



МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН РИЛСКИ“

ГЕОЛОГОПРОУЧВАТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ

КАТЕДРА „ПРИЛОЖНА ГЕОФИЗИКА“

маг.инж. Емил Илиев Ойнаков

Микросеизмичен шум, практически приложения.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за присъждане на

образователна и научна степен

„Доктор“

Професионално направление 4.4. Науки за Земята

Научна специалност „Методи и техника на геоложките изследвания“

Научен ръководител: проф. д-р Бойко Рангелов
Научен консултант: доц. д-р Драгомир Господинов

София, 2016

Пълният обем на дисертацията е 209 страници, 20 таблици и 146 фигури. Използваната литература обхваща 203 заглавия на кирилица и латиница. Дисертацията се състои от въведение, актуалност на темата, цел и задачи на дисертационния труд, шест глави и приложения.

Означенията на формулите, фигурите и таблиците в автореферата съвпадат с тези от дисертацията.

Дисертационният труд е обсъден на2016 г. и е насочен за защита към МГУ „Св.Иван Рилски” - София от Разширен катедрен съвет на катедра „Приложна геофизика” при МГУ „Св.Иван Рилски” - София със заповед на Ректора на Университета.

Практическото изследване в дисертационния труд е извършено с помощта на софтуерните продукти SeisGram2K70, MATLAB R2014a, COMSOL Multiphysics 4.4, Voxler 3(Golden Software), Surfer 10 (Golden Software), Image Analysis.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на2017 г. отчаса вна МГУ „Св. Иван Рилски” - София.

Дисертацията, автореферата и рецензиите на членовете на научното жури се намират в

Автор: маг.инж. Емил Илиев Ойнаков

Заглавие: " Микросеизмичен шум, практически приложения"

Тираж: 20 броя

Печат: ИК "Св. Иван Рилски" МГУ – София

Съдържание на автореферата

Въведение.

Обща характеристика на дисертационния труд

Актуалност на темата.

Цел на дисертационния труд.

Задачи на дисертационния труд.

Глава I. Литературен обзор и състояние на въпроса.

I.1. Активни и пасивни сеизмични методи.

I.2. Микросеизми.

I.3. Микросеизмите като сондиращ сигнал.

I.4. Източници на микросеизми.

I.5. Съвременно състояние на изследванията на микросеизмичния шум.

I.6. Методи на изследване използващи микросеизмичния фон.

I.7. Метод на ниско честотното микросеизмично сондиране.

I.8. Технология на микросеизмичното сондиране.

I.9. Неразрешени въпроси и постановка на задачата.

Глава II – Теоретични основи, математически апарат, аналитични и моделни решения.

Тримерна задача на динамиката

Резултати от численото моделиране.

Развитие на метода на ниско честотното микросеизмично сондиране.

Глава III – Експериментална част. Апаратура, методика на работа, получаване и обработка на данните.

III.1. Апаратура и методика на работа.

III.1.1 Измерителна апаратура .

Интермизийски разлом.

Сеизмична зона Вранча.

Сеизмична зона Калабрия (Южна Италия).

III.1.2. Методика на работа.

III.1.2.1. Статистически характеристики и стационарност на нискочестотните микросеизмични сигнали.

III.1.2.2. Някои особености на микросеизмичния шум на изследваните територии.

III.1.2.3. Методика на обработка на данните от измерванията на територията на провежданите изследвания.

Глава IV – Геоложки и геодинамични условия в районите на изследване. Резултати от измерванията и интерпретация.

IV.1. Основни черти на геоложкия и тектонския строеж на териториите на провежданите изследвания с ММС.

IV.1.1. Интермизийски разлом.

IV.1.2. Сеизмична зона Вранча.

IV.1.3. Сеизмична зона Калабрия.

IV.2. Резултати от микросеизмичното сондиране в изследваните райони.

IV.2.1. Резултат от микросеизмичното сондиране в областта на Интермизийския разлом.

IV.2.2. Резултат от микросеизмичното сондиране в областта Вранча.

IV.2.3. Резултат от микросеизмичното сондиране в Южна Италия сеизмична зона Калабрия.

Глава V–Оценка на точността на резултатите и построенията.

V.1. Оценка на чувствителността на метода към времевите вариации

V.1.1. Зона Вранча.

Модел, получен от усредняване на резултатите от времевите експерименти.

V.1.2. Зона на Калабрийската арка.

Модел получен от усредняване на резултатите от времевите експерименти .

V.2. Оценка чувствителността на метода към промяна местоположението на базовата станция.

V.2.1. Зона Вранча.

V.2.1. Зона на Калабрийската арка.

VI. Получени резултати и основни приноси.

VII. 1. Публикации по дисертационния труд

VII. 2. Доклади на научни форуми, конференции, симпозиуми и др.

Литература, посочена в автореферата на дисертационния труд.

Изказвам благодарността си към моя научен ръководител проф. д-р Бойко Рангелов за ценните съвети и напътствия, за придобитите знания, за помощта и моралната подкрепа, която ми оказа през целия период на редовната ми докторантура.

Изказвам благодарността си към моя научен консултант доц. д-р Драгомир Господинов за цялостната му ангажираност и подкрепа. Благодаря му за напътствията при изграждането на професионалните ми знания, опит и умения, за отношението на всеотдайност и безкористност към научно-изследователската работа.

Изказвам благодарността си към моя научен консултант проф. д-р Стефан Боянов Шанов за предоставените измервания от района на Интермизийския разлом и за цялостната му ангажираност и подкрепа.

Благодаря и на всички членове от катедра "Приложна геофизика" към Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски" за полученото съдействие.

ВЪВЕДЕНИЕ

Изучаването на микросеизмичния шум се явява актуална задача, както в теоретически, така и в практически план. Първо, микросеизмичния шум съдържа важна информация за настоящия строеж на Земята и като цяло за „живота“ на нашата планета, нейната реакция на космически въздействия и влиянието на развиващата се ноосфера. Второ, микросеизмичния шум отразява нееднородния геоложки строеж и напреженията на горната част на земната кора.

Може да се констатира, че в настоящия момент се установява ново, перспективно направление в геофизичните изследвания, което е определено като сеизмична шумова томография или сеизмология в микромащаб.

ОБЩА ХАРЕКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на темата

Немаловажни фактори в микросеизмичните проучвания се явяват икономическата и екологичната съставляваща на методиката на изследване, тъй като те не са свързани с използване на скъпо струващи изкуствени източници за възбуждане на колебания и съответно не причиняват вреда на окръжаващата среда.

В настоящия момент един от методите, добре утвърден при изучаването на нееднородни структури по данни от повърхностните вълни и отговарящ на икономическите изисквания за ниска себестойност, се явява методът на микросеизмичното сондиране (Пат. РФ на изобретение №2271554, МПК G01V 1/00. Способ сейсморазведки/ А.В. Горбатиков; заявл. 25.03.2005; опубл. 10.03.2006. Бюл.№7.9 с.) .

С помощта на пасивните сеизмични методи се решават широк кръг както фундаментални научни, така и приложни производствени и инженерни задачи. Като пример за решаването на научни задачи може да послужи изследването на строежа на крупномащабни нееднородности въз основа на определяне периода на тяхното собствено колебание, изследване на структури в горния слой с крос-корелационен анализ на функцията на сеизмичния шум, изследване на дълбочинния строеж на различни геоложки структури. Примери за приложни задачи могат да бъдат, например, търсене на залежи на въглеводороди по характерни спектрални максимуми в локалното микросеизмично поле, пасивен сеизмичен мониторинг на колекторите на нефт и газ в процеса на разработка на находищата, контрол на устойчивостта на сгради, нефтени платформи и др. съоръжения с помощта на анализа на собствените им колебания.

Цел на дисертационния труд

В дисертационния труд са поставени няколко основни цели:

1. Експериментални изследвания по метода на микросеизмичното сондиране (ММС) на различни по дълбочинен строеж, геоложки и геодинамични структури с основна насока – разломни и сеизмогенни зони и обекти.

2. Оценка на ефективността от практическото използване на микросеизмичния шум за решаване на геоложки и геодинамични структурни задачи за различни райони (Интермизийски район, сеизмична зона Вранча, сеизмична зона Калабрия)..

3. Изследване на чувствителността на метода и неговите свойства – устойчивост, разрешаваща способност, дълбочина на проникване и др.

Задачи на дисертационния труд

Реализацията на поставените цели предвижда решаването на следните задачи:

- обобщаване на опита от използването на характеристиките на микросеизмичния шум за решаване на геоложки и геомагнитни задачи и анализ на получените резултати с оглед на подобряване на методиката на изследване;
- изучаване на особеностите и уточняване на полезните параметри на микросеизмичния шум и неговите времеви вариации в условията на изучаваните обекти в различни геодинамични области;
- разработка на методика на измерване с използването на стационарни сеизмични станции и обработка на микросеизмичния шум по метода на микросеизмичното сондиране за изследваните територии;
- прилагане на метода на микросеизмичното сондиране за изследване на териториите на Интермизийския разлом, сеизмичната зона Вранча и сеизмичната зона на Калабрийската арка;
- изследване на резултатите от прилагането на метода на микросеизмичното сондиране за зоните на Интермизийския разлом, сеизмична зона Вранча и Калабрийската арка и сравнението им с други резултати, модели и хипотези;
- оценка на чувствителността на метода на микросеизмично сондиране по резултатите от прилагането му за изучаваните територии, чрез моделни и натурни експерименти;
- оценка ефективността на метода на микросеизмичното сондиране при решаването на конкретни геоложки и геодинамични задачи.

Глава I – Литературен обзор и състояние на въпроса

I.1. Активни и пасивни сеизмични методи

Съвременните сеизмични методи могат да бъдат условно разделени на две принципно различаващи се групи: активни и пасивни.

Различията са в условията на възбуждане и приемане на използваните вълни. Активните сеизмични методи изискват възбуждане на сеизмични вълни, поради което положението и други параметри на източника обичайно се считат за известни.

В пасивните методи не се възбужда сондиращ сигнал, а се използва съществуващото вълново поле, което може да има както природен така и техногенен произход. Полевите измервания по методите на пасивната сеизмика не причиняват вреда на околната среда и могат да се провеждат дори и в границите на гъсто населени градове за разлика от активните методи, изискващи използването на мощни източници на сеизмични вълни, като например подземни взривове, мощни вибратори и др.

I.2. Микросеизми.

Микросеизмите представляват слаби фонове колебания на земната кора и се явяват суперпозиция, най-общо казано, на несвързани помежду си колебателни процеси от различни, по положение и природа, сеизмични източници.

I.3. Микросеизмите като сондиращ сигнал

Привлекателността на използването на микросеизмичното поле на Земята в това качество е продиктувана от две обстоятелства. Първо, микросеизмичния фон присъства във всяка точка от повърхността на планетата и е представен в широк честотен диапазон, което позволява да се провеждат изследвания в голям дълбочинен обхват във всяка интересуваща ни точка от земната повърхност. Второ, полевите изследвания изискват много по-малки разходи в сравнение с традиционните методи на сеизмопроучването.

I.4. Източници на микросеизмите

Изследванията [Гутенберг, 1935], показват, че основен механизъм за образуване на микросеизми се явява предаването на смущенията от въздушните маси в атмосферата през повърхността на акваториите, а така също и през относително равни области от сушата, лишени от особености на релефа. Тези смущения се разпространяват по твърдата земна повърхност във вид на различни типове сеизмични вълни.

Резултатите от изследването на микросеизмичното поле показват, че при микросеизмичните колебания честотите варират от стотни части от Hz до няколко kHz , а амплитудата на колебание на точките на средата варират от част на нанометъра до няколко микрона. Основната енергия на микросеизмичния шум е концентрирана в диапазона честоти $0.05 \div 0.25 Hz$ (периоди $12 \div 20 s$). Енергетичният спектър на микросеизмите, характерен за наблюденията на сушата, има два максимума: първият в честотния диапазон $0.05 \div 0.08 Hz$ (периоди $12 \div 20 s$), вторият - $0.01 \div 0.25 Hz$ (периоди $4 \div 10 s$).

I.5. Съвременен състояние на изследванията на микросеизмичния шум.

Извършеният литературен обзор включва сведения за историческото развитие на изследванията на микросеизмичния шум, както и анализ на съвременното им състояние.

I.6. Методи на изследване използващи микросеизмичния фон.

Дисперсионни методи.

Сеизмичните методи от дисперсионната група, по правило се базират на измерванията целта на които е построяването на експериментални криви на зависимостта на фазовата скорост на повърхностните вълни от тяхната честота (дисперсионна зависимост). Съществено достойнство на методите от дисперсионната група е, че те разширяват възможностите на традиционните сеизмични методи, основани на използването на записите от земетресения. Към недостатъците на дисперсионните методи може да отнесем сравнително

ниската разрешаваща способност и високата трудоемкост на реализацията на дисперсионните методи.

Статистически методи.

Фактът за наличието на връзки между пространственото разпределение на някои статистически характеристики на микросеизмичното поле (амплитудата, централната честота на характерен максимум в спектъра и др.) с пространственото разпределение на акустичните свойства на геоложката среда се явява основата на методите от втората – статистическа – група методи. Голяма част от методите на статистическата група по същество е насочена към опита без съществени загуби на качество и информация да се заобиколи трудоемкостта и относително високата стойност на методите от дисперсионната група.

I.7. Метод на ниско честотното микросеизмично сондиране.

През 2005 година е патентован нов способ на пасивното сеизмическо проучване основан на анализа на пространствените вариации на спектъра на локалното микросеизмично поле [А.В. Горбатиков, 2005]. Метода се базира на експериментално проверено предположение за това, че вертикалната компонента на преместване в микросеизмичния шум е представена основно от вертикалната компонента на преместване на фундаменталната мода на вълните на Релей.

Методът на микросеизмичното сондиране (ММС) по описание се отнася към групата на статистическите методи. На първи етап метода на ниско честотното микросеизмично сондиране се явява чисто феноменологичен, но автора на метода и други изследователи провеждат теоретични и експериментални изследвания, резултатите, от които отговарят на множеството възникнали въпроси и в значителна степен обяснява явленията, на които се базира метода, а също така и обосновават възможностите за неговото широко прилагане

I.8. Технология на микросеизмичното сондиране.

Технологията на измерване и обработка на данните предвиждат:

1. Последователно измерване на статистически устойчивите спектри на микросеизмите във всички точки на мрежата или профила до достигане на статистически устойчив микросеизмичен сигнал.

2. Построяване на карта или на профил на разпределение на амплитудата за всяка честота в спектъра.

3. Привързване на получените карти или профили към съответната дълбочина, изхождайки от отношението:

$$H(f) = k_G \lambda_R(f) = k_G \frac{c_R(f)}{f},$$

където $H(f)$ - дълбочина на слоя, за който се строи изображението, $\lambda_R(f)$ - дължина на вълната на фундаменталната мода на Релей, f - честота в спектъра на микросеизмичния сигнал, за който се правят изчисленията, $c_R(f)$

- фазова скорост на фундаменталната мода на вълната на Релей с честота f , k_c - коефициент на дълбочинно привързване, оценен в диапазона 0,4-0,5.

I.9. Неразрешени въпроси и постановка на задачата.

Строго теоретично обосноваване на метода на ниско честотното микросеизмично сондиране до настоящия момент не е получено, както и оценка на погрешността на метода, и границите на неговото приложение в допълнение към тези, които са били направени по чисто експериментален път.

В настояща точка, е направено общо изследване на ММС за да определим неговите възможности и област на използване, както и мястото му сред останалите сеизмични методи.

Накратко са изброени положителните и отрицателни качества на метода на микросеизмичното сондиране, при това трябва да е ясно, че не винаги може да се говори строго, явявали се това или онова качество положително или отрицателно при дадения подход.

Глава II – Теоретични основи, математически апарат, аналитични и моделни решения.

Въпросът за формирането на полето на спектъра на вертикалната компонента на колебанието на повърхността при взаимодействие на основната мода на вълните на Релей с произволни нееднородности не е изучен напълно. Частично този въпрос е разгледан в [Горбатиков А.В., и др. 2008] където са изложени резултати от числовото моделиране за двумерния случай, изпълнени по метода на крайните елементи в програмен пакет Comsol Multiphysics [reference guide. 1998]. В изследването е демонстриран ефекта на изменение амплитудата на релеевите вълни, регистрирани на повърхността, над компактна нееднородност. При което, големината на изменение на амплитудата пряко зависи от характера на нееднородността. В случай, ако скоростта на еластичните вълни в нееднородността е по-малка, отколкото в околващата среда, при съответните честоти се наблюдава увеличение на амплитудата на релеевите вълни на повърхността в областта непосредствено над нееднородността. В случая с високоскоростна нееднородност се наблюдава характерно намаляване на амплитудата в същата област. Решението на двумерната задача отразява само част от възможния ефект при облъчване на нееднородността в общия тримерен случай. Най-съществен от тези ефекти е прекъсването на фронта при плъзгане на облъчващата вълна по вертикалната граница на две области с различни акустични свойства. Реакцията на амплитудата на релеевите вълни на повърхността при взаимодействие с нееднородностите в средата зависи от много фактори: положение, форма, размер, ориентация, еластични свойства на

нееднородността, а също така и еластичните свойства на вместващата среда, дължината на облъчващата вълна или нейния спектрален състав, продължителност на сериите, кохерентност и др. Всеки от изброените фактори съществено влияе на формирането на вълновата картина на повърхността, тази зависимост е сложна, нееднозначна и малко изучена. Затова трябва да се направи изследване, което би могло да отговори на част от въпросите за това, как свойствата на нееднородностите и сондиращите вълни се проявяват в регистрираното на повърхността вълново поле.

В настоящата глава се разглежда възстановения по материали от публикации паралелен алгоритъм, реализиран с метода на крайните разлики, за решаване на тримерната задача на динамиката за нееднородно линейно-еластично полупространство със свободна повърхност.

Тримерна задача на динамиката:

Динамичното уравнение на нееднородна неограничена еластична среда е:

$$\rho(\vec{r}) = \frac{\partial^2 U_i(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = \sum_k \frac{\partial \sigma_{ik}(\vec{r}, t)}{\partial x_k} + f_i(\vec{r}, t),$$

, $\vec{r} \in \bar{R}^3$; $i, k=1, 2, 3$;

$$\{x_1, x_2, x_3\} \Leftrightarrow \{x, y, z\}; \{U_1, U_2, U_3\} \Leftrightarrow \{U_x, U_y, U_z\} \quad (1)$$

, където $\vec{U}(\vec{r}, t)$ - поле на преместените точки на твърдата среда при нейната еластична деформация, $\vec{f}(\vec{r}, t)$ - функция , описваща източника (плътност на външната сила). Тензорът на еластичните напрежения $\hat{\sigma}$ за изотропна среда в рамките на линейната теория на еластичността е свързан с деформациите от закона на Хук

$$\hat{\sigma}(\vec{r}, t) = \lambda(\vec{r}) \hat{I}_r \hat{U}(\vec{r}, t) + 2\mu(\vec{r}) \hat{U}(\vec{r}, t), \quad (2)$$

, където \hat{I} -единичен тензор, а \hat{U} - тензор на деформацията, изразен чрез пространствените производни от компонентите на вектора на преместването

$$U_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right).$$

На свободната повърхност $y=0$ предвид отсъствието на външни сили [Ландау Л.Д., Е.М.Лифшиц, 2007], трябва да се изпълнява равенството $\sigma_{ij} n_j = P_i \Rightarrow \sigma_{ij} n = 0$, където n_i - външна нормала към повърхността $\vec{n} = (-1, 0, 1)$, откъдето всички компоненти на симетричния тензор на напрежение на Γ съдържащи индекс y са равни на нула: $\sigma_{xy} = \sigma_{yy} = \sigma_{yz} = 0$. Като се развие всяко едно равенство, се получава система диференциални уравнения от първи род относно компонента на вектора на преместването $\vec{u}_i(\vec{r}, t)$

$$\begin{cases} \partial_y u_x = -\partial_x u_y \\ \partial_x u_x + \partial_z u_z = -\gamma \partial_y u_y \\ \partial_y u_z = -\partial_z u_y \end{cases} \quad \vec{r} \in \Gamma, \quad (3)$$

където е въведено означението $\gamma = 1 + 2\frac{\mu}{\lambda} = \nu^{-1} - 1$. ($\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$ - коефициент на Пуасон).

Съгласно принципа на граничното поглъщане определен за гранични условия тип Дирихле на безкрайно отдалечени граници Γ_∞ :

$$u_i(r \in \Gamma_\infty, t) = 0, \quad (4)$$

Допълвайки системата с условия за отсъствие на движение и преместване в началният момент от време

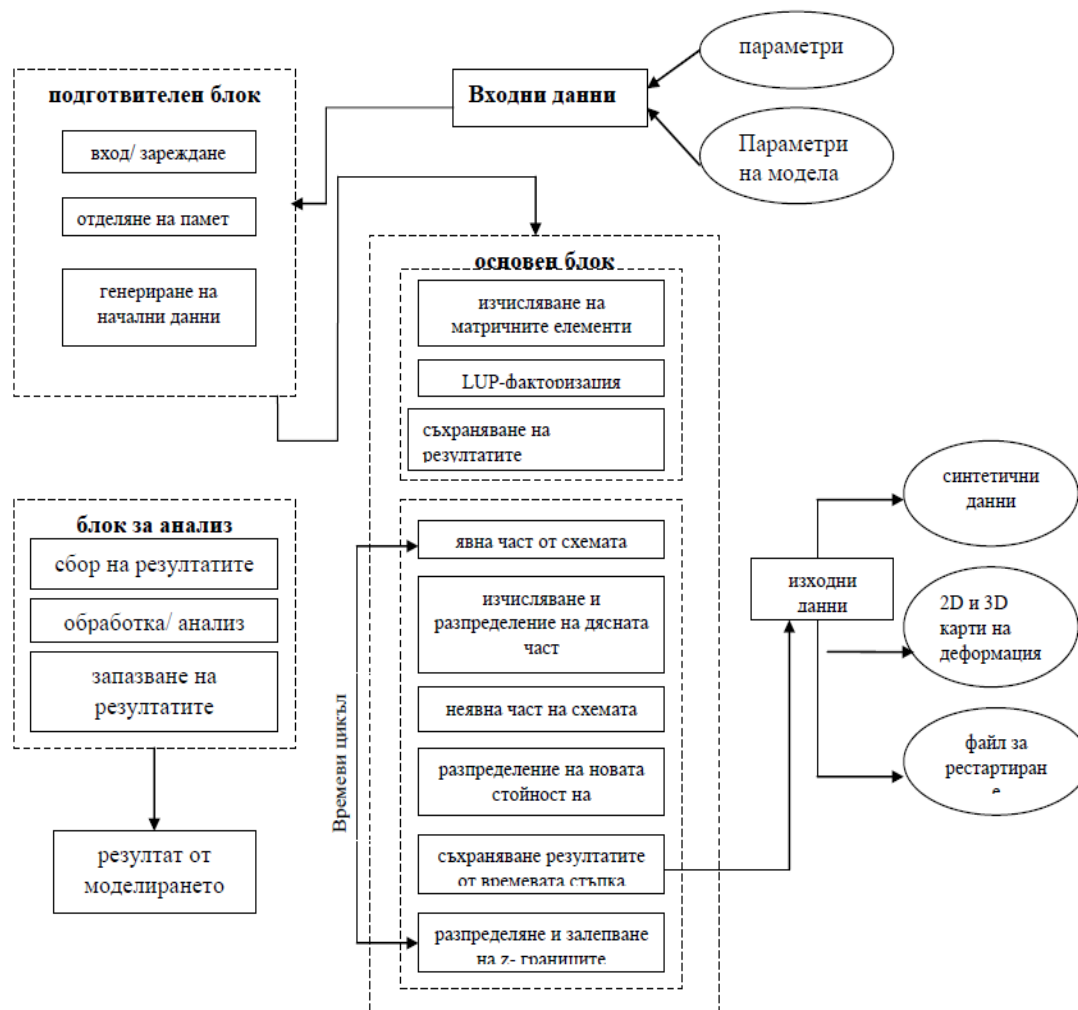
$$u_i(t=0) \equiv \dot{u}_i(t=0) \equiv 0, \quad \vec{r} \in \bar{R}^3 \quad (5)$$

получаваме начално-гранична задача на динамиката на нееднородно еластично полупространство със свободна повърхност..

За решаването на системата диференциални уравнения (1,2) с гранични условия (3,4) и начални условия (5) се използва метода на крайните разлики. В настоящият труд е представена смесена „неявно-явна“ схема и е представен съответен паралелен алгоритъм за решение (фиг.1)

Многопроцесорният алгоритъм в зависимост от характера на решаваната с него задача е реализиран с няколко способа и всеки от тях с няколко модификации:

- Смесената неявно-явна схема за метода на крайните разлики
- (МКР) с последователен (еднопроцесорен) алгоритъм LUP-разлагане на разреждени матрици; в паметта на всеки възел на кластера се формира копие на алгоритъма с различни входни данни, което позволява за единно пускане да получим веднага набор от интересувашите ни зависимости.
- Смесена неявно-явна схема МКР с паралелен (MPI-интерфейс) алгоритъм LUP-факторизация оптимизиран за разреждени матрици с използване на асоциативен масив (STL); повърхността се изчислява с неявен паралелен алгоритъм, обемните точки разпределени в блокове, се изчисляват с явна схема, всеки блок на своя процесор.
- Напълно неявна безусловно устойчива схема за двумерна постановка на задачата с паралелна LUP-декомпозиция оптимизирана за разреждени матрици с използване на асоциативни контейнери; фрагменти на основната матрица са разпределени в паметта на възлите на кластера, което позволява съществено да се увеличи размера на изчисляваната област (използвала се е на началния етап на изследванията).



Фиг.1. Блок-схема на паралелната програма, използваща смесен неявно-явен метод за решаване на правата задача.

Резултати от численото моделиране.

Въз основа на моделирането и числените експерименти с модела са направени оценки на точността и разрешаващата способност на MMC. Допуснато е, че закономерностите на поведението на възстановеното изображение по отношение на размера на моделната нееднородност са качествено идентични за двумерния и тримерния случай. Т.е. за тримерния случай характерните хоризонтални размери на изображението намаляват заедно с намаляването на нееднородността до тогава, докато размерът на нееднородността стане по-малък от четвърт от дължината на сондиращата вълна. При по нататъшно намаляване на нееднородността формата на изображението се запазва, а неговата амплитуда намалява.

При това допускане числено е оценено минималното хоризонтално разстояние между две малки нееднородности, при което тяхното изображение се разделя. Тази оценка показва, че в тримерния случай в линейно приближение това разстояние е в диапазона , където -ефективна (за

съответната дълбочина) дължина на вълната на фундаменталната мода на Релей. За точността на определяне на хоризонталното положение на малки нееднородности, е направена оценка, че докато те се „разрешават“, центъра на всяка от тях може да бъде определен при идеални условия с нулева грешка.

Изображението на две нееднородности, разположени една над друга започва да се разделя, ако разстоянието между тях по вертикала е $(\frac{1}{3} \div \frac{1}{2})\lambda_R$ или по-голямо, където λ_R - ефективна дължина на вълната, съответстваща на дълбочината на средната точка между тях.

С помощта на математичното моделиране е направено изследване на редица закономерности на взаимодействието на фундаменталната мода на вълните на Релей с нееднородностите с различни размери и различни механични свойства.

Тези резултати потвърждават коректността на прилагането на технологията на микросеизмичното сондиране сред родствените му повърхностно-вълнови методи.

Развитие на метода на ниско честотното микросеизмично сондиране.

Изложен е подход, използващ диференциалната функция на реакцията, преимуществото на който, в сравнение с решението на обратната задача със стандартен ММС се заключава: първо –съществено намалява асиметрията в получавания контраст между горната и долна граница на нееднородността; второ- точно се отделя долната граница на нееднородността ; трето-не се изисква подбор на стойността на коефициента на дълбочинно привързване; четвърто-подобрява се хоризонталната резолюция във връзка с това, че в модела на механизма на образуване на сигнала се отчита приноса на широк диапазон честоти, в това число и с къси дължини, а те „рязко“ отразяват изменението на свойствата на средата в хоризонтално направление; пето-съществено се увеличава максималната дълбочина на изследването $\xi/\kappa_G \sim 4$ при използване на един и същ честотен диапазон.

Недостатъци: слаба устойчивост на решението; изисква се контролиране на появяването на артефакти; изисква се прецизен подбор на параметър s на пресеченото псевдообръщане.

Може да се запише

$$\Xi = R(C),$$

където R - природа на формирането на реалното поле на интензивността Ξ на повърхността, C -пространствено разпределение на физичните свойства на нееднородна среда, влияещо на нейните вълнови свойства. Приема се, че M е един от математическите модели на процеса R , достатъчно точен и пълен за

да отчете по-голямата част от ефектите влияещи на резултата. Тогава се записва $\chi = M(C)$, където C - свойства на средата, отчетени в модела, а M - сложен нелинеен оператор.

Предлага се линеен модел на формиране на сигнала

$$\xi = Af.$$

Формулира се обратна задача в детерминирана ($\xi = A(f_0 + \mu) + v$) постановка.

Изложен е подход към модела на процеса на формиране на пространствените вариации на спектъра на полето на фундаменталната мода на вълните на Релей в нееднородна среда и е разгледан частен случай, отчитащ характеристиките на чувствителността на нулевата мода само във вертикално направление.

На основа на предложениия нов модел на формиране на сигнала е формулирана обратната задача в детерминирана и постановка.

Глава III – Експериментална част. Апаратура, методика на работа, получаване на данни.

III.1. Апаратура и методика на работа.

III.1.1 Измерителна апаратура .

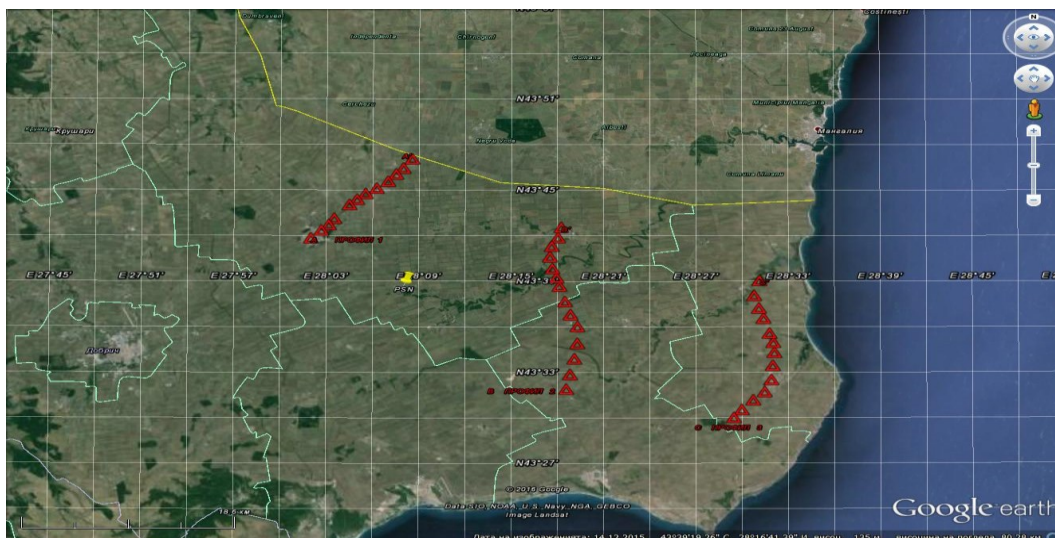
Измерването на пространствените вариации (вертикална компонента) на микросеизмичното поле с метода на микросеизмичното сондиране е свързано с две особености на микросеизмичния фон:

1. Малка амплитуда на колебанието от порядъка на
2. Ниско честотен работен диапазон 0.01-3 Hz.

Интермизийски разлом.

Измерванията на микросеизмичното поле в района на Интермизийския разлом е извършено през 2006 г. от съвместен екип учени на РАН и БАН (Е.А. Рогожин, Ю.В. Харизанова, А.В. Горбатиков, С. Шанов, А. Митев) по програма „Строеж и съвременна активност на Интермизийския разлом по резултати от комплекса нови геолошко-геофизични методи“. Данните от измерванията любезно са предоставени от проф. Ст. Шанов.

Разположението на точките на измерване върху картата на изследваната територия е показано на фиг.III.1. За организация на наблюденията в областта на Интермизийския разлом са били разработени и използвани няколко комплекта специализирана сеизмична апаратура с гъвкава структура. Особеностите на тяхната конструкция се състои във възможността за включване към един и същ универсален регистратор на измерителните канали, обезпечаващ различни честотни диапазони и стойност на чувствителността, и програмна настройка на параметрите на регистрацията.

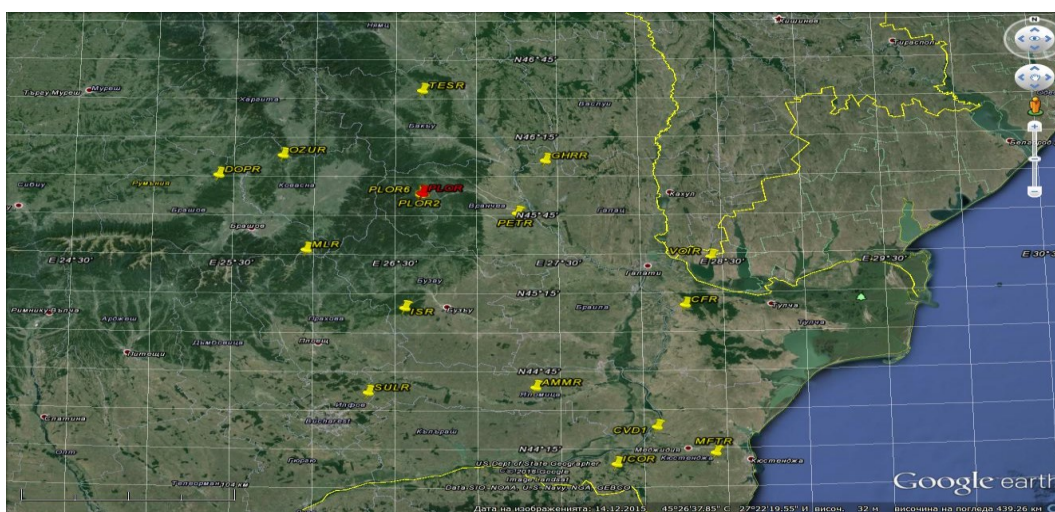


Фиг.III.1. Разположението на точките на измерване (Таб.III.1.) по профилите и базовата станция PSN (жълт маркер) върху картата на изследваната територия.

Сеизмична зона Вранча.

Сеизмичните записи за настоящото изследване на сеизмичната зона Вранча са взети от 19 широколентови сеизмични станции разположени на територията на Румъния, които са част от широколентовата мрежа за регистрация в реално време на NIEP (National Institute for Earth Physics). Разположението на сеизмичните станции на картата на изследваната територия е показано на фиг.III.2.

От избраните 19 сеизмични станции единадесет са оборудвани с широколентови датчици за скорост - CMG-40T, три с STS2, две с CMG3EPS и две с KS2000.



Фиг.III.2. Разположение върху картата на изследваната територия на сеизмичните станции използвани в изследването, базовата станция CFR е означена с червен маркер.

Сеизмична зона Калабрия (Южна Италия).

Сеизмичните записи за настоящото изследване на сеизмичната зона Калабрия (южна Италия) са взети от 58 широко лентови сеизмични станции разположени на територията на Италия, които са част от широколентовата мрежа за регистрация в реално време на IV (National Seismic Network of Italy). Разположението на сеизмичните станции на картата на изследваната територия е показано на фиг.III.3.

От избраните 58 сеизмични станции петдесет са оборудвани с широколентови датчици Trillium-40s, седем с Trillium-120s и една с Trillium-240s.



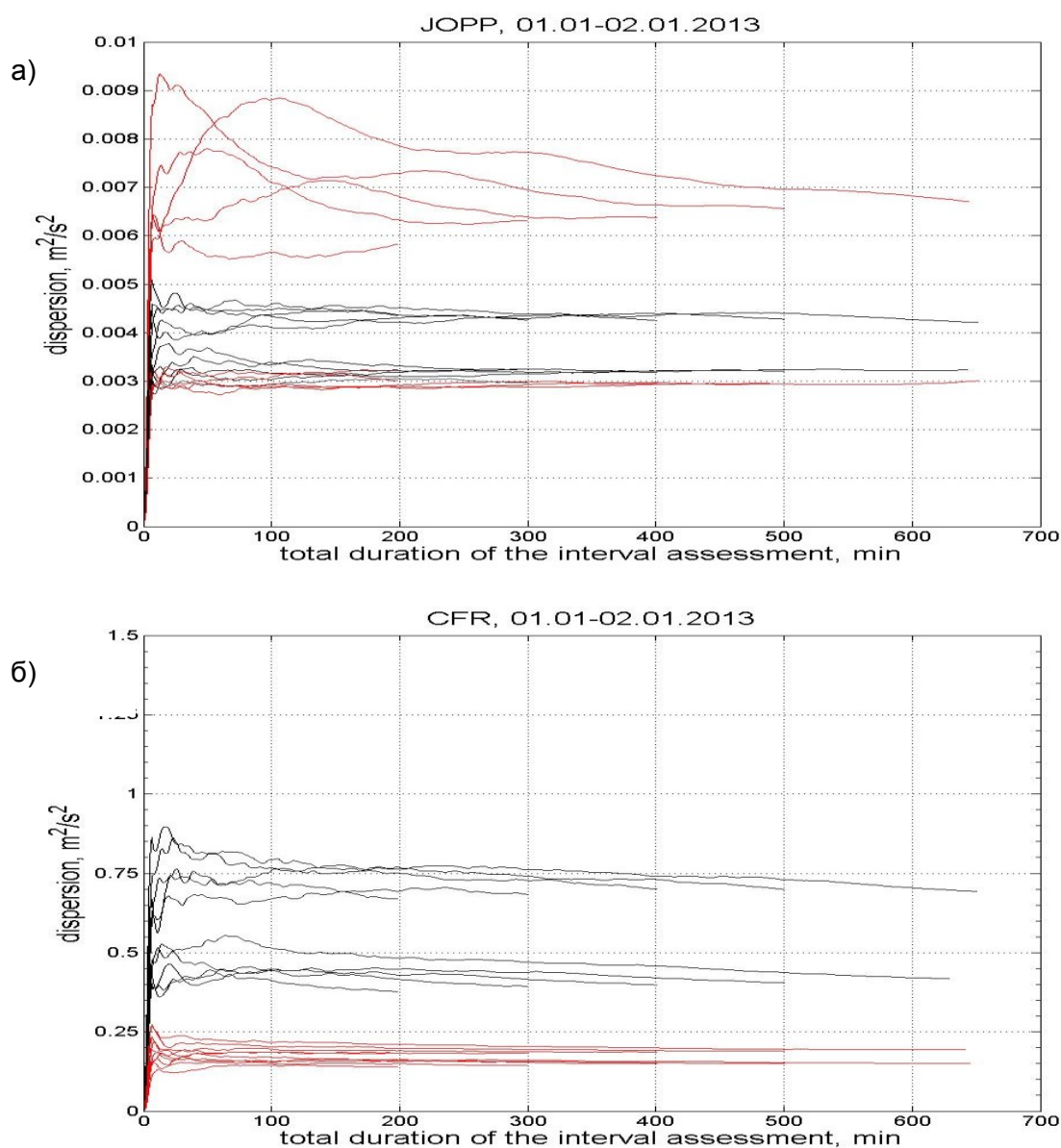
Фиг.III.3. Разположение върху картата на изследваната територия на сеизмичните станции, базовата станция JOPP е означена с червен маркер.

III.1.2. Методика на работа.

III.1.2.1. Статистически характеристики и стационарност на нискочестотните микросеизмични сигнали.

За провеждането на изследване на статистическите характеристики и стационарността на процеса, основание се явяват резултатите от анализа на поведението на дисперсията на микросеизмичния сигнал в честотния диапазон 0.03-15 Hz в увеличаващ се времеви прозорец (фиг.III.3.а,б).

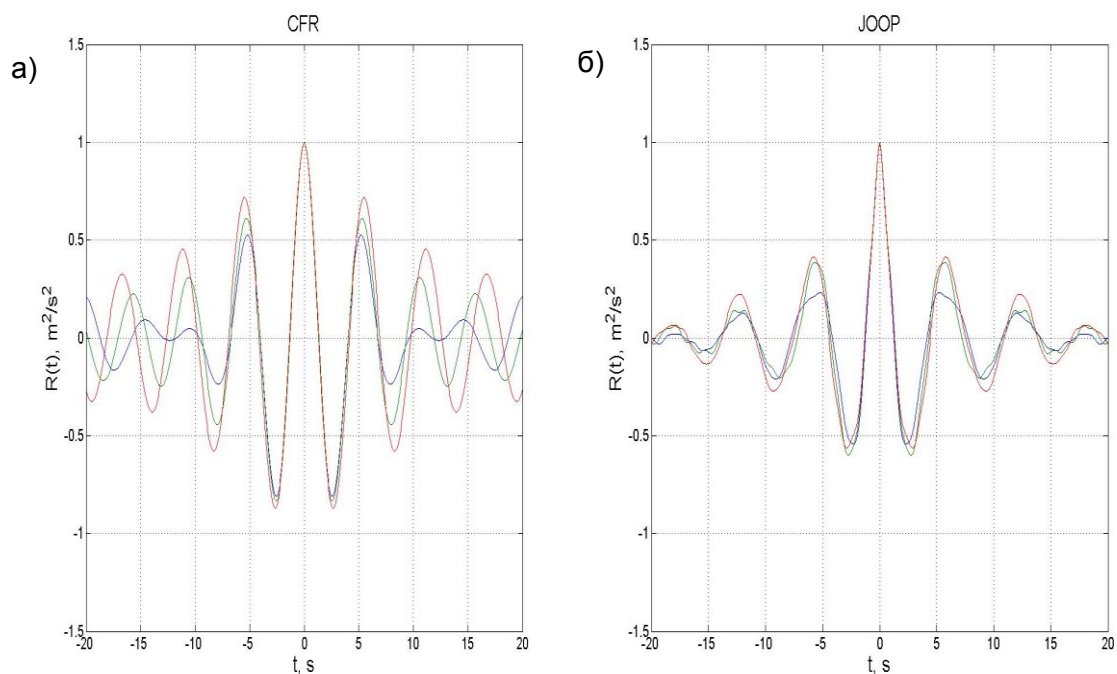
Могат да бъдат отделени следните участъци на особено поведение на дисперсионните криви, характерни за всяко семейство криви. (1) Началният участък практически на всяка крива има характер на спускане или покачване. (2) Всяка крива има характерен участък на стабилизация. (3) Всяка крива завършва с характерен участък на гладък подем или спад. Може да се направи извод, че случайният процес (микросеизмичния сигнал) не се явява стационарен за значителни времеви интервали, от порядъка на няколко часа. Въпреки това, наличието на определен участък на стабилизация (участък 2) ни позволява да поставим въпроса за експериментално изследване на неговата продължителност и оценка на стационарността на микросеизмичния сигнал за този интервал.



Фиг. III.3. Семейство зависимости на дисперсията на микросеизмичния сигнал в диапазона честоти 0.03-15 Hz от продължителността на интервала на оценка за станции JOPP (а) и CFR(б). Червените линии се отнасят за 01.01.2016 г. а черните за 02.01.2016 г.

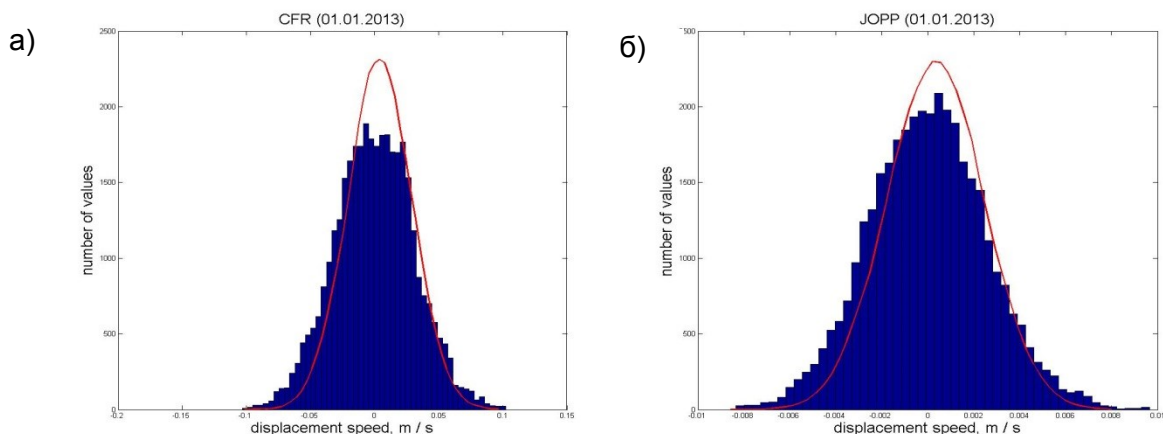
За правилния анализ на случайните процеси по техните реализации е необходимо да се установи, имат ли тези процеси трите основни свойства, а именно случайност, нормалност и стационарност.

На фиг.III.4.а,б са представени експерименталните автокорелационни функции за три различни реализации (на фигурите са с различни цветове) на микросеизмичния сигнал, измерен в две различни по характер места- зона Вранча , Калабрийската арка. По формата на автокорелационната функция на сигналите , може да се направи извод, че и на двете места микросеизмите се явяват тясно лентов случаен шум, доколкото функцията на автокорелация се явява бавно сходяща към нула периодична функция. Видимият характерен период на колебание и за двете зони е около 6 секунди.



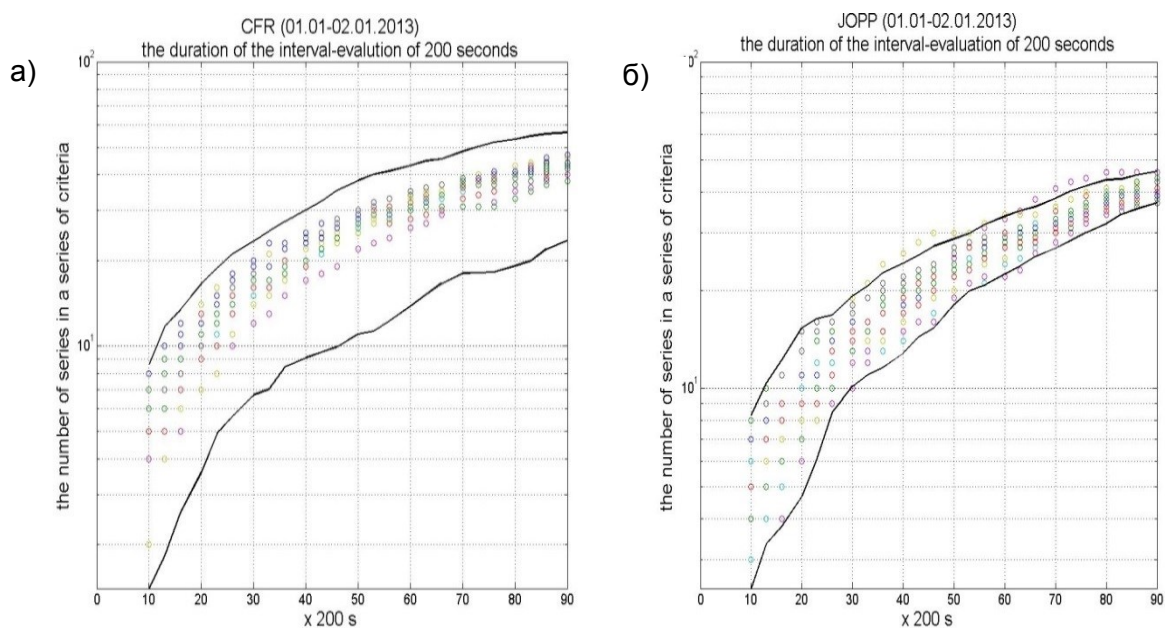
фиг.III.4. Примери за автокорелационните функции на микросеизмичния сигнал в диапазона честоти 0.03-15 Hz за зоната Вранча (а) и зоната на Калабрийската арка (б). Различните цветове съответстват на три последователни записи на сигнала. Продължителността на отделните записи е 4 минути.

За изследването на нормалността на микросеизмичния сигнал по времето на реализация са изчислени хистограмите на плътността на разпределение на скоростите на преместване (фиг.III.5.а,б). В резултат на анализа се получава, че и за двете изследвани зони разпределенията не се явяват нормални в строгия смисъл, но формата им е достатъчно близка към плътността на Гаусовото разпределение особено за зоната на Калабрийската арка.



Фиг.III.5. Хистограми на микросеизмичния сигнал в диапазона честоти 0.03-15 Hz за сеизмична зона Вранча (а) и зоната на Калабрийската арка (б).

Изследването на стационарността се заключава в анализа на последователността на дисперсията за наличие на монотонен и колебателен тренд, който превишава очакваната стойност на отклонение. За анализа е приложен статистическият критерий –критерий серии (фиг.III.6 а,б)



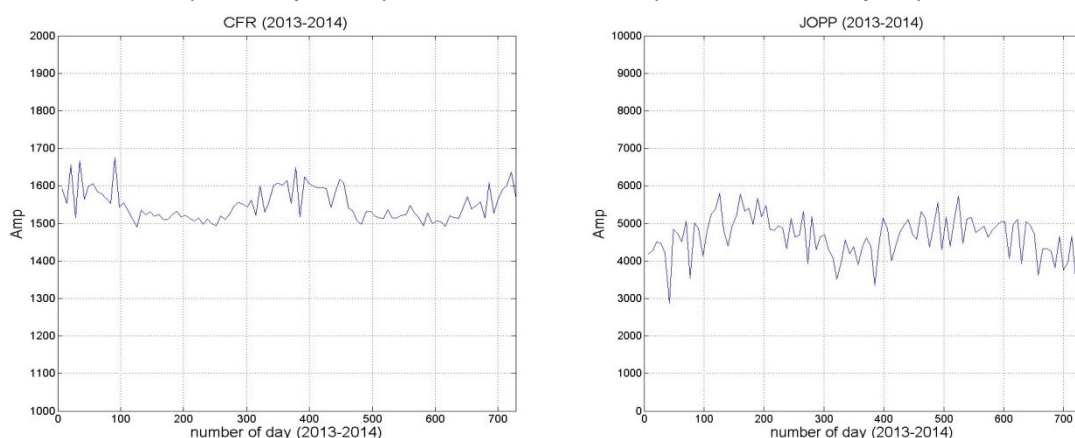
Фиг.III.6. Анализ на стационарността, по критерия серии , за микросеизмичните сигнали в зоната Вранча (а) и зоната на Калабрийската арка (б). Честотен диапазон 0.03-15 Hz. Продължителността на интервала на оценка 200 секунди.

От фигурите се вижда, че за зоната Вранча микросеизмичният сигнал за времето на регистрацията 300 минути се явява стационарен. Примера за зоната на Калабрийската арка показва, че в честотния диапазон 0.03-15 Hz стационарността на микросеизмичния сигнал се нарушава по критерия серии около 100 минути след началото на регистрацията.

III.1.2.2. Някои особености на микросеизмичния шум на изследваните територии.

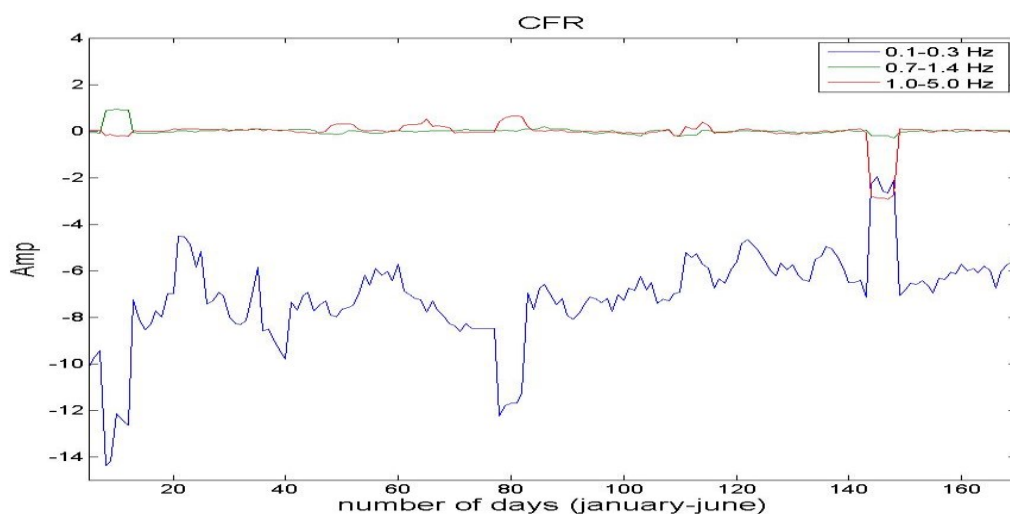
В резултат на дългите периоди на измерване в условията на изследваните територии са изучени особеностите на микросеизмичния шум и неговите вариации. Показано е, че времевите вариации на интензивността на микросеизмичния шум, предизвикани както от естествени (ендогенни и екзогенни), така и от антропогенни причини, изискват отчитане при решаването на геоложките задачи.

На фиг.III.8 а,b отчетливо се вижда годишна периодичност и сезонни изменения (зима, пролет, лято и есен) на нивото на микросеизмичния шум за станция CFR (зона Вранча) и станция JOPP (област Калабрия).



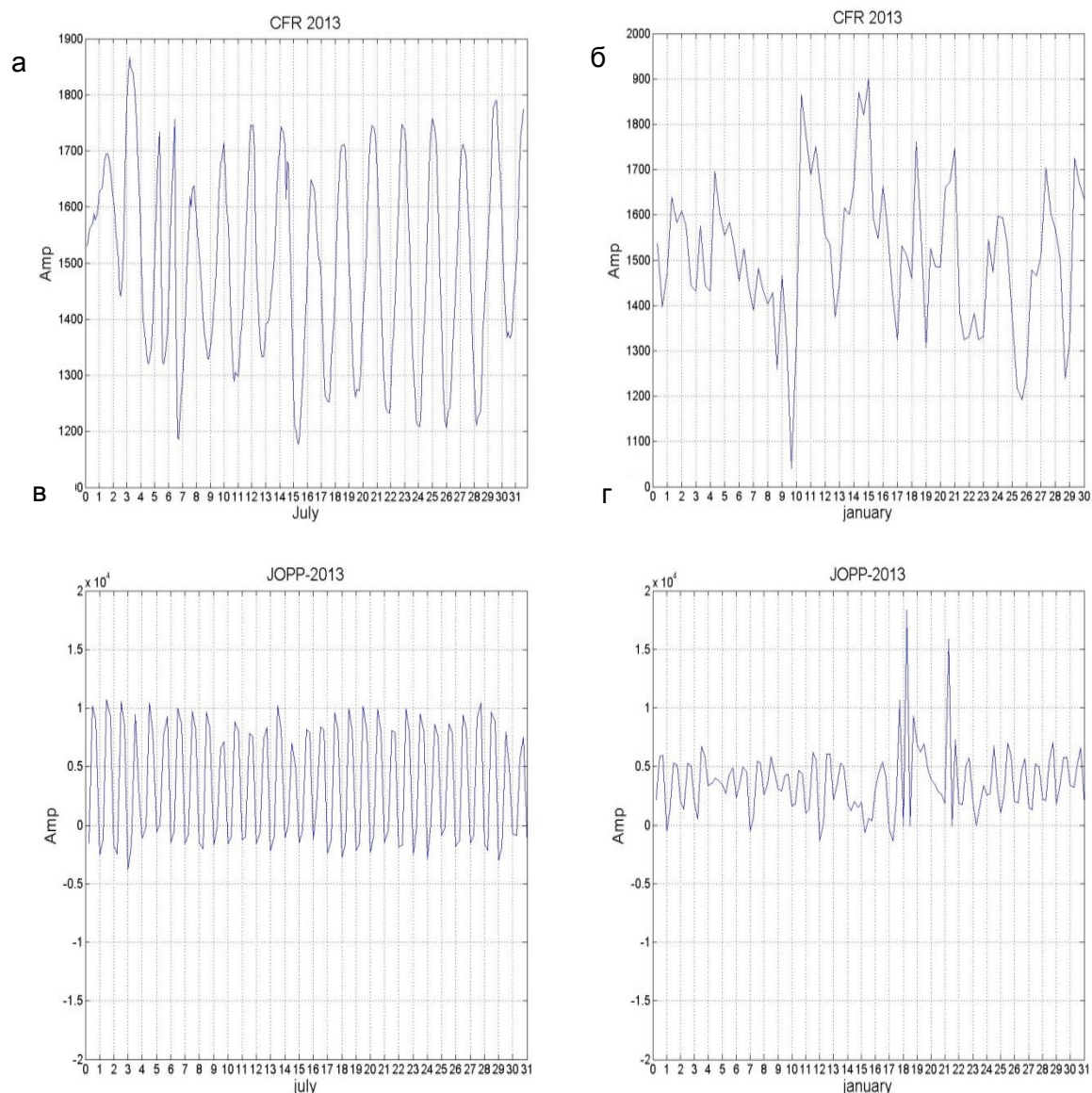
Фиг.III.8. Вариации на нивото на микросеизмичния шум (Z-компонента) за периода 2013-2014г. за станции а) CFR и б) JOPP.

На фигура III.9. е показано, че в диапазона честоти 0.1 – 0.3 Hz нивото на микросеизмичния шум за станция CFR е подложено на най-големи изменения в продължение на половин година.



Фиг.III.9. Вариации на средно дневното ниво на микросеизмичния шум, измерено на сеизмостанция CFR в различни честотни диапазони за първите шест месеца на 2013г.

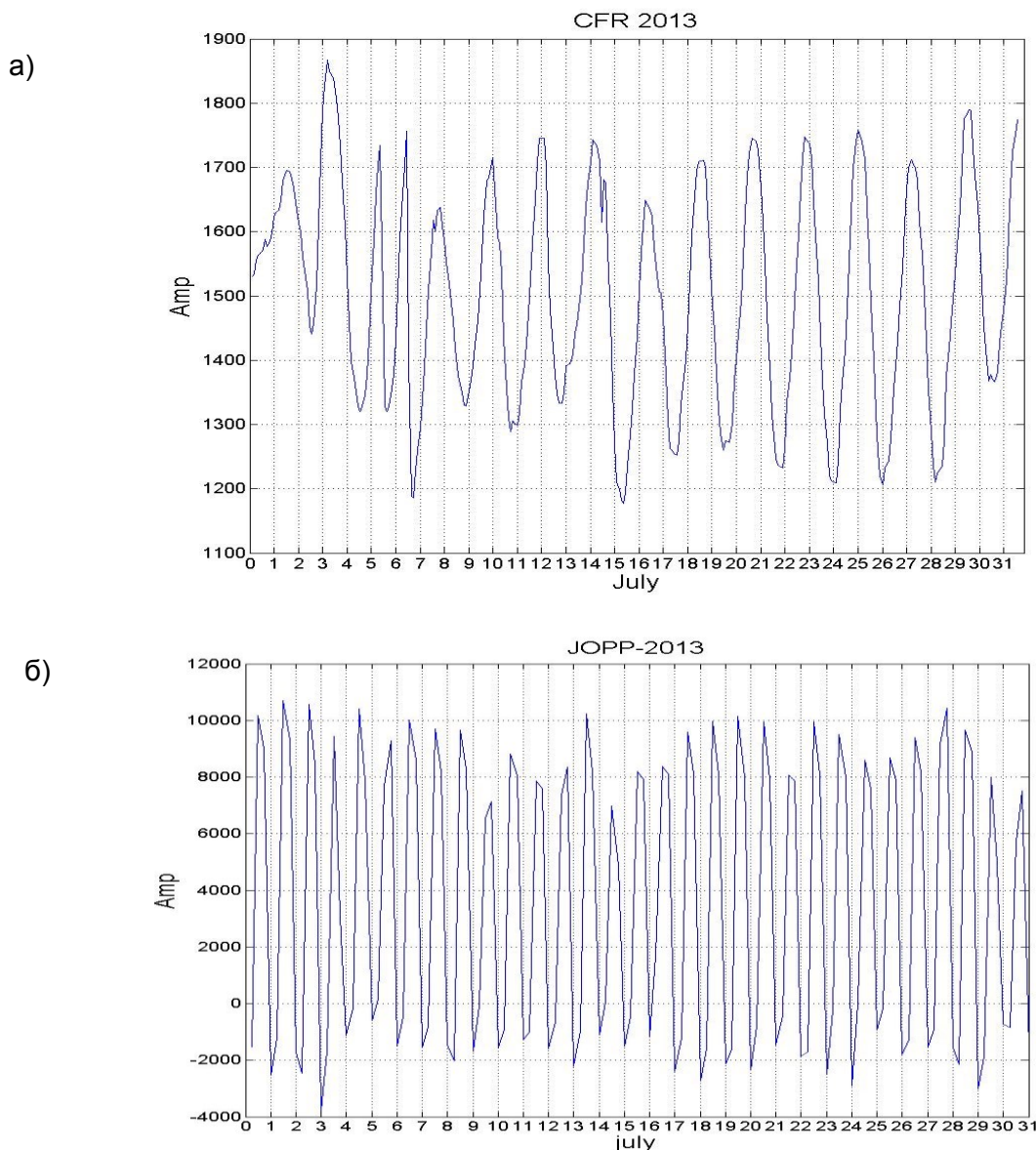
На фиг.II.10 са представени типичните графики на вариациите на микросеизмичния шум с интервал на усредняване 5 часа през летния (фиг.III.10 а,в) и зимния период (фиг.III.10 б,г) на сеизмични станции CFR и JOPP . През лятото определящо във времевите изменения на нивото на микросеизмичния шум се явява делът на денонощните вариации, свързани, основно с антропогенни източници а през зимния период основният дял в изменението на нивото на микросеизмичния шум внасят колебанията на честоти 0.1-0.3 Hz.



Фиг.III.10. Изменение на нивото на микросеизмичния шум на сеизмостанции а),б) CFR и в),г) JOPP за месеците юли а) , в) и януари б),г) на 2013г.

Резултатите от измерването на нивото на микросеизмичния шум, на станции а) CFR и б) JOPP за месец юли 2013 г. (на база 6 часово усредняване) са показани на фиг.III.13 - денонощните вариации на шума отразяват ритъма на

селскостопанската дейност в района на станцията. В нощните часове нивото на шума е минимално , а през деня достига високи нива .



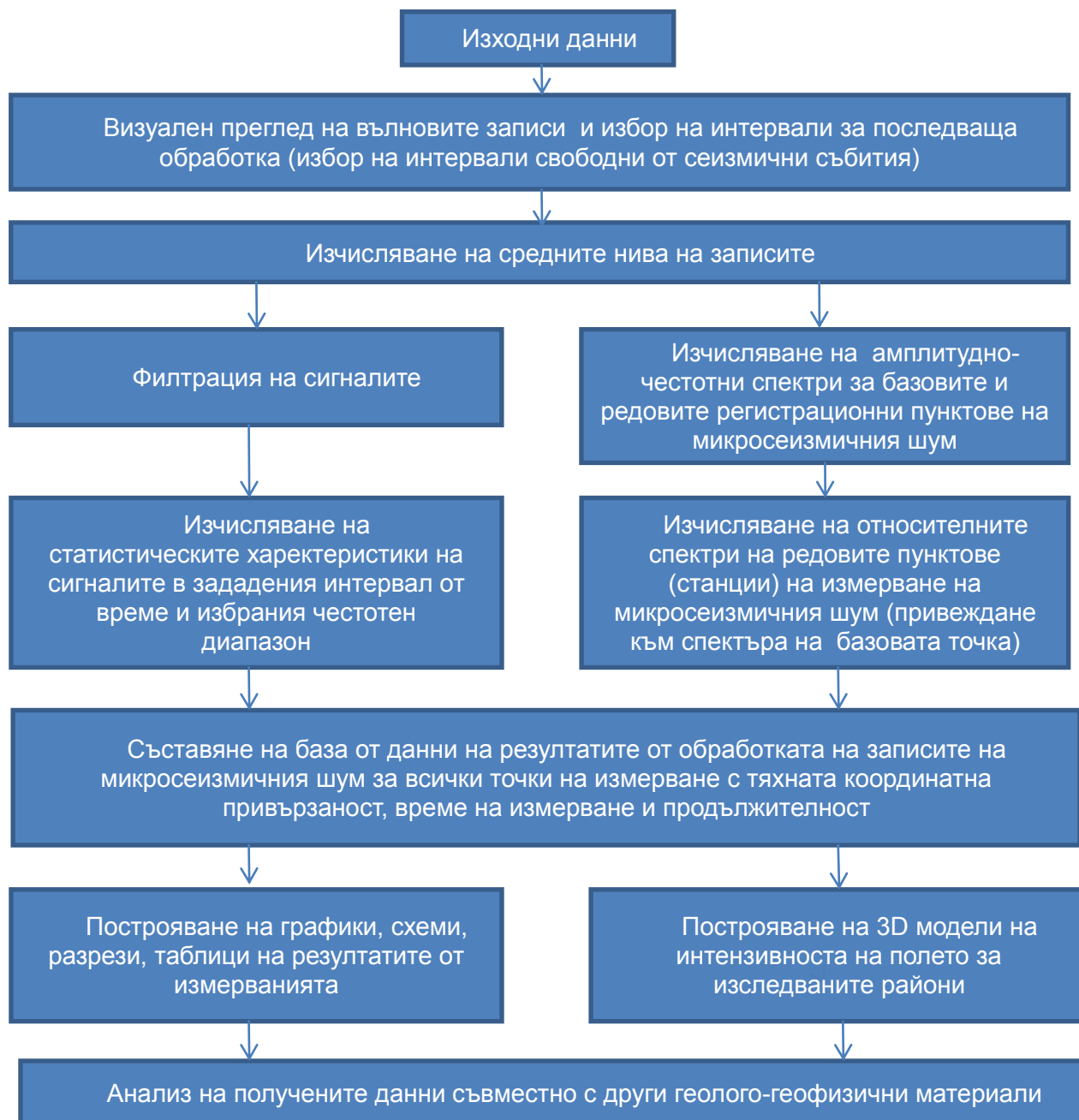
Фиг.III.13. Изменение на нивото на микросеизмичния шум на сеизмостанции а) CFR и б) JOPP за месец юли 2013г.

III.1.2.3. Методика на обработка на данните от измерванията на територията на провежданите изследвания.

Алгоритъма на основните етапи на обработката и интерпретацията на резултатите от измерванията са представени на фиг.III.15.

Принципно важен момент в методиката на измерване на микросеизмичния шум се явява изборът и използването на опорна (базова)

станция. Базовата станция изпълнява няколко функции при обработката на резултатите от полевите измервания и избраните сеизмични станции.



Фиг. III.15. Алгоритъм на основните етапи на обработка и интерпретация на резултатите от измерванията на микросеизмичния шум.

Първо, използва се за отчитане на времевите вариации в диапазона ниски честоти на спектъра (областта на щормовите микросеизми) при провеждането на регионални и локални изследвания в целия спектър на микросеизмичния шум. Отчитане на вариациите на опорната станция при изследване на локални площи позволява измерванията да се провеждат по

всяко време на денонощието без загуби на качеството на получавания полеви материал.

Второ, дълговременният опорен пункт позволява да се приведат към едно ниво (нормира) наблюденията от различни години, натрупвайки ги и след

това могат да бъдат използвани за решаване на различни задачи. Трето, синхронното измерване на полевата и опорната точка позволява да се увеличи диапазона на изучавания спектър в диапазона ниски честоти.

Глава IV. Геоложки и геодинамични условия в районите на изследване. Резултати от измерванията и интерпретация.

IV.1. Основни черти на геоложкия и тектонския строеж на териториите на провежданите изследвания с ММС.

IV.1.1. Интермизийски разлом.

В тази точка са описани основните черти на геоложкия и тектонския строеж на района на Интермизийския район. Тази тектонична структура е известна на територията на България под името Силистра-Белгунски разлом, а на територията на Румъния – Интермизийски разлом. Зоната на Интермизийския разлом пресича Мизийската плоча в северозападно направление и в по-широк план представлява два близки субпаралелни клона (северо-източен-Силистро-Езерецки и юго-западен-Сребърна-Шабленски), имащи общо западно-северно-западно западане в източната част на изучаваната територия и северозападна ориентировка в по-западната част на района. Мизийската плоча е относително млада платформа, която се е формирала в сегашен вид на най-новия етап на развитие.

Плочата е изразена в релефа във вид на невисоко издигане (с надморска височина 100-200 m) с равнина, слабо хълместа повърхност. От сеизмологична гледна точка Мизийската плоча се явява "остров" на стабилност между сеизмично активните зони на Карпатите и Балканите, но тя не е лишена от рядка и не регулярна сеизмичност ($M=3-4$).

IV.1.2. Сеизмична зона Вранча.

Сеизмичната зона Вранча се намира в контактната област на Източните и Южните Карпати, които са сравнително млада гънкова структура. Три различни по възраст платформени структури (Молдавската, Скитската и Мизийската плоча) са разположени на юг, североизток и изток от зоната.

Епицентровете на земетресенията в зоната, в план се намират в ограничена област $40 \times 80 \text{ km}$ с дълбочина $70-180 \text{ km}$ (максимум 220 km (Onicescu, Vonjerg, 1997), сеизмично фокалната зона има силно северозападно падение.

Зоната Вранча е в област на контрастни движения, възникващи на границата на издигащата се система на Карпатите и потъващата Предкарпатска депресия.

Най-обсъжданите модели на развитие на сеизмичните процеси в настоящия момент се явяват плитко-тектоничните модели, от позицията, на

които сеизмичната зона Вранча се разглежда като резултат от потъването на *slab*, възникнал в процеса на субдукция на дълбоководния океан Тетис.

IV.1.3. Сеизмична зона Калабрия.

Много автори (i.e., Gueguen et al, 1998; Carminati et al, 1998; Doglioni et al, 1998) обясняват геодинамичната обстановка на Тиренско море - Калабрийската аркова система като резултат от югоизточно ретроградно движение на северозапад субдуцираща западната част на Средиземноморската плоча и свързаната с нея дъгова миграция.

Калабрийската арка участва в субдукцията на Йонийската литосфера в направление северозапад под Тиренско море, където дълбочината на източниците на земетресения се увеличава с отдалечаване от Калабрийската дъга (e.g. Caputo et al., 1970; Caputo et al., 1972; Anderson and Jackson, 1987).

Под Калабрийската дъга много сеизмични особености предполагат наличието на потапяща се Йонийска океаническа литосфера. Фактическото съществуване на *slab* се определя от многото възникнали плитките и дълбоки земетресения, съсредоточени по протежението на Калабрийската дъга и в югоизточния сектор на Тиренския басейн съответно.

IV.2. Резултати от микросеизмичното сондиране в изследваните райони и интерпретация.

IV.2.1. Резултат от микросеизмичното сондиране в областта на Интермизийския разлом.

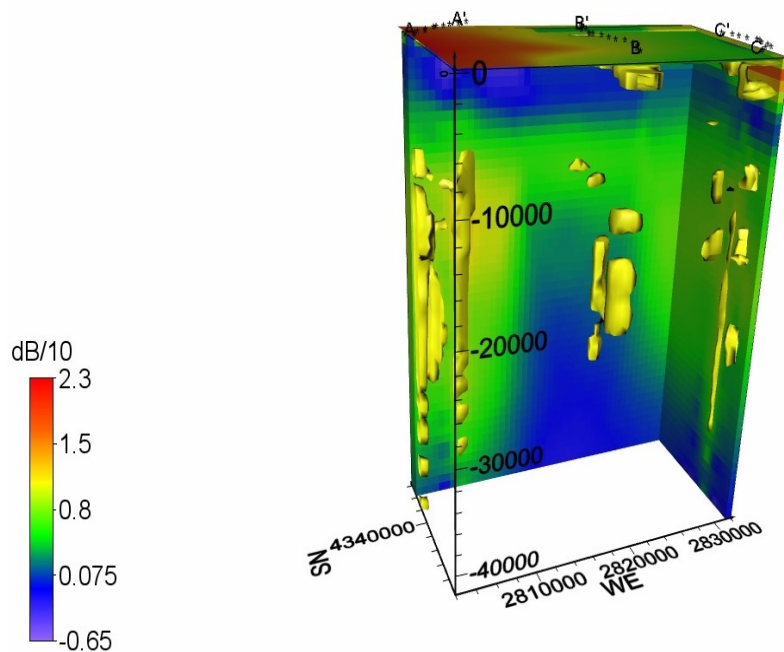
Предвид на това, че сондиращ сигнал се явяват повърхностните вълни на Релей, чиято амплитуда е силно чувствителна към промяна на модула μ (еластичен модул на Ламе) на средата, за метода на микросеизмичното сондиране най-удобни обекти за изследване се явяват вертикалните структури, т.е. хоризонталните нееднородности – изменят модула μ на средата в странично направление.

На фиг.IV.11,IV.12 е показан примерен модел на зоната на Интермизийския разлом построен по резултатите от измерванията с метода на микросеизмичното сондиране. Моделът показва интензивността на микросеизмичното поле в dB/10. Тримерното моделиране позволява да се определи пространственото положение на ниско скоростните области определени на вертикалните разрези, както и да се определи евентуалното пространствено положение на Интермизийския разлом.

На фигура IV.14. е представен получения тримерен модел на изучаваната зона до дълбочина 7 km, на който се наблюдава изразено потъване на фундамента. В южната част на разреза се наблюдава вклиняване на относително високоскоростен слой на дълбочина 1000-1700 метра, което,

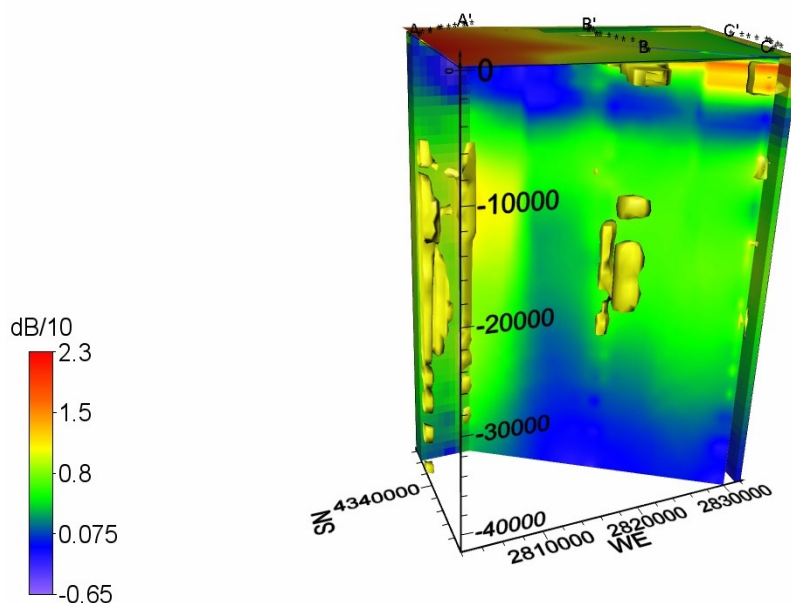
видимо съответства на слоя доломити от горна юра, известен от сондажите в района.

3D model of the intensity of the macroseismic field near Intra moesian fault

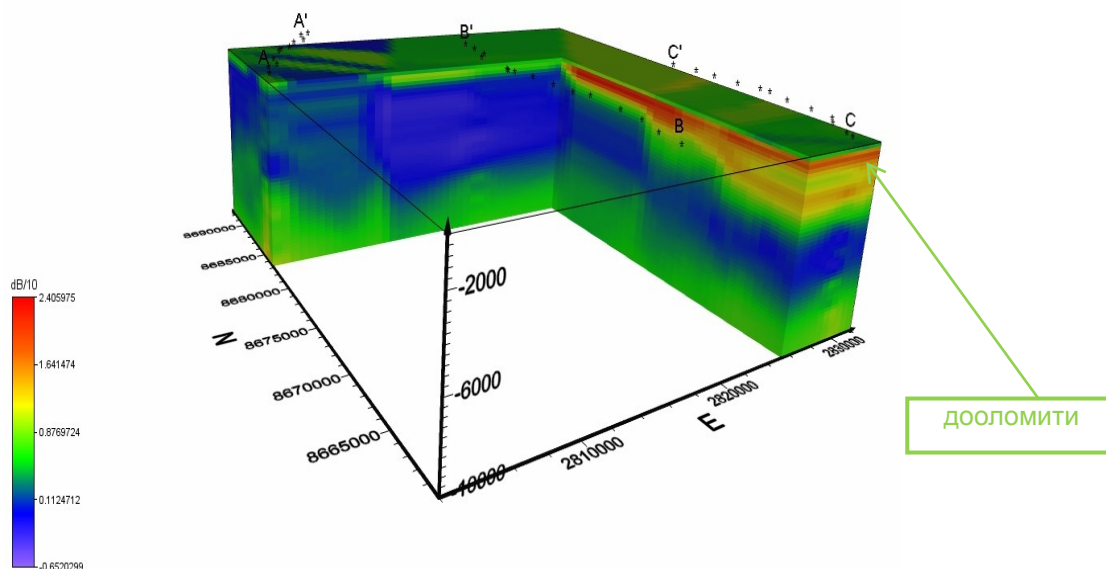


Фиг.IV.11. Тримерен модел на интензивността на микросеизмичното поле ($dB/10$) с отделени с изоповърхнини ниско скоростни зони.

3D model of the intensity of the macroseismic field near Intra moesian fault



Фиг.IV.12. Профил по предполагаемото простиране на Интермизийския разлом построен по метода на микросеизмичното сондиране.

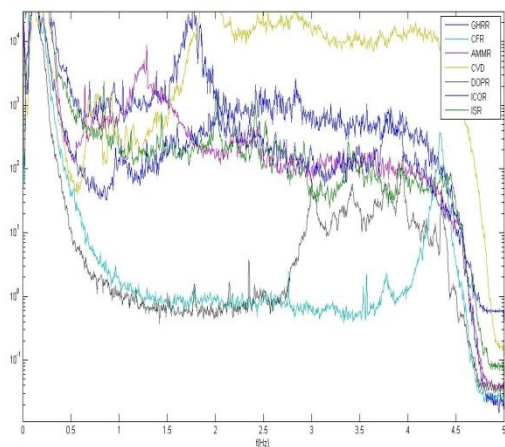


Фиг.IV.14. Тримерен модел на интензивността на микросеизмичното поле ($dB/10$) до дълбочина 10000 метра на зоната на Интермизийския разлом.

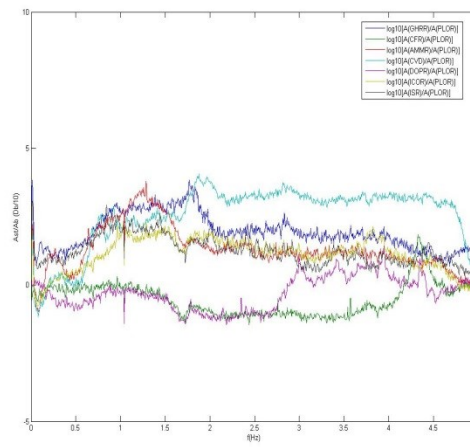
Получените резултати, потвърждават възможността за използване на микросеизмите за изучаване на дълбочинния строеж на разреза и прилагането им при някои основни структурни изследвания в определени райони на България.

IV.2.2. Резултат от микросеизмичното сондиране в областта Вранча.

За изследването са взети едновременни сеизмични записи от всички 19 сеизмични станции, записани на 01.02.2015 г. за интервала 00:00:00-01:00:00 часа, от които са изчислени мощностните спектри (фиг.IV.15) за всяка станция. Разпределението на вариациите на интензивността е определено по отношение на базовата опорна станция (PLOR) (фиг.IV.16).



Фиг.IV.15. Спектри на едновременните сигнали за седем различни станции. базовата

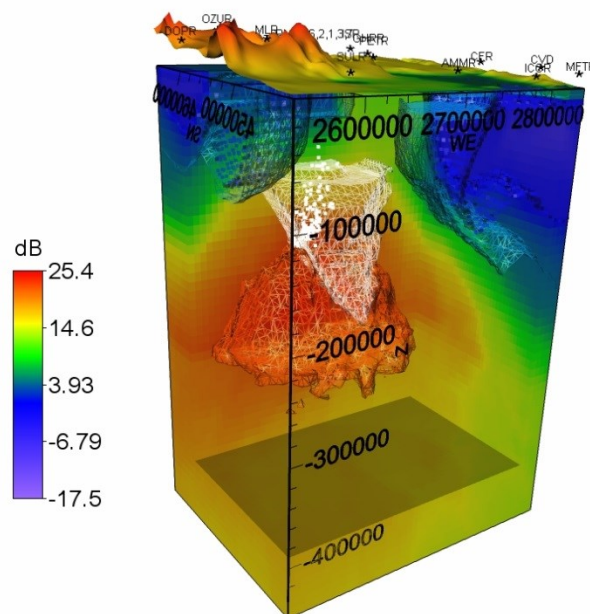


Фиг.IV.16. Графики на отношение на спектр редовите станции към спектъра на станция (PLOR).

При преизчисляването на спектралните честоти в дължини на вълни, са отчетени дисперсионните свойства на Релеевите вълни, а именно, увеличението на скоростта с увеличаването на дължините на вълните. За тази цел е използван скоростен модел създаден от F.Hauser (2002, VRANCEA2001).

На получения модел (фиг.IV.14) се виждат две относително високоскоростни области (-0,36 - 4,04 dB; син цвят), разположени западно и източно от нецентралната зона. Западната високоскоростна зона достига до дълбочина 80 km за изоповърхнината със стойност 4,04 dB и 60-70 km за стойност -0,36 dB, която може да се интерпретира като част от фундамента на Интеркарпатската субплоча. Локализираната на изток област с изразени високи скорости може да се проследи до дълбочина 150 km за стойности на ограничаващата я изоповърхнина 4,04 dB, и 100-120 km за стойност -0,36 dB, която може да се интерпретират като части от фундамента на Мизийската платформа.

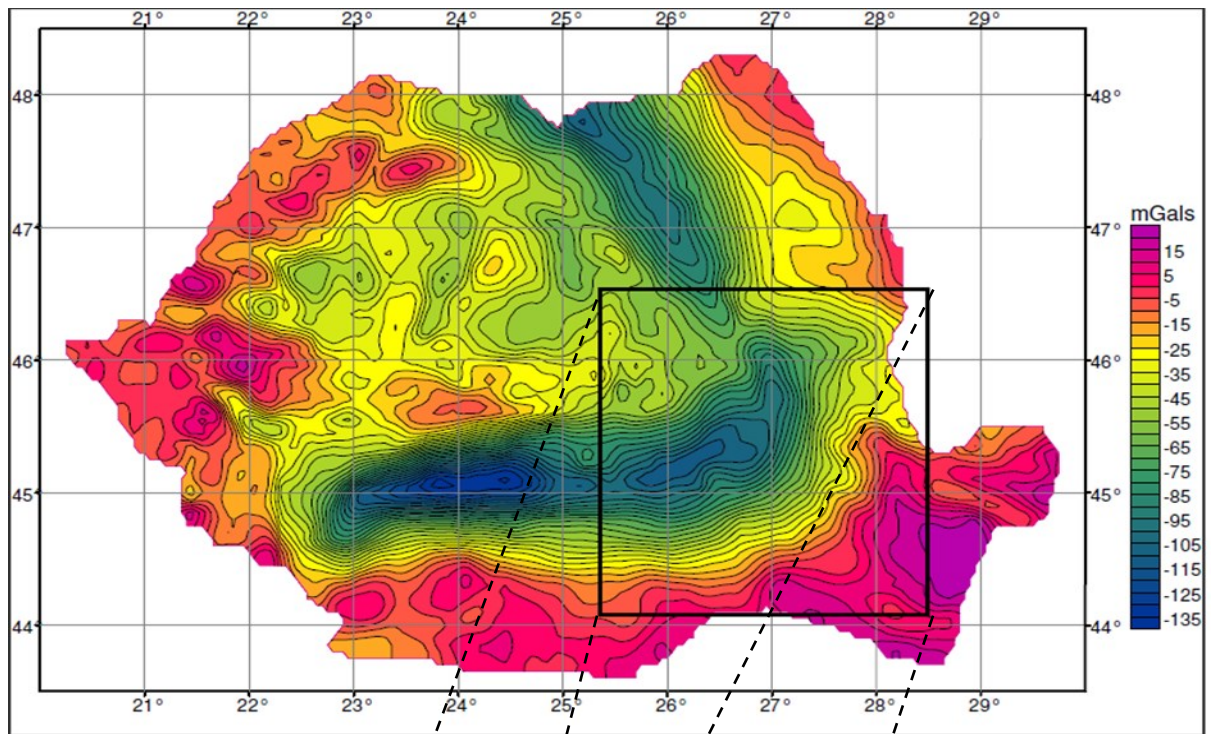
Model Vrancea area parameter in contrast to the intensity of microseismic field



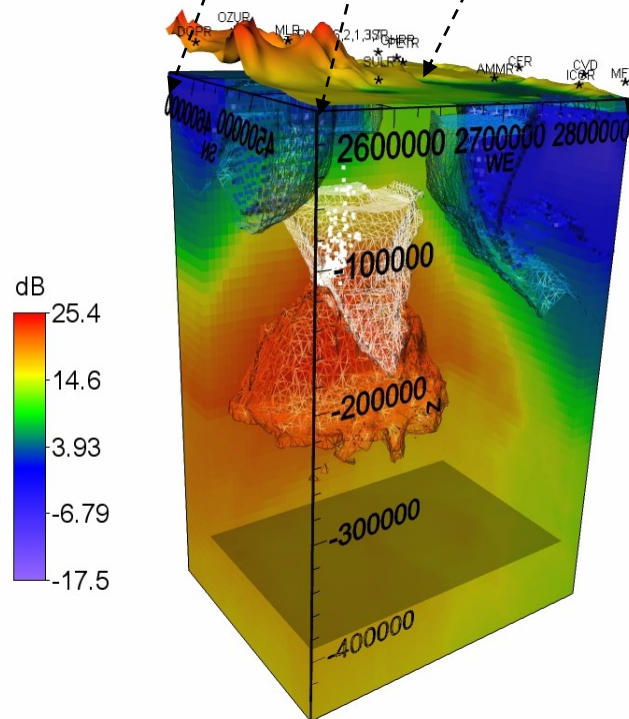
Фиг.IV.14. Тримерен модел на интензивността на микросейзичното поле (dB) на сеизмичната зона Вранча.

Трябва да се има предвид, че при изучаването на скоростния дълбочинен строеж под зоната Вранча и неговите връзки с хипоцентровете на земетресенията не се разглежда въпроса за това, какви ендегенни фактори могат да послужат за причина и стартов механизъм за ставащите земетресения. В общия случай този въпрос е много сложен, преди всичко е по силите ни да открием структури, имащи отношение към мантията под зоната Вранча.

Сравняване на получения тримерен модел с картата на Буге аномалиите на силата на тежестта (D. Ioane, 2005) е показано на фигура IV.18 и от фигурата Може да се заключи, че разпределението на силата на тежестта над изследваната територия много добре се корелира с получения модел на пространствено разпределение на интензивността на микросейзичното поле.

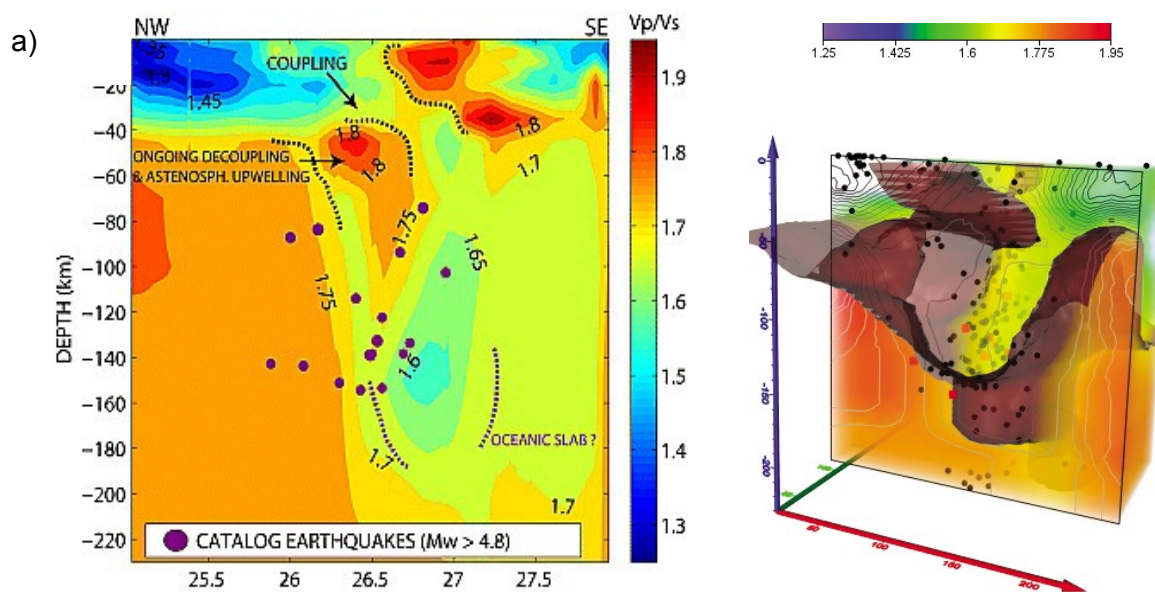


Model Vrancea area parameter in contrast to the intensity of microseismic field

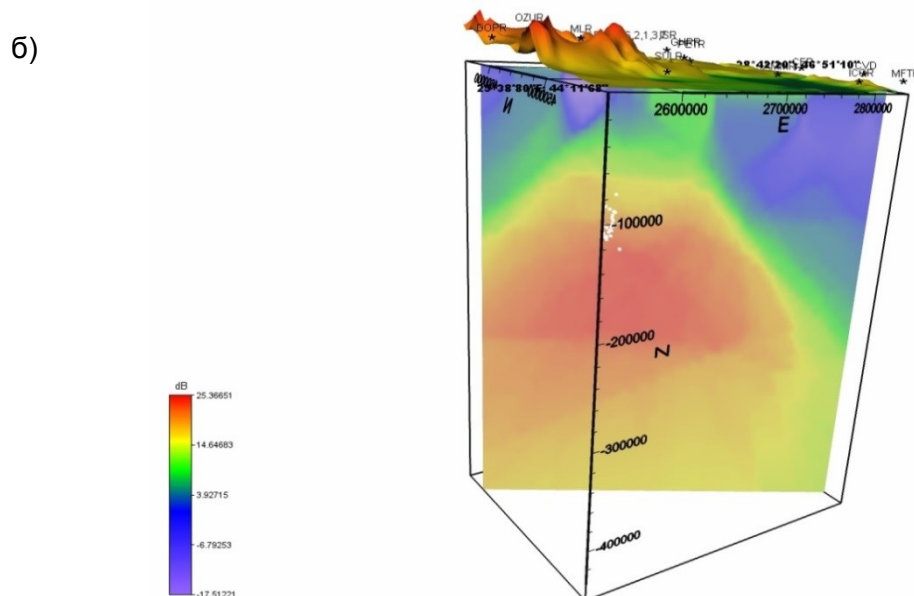


Фиг.IV.18.. Сравнение на данните от гравиметричните измервания (D. Ioane ,2005) с модела на интензивността на микросеизмичното поле за областта Вранча.

Както се вижда на вертикалния разрез (фиг.IV.20), построен по разпределението на скоростното отношение V_p/V_s в дълбочина, по профил VRANCEA 2001, на дълбочина, която съвпада добре със сеизмични разрив на земната кора и промеждутъчната дълбочина на земетресенията, област на ниска V_p/V_s аномалия лежи редом с площ на високи стойности на V_p/V_s , което е в близък синхрон с зоната по същия профил в получения модел по метода на микросеизмичното сондиране.



Model Vrancea area parameter in contrast to the intensity of microseismic field



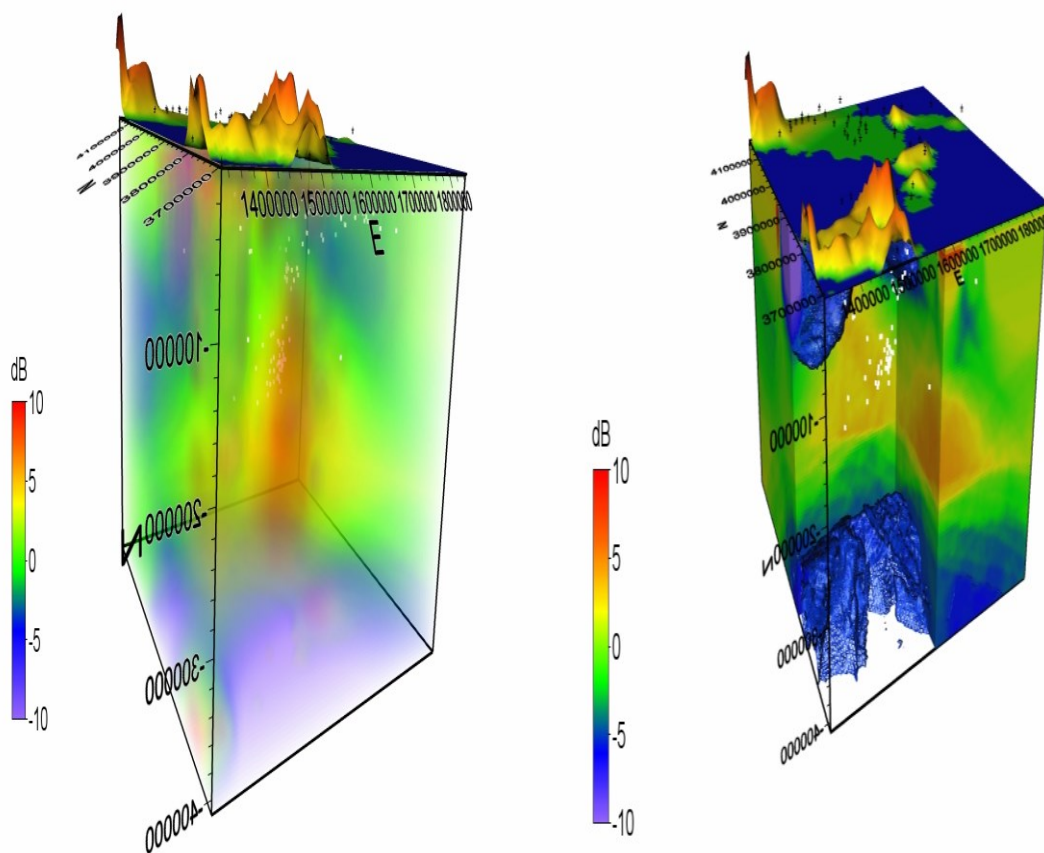
Фиг.IV.20.(а) Вертикален разрез през 3-D V_p / V_s модела по протежение на VRANCEA2001 профила на рефракция. 3-D визуализация на W-E вертикална секция на полученият 3-D V_p / V_s модел на югоизточните Карпати. (б) Микросеизмичен разрез на интензивността на полето по същия профил (dB).

IV.2.3. Резултат от микросеизмичното сондиране в Южна Италия сеизмична зона Калабрия.

За изследването са взети едночасови сеизмични записи от всички 58 сеизмични станции, записани на 01.02.2013 за интервала 00:00:00-01:00:00 часа, от които са изчислени мощностните спектри за всяка станция. Разпределението на вариациите на интензивността е определено по отношение на базовата опорна станция (JOPP). При преизчисляването на спектралните честоти в дължини на вълни, са отчетени дисперсионните свойства на Релеевите вълни, а именно, увеличението на скоростта с увеличаването на дължините на вълните. За тази цел е използван скоростен модел построен от G.F.Panza и A.Pontevivo (2002г.).

На фиг. IV.21, IV.25 са показани резултатите от обработката на данните получени с метода на микросеизмичното сондиране. Цветовете тонове на тримерните модели съответстват на относителната интензивност на Релеевите вълни, изразени в децибели, което се интерпретира като относително изменение на скоростта на напречните вълни в изследваната област. Цветовата скала е в динамичен диапазон от -10 до 20 dB.

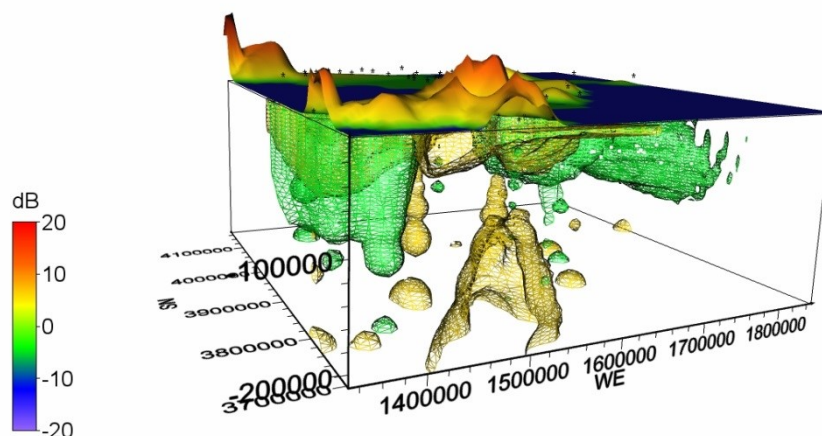
Model CALABRIAN ARC area parameter in contrast to the intensity of microseismic field



Фиг. IV.21. Тримерен модел на пространственото разпределение на интензивността на микросеизмичното поле (dB) на зоната на Калабрийската арка.

На полученото 3-мерно изображение до дълбочина 200 km (фиг.IV.25), могат да се проследят няколко относително високоскоростни области (ограничени от зелени изоповърхнини със стойност -5 dB), които се разположени под Йонийско море; Месианския пролив и Апенинския полуостров.

Model CALABRIAN ARC area parameter in contrast to the intensity of microseismic field

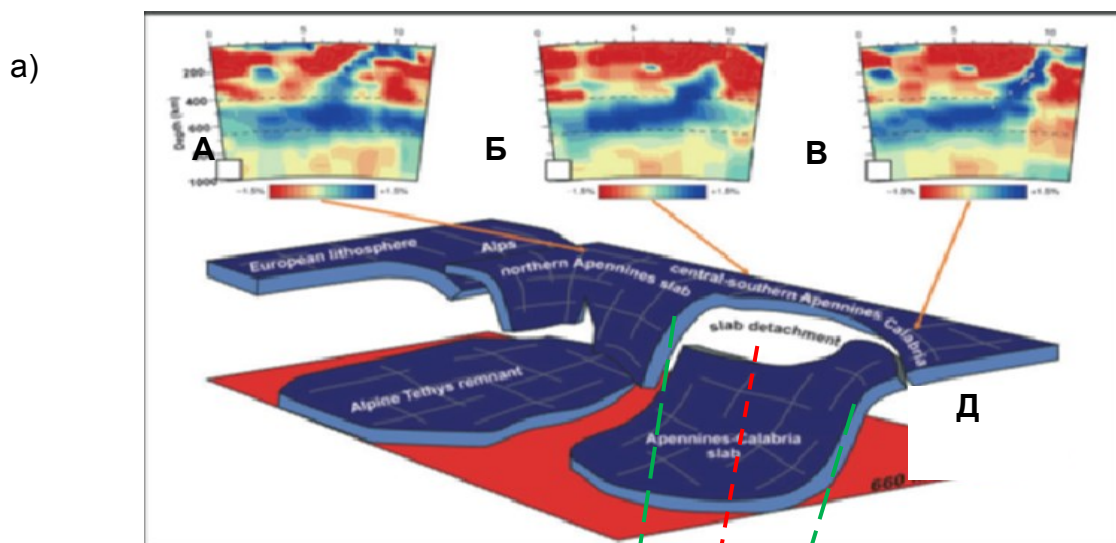


Фиг.IV.25. Тримерен модел на интензивността на микросеизмичното поле до дълбочина 200000 метра с обособени ниско скоростни (цвет охра) и високоскоростни (зелен цвят) зони.

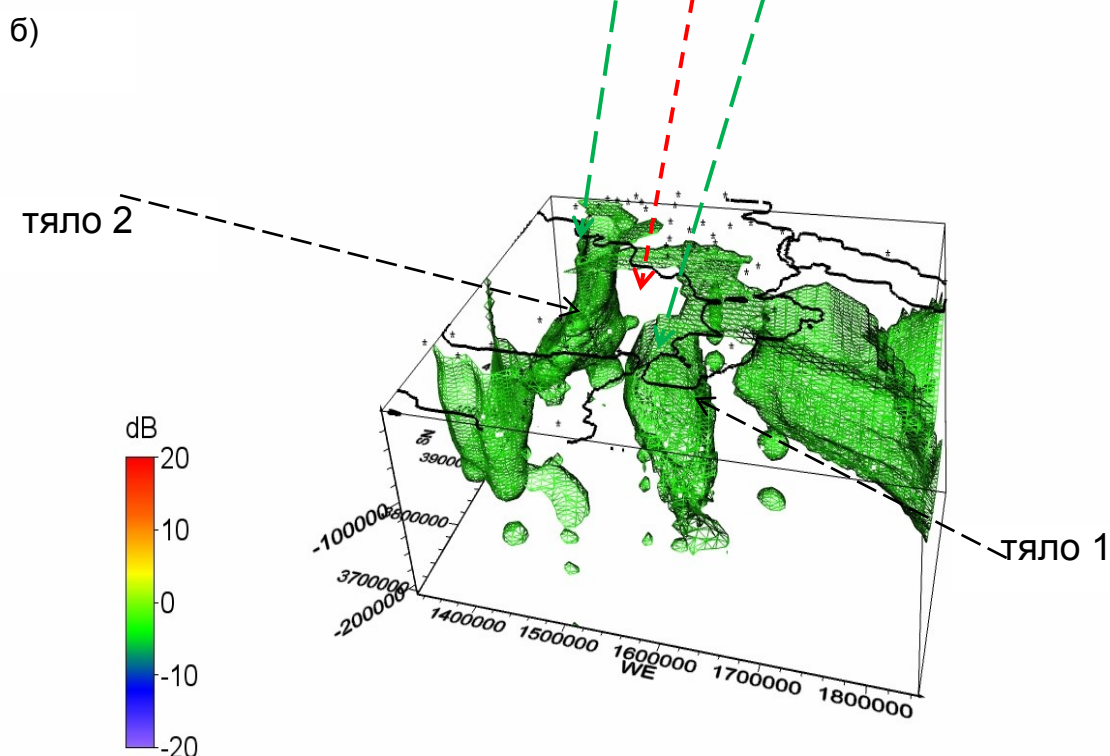
На изображението (фиг.IV.25) се виждат и две относително ниско скоростни области (6 dB; ограничено от жълта изоповърхнина), които се разположено под вулкана Етна на о. Сицилия. Първата област се простира от повърхността до дълбочина 10-15 km, а втората започвайки от 100 km продължава в дълбочина и след 200 km.

Сравняването на получения модел с модела получен от Spakman и Wortel (2004) на основа на направената от тях интерпретация на резултатите от сеизмичната томография в района на Италианската част на Западното Средиземноморие (фиг.IV.27 а), показва, добра корелация на двата модела. Високоскоростното тяло 1 (фиг.IV.27 б) в модела получен по MMC отговаря на предположеното наличие на Алпино-Калабрийски slab, а свободното пространство северно от тяло 1 на описания от Spakman и Wortel „прозорец“. Тяло 2 може са се интерпретира като част от предполагаемия северно Апенинския slab в модела на Spakman и Wortel.

В резултат от изследването на интензивността на микросеизмичния в зоната на Калабрийската арка са построени тримерни модели. Високоскоростните зони на моделите до голяма степен съвпадат с предположените местоположения на Алпино-Калабрийския и северно Апенинския slab в модела на Spakman и Wortel. Установено е, че разположението на хипоцентровете на плитките земетресения с $M > 4$ е по-протезението на високоскоростно тяло, а дълбоките земетресения са привързани към ниско скоростна зона разположена в близост до в. Етна.



Model CALABRIAN ARC area parameter in contrast to the intensity of microseismic field



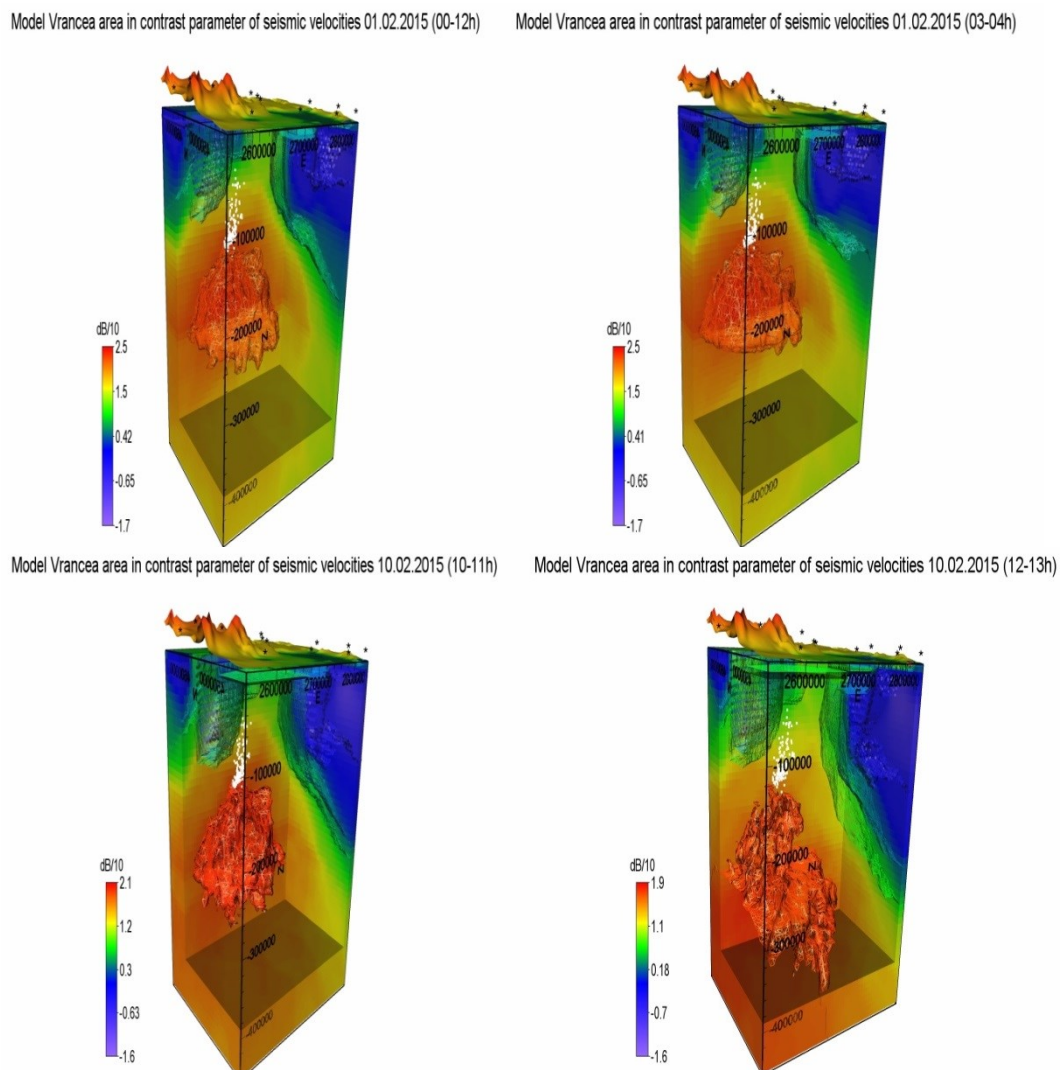
Фиг. IV.27. (а) Томографски изображения на аномалии скоростите на Р-вълни са показани за северните Апенини-Б, южните Апенини-В, и Калабрийската арка-Г Трансектите (от Spakman & Wortel, 2004; цветовете показват сеизмични аномалии на скоростта на вълната като процентни отклонения от средните мантия скорости, дадени от същите автори). Д - Модел показваща настоящата конфигурация на *slab* в италианската част на Средиземноморския регион, базирани на сеизмична томография (от Spakman & Wortel, 2004). (б) Високоскоростни области определени по метода на микросейзичното сондиране.

Глава V.– Оценка на точността на построенията и резултатите.

V.1. Оценка на чувствителността на метода към времевите вариации.

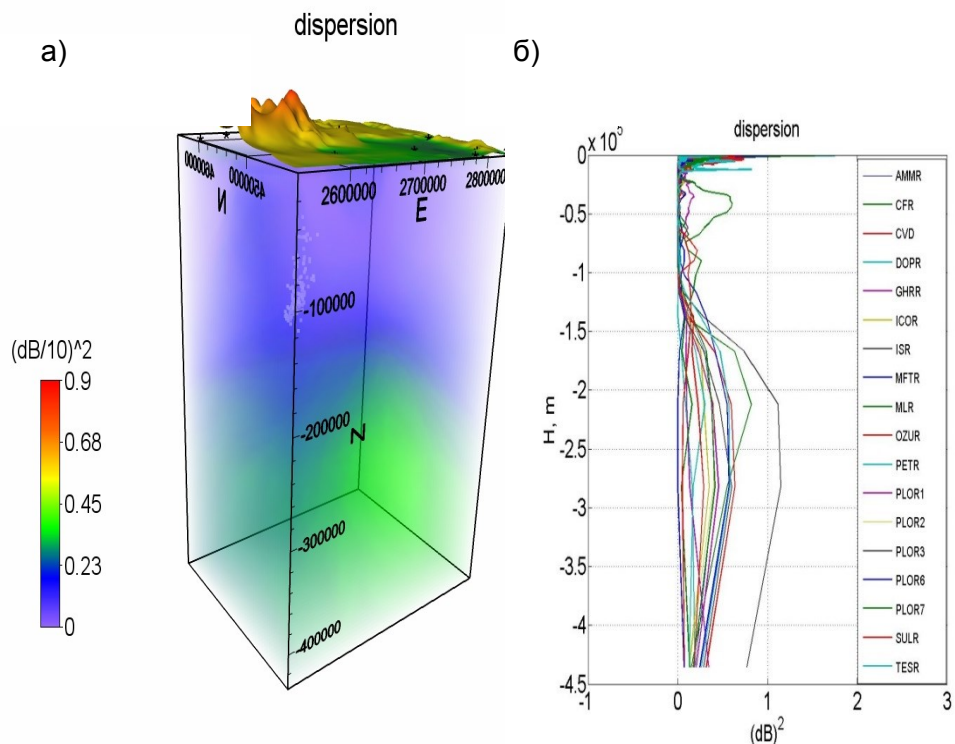
V.1.1. Зона Вранча.

За оценка на чувствителността на метода към промяната на времевата зона, в която се регистрира сигнала са направени четири експеримента. Интервала на натрупване на сигнала и за четирите експеримента е 1 час. Експериментите са направени както следва: 1. на 01.02.2015г. в интервала 00-01 час; 2. на 01.02.2015г. в интервала 03-04 часа; 3. на 10.02.2015г. в интервала 10-11 часа; 4. На 10.02.2015г. в интервала 12-13 часа. Базовата станция и за четирите експеримента е PLOR (lng. 24°64'90"; lat. 45°85'10", разположена на около 30 km от условия център на изследваната територия (~lng. 27°00'00" lat. 45°45'00". Получените модели на интензивността на микросеизмичния сигнал за четирите експеримента са показани на фиг.V.2.

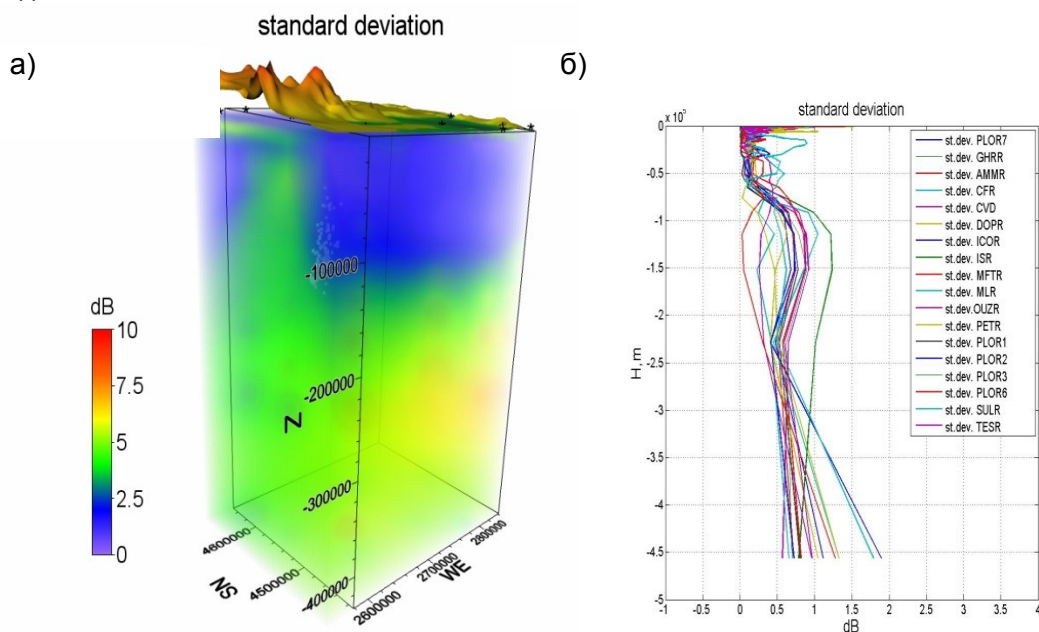


Фиг.V.2. Резултати от четирите експеримента, разположени както следва отгоре надолу и от ляво на дясно: 1-01.02. 00-01 часа; 2-01.02. 03-04 часа; 3-10.02. 10-11 часа; 4-10.02. 12-13 часа.

За численото оценяване на чувствителността са изчислени дисперсията и средното квадратично отклонение на резултатите от четирите експеримента за всяка станция (фиг.V.3, б) и по тях е построен 3D модел на пространственото разпределение на дисперсията и средно квадратичното отклонение (фиг.V.3,V.4).

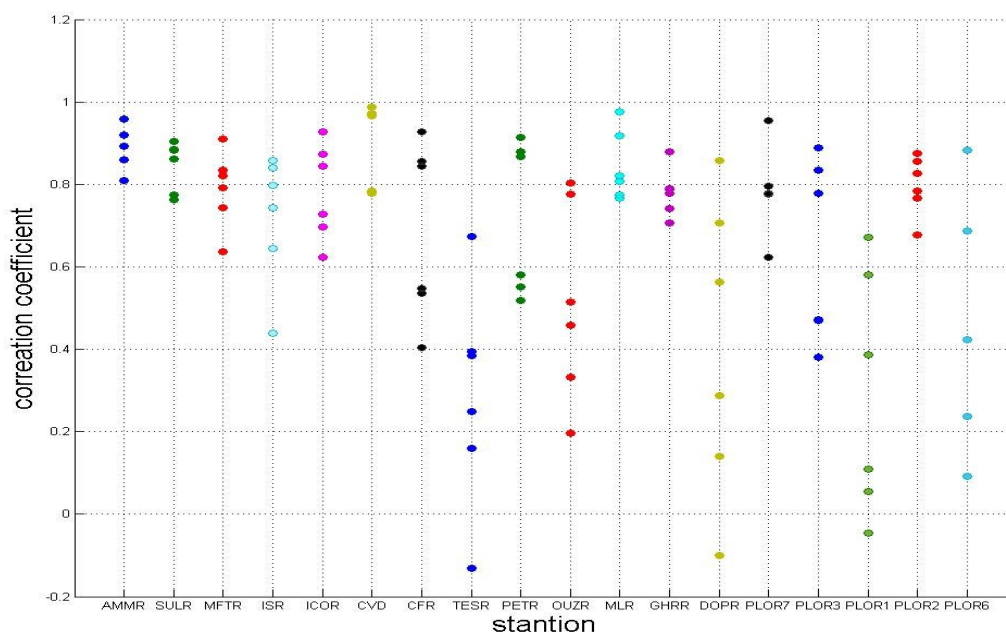


Фиг.V.3. а) пространствено и б) в дълбочина разпределение на дисперсията на четирите модела.



Фиг.V.4. а) пространствено и б) в дълбочина разпределение на средното квадратично отклонение за четирите модела.

При обработката на геофизичната информация широко се използва в практиката корелационната функция и коефициента на корелация. Изчислени са и представени в таблица коефициентите на корелация между различните експерименти, както и средните коефициенти на корелация. Общият среден коефициент на корелация е 0.67 което показва едно сравнително добро съвпадение на резултатите. На фиг.V.5 е показано графичното представяне на коефициентите на корелация между различните опити.



Фиг.V.5. Разпределение по станции на коефициентите на кроскорелация

Ако при сравняване на резултатите, се използва за количествена на характеристика на подобие между тях, средната стойност на коефициента на взаимна корелация, може да се заяви, че четирите модела имат 67% съвпадение.

Модел, получен от усредняване на резултатите от експериментите с дълги времеви серии.

В съответствие с алгоритъма за обработка на спектрите по метода на микросеизмичното сондиране (Горбатиков и др., 2008), относителната интензивност I на честота f_i е :

$$I = \frac{S_a + n_a}{S_b + n_b} \tag{1}$$

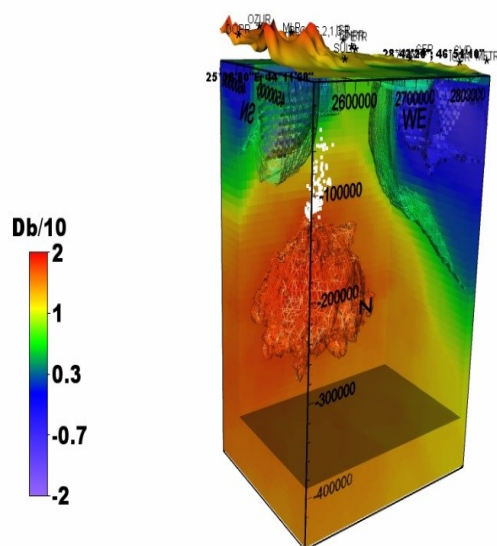
Ако опорната и подвижната станция са разположени на близко разстояние една от друга, то за оценка на относителната интензивност I не е необходимо натрупване и усредняване на спектрите на станциите по отделно и след това намирането на тяхното отношение. В този случай може пряко да се изчисли точната стойност I' , чрез намиране на отношението на спектъра на

мощността на сигнала на подвижната станция S_a^d към спектъра на базовата станция S_b^d .

$$\frac{S_a^d}{S_b^d} = \frac{I' S_a^d}{S_b^d} = I' \quad (5)$$

На практика, определеното съотношение ще съдържа изчислителни грешки. За да се отстранят трябва да се осредни получената стойност за I' по няколко измервания, и резултата от такова усредняване няма да зависи от свойствата на сондиращия микросеизмичен сигнал и ще е сходим към точното решение.

Model Vrancea area in contrast parameter of aver. v. seismic velocities



Фиг.V.6. Тримерен модел на разпределението на интензитета на микросеизмичното поле получен от средния резултат между четирите експеримента.

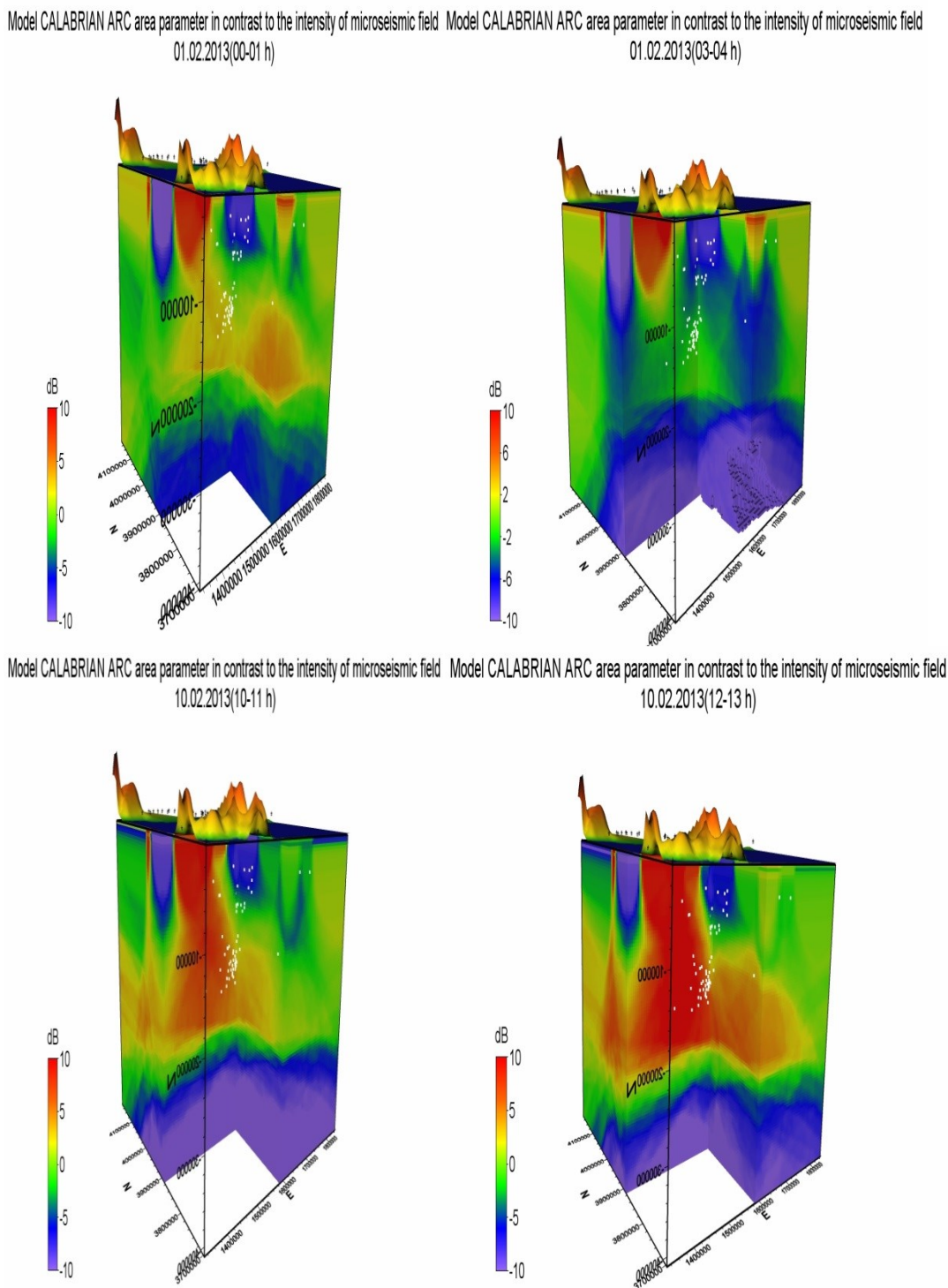
Представени са кроскорелационните коефициенти между различните експерименти във времето и модела получен от средните стойности между тях. Можем да се отбележи, че средната стойността на коефициента на крос корелация е 0.84, което е с 20% процента повече от средният корелационен коефициент между всеки от опитите.

V.1.2. Зона на Калабрийската арка.

За оценка на чувствителността на метода към промяната на времевия интервал, в който се регистрира сигнала са направени четири експеримента. Интервала на натрупване на сигнала и за четирите експеримента е 1 час. Експериментите са направени както следва: 1. на 01.02.2013г. в интервала 00-01 час; 2. на 01.02.2015 в интервала 03-04 часа; 3. на 10.02.2013 в интервал 10-11 часа; 4. На 10.02.2015 в интервала 12-13 часа. Базовата станция и за четирите експеримента е JOPP (lng. $26^{\circ}64'90''$; lat. $45^{\circ}85'10''$, разположена на

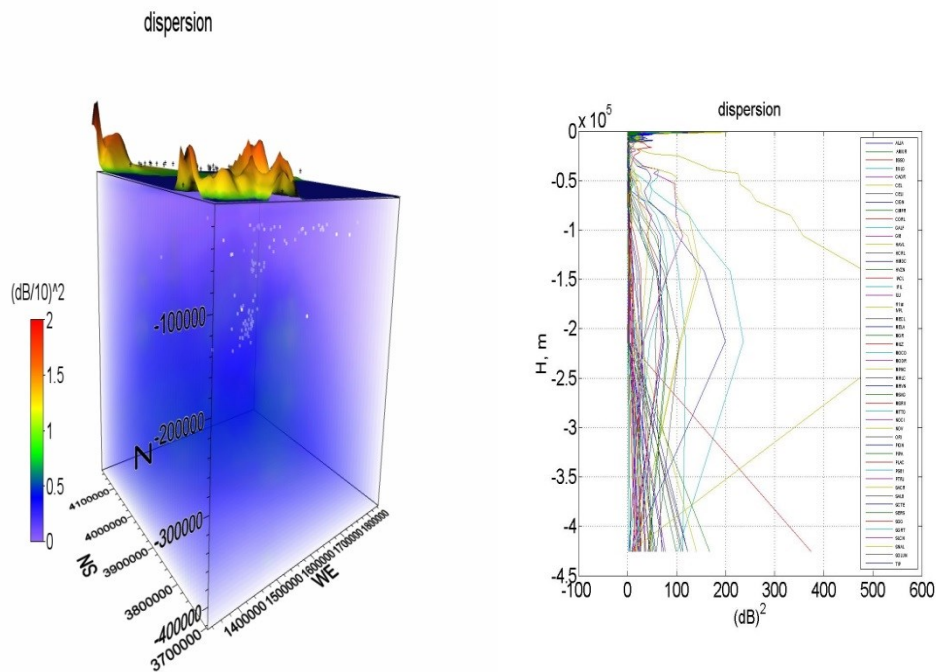
Автореферат на дисертационен труд. Микросеизмичен шум, практически приложения. 2016

около 90 km от условния център на изследваната територия (~lng. 15°34'23" , lat.39°26'53". Получените модели относителната интензивност на микросеизмичния сигнал за четирите експеримента са показани на фиг.V.8.

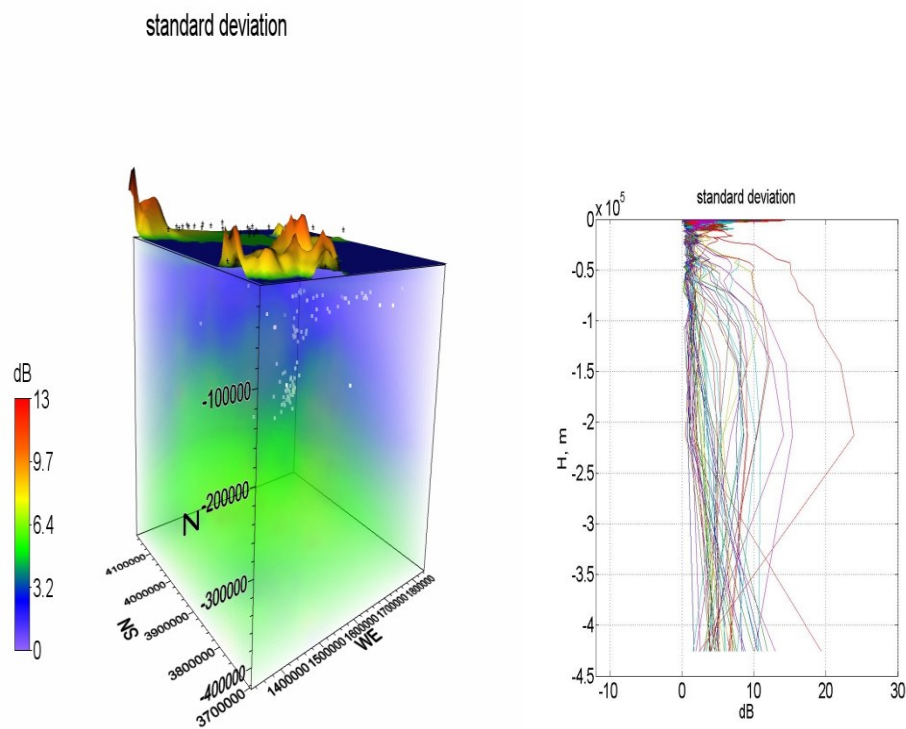


Фиг.V.8. Резултати от четирите експеримента, разположени както следва отгоре надолу и от ляво на дясно: 1-01.02. 00-01 часа; 2-01.02. 03-04 часа; 3-10.02. 10-11 часа; 4-10.02. 12-13 часа.

За оценяване на чувствителността на метода при прилагането му в изследваната зона са изчислени дисперсията и средното квадратично отклонение на резултатите от четирите експеримента за всяка станция и по резултата е построен 3D модел на пространственото разпределение на дисперсията и средно квадратичното отклонение (фиг.V.9,V.10).



Фиг.V.9. Пространствено разпределение на дисперсията за четирите модела.



Фиг.V.10. Пространствено разпределение на средното квадратично отклонение за четирите модела

Изчислени са коефициентите на корелация между различните експерименти, както и средните коефициенти на корелация. Общият среден коефициент на корелация е 0.64 което показва едно сравнително добро съвпадение на резултатите.

Модел, получен от осредняване на резултатите от времевите експерименти.

Построен е модел получен от средната стойност (от четирите времеви експеримента) на относителните спектри за всяка станция . Трябва да се отбележи, че средната стойност на взаимните корелационни коефициенти от различните експерименти с осреднените стойности на относителните спектри е 0.84, което е с 20% повече от средната стойност на взаимния корелационен коефициент между различните експерименти (0.64).

V.2. Оценка чувствителност на метода към промяна местоположението на базовата станция.

V.2.1. Зона Вранча.

За оценка чувствителността на метода при промяна на базовата станция са направени 8 експеримента.

Първият ред експерименти е проведен по сеизмичните записи от 01.02.2015г. (00-12 часа) с базови станции AMMR (Ing. 27°33'50", lat. 44°61'00"), ISR (Ing.26°54'31", lat. 45°11'88"), PLOR1 (Ing. 26°64'60", lat.45°85'20".), PLOR2 (Ing. 26°64'30", lat. 45°85'00") . Разстоянието на което са разположени станциите от условния център на изследваната зона (~Ing. 27°00'00", lat.45°45'00") са както следва: AMMR-125,35 km.; ISR-72,30 km.; PIOR1-27,85 km.; PLOR2-27,92 km.

От таблицата с кроскорелационните коефициенти на първия ред експерименти могат да се направят следните изводи: 26°64'60" 1.средният корелационен коефициент между експерименти с базови станции AMMR и PLOR1, AMMR и PLOR2 са много по-малки от 0,5, причината за което е голямата отдалеченост на базовата станция AMMR (125,35 km) от условния център на зоната ; 2. Корелационните коефициенти са най големи при експериментите с близко разположени базови станции и сходни релефни особености (PLOR1-PLOR2 0,31 km - близко разстояние; AMMR-ISR 83 km-сходни условия).

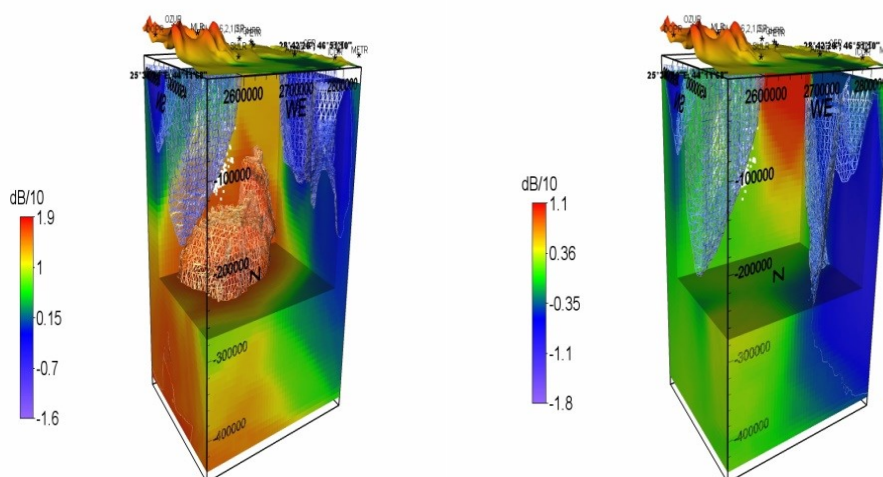
Втората група експерименти са проведени с четири базови станции близко разположени както една от друга така и близко разположени до централната зона, както и имащи сходни релефни особености (PLOR,PLOR1,PLOR2,PLOR3) . Използваните сеизмични записи на станциите са направени на 01.02.2015г. (00-12 часа) . Координатите на базовите станции са: PLOR- Ing. 26°64'90" ,lat. 45°85'10"; PLOR1 - Ing. 26°64'60", lat. 45°85'20"; PLOR2-Ing. 26°64'30", lat. 45°85'00" ; PLOR3- Ing. 26°64'50", lat. 45°85'40". Разстоянията между станциите са: PLOR-PLOR1 0,26 km, PLOR PLOR2 0,48 km ; PLOR-PLOR3 0,46 km ; PLOR1-PLOR2 0,31 km; PLOR1-PLOR3 0,23

km ; PLOR 2 - PLOR 3 0,46 km. PLOR1-PLOR3 0,23 km ; PLOR 2 - PLOR 3 0,46 km. Разстоянието на отделните базови станции до условния център (~lng. 27°00'00", lat. 45°45'00") на изследваната територия е приблизително едно и също - около 30 km.

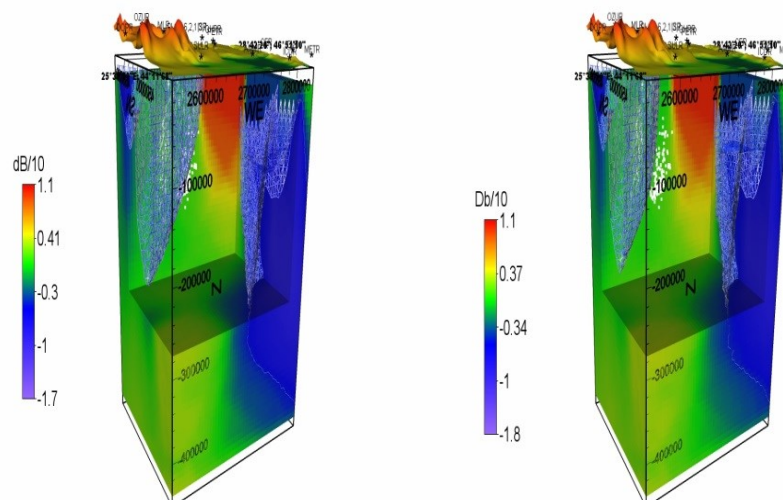
Получените 3D модели на контраста на интензивността на сигнала при промяна на базовите сеизмични станции са представени на фиг.V.15.

Изчислени са корелационните коефициенти които са с много по-високи стойности като цяло от стойностите на първата серия опити. Изключение е ниските стойности на кроскорелационните коефициенти за станция PLOR1, което може да се дължи на локален сеизмичен източник. Средната стойност на коефициента на корелация за всички станции е 0.77, което е с 19% по висок от средния коефициент на корелация от първия ред опити- 0.58.

Model Vrancea area in contrast parameter of seismic velocities (PLOR) Model Vrancea area in contrast parameter of seismic velocities (PLOR1)



Model Vrancea area in contrast parameter of seismic velocities (PLOR2) Model Vrancea area in contrast parameter of seismic velocities (PLOR3)

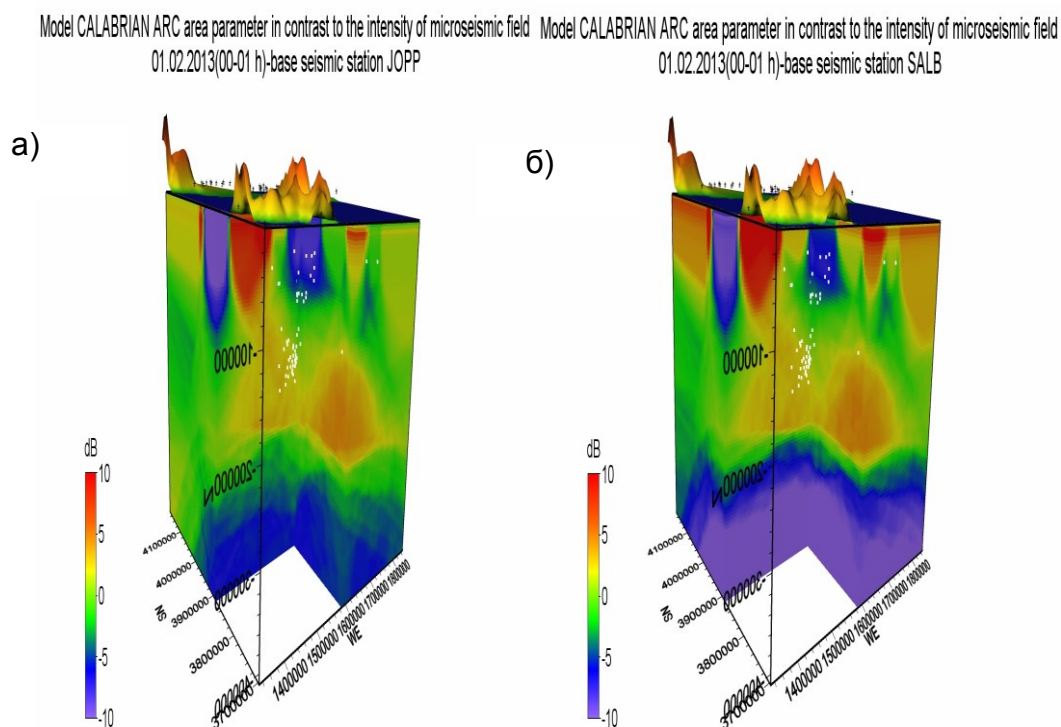


Фиг.V.15. Модели на контраста на интензивността на полето при промяна на базовата станция както следва: от ляво на дясно, от горе на долу – базови станции PLOR, PLOR1, PLOR2 и PLOR3.

V.2.2. Зона на Калабрийската арка.

За оценка чувствителност на метода при промяна на базовата станция е направен 1 експеримент проведен със сеизмичните записи от 01.02.2013г. (00-12 часа) с базова станция JOPP (Ing.15°53'08"; lat.38°36'24") и SALB (Ing. 16°20'45", lat. 39°52'37"). Разстоянието на което са разположени станциите от условния център на изследваната зона (~Ing. 15°54'00", lat. 39°24'00") са както следва: JOPP-97 km и SALB-57 km, разстоянието между двете станции е 145 km.

Получените 3D модели на контраста на интензивността на сигнала при промяна на базовите сеизмични станции са представени на фиг.V.19



Фиг.V.19. Модели на разпределение на интензивността на микросеизмичното поле (dB) за две различни базови станции- (а) базова станция JOPP; (б) базова станция SALB.

Средната стойност на коефициента на корелация от двата експеримента е 0.87, което показва добра корелация между моделите, получени при промяна на базовата станция за района на Калабрийската арка, т.е. изборът на базова станция за изследвания район не влияе силно на изображението на пространственото разпределение на микросеизмичното поле.

Дисперсия и средно квадратично отклонение са критериите за оценка на разсейването на данните от двата експеримента. Построените 3D модели на дисперсията и средно квадратичното (стандартно) отклонение показват разпределението на разсейването на данните от средната стойност между

двата експеримента в дълбочина, което може да бъде показател за достоверността на получаваните контрастни граници. Тъй като стандартното отклонение е в същите единици както интензивността на полето той е и удобен параметър за анализ. Изхождайки от това можем да се отбележи, че за всички дълбочини средното квадратично отклонение е в границите на 0-5 dB. Изключение прави само малка зона разположена на дълбочина под 300 km в централната част на модела за която средно квадратичното отклонение е около 40 dB .

Можем да се направи извод, че при избор на базови станции които се намират в сходни релефни особености и на не голяма отдалеченост от централната зона на изследваната област получените като резултат модели практически не се различават. Което отново потвърждава извода направен при експеримента с базови станции в зоната Вранча, т.е. базовата станция е добре да бъде избрана възможно най-близо до условния център на изследваната територия и по възможност на място с минимум релефни особености.

VI. Получени резултати и основни приноси.

В процеса на реализация на поставените цели на дисертационния труд са получени следните по-важни резултати:

1. Изучено е съвременното състояние на изследванията на микросеизмичния шум, обобщен е опита от работите, свързани с решаването на геоложки задачи, въз основа на техните особености. Установени са преимуществата и недостатъците на Метода на микросеизмичното сондиране.

2. Въз основа на проучените геолошко-геофизични условия на районите на изследване (Интермизийски разлом, сеизмичната зона Вранча и областта на Калабрийската арка), са подбрани такива експериментални условия, позволяващи дълбочинно изследване на структурните и скоростни нееднородности в тези райони.

3. Измерени са характеристиките на микросеизмичния шум и неговите времеви вариации за конкретните условия на изследваните територии.

4. Разработена е методика за прилагане на метода на микросеизмичното сондиране с използването на стационарни сеизмични станции, предложен е алгоритъм за обработка на резултатите от измерванията на сигналите регистрирани в сеизмичните станции, основан на отчитането на времевите вариации и нормирането с използване на базова станция.

5. Получените резултати от интерпретацията на обработените данни, доказват възможността за използването на метода на микросеизмичното сондиране както за картиране на разломни структури, така и за дълбочинното изследване на картирането на крупномащабни геолошко-тектонски структури.

6. С помощта на метода на микросеизмично сондиране са построени примерни модели на разпределението на интензивността на микросеизмичното поле в изследваните територии (Интермизийски разлом; зона Вранча; Калабрийската арка), които демонстрират добро съответствие с резултатите от изследването на дълбочинния строеж с данните на други световни изследователи, получени с други, независими методи.

7. Експериментално е изследвана чувствителността на метода на микросеизмичното сондиране към времевите вариации, като са получени

количествените характеристики на чувствителността на метода към времевите вариации. Показано е, че те се определят надеждно в рамките на 60-70%.

8. Експериментално е изследвана чувствителността на метода на микросеизмичното сондиране към избора на базова станция. Получени са количествени характеристики на чувствителността на метода към избора на базова станция, които варират в рамките на 50-60%.

9. Резултатите от изследванията в дисертацията показват ефективността на ММС при изследване на разломни и дълбочинни сеизмогенни структури, като получаваните резултати се отличават с висока надеждност и разделителна способност. Показано е, че тези характеристики намаляват с увеличаване на дълбочината, което е заложено в самата физическа същност на метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трудът представлява научна разработка, в която е предложена научно-обоснована технология за създаване на относителни скоростни модели по метода на Микросеизмичното Сондиране, посредством използването на широко лентови стационарни сеизмични станции.

VII. 1. Публикации по дисертационния труд.

1. Е. Ойнаков, Б. Рангелов „ Микросеизмично сондиране и някои приложения“, Сборник популярни и научни доклади Дни на физиката 2015, Издателство на ТУ – София, Том 7, с.68, ISSN 1313-9576
2. Емил Ойнаков, Бойко Рангелов , Изследване на разломни структури и равномерно потъващ фундамент с помощта на микросеизмичен шум. Диск с доклади от XXV международен симпозиум Съвременните Технологии, Образованието и професионалната практика в геодезията и свързаните с нея области, ISSN 2367 – 6051
3. Е. Ойнаков, Микросеизмично сондиране, статистически характеристики на полето в района на Интермизийския Разлом, Годишник на Минно-Геоложкия Университет “Св. Иван Рилски”, Том 58, Св. I, Геология и геофизика, 2015, с.236, ISSN 1312-1820
4. Емил Ойнаков, Бойко Рангелов, „Микросеизмично сондиране - оценка на чувствителността на метода с реални експерименти на реален дълбочинен обект – сеизмогенна зона Вранча“, Сборник популярни и научни доклади Дни на физиката 2016, Издателство на ТУ – София, Том 8, ISSN 1313-9576
5. E. Oynakov E. Deep Seismic Sounding by Microseismic Tremor (SSMT) Broadband Signals for Calabria Seismic Zone, International Academy Journal Web of Scholar, October 2016, 35, ISSN 2518-167X, 6(6)
6. Boyko Rangelov, Emil Iliev ,“Дълбочинни нееднородности в района на сеизмоактивната Калабрийска арка установени по Метода на Микросеизмичния Шум“ , Сборник с доклади от XII научна конференция с международно участие SES'2016. ИКИТ-БАН., ISSN 1313–3888, под печат
7. E. Oynakov, B. Rangelov, Sensitivity Of The Method Of Microseismic Drilling At Depth Research In Different Seismic Zones - Vrancha And Calabria, Сборника с

Научни трудове по физика на Пловдивския университет "Паисий Хилендарски" от V Национална студентска, научна сесия по физика и инженерни технологии, ISSN 0861-0029, под печат

8. Emil Oynakov, Boyko Rangelov, „Числени експерименти за установяване на устойчивостта и разделителната способност на Метода на Микросейсмичното Сондиране (MMC)“, диск с доклади от VIII Национална конференция по геофизика, N8, ISSN 1314-2518

VII. 2. Доклади на научни форуми, конференции, симпозиуми и др.

1. Scientific Session "Days of physics", Technical University of Sofia, 2015
2. International Conference of MGU "Sv. Ivan Rilski" October 20, 2015
3. I International Simposium "Modern technologies, education & professional practice in geodesy & related fields" 2015
4. Scientific Session "Days of physics", Technical University of Sofia, 2016
5. Twelfth Scientific Conference "Space, Ecology, Safety" S E S 2016
6. VIII Национална конференция по геофизика, София, 25 ноември 2015г.

Литература, посочена в автореферата на дисертационния труд:

Антоненко Э.М., Е.Ф.Саваренский. О природе высокочастотных микросейсм. // Изв. АН Каз.ССР, серия геология, 1963, №54, том 3, с. 81-90.

Горбатиков А.В. Патент на изобретение № RU2271554. "Способ сейсмо разведки". Дата приоритета 25.03.2005 // Бюл. №, 10.03.2006.

Горбатиков А.В., М.Ю.Степанова, Г.Е.Кораблев. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм. // Физика Земли, 2008, JW, С. 66-84.144

Ландау Л.Д., Е.М.Лифшиц. Теоретическая физика: Учеб. пособ.: Для вузов. В 10 т. VII. Теория упругости. 5-е изд. М.: Физматлит, 2007. 264

Wood, Harry O., and Beno Gutenberg. "Earthquake prediction." *Science* 82.2123 (1935): 219-220.

Carminati, E., M. J. R. Wortel, W. Spakman, and R. Sabadini, 1998, *The role of slab detachment processes in the opening of the western-central Mediterranean basins: some geological and geophysical evidence*, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 160, 651-665.

COMSOL Multiphysics reference guide; *Structural mechanics module reference guide*, (c) Copyright 1994-2007 by COMSOL AB. All rights reserved

Doglioni, C., Mongelli, F., & Pialli, G. (1998). *Boudinage of the Alpine belt in the Apenninic back-arc*. *Mem. Soc. Geol. It.*, 52, 457-468.

Gueguen, E., C. Doglioni, and M. Fernandez, 1998, *On the post-25 Ma geodynamic evolution of the western Mediterranean*, *Tectonophysics*, 298, 259-269.

Hauser, F., Prodehl, C., Landes, M., VRANCEA working group, 2002. *Seismic experiments target earthquake-prone region in Romania*. *AGU* 83, 457 – 463.

Ioane, D., & Ion, D. (2005). *A 3D crustal gravity modelling of the Romanian territory*. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 8(4), 189-198.87.

Oncescu M.C, Bonjer K.P. *A note on the depth recurrence and strain release of large Vrancea earthquakes // Tectonophysics-1997.-272.-P. 291-302*

Spakman, W., & Wortel, R. (2004). *A tomographic view on western Mediterranean geodynamics. In The TRANSMED atlas. The Mediterranean region from crust to mantle* (pp. 31-52). Springer Berlin Heidelberg.

Wood, Harry O., and Beno Gutenberg. "Earthquake prediction." *Science* 82.2123 (1935): 219-220.