регистрацията на данните една секунда. Средните стойности на α и стандартните им отклонения, пресметнати за 95% доверително ниво са показани в таблица 2. От нея се вижда, че средните стойности на α , изчислени за хоризонталната компонента на магнитното поле имат по-високи стойности и за двете времеви скали, отколкото тези за вертикалната компонента. По-високите стойности за хоризонталната компонента се обясняват с по-силното влияние на геомагнитната активност върху нейните вариации.

Сравнявайки средните стойности на скейлинг индекса α от Таблица 1, получени за вертикалната компонента на магнитното поле за станция AQU с тези за вертикалната компонента от Таблица 2 се вижда, че за периода 01 януари 2008 - 07 април 2009 година те са по-високи за двете времеви скали от тези за периода 01 юни 2004 - 28 февруари 2005 година. Това означава, че фракталните структури на ULF емисиите през 2008-2009 са различни от тези наблюдавани през 2004 - 2005 година. За да се отговори на въпроса каква е била тяхната динамика за целия период 2004 - 2009 година и дали това по някакъв начин е свързано със състоянието на проводимост на земната кора е нужно детайлно изследване.

Станция AQU	H component		Z component	
	10-900 sec.	10-180 sec.	10-900 sec.	10-180 sec.
Mean	1.1340	1.033	0.943	0.901
Sd	0.146	0.234	0.066	0.070

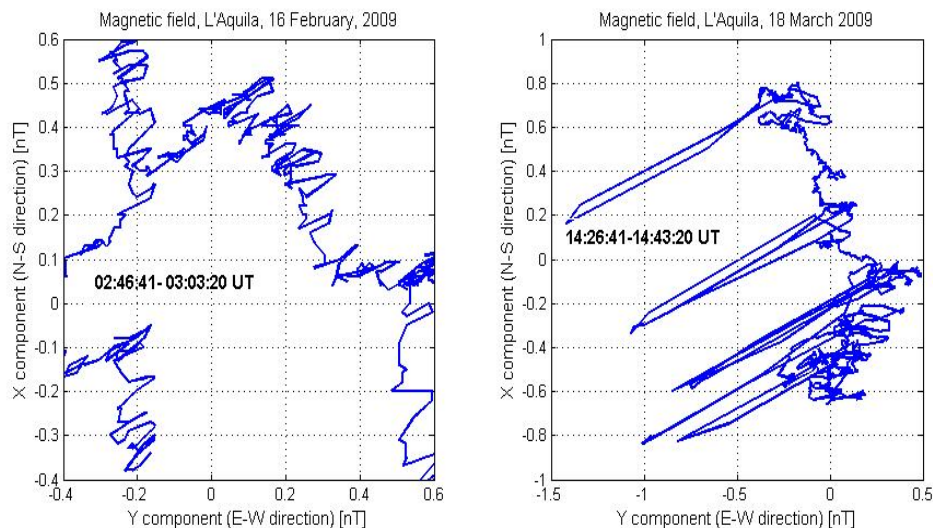
ТАБЛИЦА 2. СРЕДНИ СТОЙНОСТИ НА СКЕЙЛИНГ ИНДЕКСА α И ТЯХНАТА СТАНДАРТНА ДЕВИАЦИЯ, ИЗЧИСЛЕНИ ЗА СТАНЦИЯ AQU ЗА ПЕРИОДА 01.01.2008 – 07.04.2009г.

За периода януари 2008 – април 2009 се наблюдава периодичност в поведението на вариациите на скейлинг индекса α , която се колебае около период 9 дни за двете компоненти в двете времеви скали, като по-добре е изразена при скейлинг индексът α , пресметнат за хоризонталната компонента на магнитното поле. Вариациите на α са представени (на фигура 46) в дисертацията. Установено е (Mukhtarov, P. et al., 2011), че те имат връзка със слънчевата активност.

Проведените спектрален и поляризационен анализи от предишни изследвания на магнитни данни от станция AQU не откриват убедителни доказателства за промени в магнитния сигнал, имащи връзка със земетресението от 06.04.2009 г. в Лакуила, Италия (Villante et al. 2010). Според авторите единственото изключение правят, наблюдаваните на 18.03.2009 г. интензивни пулсации, за които трудно би се намерило обяснение. Сравнявайки техните характеристики с тези на 16 февруари се вижда, че те са различни по амплитуди и продължителност.

На 14 и 16 февруари 2009 година импулсовата активност е продължила няколко часа, като амплитудите на импулсите са в границите $\sim 0.05 - 0.1 \text{ nT}$ докато амплитудите на импулсите от 18 март (фиг.21) са с големина $\sim 1 \text{ nT}$ и са групирани в клъстери. Наблюдавани са в сигнала, получен от два независими fluxgate магнитометъра и един search coil (с изключение на малка част от февруари 2009, когато е имало прекъсване на работата му) в станция AQU и продължителността на импулсите варира от 1 до 16 секунди. Подобни импулси с продължителност до 15 сек., регистрирани по направлението север-юг 15 дни преди сеизмично събитие, са описани от Bleier et al.

(2009) във връзка със земетресението от Alum Rock, което има близки магнитуд и дълбочина с това в L'Aquila. В L'Aquila пулсациите, имащи локален характер, са регистрирани 48 - 55 дни преди земетресението и имат слаба интензивност, докато тези на 18 март 2009 г. (19 дни преди земетресението) имат голяма интензивност, но са групирани в клъстери. След 19 март 2009 година, магнитният сигнал се връща към обичайното си поведение до 6 април 2009 г.



Фигура 21. Поляризация на магнитен сигнал на 16 февруари и 18 март 2009г. ,станция AQU.

Поляризацията на импулсите (фиг. 21) от 16 февруари и 18 март са ориентирани по един и същи начин – на около 25° спрямо оста X(изток). И в двата дни пулсациите са еднополярни, като на 16 февруари имат „положителна“ поляризация по всички компоненти и са с ориентация по направление североизток. На 18 март имат „отрицателна“ поляризация и са ориентирани в посока югозапад, противоположно на тези от 16 февруари. Тези пулсации, вероятно се дължат на токове, течащи в земната кора и техният ъгъл на поляризация би трябвало да показва тяхната ориентация. Имайки предвид, че епицентърът е разположен в посока юг от магнитната обсерватория, то тогава токовете ще са ориентирани на ъгъл не по-малко от 20° спрямо Apennine fault (NW – SE). Това предположение може да бъде доказано само чрез комплексен анализ на разломните структури, анализ на разпределението на локалните проводимости в земната кора и други фактори (Bortnik et al., 2010). Вариации с амплитуди от порядъка ~ 1 nT, регистрирани в геомагнитното поле, са били причислени към тектонска и вулканична активност в земната кора (Zlotnicki and Bof 1998; Del Negro et al., 1994; Currenti et al., 2005a; Currenti et al., 2005c; Currenti et al., 2005b), също така (Johnston 1997; Masci 2010; Masci 2011; Molchanov et al., 1995) намират аномални прояви в геомагнитното поле, имащи литосферен произход. L'Aquila и Alum Rock имат съвсем различни геоложки структури и проводимости под точките на измерване на магнитното поле и въпреки това се наблюдават очевидни прилики в импулсната активност, регистрирана в двете станции.

От теоретична гледна точка, до сега има предложени няколко модела на физически механизми, опитващи се да обяснят геомагнитните сигнали, имащи връзка със сеизмичната активност:

- (a) магнито-хидродинамичен модел, като резултат на движение на флуиди през скали (Draganov et al., 1991);
- (b) електрокинетичен (Fenoglio et al., 1993; Fenoglio et al., 1995);

(с) преразпределение на зарядите в микропукнатините поради повишен натиск преди земетресение (Surkov et al., 2003; Molchanov and Hayakawa 1995; Molchanov and Hayakawa 1998);

(d) електрокинетичен, при който поради промяна в средата, породена от натиск, в нея се пораждат локални промени в проводимостта (Egbert 2002; Johnston 1997; Merzer and Kelemper 1997; Park et al. 1993; Park 1996). Има и друг модел, основаващ се на лабораторни експерименти, за генериране на електрично поле и съответно електрични токове в скални образци, които са свързани с механизма на подготовка на земетресения. (Freund et al. 2006; Freund 2007).

Lucente et al. (2010) определят епицентровете на форшоковете в Лакуила през 2009 година и получават отчетлива промяна в съотношението на скоростите на напречните и надлъжните (P и S) сеизмични вълни $\frac{V_p}{V_s}$ (compressional and shear waves).

Тя е започнала веднага след 30 март 2009 година, когато е имало форшок с $M=4$, а също така промени в сеизмичната анизотропия. Големите налягания в средата причиняват множество микропукнатини, което води до повишаване обема на скалите, а това от своя страна води до намаляване на V_s и респективно до нарастване на съотношението $\frac{V_p}{V_s}$.

Пукнатините, които имат определена ориентация, могат да причинят сеизмична анизотропия. Тя се изразява в това, че сеизмичните вълни се разпространяват в различните посоки по различен начин (Savage 2010). Според резултатите на Lucente et al. (2010), основните характеристики, свързани с подготвителната фаза на земетресението в Лакуила са:

- До 30 март 2009г. скалните образци от разлома са сухи и по тях се появяват пукнатини, което е определено чрез $\frac{V_p}{V_s}$ (малки стойности на съотношението).
- През втората половина на март 2009 г. се наблюдава повишено подреждане и сливане на тези пукнатини, започнало на 17 март 2009г., което е един ден преди наблюдаваната от нас пулсации на 18 март 2009г.
- Преди 30 март 2009 г. флуидите са затворени в долната част на разлома, поради свличане на скали породено от пукнатини в тях.
- Форшокът от 30 март 2009, $M=4$, е причина да се разкъса „уплътнението“ около флуидите и те се разпространяват по разлома, запълвайки фрактури и пукнатини.

Lucente et al. (2010) смятат, че именно този механизъм на разпространение на флуидите в скалите се крие в зародишът на голямото земетресение от 6 април 2009 г.

Получените от нас резултати за динамиката на скейлинг индекса α за периода 2008 - 2009 г., пресметнат за станция AQU и регистрираните пулсации на 14-ти, 16-ти февруари и 18-ти март 2009 година допълват физическата картина и са в съгласие с получените резултати от други автори (Lucente et al. 2010; Savage 2010; Villante et al. 2010). Те дват възможност постепенно да се запълват част от празнините и да се оформи по-пълна картина по отношение на това какво се случва в локалния електромагнитен фон при подготовка на геодинамични процеси.

Основни резултати

1. Проследена е динамиката на ULF електротелуричен шум, регистриран в сеизмична станция „Крупник“ при ниска геомагнитна активност. Посредством приложени дисперсионен и спектрален анализ (FFT) са намерени дни с аномално поведение на електротелуричния сигнал – 13.08.2003 и 22.11.2004 и е дискутиран техния възможен произход.

2. Получено е честотното разпределение на сигнала за седем честотни интервала: 1 – 3 mHz, 3 – 8 mHz, 8 – 20 mHz, 20 – 80 mHz, 0.08 – 0.2 Hz, 0.2 – 0.8 Hz и 0.8 – 2.5 Hz и е демонстрирано как се влияят тези честотни интервали от геомагнитната активност. Намерено е, че честотните диапазони 1 – 3 mHz, 3 – 8 mHz са най-силно повлияни от геомагнитната активност.
3. Усреднените стойности на големината на скейлинг индекса α , изчислен за станциите NCK-Унгария и AQU, CST, RNC-Италия са различни и зависят от точката на измерването. Това предполага, че фракталните структури на ULF емисиите са повлияни от геоложките условия, т.е. флукуационната функция и индексът α са чувствителни на геоложкия строеж (по точно, на разпределението на проводимостта).
4. В станцията CST са разгледани три основни събития с намаляващ скейлинг индекс α . Те са наблюдавани за периода 10 – 21 юни 2004г., на 7 септември (с продължителност ~4 дни) и на 31 октомври 2004 г.(~10 дни) във времевата скала 10 -180 сек. и имат локален характер. Анализът на сигнала показва понижение в спектралната плътност в диапазона Pc3-Pc5 на 7 септември и 31 октомври 2004г. Това може да е продиктувано или от повишение на високочестотните флукуации в интервала 0.01 – 0.5 Hz в сравнение с нискочестотните компоненти (< 0.01 Hz), или от относително подтискане на спектралната плътност на нискочестотните компоненти в сравнение с високочестотните ULF компоненти (0.01 – 0.5 Hz).
5. С прилагането на DFA метода беше установено, че вариациите на скейлинг индекса α имат глобални и локални характеристики. (а) Глобалните характеристики се състоят в появяване на краткосрочни повишения на α във всички обсерватории (станции), които се свързват с повишена геомагнитна активност. В дните на повишена геомагнитна активност динамиката на наклона на флукуационната функция $F(s)$ следва вариациите на геомагнитния индекс K_p . (б) Локалните характеристики се състоят в значими разлики в средните стойности на скейлинг индекса, изчислен за станциите NSK-Унгария и AQU, CST, RNC-Италия; Това предполага, че фракталните структури на ULF емисиите са чувствителни на състоянието на проводимостта в земната кора. Флукуационната функция показва действието на себеподобен механизъм (self-similarity) във времевата скала ($10 < T < 900$ сек).
6. Установи се, че поведението на скейлинг индекса α , изчислен за вертикалната компонента на магнитното поле във времевата скала 10 - 180 секунди, не се контролира основно от геомагнитната активност, което я прави по-подходяща за изследвания при търсене на литосферни причинители на смущения в магнитното поле в сравнение със скалата 10 – 900 секунди.
7. Получени са скейлинг характеристиките на вариациите на магнитното поле за станциите от магнитометричната мрежа SEGMA за периоди от 2007, 2008, 2009 и 2010 година. В станция AQU посредством проведен DFA анализ са намерени дни с необичайна поява на уникални пулсации в магнитния сигнал – 14, 16 февруари 2009 г. и 18 март 2009 г., които не са свързани с магнитосферен източник или антропогенна дейност. Изследвани са техните поляризационни и спектрални характеристики и е намерено, че те най-вероятно имат литосферен произход, имайки предвид и изследванията на други автори.

Приноси на дисертационния труд:

1. Проведено е първото по рода си изследване на локалните спектрални характеристики на ULF елетротелуричен шум, регистриран в сеизмично

активна зона Крупник, България при ниска геомагнитна активност и е намерено разпределението на нормалния електротелуричен шум.

2. Получени са локалните скейлинг характеристики на магнитното поле при многоточкови измервания в рамките на магнитометричната мрежа SEGMA с цел идентифициране на възможните причинители на смущения на магнитното поле.
3. Получена е зависимостта на скейлинг параметъра α за различни времеви скали и влиянието на геомагнитната активност върху неговото поведение. Намерено е, че съществува времева скала (10 -180 секунди) за вертикалната компонента на магнитното поле, при която влиянието на геомагнитната активност върху вариациите на магнитното поле е много слабо. Това дава възможност смущенията от литосферен произход да бъдат по-лесно идентифицирани.
4. Намерени са уникални геомагнитни пулсации в магнитния сигнал, регистриран в станция AQU. Получените резултати за изследваните в тази дисертация аномални ULF вариации на магнитното поле потвърждават и допълват резултати на други автори, за други физични параметри, които вероятно са свързани със земетресението в Лакуила, Италия на 06.04.2009г.

Авторски публикации, включени в дисертационния труд:

1. B.V.Boychev, P.I.Nenovski, St.T.Ivanov, M.Chamati, L.Petrov, V.B.Boychev (2003). Equipment for measuring quasistatic and ULF variations of the Earth Electric Potential, BGJ, Vol.29,1 - 4.
2. Nenovski, P., Chamati, M., and Boytchev, B. (2005). ULF electrotelluric noise measurements at Krupnik seismic station (Bulgaria), Int. Workshop on Seismo Electromagnetics, IWSE-2005, Tokyo, Japan, pp 223-226.
3. M. Chamati, P. Nenovski, M. Vellante, U.Villante, K. Schwingenschuh, M. Boudjada, V. Wesztergom (2009). Application of DFA method to magnetic field data from SEGMA array. BGJ, Vol. 35, pp.3-16.
4. Chamati, M., Nenovski, P., Vellante, M., Villante, U., Schwingenschuh, K., Boudjada, M., Wesztergom, V., (2011). Application of DFA method to magnetic field data. (Complex research of earthquake's forecasting possibilities, seismicity and climate change correlations), 13-16 September 2011, Tbilisi, Georgia, Volume 2, ISSN 2233-3681, pp. 72-79.
5. Nenovski, P., Chamati, M., Villante, M., De Lauretis, M. and P. Francia (2013). Scaling characteristics of SEGMA magnetic field data around the Mw6.3 Aquila earthquake. Acta Geophysica, Vol. 61(2), pp.311-337. (IF 1)

Цитирания:

H.Chamati, M.S. Stoycheva and G.A. Evangelakis (2004). Immersed nano-sized Al dispersoids in an Al matrix: effects on the structural and mechanical properties by molecular dynamics simulations, J.Phys.: Condens. Matter Vol.16, 28, 5031-5042.

1. I.A. Ovid'ko and A.G. Sheinerman, J. Phys.: Condens. Matter 18 (2006) L225–L232.
2. Z. Zhang and D.L. Chen, Mater. Sci. Eng. A, 483–484 (2008) 148–152.
3. Н.В. Тиховская, "ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ СОСТОЯНИЙ НА НОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ" АВТОРЕФЕРАТ – диссертации на соискание учёной степени кандидата физико–математических наук, "Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского" 2008.

Nenovski, P., Chamati, M., Villante, M., De Lauretis, M. and P. Francia (2013). Scaling characteristics of SEGMA magnetic field data around the Mw6.3 Aquila earthquake. *Acta Geophysica*, Vol. 61(2), pp.311-337. (IF 1)

1. Elizabeth Dologlou, 2013, Aspects on the origin of the precursory magnetic anomalies of the Mw 6.4 Aquila earthquake, *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, DOI 10.1007/s00531-013-0970-9 (IF2.26).

Авторски публикации извън дисертационния труд:

1. H.Chamati, M.S. Stoycheva and G.A. Evangelakis (2004) Immersed nano-sized Al dispersoids in an Al matrix: effects on the structural and mechanical properties by molecular dynamics simulations, *J.Phys.: Condens. Matter* Vol.16, 28, 5031-5042.
2. Б. Бойчев, П.Неновски, М. Шамати (2004) Електромагнитни предвестници на активни сеизмични явления., Юбилейна научна сесия 2004 "130 години авиационно образование в България", НВУ "В.Левски", 20-21.04.2006, Сборник доклади, Том 1, ISBN 978-954-713-079-1
3. P. Nenovski, B. Boychev, M. Chamati, S. Ivanov and I. Cholakov (2004). Electrotelluric ULF noise studies at the Krupnik fault, 4th National Geophysical Conference, 4-5 October 2004, Sofia.
4. P. Nenovski, M. Chamati and B. Boytchev (2005). ULF Electromagnetic Signatures of Earthquake Preparation Processes-their Reliability and Analysis, 11-th International Scientific Conference "Solar-Terrestrial Influences", 23-25 November 2005, Sofia. , ISBN 954-91424-1-9, pp. 31-34.
5. Бойчев Б, П. Неновски, М. Стойчева-Шамати, В. Бойчев (2005). Електротелурични измервания в ULF диапазона за изследване на краткосрочни предвестници на земетресения. Proceedings of Scientific Conference "SPACE, ECOLOGY, SAFETY" with International Participation - SES'2005, 10-13 June 2005, Varna, Bulgaria, Book 2, pp. 302-309.
6. Boytchev B., P. Nenovski, S. Dimitrova, K. Donkova, V. Boytchev, M. Chamati, E. Spassov (2006). Seismicity and measurements of electromagnetic forerunners in the Kresna's earthquake zone. SENS 2006, 14-16 June 2006, Varna, Bulgaria.
7. P.Nenovski, M.Chamati and P.Muhtarov (2011). What we can learn from the 2009 Mw6.3 L'Aquila earthquake. Complex research of earthquake's forecasting possibilities, seismicity and climate change correlations, 2-5 May 2011, Ohrid, Republic of Macedonia, Volume 1, ISBN 978-9989-631-04-7, pp.243-255.
8. Nenovski, P., M. Chamati, U. Villante, M. De Lauretis, M. Vellante, P. Francia, V. Wesztergom, K. Schwingenschuh, M. Boudjada, G. Prattes, DFA analysis of SEGMA magnetic field data around the M6.3 Aquila EQ, Proceedings of the 2nd workshop of EU FP7 project BlackSeaHazNet (Complex research of earthquake's forecasting possibilities, seismicity and climate change correlations), 13-16 September 2011, Tbilisi, Georgia, Volume 2, ISSN 2233-3681, pp. 157-163.

Участие в научни форуми (конференция/конгрес):

1. 4th National Geophysical Conference, 4-5 October 2004, Sofia.
2. Workshop on Seismo Electromagnetics, IWSE-2005, Tokyo, Japan.
3. 11-th International Scientific Conference "Solar-Terrestrial Influences", November 23-25, 2005, Sofia.
4. Scientific Conference "SPACE, ECOLOGY, SAFETY", SES' 2005, 10-13 June 2005, Varna, Bulgaria.
5. Second Scientific Conference with International Participation SENS'2006, 14-16 June 2006, Varna, Bulgaria.
6. International Symposium on Recent Observations and Simulations of the Sun-Earth System (ISROSES); Varna, Bulgaria; September 18-22, 2006.
7. First DEMETER Symposium, Toulouse, France, June 2006.
8. EGU, Vienna, Austria, 02-07 May 2010.

9. Complex research of earthquake's forecasting possibilities, seismicity and climate change correlations, 1-st workshop of the EU FP7 project BlackSeaHazNet, 2 – 5 May 2011, Ohrid, FYRO Macedonia.
10. Complex research of earthquake's forecasting possibilities, seismicity and climate change correlations, 2-nd workshop of the EU FP7 project BlackSeaHazNet, 12-16 September 2011, Tbilisi, Georgia.

Участие в проекти:

Ръководител:

МУ 1506/05 Изследване на ULF електротелуричен шум в честотния диапазон 0.001-2.5 Hz.

Участник:

НЗ1402/04 Електромагнитен мониторинг на райони с повишена сеизмична активност.

ЕБР-Австрия: Анализ на ULF електро и магнитотелурични наблюдения свързани със сеизмичната активност.

ЕБР-Италия: Анализ на електромагнитни наблюдения от SEGMA свързани с глобален мониторинг за околна среда и сигурност (GMES).

BlackSeaHazNet- FP7 MCA Project PIRSES-GA-2009-24687

Библиография:

- Alperovich, L. et al., 2006. Coherence of the ULF fields in the seismoactive zone of Japan. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(4-9), pp.248–257.
- Alperovich, L., Zheludev, V. & Hayakawa, M., 2003. Use of wavelet analysis for detection of seismogenic ULF emissions. *Radio Science*, 38(6), p.n/a–n/a.
- Berry, M.V., 1979. Diffractals. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 12(6), pp.781–797.
- Bleier, T. et al., 2009. Investigation of ULF magnetic pulsations, air conductivity changes, and infra red signatures associated with the 30 October Alum Rock M5.4 earthquake. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9(2), pp.585–603.
- Bortnik, J. et al., 2010. Estimating the seismotelluric current required for observable electromagnetic ground signals. *Annales Geophysicae*, 28(8), pp.1615–1624.
- Boychev, B. et al., 2006. Seismicity and measurements of electromagnetic forerunners in the Kresna's earthquake zone. In *SENS'2006 (Space, Ecology, Nanotechnology, Safety)*. Second Scientific Conference with International Participation 14 - 16 June 2006. Varna, Bulgaria.
- Boychev, B., & Nenovski, P., 2003. Ground-based diagnostics of the inner magnetospheric, ionospheric and lithospheric parameters by geomagnetic pulsation measurements. *Advances in Space Research*, 31(5), pp.1241–1246.
- Boychev, B.V. et al., 2003. Equipment for measuring quasistatic and ULF variations of the earth electric potential. *BGJ*, 29(1-4), pp.31–41.
- Buldyrev, S.V. et al., 1995. Long-range correlation properties of coding and noncoding DNA sequences: GenBank analysis. *Physical Review E*, 51(5), p.5084.
- Chamati, M. et al., 2011. Application of DFA method to magnetic field data. In *Complex research of earthquake's forecasting possibilities, seismicity and climate change correlations, 13-16 September 2011, Tbilisi, Georgia*. pp. 72–79.
- Chamati, M. et al., 2009. Application of DFA method to magnetic field data from SEGMA array. *Bulgarian Geophysical Journal*, 35, pp.3–16.
- Currenti, G. et al., 2005b. Fluctuation analysis of the hourly time variability of volcano-magnetic signals recorded at Mt. Etna Volcano, Sicily (Italy). *Chaos, Solitons & Fractals*, 23(5), pp.1921–1929.
- Currenti, G. et al., 2005c. Multifractality in local geomagnetic field at Etna volcano, Sicily (southern Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5(4), pp.555–559.
- Currenti, G. et al., 2005a. Scaling characteristics of local geomagnetic field and seismicity at Etna volcano and their dynamics in relation to the eruptive activity. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(1-2), pp.96–106.
- Dobrovolsky, I.P., Zubkov, S.I. & Miachkin, V.I., 1979. Estimation of the size of earthquake preparation zones. *pure and applied geophysics*, 117(5), pp.1025–1044.

- Egbert, G.D., 2002. On the Generation of ULF Magnetic Variations by Conductivity Fluctuations in a Fault Zone. *Pure and Applied Geophysics*, 159(6), pp.1205–1227.
- Fenoglio, M.A. et al., 1993. Comparison of Ultra-Low Frequency Electromagnetic Signals with Aftershock Activity during the 1989 Loma-Prieta Earthquake Sequence. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(2), pp.347–357.
- Fenoglio, M.A., Johnston, M.J.S. & Byerlee, J.D., 1995. Magnetic and electric fields associated with changes in high pore pressure in fault zones: Application to the Loma Prieta ULF emissions. *Journal of Geophysical Research*, 100(B7), p.PP. 12,951–12,958.
- Fraser-Smith, A.C. et al., 1990. Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake. *Geophysical Research Letters*, 17(9), pp.1465–1468.
- Freund, F.T., 2007. Pre-earthquake signals – Part II: Flow of battery currents in the crust. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7(5), pp.543–548.
- Freund, Takeuchi, A. & Lau, B., 2006. Electric currents streaming out of stressed igneous rocks – A step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions. *Physics and Chemistry of the Earth Parts ABC*, 31(4-9), pp.389–396.
- Gotoh, K., Hayakawa, M. & Smirnova, N., 2003. Fractal analysis of the ULF geomagnetic data obtained at Izu Peninsula, Japan in relation to the nearby earthquake swarm of June–August 2000. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3(3/4), pp.229–236.
- Hayakawa, M. et al., Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam Earthquake of 8 August 1993. *Geophysical Research Letters*, 23(3), p.PP. 241–244.
- Hayakawa, M., Ito, T. & Smirnova, N., 1999. Fractal analysis of ULF geomagnetic data associated with the Guam Earthquake on August 8, 1993. *Geophysical Research Letters*, 26(18), p.PP. 2797–2800.
- Hurst, H.E., 1951. Long-term storage capacity of reservoirs. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 116, pp.770–808.
- Ida, Y. et al., 2005. Multifractal analysis for the ULF geomagnetic data during the 1993 Guam earthquake. *Nonlin. Processes Geophys.*, 12(2), pp.157–162.
- Ismaguilov, V.S. et al., 2001. ULF magnetic emissions connected with under sea bottom earthquakes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 1(1/2), pp.23–31.
- Johnston, M.J.S., 1997. Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity. *Surveys in Geophysics*, 18(5), pp.441–475.
- Kantelhardt, J.W. et al., 2001. Detecting Long-range Correlations with Detrended Fluctuation Analysis. *PHYSICA A*, 295, p.441.
- Kantelhardt, J.W. et al., 2002. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 316(1-4), pp.87–114.
- Kopytenko, Y.A. et al., 1993. Detection of ultra-low-frequency emissions connected with the Spitak earthquake and its aftershock activity, based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardzia observatories. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 77(1-2), pp.85–95.
- Li, M. et al., 2013. Review of unprecedented ULF electromagnetic anomalous emissions possibly related to the Wenchuan MS = 8.0 earthquake, on 12 May 2008. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13(2), pp.279–286.
- Lucente, F.P. et al., 2010. Temporal variation of seismic velocity and anisotropy before the 2009 MW 6.3 L'Aquila earthquake, Italy. *Geology*, 38(11), pp.1015–1018.
- Masci, F., 2010. On claimed ULF seismogenic fractal signatures in the geomagnetic field. *Journal of Geophysical Research*, 115, p.10 PP.
- Masci, F., 2011. On the seismogenic increase of the ratio of the ULF geomagnetic field components. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 187(1-2), pp.19–32.
- Merzer, M. & Kelemper, S.L., 1997. Modeling Low-frequency Magnetic-field Precursors to the Loma Prieta Earthquake with a Precursory Increase in Fault-zone Conductivity. , (150), pp.217–248.
- Molchanov, O.A. et al., 1992. Results of ULF Magnetic Field Measurements Near the Epicenters of the Spitak (M_S = 6.9) and Loma Prieta (M_S = 7.1) Earthquakes: Comparative Analysis. *Geophysical Research Letters*, 19(14), pp.1495–1498.
- Molchanov, O.A., Hayakawa, M. & Rafalsky, V.A., 1995. Penetration characteristics of electromagnetic emissions from an underground seismic source into the atmosphere, ionosphere, and magnetosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 100(A2), pp.1691–1712.
- Moore, George W., 1964. Magnetic Disturbances preceding the 1964 Alaska Earthquake. *Nature*, 203(4944), pp.508–509.

- Mukhtarov, P., Pancheva, D. & Trifonova, P., 2011. Geomagnetic and Ionospheric Response to Recurrent Geomagnetic Activity at Middle Latitudes. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*, 64(10), pp.1469–1478.
- Del Negro, C. et al., 1994. Volcanomagnetic anomalies: a review and the computation of the piezomagnetic field expected at Vulcano (Aeolian Islands, Italy). *Annals of Geophysics*, 37(5 Sup.). Available at: <http://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/4165>.
- Nenovski, P. et al., 2013. Scaling characteristics of SEGMA magnetic field data around the Mw 6.3 Aquila earthquake. *Acta Geophysica*, 61(2), pp.311–337.
- Nenovski, P., Chamati, M. & Boytchev, B., 2005a. ULF electromagnetic signatures of earthquake preparation processes - their reliability and analysis. In 11-th International Science Conference SOLAR-TERRESTRIAL INFLUENCES. Sofia, Bulgaria, pp. 31–34.
- Nenovski, P., Chamati, M. & Boytchev, B., 2005b. ULF electrotelluric noise measurements at Krupnik seismic station (Bulgaria). In *IWSE-2005*. Int. Workshop on Seismo Electromagnetics. Tokyo, Japan, pp. 223–226.
- Nenovski, P., M. Chamati & Muhtariv, P., 2011. What we can learn from the 2009 Mw6.3 L'Aquila earthquake. In *Complex research of earthquake's forecasting possibilities, seismicity and climate change correlations, 2-5 May 2011, Ohrid, Republic of Macedonia*. pp. 243–255.
- Park, S.K. et al., 1993. Electromagnetic precursors to earthquakes in the Ulf band: A review of observations and mechanisms. *Reviews of Geophysics*, 31(2), p.PP. 117–132.
- Park, S.K., 1996. Precursors to earthquakes: Seismoelectromagnetic signals. *Surveys in Geophysics*, 17(4), pp.493–516.
- Peng, C.-K. et al., 1995. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 5(1), p.82.
- Pilipenko, V., Nenovski, P. & Tanaka, H., 2003. Detection and discrimination of VLF/ULF seismic-related electromagnetic emissions. *Bulgarian Geophysical Journal*, 29(1-4), pp.13–30.
- Prattes, G. et al., 2008. Multi-point ground-based ULF magnetic field observations in Europe during seismic active periods in 2004 and 2005. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8(3), pp.501–507.
- Ralchovsky, T.M. & Komarov, L.N., 1988. Periodicity of the earth electric precursor before strong earthquakes. *Tectonophysics*, 145(3–4), pp.325–327.
- Savage, M.K., 2010. The role of fluids in earthquake generation in the 2009 Mw 6.3 L'Aquila, Italy, earthquake and its foreshocks. *Geology*, 38(11), pp.1055–1056.
- Serita, A. et al., 2005. Principal component analysis and singular spectrum analysis of ULF geomagnetic data associated with earthquakes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5(5), pp.685–689.
- Turcotte, D.L., 1995. Chaos, fractals, nonlinear phenomena in Earth sciences. *Reviews of Geophysics*, 33(S1), pp.341–343.
- Turcotte, D.L., 1997. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics* 2nd ed., Cambridge University Press.
- Varotsos, P. & Lazaridou, M., 1991. Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals. *Tectonophysics*, 188(3–4), pp.321–347.
- Varotsos, P.A., Sarlis, N.V. & Skordas, E.S., 2009. Detrended fluctuation analysis of the magnetic and electric field variations that precede rupture. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 19(2), p.023114.
- Varotsos, P.A., Sarlis, N.V. & Skordas, E.S., 2003. Long-range correlations in the electric signals that precede rupture: Further investigations. *Physical Review E*, 67(2), p.021109.
- Villante, U. et al., 2010. The 6 April 2009 earthquake at L'Aquila: a preliminary analysis of magnetic field measurements. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10(2), pp.203–214.
- Zlotnicki, J. & Bof, M., 1998. Volcanomagnetic signals associated with the quasi-continuous activity of the andesitic Merapi volcano, Indonesia: 1990–1995. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 105(3–4), pp.119–130.