## БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

## <u>НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО</u> <u>ГЕОФИЗИКА, ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОГРАФИЯ</u>

Гергана Димитрова Георгиева

## "Анализ на дългопериодни вълнови форми от земетресения с цел изучаване на строежа на земната кора и горната мантия"

Научна специалност: 01.04.06 "Сеизмология и вътрешен строеж на Земята"

## ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

за получаване на научна и образователна степен

Доктор

## Научен ръководител:

ст.н.с. д-р Светлана Николова НИГГГ, БАН

София 2013

Изказвам моите най-големи благодарности на уважаемия акад. Людмил Христосков за ценните му напътствия и съвети при подготовката на дисертацията ми.

Благодаря на научния ми ръководител д-р Светлана Николова за напътствията, помощта и подкрепата през цялото време на усвояване на метода, получаването и анализа на резултатите и най-вече при писането на дисертацията.

Отправям благодарности на колегите ми от НИГГГ - на доц. д-р Лилия Димитрова за съвместната работа по някои от задачите в дисертацията, на чл. кор. дфн Димчо Солаков, на проф. д-р Ценка Христова и проф. д-р Емил Ботев за проведените с тях дискусии и напътствия в работата и предоставената възможност да използвам данните от Националната цифрова сеизмологична мрежа.

Благодарности на проф. Р. Кинд и д-р Ф. Судуди за оказаната подкрепа и предоставения софтуер при изучаването и прилагането на метода. Благодаря на ДААД за предоставената финансова подкрепа, без която нямаше да бъде възможна работата с проф. Кинд и д-р Судуди.

Благодаря на д-р Ренета Райкова подкрепата и съветите през цялото време на подготовката на дисертацията и най-вече при интерпретацията на резултатите.

Благодарности на колегите от катедра Метеорология и геофизика на СУ "Св. Климент Охридски" за съветите и подкрепата при изготвянето на дисертацията.

Благодарности на колегите от НИГГГ, департамент Сеизмология.

Благодаря на Петя Петкова за помощта при изготвянето на част от графиките.

Благодаря на колегите от фирма "ММ Солушънс".

Благодаря на семейството ми, че ме подкрепяха през цялото време.

Благодаря на децата ми за търпението понякога.

## СЪДЪРЖАНИЕ

Увод	
TOM 1	
Глава 1. Сеизмотектоника и обзор на	сеизмичните изследвания
1.1. Кратки геолого-тектонски си полуостров	ведения за Балканския
1.2. Кратък преглед на изследва България и прилежащите терито	нията на земната кора в ории
1.3. Цели на дисертационния тр	уд.
Глава 2. Национална цифрова сеизми използвани данни	ична мрежа (НЦСМ) и
2.1.Национална цифрова сеизми	чна мрежа
2.2. Формати за сеизмични данн сеизмологичен център	и, използвани в Националния
2.2.1. Формат RefTech	1
2.2.2. Формат SEED	
2.2.3. Формат CSS	
2.3. Данни.	
Глава З. Изследване строежа на земн	ата кора в България
3.1. Метод на функци functions)	ите на приемане (receiver
3.1.1. Ист	ория на метода
3.1.2. Mer	год на функциите на приемане
3.1.3. Изч сензора	истване на влиянието на
3.1.4. Рот на запис	ация на координатната система
3.1.5. Дек	онволюция
3.1.6. Сти корекция за времето	коване на сеизмограмите и
земната кора и отношението на	ределяне на дебелината на скоростите на Р и S вълните

приемане от азимута анизотропия	3.1.8. Зависимост на функциите на , наклона на границите и наличието на	
	3.1.9. Инверсия	
	3.1.10. Функции на приемане от S вълни	
3.2. Резултати от приемане за станциите от	прилагането на метода на функциите на • НЦСМ в България	
(PLD)	3.2.1. Станции Ямбол (JMB) и Пловдив	
Павликени (PVL) и С	3.2.2. Станции Малопещене (MPE), Стражица (SZH)	
(RZN)	3.2.3. Станции Кърджали (KDZ) и Рожен	
Крупник (ККВ), Вит	3.2.4. Станции Мусомище (MMB), оша (VTS) и Панагюрище (PGB)	
Преселенци (PSN)	3.2.5. Станции Провадия (PRD) и	
Глава 4. Изследване стр територията на България	оежа на зоната на преход в мантията за и околните земи	
4.1. Кратъ Балканския полуостр	к обзор на изследванията на мантията под оов	
структурата на манти	4.1.1. Глобални изследвания на ията	
мантията под Балкан	4.1.2. Изследване на структурата на ския полуостров	
4.2. Петро	логия на мантията	
4.3. Допъл на функциите на при мантията	нителни техники, приложени към метода емане, за изследване на строежа на	
	4.3.1. Миграция	
	4.3.2. Разделителна способност на метода	
4.4. Резулт	ати	
Глава 5. Заключение.		
Глава 6. Приноси на дисе	ртационния труд.	

Списък на авторските публикации.	
Списък на изнесените доклади.	
Използвана литература.	
TOM 2.	
Приложения.	

### Увод

До началото на 70-те години на миналия век сеизмолозите са работели основно за установяване на радиалната структура на цялата планета. Скоро обаче се установява, че има райони, в които се срещат значителни отклонения в скоростната структура, спрямо радиалния модел. С развитието на цифровата регистрация на сеизмичната информация се трупа огромна база от данни. Това дава възможност да се изследва по-детайлно структурата на Земята и все по-важни стават локалните изследвания.

Балканският полуостров е най-активната в сеизмично отношение част от континентална Европа. На малка площ са разположени различни геоложки структури, което затруднява изучаването на строежа и геодинамиката на района като цяло. Допълнителна трудност до скоро беше също и липсата на цифрови сеизмологични данни за част от региона. Основните изследвания са насочени към изясняването на строежа на зоната на субдукция в Егейско море и в района на Вранча. Изучаването на останалата част от Балканския полуостров е сравнително общо като не се отчитат локални структури.

Модернизирането на мрежата от сеизмични станции в България дава много добра възможност за прилагане на съвременни методи за изследване на структурата на земната кора и горната мантия под територията на страната. Благодарение на географското разположение на България, която заема централната част на Балканския полуостров, резултатите получени за по-голяма дълбочина дават представа за структурата на горната мантия и за по-голяма територия, което обхваща южната част на полуострова. Така от една страна натрупаните вече в България цифрови данни са предпоставка за локалното изясняване на строежа на земната кора в България, нейната дебелина и структурата на отделни геоложки единици. От друга страна се прибавя допълнителна информация към изследванията провеждани на територията на съседните държави за структурата на горната мантия, като тази информация помага за изясняването на геодинамиката в района.

## TOM I

# ГЛАВА 1 Сеизмотектоника и обзор на сеизмичните изследвания

### 1.1. Кратки геолого-тектонски сведения за Балканския полуостров

Балканският полуостров е регион с изразена тектонска активност и поради това тази част от континентална Европа е най-активната в сеизмично отношение. България се намира в централната част на Балканския полуостров. Районът е изцяло разположен в Алпийския орогенен пояс, който възниква на мястото на Тетиската област в пространството между литосферните плочи на Източноевропейската и Африкано-Арабската платформа. Той се характеризира с изключително сложен съвременен геоложки строеж. Като резултат от геоложкото развитие на Балканския полуостров са се формирали два основни структурнотектонски клона – северен и южен с подчертана надлъжна зоналност. Северният клон включва Карпатите и Балканидите. Балканидите се разделят на Предбалканска, Старопланинска и Средногорска зона. Източните Карпати, Южните Карпати и Старопланинската зона, формират дъга, която ограничава от запад и от юг Мизийската платформа, изтеглена на изток до Черноморската падина. (Дачев, 1988)

Южният клон на Алпийския орогенен пояс е изграден от Динаридите, Хеленидите и Тавридите, които продължават на запад през Южните Алпи, Апенините и Калабрийско-Сицилианската дъга в Северна Африка, а на изток - в нагънатата система Загрос. На територията на Южна България и Северна Гърция се отделя древният Родопски масив. Между консолидираните Родопска и Мизийска плоча са притиснати алпийските структури на Балканидите.

При формирането на съвременните геоложки структури на Балканския полуостров важна роля са играли надлъжните дълбочинни разломи, по-голямата част от които имат доалпийска възраст и многократно са се активизирали на места с повишено проявление на магматизъм. Имат значение също и напречните тектонски нарушения. Разломните структури на територията на България по своята ориентация се групират в няколко системи. Силно доминират една надлъжна – Балканидна, и две диагонални (Струмска и Твърдишка). (Добрев и др., 1989)

Изложението по-надолу в дисертацията следва обзора на Дачев за сеизмотектониката на Балканския полуостров (Dachev et al., 1995).

# 1.2. Изследвания на структурата на земната кора в България и прилежащите територии.

Трябва да се отбележи че, основен принос в изследването на земната кора имат работите по сеизмичните профили получени от дълбочинното сеизмично сондиране, пресичащи България (Сологуб, 1980, Дачев, 1988) и Балканския полуостров. Тези резултатите дават основна представа за особеностите на границата на Мохоровичич и дебелината на седиментния слой за този регион. През 80-те години са проведени сеизмопроучвателни работи на територията на страната по два профила: Петрич – Никопол и Сливен – Силистра (Якимов, 1991). Резултатите от тези изследвания дават детайлна информация за строежа на земната кора в районите, през които минават профилите.

По-новите изследвания, основаващи се главно на различни методи, анализиращи разпространението на сеизмичните вълни от земетресения, допълват представите за структурата на земната кора на територията на България.

Ботев и др. (1996) използват времена на пристигане на Р-вълни от локални земетресения и взривове в кариери, регистрирани от НЦСМ. Те прилагат едновременното преопределяне на хипоцентрите на земетресенията и тримерния скоростен модел на средата и получават информация за скоростните нееднородности в кората и горните части на мантията на територията на страната.

Рараzachos (1998) изследва Р- и S-скоростната структура на земната кора на територията на Северна Гърция, в района на Сърбо-Македонския и Родопския масив. Той използва нелинейна инверсия на времената на пробег на надлъжните обемни вълни от локални земетресения и получава за дълбочината на границата на Мохоровичич в изследвания регион около 34-36 km под Сърбо-Македонския и Родопския масив. Тези резултати се различават съществено от полученото в изследванията на други автори (Дачев, 1988, Raykova, 2005). Възможна причина за

тези отклонения са използваните данни от локални сеизмични събития (размерът на изследваната област е 2°х3°), от които дълбочината на проникване на лъчите, особено в граничните части на изследвания район е малка и не могат да достигнат до границата на Мохоровичич. Затова смятаме, че получените резултати от Дачев и Райкова за дебелината на земната кора в Родопския масив са достоверни.

Raykova (2005) използва повърхностни вълни за изследване строежа на земната кора и горната мантия на територията на Балканския полуостров и част от Италия. Прилага честотно-времеви анализ и получава над 300 дисперсионни криви на груповата скорост на Рейли и Лъв вълните и двумерна томография за намирането на разпределението на груповите скорости на повърхностните вълни и след това са построени локални дисперсионни криви за области с размери 1°х1° в Югоизточна Европа. Въз основа на инверсията на получените дисперсионни криви е получена скоростната структура на земната кора и горната мантия в изследвания регион. Като цяло за територията на стараната дебелината на земната кора е определена на 38-40 km. Получените резултати покриват територията на България и дават добра основна представа за дълбочината на границата на Мохо и скоростите на Vs вълните.

През 2009 Grad et al. комбинират резултати по над 250 профила от различни локални и регионални изследвания на земната кора в Европа, 3D модели, получени по обемни и повърхностни вълни, функции на приемане и други геофизични изследвания. Те изготвят карта на дълбочината на границата на Мохоровичич за цяла Европа. По-късно е направена втора карта, която обединява данните от всички изследвания в Европа използващи функциите на приемане (Grad et al. 2012). За района на България дебелината на земната кора варира между 30 и 50 km. Наблюдава зона с дебелина на земната кора около 45-50 km в югозападната част на страната и друга с дебелина около 40 km в югоизточната. Картата получена чрез функциите на приемане (Grad et al. 2012) има по-слабо покритие с данни и за района на България се оформя частично зоната с по-дебела кора в югозападна България.

Получените от Grad et al. (2009, 2012) карти са опит да се обобщят всички локални и регионални изследвания на структурата на земната кора в Европа. Част от районите са добре изследвани, докато резултатите за други райони са получени чрез

интерполация. Така някои локални особености в структурата на земната кора не се отчитат.

Воуkova (1999) прави изследване подобно на Grad et al. (2009). Тя обединява данните за дълбочината на границата на Мохоровичич в 144 точки на територията на страната. Прилагайки Кригинг и вариограмен анализ, тя построява карта на дълбочината за България.

От направения литературен обзор се вижда, че има сравнително неголям брой публикации за строежа на земната кора на Балканския полуостров, като някои от резултатите в публикациите са противоречиви. Също така няма достатъчно детайлно изследване за земната кора в България, затова провеждането на настоящето научно изследване е важно и актуално за доизясняването на строежа на кората. Съществуващата сеизмологична мрежа в България и натрупаните данни в периода на работата й, позволяват провеждането на такова научно изследване.

### 1.3. Цели на дисертацията

Структурата и особено дебелината на земната кора в България са обект на изследване от не малък брой автори. Работите до края на 2005 година обаче са въз основа на аналогови данни или се използват цифрови данни основно от станции извън територията на страната. В края на 2005 година заработи модернизираната мрежа от сеизмични станции и сеизмичната информация и в България започна да се регистрира в цифров вид. Това позволи да се приложат съвременни методи, като метода на функциите на приемане, за изследване на структурата на Земята и в частност земната кора и горната мантия като се използват данни записани от станциите в България.

Основна цел на настоящата работа е изследването на строежа на земната кора и мантията на територията на България и прилежащите земи въз основа на данните от съвременните цифрови широколентови сеизмични станции в България и чрез прилагането на модерни методи за обработка и анализ на сеизмичните вълни. За всяка станция от мрежата се предполага чрез метода на функциите на приемане да се получи скоростен модел на кората около района на станцията и да се определи

дълбочината на основните граници на мантията за България. Друга съществена цел на настоящата работа е създаването на база от унифицирана сеизмологична информация, която може да бъде използвана в бъдещи локални, регионални или глобални изследвания, използващи приложената в настоящата работа методика.

• създаване на dataless файлове за станциите от Националната Цифрова Сеизмична Мрежа (НЦСМ);

• създаване на база данни, съдържаща информация за използваните в изследването земетресения и свързаните с тях унифицирани широколентови записи на сеизмични станции от НЦСМ в mSEED формат;

 избор на подходящ метод за изследване на структурата на земната кора и горната мантия на територията на България. Адаптирането на метода за данните от НЦСМ на България;

• изследване на структурата на земната кора и горната мантия по цифрови данни записани от НЦСМ; определяне на годността и качеството на данните във формат mSEED от цифрова сеизмична мрежа за различни сеизмологични изследвания;

• подбор на подходящи данни за настоящото изследване и подготовка на данните за обработка с програмата SH (Seismic Handler) и скриптовете за пресмятане на функциите на приемане;

• пресмятане на функциите на приемане за всички станции от НЦСМ оборудвани с широколентови сензори и получаване на времеви профили за района на всяка станция;

• определяне дебелината на земната кора и на скоростните модели за различни азимутни диапазони около сеизмичните станции на НЦСМ;

• идентифициране на основните граници в зоната на преход в мантията под територията на България и прилежащите територии.

Работата се състои от шест глави и отделен том с приложения. В настоящата, **първа** глава е направен кратък преглед на геофизичните и сеизмологични изследвания на структурата на Балканския полуостров. От направеният обзор се вижда актуалността на изследването, представено в тази работа. Във **втора** глава е разгледано състоянието на НЦСМ и е описана методиката за подбор на входни данни. В **третата** глава са разгледани теоретичните основи на метода и са дадени подробно получените резултати за всяка станция от НЦСМ. В **четвърта** глава е направен литературен обзор на изследванията на мантията под Балканския полуостров, разгледани са допълнителните техники, които се прилагат за мантията и са представени резултатите за строежа на зоната на преход в мантията за България и околните земи. В **пета** глава са представени приносите на дисертационния труд, авторските публикации и доклади, както и използваната литература.

По дисертационния труд са направени **девет публикации**, една от които в списание с импакт фактор. Материали по дисертацията са приети за доклад на **седем** научни мероприятия.

# ГЛАВА 2 Национална Цифрова Сеизмологична мрежа и използвани данни

### 2.1. Национална Цифрова Сеизмологична Мрежа

Националната Оперативна Телеметрична Система за Сеизмологична Информация (НОТССИ) съществува от 1980 г. С нейното изграждане започва нов важен етап в развитието на сеизмологичните наблюдения в България. Основното й предназначение бе да осигури бърза локализация на сеизмичните събития на територията на България и прилежащите земи. Тази мрежа също така позволи да се проведат редица научни изследвания на строежа на земната кора и горната мантия (Botev et al. 1988, Botev&Spasov 1989, Ботев и др. 1996, Raykova 2005, Raykova&Nikolova 2007).

През 2005 г проект "Модернизация на Националната Оперативна Телеметрична Система за Сеизмична Информация", финансиран с решение СБ-

3/04.05.2005 г. на ПКЗНБАК позволи цялостна подмяна на регистриращото оборудване. Към 2010 г (когато е приключен подбора на данните за дисертацията) Национална Цифрова Сеизмична Мрежа (НЦСМ) се състои от 15 станции (фиг. 2.1.): Малопещене (MPE), Павликени (PVL), Стражица (STZ), Провадия (PRD), Преселенци (PSN), Панагюрище (PGB), Пловдив (PLD), Ямбол (JMB), Димитровград (DIM), Кърджали (KDZ), Рожен (RZN), Мусомище (MMB), Крупник (KKB), Витоша (VTS) и ГФИ (SOF). Освен НЦСМ работи и една локална сеизмична мрежа – ЛСМ "Провадия", в района на гр. Провадия за мониторинг на сеизмичността в района на солното находище.

Данните от повечето станции се записват и архивират във формат на фирма Refraction Technology Inc. Благодарение на SeedLink/SeisComP сеизмичната информация се архивира и във формат mSEED, който е стандартен за обмен на сеизмични данни. Третият формат, в който се записват сеизмични данни в HCЦ е CSS.



Фиг. 2.1. Карта на НЦСМ. С черни триъгълници са означени станциите с широколентови сензори, данните от които са използвани за изследване на структурата на земната кора и горната мантия; с черни звездички са означени

станциите, чийто данни не са използвани, като станция DIM е оборудвана с късопериоден сензор, а станциите PRD и PSN – с широколентови; черните точки показват местоположението на станциите от ЛСМ "Провадия".

### 2.2. Формати за сеизмични данни, използвани в НСЦ.

### 2.2.1. Формат RefTech

Основният формат, в който се записват данните в НЦСМ е така наречения RefTech формат. В действителност това е форматът PASSCAL (Program for Array Seismic Studies of the Continental Lithosphere), който е разработен за съхранението на сеизмична информация записана от инструментите от програмата за изследване на континенталната литосфера, с помощта на сеизмични групи. Програмата стартира през 1984. Най-общо при форматът PASSCAL всеки запис е самостоятелен по отношение на началният отчет, честотата на цифроване, и формата на данните.

### 2.2.2 Формат SEED

През 1985 г Международната асоциация за сеизмология и физика на вътрешността на Земята (IASPEI) сформира група, чиято цел е да предложи единен стандарт за обмен на сеизмични данни. През 1987 г за такъв формат е приет SEED (Standard for the Exchange of Earthquake Data).

Предимствата на SEED формата са:

- цялата необходима информация, включително и информацията за отчетените амплитуди се съдържа само в един файл;

- информацията за земните движения се компресира по специален начин, така че големината на получените файлове с данни е много малка;

SEED формата се използва в две форми — цели файлове, в които се съдържа подробна информация за станцията и записващата апаратура, и файлове само с данни (miniSEED или mSEED). Отделно информацията за всяка станция се съхранява в така наречените dataless (без данни) файлове.

За целите на дисертацията, а именно правилното отчитане на влиянието на регистриращата апаратура върху вълновите форми, през 2006 г бяха разработени

dataless SEED за всички станции на НЦСМ според въведените стандарти. Освен това беше разработен алгоритъм за създаването и публикуването онлайн на SEED файлове за дадено сеизмично събитие. Това направи възможен обмена и на цели SEED файлове на НЦСМ.

#### 2.2.3. Формат CSS

Третият формат, в който се записват данните в НЦСМ е CSS (Center for Seismic Studies). Данните се съхраняват в две категории – вълнови форми и параметрични данни. Параметричната информация е организирана в свързани таблици и е ASCII форматирана. Това я прави лесна за четене и допълване за разлика от SEED формата. Вълновите форми са организирани в отделни файлове. Този формат се използва за съхранение на данни от Международната Мониторингова мрежа за наблюдение на ядрени опити.

### 2.3. Използвани данни

В дисертацията са използвани данни от станциите оборудвани с широколентови сеизмометри, а именно VTS, KKB, MMB, RZN, PLD, KDZ, JMB, PGB, MPE, PVL, SZH, PRD и PSN (фиг. 2.1.). Използвани са файлове само във формат mSEED.

За прилагането на метода на телесеизмичните функции на приемане се препоръчва да се разглеждат сеизмични събития с епицентрални разстояния в диапазона 30° – 95° и магнитуд 5 – 7 (Langston, 1977, Vinnik, 1977). Желателно е да се избират само събития, които имат високо ниво сигнал/шум, както и да се подберат така, че да се получи колкото се може по-пълно азимутно покритие с данни около сеизмичната станция.

От каталога на Европейския средиземноморски сеизмичен център са определени всички събития, които отговарят на тези условия за станциите и са реализирани след декември 2005 г. За да се подберат подходящи сеизмични събития са прегледани всички налични записи на земетресения, отговарящи на тези критерии след пускането на съответната цифрова станция (за повечето станции декември 2005)

до юли 2010. Така за всяка станция първоначално бяха подбрани около 500 – 600 събития. При повторния преглед на избраните събития бяха изключени всички афтършоци и събитията в споменатия азимутен интервал с ниско ниво сигнал/шум. За всяка станция останаха около 300 – 400 събития, за които бяха пресметнати функциите на приемане.





При последния подбор на събития от пресметнатите и стиковани функции на приемане са премахнати сеизмичните събития, които са видимо шумни или има грешка при пресмятането им (фиг. 2.2.). След тази операция за всяка станция остават около 200 събития, които осигуряват сравнително добро азимутно покритие около всяка станция.

### Глава З Изследване строежа на земната кора в България

### 3.1. Метод на функциите на приемане (receiver functions)

В днешно време са известни различни техники за изследване на структури под повърхността на Земята. Развитието на записващата апаратура позволява отделянето на все повече характерни особености в записите на сеизмичните вълни и позволява тяхната интерпретация. Цялата тази информация може да се използва за изследването на структурата на Земята. Повечето техники, като сеизмичната томография например, изискват сравнително голяма мрежа от сеизмични станции. Методът, който използва функциите на приемане е изключение. При него необходимата мрежа от сеизмични станции се заменя с мрежа от сеизмични събития. Така само една станция е достатъчна, за да се изследва структурата под земната повърхност.

### 3.1.1. История на метода

За първи път методът на функциите на приемане се появява през 50-те години на миналия век в Съветския съюз. През 1964 Phinney използва метода отново с името "корова функция на пренос". По-късно през 1977 Langston и Vinnik независимо един от друг развиват метода във вида, който се използва и до днес. Те се смятат за основоположници на метода. По-късно той е доразвит от Kosarev, Ammon, Zandt, Kind, Owens и др. (Kind, 1978, Owens et al. 1984, Kosarev et al. 1987, Zandt&Ammon, 1995). Към метода са добавени различни корекции, които се прилагат върху данните в сеизмопроучването, като например корекцията за време (Gurrola et al. 1994, Yuan et al. 1997), както и различни техники за миграция на данните (например Sheehan et al., 2000).

По-надолу са описани метода, както и различните корекции, които се правят с данните при изчисляването на функциите на приемане. Стъпките са описани по реда и по начина, по който са приложени към данните в настоящата дисертация.

#### 3.1.2. Същност на метода на функциите на приемане

Терминът функция на приемане е въведен за радиалната компонента на сеизмограмата, деконволюирана с вертикалната. Основно положение в метода е, че няколко процента от енергията на падащата Р вълна при телесеизмични събития се превръща в S вълна (Ps), ако имаме сравнително рязка граница в земната кора или горната мантия. Тази конвертирана фаза пристига в сеизмичната станция в кодата на Р вълната. Времето на пристигане, амплитудата и полярността й зависят от разпределението на скоростите на S вълните под сеизмичната станция. Следователно, ако се определи времето на пристигане на Ps фазата след основната P фаза и се използва начален скоростен модел, то може да се определи дълбочината на границата, която е

генерирала тази фаза. Докато времето на пристигане на конвертираната Ps фаза зависи от дълбочината на границата, то нейната амплитуда зависи от разликата в скоростите на сеизмичните вълни от двете страни на границата. Освен главната конвертирана фаза, се регистрират и многократно отразени фази от земната повърхност и от съответната граница (фиг. 3.1.).



Фиг. 3.1. Разглеждаме слой с дебелина 30 km върху полупространство: а) показва пристигащи в сеизмичната станция вълни – преминала Рр вълна, конвертирана Ps, и техните многократни отражения от земната повърхност и скоростната граница; на б) е показан записа в сеизмичната станция – основната Р вълна, следвана от конвертираната фаза и многократните им отражения.

#### 3.1.3. Ротация на координатната система на запис

Първата стъпка към пресмятането на функциите на приемане е да се направи ротация на трите компоненти на сеизмограмата. За целта се избира нова координатна система по следния начин (фиг. 3.2.): оста L е насочена по посока на падащата Р вълна; оста Q е перпендикулярна на L и сочи в посока, обратна на местоположението на източника; T е перпендикулярна на равнината LQ и успоредна на земната повърхност. Получената LQT или P-SV-SH (както още е известна) координатна система е дясно въртяща. При тази координата система енергията на P вълната е основно на L компонентата, докато на Q и T компонентите доминира енергията на конвертираните S вълни (фиг. 3.3.). За хоризонтално хомогенна среда на T компонентата не се наблюдава енергия. При наблюдения на реални сеизмични записи това често не е така. Langston (1977) показва, че наличието на енергия на T компонентата е индикация за разломна и/или анизотропна структура или съответната граница е с наклон повече от 10° (Langston, 1977, Eckhard&Rabbel, 2011).

Изборът на LQT координатна система зависи от ъгъла на падане и от обратния азимут. Ротацията често се прави като се пресметнат теоретичния обратен азимут – като са известни координатите на станцията и хипоцентъра на земетресението, и теоретичния ъгъл на падане в зависимост от епицентралното разстояние. Те мога също така да бъдат измерени, ако отношението сигнал/шум е достатъчно високо.



Фиг. 3.3. 90 s от началото на сеизмично събитие записано на станция MPE, след завъртането на сеизмограмата.

### 3.1.5. Деконволюция

Можем да разгледаме сеизмограмата като получена чрез конволюция на различни функции сигнала от източника, функция, която описва реакцията на

сеизмичните вълни при преминаването им от източника до станцията към различни структури в Земята и отговора на регистриращата апаратура към пристигащите сеизмични вълни.

За да се пресметнат функциите на приемане на структурата под сеизмичната станция, трябва да се направи деконволюция на съответната компонента - SV или SH, с P компонентата.

На фиг. 3.4. е представен резултата след деконволюция за едно земетретресение, регистрирано на станция MPE.



Фиг. 3.4. Данни от станция МРЕ след деконволюция. Енергията на Р вълната е отделена на L компонентата, докато нейната кода е на T и Q. Q компонентата е търсената функция на приемане и при хомогенна среда цялата енергия на кодата на Р вълната е отделена на нея. В този случай на T компонентата не би трябвало да се наблюдава енергия.

#### 3.1.6. Стиковане на сеизмограмите и корекция за времето

Ако се разгледа единична функция на приемане (фиг. 3.4.), то е лесно да се забележи, че е трудно да се отдели ясно изразена фаза, както Р фазата например. Причината за това е, че амплитудите на конвертираните Ps вълни са сравнително малки. Още по-трудно е да се отделят фазите на многократно отразените вълни. Затова е необходимо да се разгледат всички пресметнати функции на приемане за една станция заедно, т.е. да се стиковат. От друга страна след стиковането се забелязва, че фазите, които идват от една и съща граница, не се подреждат една под друга. Това налага да се направи допълнителна корекция за времето, подобно на обработката на данните в сеизмопроучването.

При обработката на данните за дисертацията е направена корекция, за да бъдат подредени времената на пристигане на Ps фазите спрямо времената на пристигане на Ps фазите от моделно земетресение с епицентрално разстояние 67° (което съответства на лъчев параметър 6.4 s/° за iasp91 скоростен модел).

# 3.1.7. Определяне на дебелината на земната кора и отношението на скоростите на Р и S вълните

В кодата на Р вълната се съдържат фази, носещи информация за средата под сеизмичната станция. С най-голяма амплитуда е конвертираната Ps фаза, която идва от границата на Мохоровичич. Ако измерим нейното закъснение по отношение на основната Р фаза можем да определим дълбочината на границата от следната зависимост (Zhu&Kanamori, 2000):

$$h = \frac{t_{P_{S}-P_{p}}}{\sqrt{\frac{1}{V_{S}^{2}-p^{2}}} - \sqrt{\frac{1}{V_{P}^{2}-p^{2}}}}$$
(3.1)

Дълбочината, определена по този начин зависи по-малко от скоростта на Р вълните  $V_P$  и доста по-силно от отношението  $\kappa = V_S/V_P$ . Например, ако променим  $V_P$  с 0.1 km/s то изменението в определянето на дълбочината няма да е повече от 0.5 km (фиг. 3.5.). За сметка на това, обаче, ако променим  $\kappa$  с 0.1, то изменението на дълбочината става около 4 km. За да се редуцира тази зависимост се използва информацията, която носят фазите от многократните отражения.

Ако се разглежда само една функция на приемане е много трудно да се отделят всички необходими фази. Фазите на многократните отражения са със сравнително малки амплитуди и се губят в шума. Затова тук отново трябва да се направи стиковане. Zhu и Kanamori (Zhu &Kanamori, 2000) предлагат метод за стиковане в h- $\kappa$  пространството. При този метод за всяка функция на приемане се пресмятат дълбочината на границата на Мохоровичич и отношението на скоростите на Р и S вълните. Получените стойности се разглеждат в h- $\kappa$  пространство. Там

където функцията *S*(*h*,*к*)

$$S(h,\kappa) = w_1 Q(t_1) + w_2 Q(t_2) - w_3 Q(t_3)$$
(3.2)

има максимум се намират и истинските стойности за h и  $\kappa$ . Функцията има максимум, когато всичките фази са групирани кохерентно. Q(t) е съответната функция на приемане;  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  са времената на пристигане на конвертираната фаза Ps и на мултиплетите PpPs и PpSs+PsPs след P фазата;  $w_1$ ,  $w_2$  и  $w_3$  са тегловни коефициенти, които се избират така че сумата им да е винаги 1 и  $w_1 > w_2 + w_3$ .



Фиг. 3.5. Графично представяне на решенията за h и к при различни средни скорости: а) V<sub>Pcp</sub>=6,0 km/s; б) V<sub>Pcp</sub>=7,0 km/s. С кръг са означени най-вероятните стойности.

Методът дава най-добри резултати, когато фазите на многократните отражения се виждат ясно и времената им на пристигане след Р фазата могат да се определят добре. Когато има сложна структура под сеизмичната станция или се наблюдава енергия на Т компонентата този метод не трябва да се използва самостоятелно.

3.1.8. Зависимост на функциите на приемане от азимута, наклона на границите и наличието на анизотропия

Повечето по-стари изследвания, които се основават на метода на функциите на приемане, са правени със сравнително малък брой сеизмични събития. Когато в изследването се включат голям брой земетресения както е в настоящата дисертация и се постигне сравнително добро покритие с данни в целия азимутен диапазон около станцията, значение има наличието на различни геоложки структури, което се отразява върху формата на получените границите. Това прави въпроса за азимутната зависимост на функциите на приемане много актуален.

Картината се усложнява допълнително, ако близо до сеизмичната станция имаме анизотропен слой (фиг. 3.6.).





През 1977 г Langston показва, че наклон на границите и по-специално границата на Мохоровичич, близо до сеизмичната станция до 10° не оказва съществено влияние върху разпределението на енергията на Р вълната на радиалната и тангенциалната компоненти. Когато границата е с по-голям наклон на тангенциалната компонента ясно се вижда наличието на Р фаза. Това означава, че много често в изследването по метода на функциите на приемане трябва да се включва и Т компонентата. Информацията от Т и Q компонентите трябва да се разглежда заедно, за да може да се отделят азимутни диапазони, където имаме наличието на по-сложни структури.

Източниците на анизотропията по отношение на скоростта на сеизмичните вълни могат да бъдат различни. От една страна важна причина е анизотропията на минералите. От друга страна дори съставена от изотропни минерали, в дадена част от земната кора може да се образува структура, в която има посока, където скоростта на сеизмичните вълни да се различава от останалите направления.

В настоящата дисертация разглеждането на възможната анизотропия на структурите под станциите е направено до ниво предполагаемо наличие анизотропни слоеве в кората от качественото разглеждане на получените резултати, получаването на количествени параметри на анизотропните слоеве излиза извън задачите поставени в дисертацията. Подобно изследване изисква прилагането на други методи на инверсия, но събраните данни са достатъчни за провеждането му в бъдеще.

### 3.1.9. Инверсия

Проблемът с инверсията на функциите на приемане е засегнат от различни автори (Ammon et al., 1990, Kind et al., 1995, Vinnik 2004) основно за структурата на земната кора.

Инверсията се основава на регуляризационния метод на Тихонов (Kind et al., 1995) използван за решаването на лошо обусловени обратни задачи. Предполага се, че земната кора е съставена от хоризонтално лежащи хомогенни слоеве върху хомогенно полупространство. Моделът зависи от скоростта на Р и S вълните ( $V_P$  и  $V_S$ ), от плътността  $\rho$  и дебелината във всеки слой.

Оптималните параметри на модела се намират чрез минимизация на изглаждащия функционал *F*(*m*,*c*). Двойните скоби означават средно квадратично отклонение:

$$F(m,c) = Q_{obs}(t) - Q_{syn}(t,m,c) + \alpha q(d) ||m - m_0||$$
(3.26)

където  $m_0$  са параметрите на началния скоростен модел, q(d) са тегловни функции и  $\alpha$  е параметър на подтискане (damped factor). Параметърът  $\alpha$  се променя по време на процедурата за инверсия като  $\alpha p+i=\alpha p\Delta \alpha$ , където  $\alpha p$  е стойността на  $\alpha$  в предишната итерация, а  $\Delta \alpha$  е по-малко от 1.0. Обикновено използваме q(d)=1,  $\alpha=100$  и  $\Delta \alpha=0.3$ . Ако

тази процедура не е успешна или получените параметрите при минимизацията са нереалистични, се изменят параметрите, началния модел или се използва подход на пробите и грешките. Оценката на минимизацията се дава в същите единици като данните, т.е. процент от съвпадението с изходния вълнови сигнал на на сеизмограмата, т.е. за всеки получен от инверсията скоростен модел се изчислява синтетична сеизмограма и се сравнява с регистрираната.

В резултат на инверсията се определя скоростния модел по напречни вълни  $V_S$  и от него се получават в резултат на зададени съотношения на  $V_P/V_S$  и формула за плътността  $V_P$  и плътностите в модела.

## 3.2. Резултати от прилагането на метода на функциите на приемане за станциите от Националната Цифрова Сеизмологична мрежа в България.

След подбора на данните за всяка станция и адаптирането на програмите за тяхната обработка по метода на функциите на приемане бяха построени времевите профили за всяка станция и всяка от компонентите Q и T. След идентифициране на отраженията от границите в земната кора беше извършено определяне на дълбочината на границата на Мохоровичич по два начина – по метода на Zhu и Kanamori (Zhu&Kanamori, 2000) и чрез инверсия на вълните в първите 50 s на стикованите сеизмограми. Резултатите са представени по-долу за всяка отделна станция.

Времевите профили за отделните станции могат да бъдат разделени в няколко групи в зависимост от географското им местоположение. В Северна България върху Мизийската платформа са разположени станциите MPE, PVL и SZH. Тракийска низина, където са станциите JMB и PLD, Балканиди - станция PGB и в Рило-Родопския масив се намират станциите KDZ, RZN, MMB, KKB и VTS (Таблица 3.1). Станция VTS е прибавена към тази група, защото някои автори смятат, че Витоша е част от Рило-Родопския масив. Освен това времевия профил за VTS не прилича на профилите на станциите от Северна България. Останалите две станции, екипирани с широколентови сеизмографи – PRD и PSN, са разгледани заедно. Поради близостта

им с Черно море и влиянието на морските микросеизми двете станции имат сходни времеви профили, които се различават от профилите на останалите станции от Дунавската равнина.

В основния текст на дисертацията резултатите за станциите са разгледани отделно в следната последователност JMB, PLD, MPE, PVL, SZH, KDZ, RZN, MMB, KKB, VTS, PGB, PRD и PSN. Резултатите са структурирани по следния начин:

Първо е разгледано азимутното покритие с данни, представена е карта с епицентрите на използваните земетресения. За станциите от НЦСМ е получено добро покритие с данни (пример е даден за станция JMB на фиг. 3.7.), като основно липсват данни в малък азимутен интервал около азимут 180°. Причината за това е географското разпределение на епицентрите на земетресенията. На юг от България има сравнително малко земетресения, които влизат в условията за прилагане на метода.



Фиг. 3.7. Карта с епицентрите на използваните при пресмятането на функциите на приемане земетресения, регистрирани в станция ЈМВ. Получено е сравнително добро азимутно покритие с данни.

CMD 2013 Aug 20 16:51:03 ~Event epicenters for Station JMB~

Функциите на приемане за всяка станция са пресметнати по два начина – с теоретично пресметнати обратен азимут и ъгъл на падане (по-надолу за краткост ще бъдат наричани "теоретични" функции на приемане) и с измерени от данните такива (по-надолу ще бъдат наричани "наблюдавани" функции на приемане). Направено е сравнение между теоретичните и наблюдаваните функции, като е описана разликата между двете. При всички станции от НЦСМ, с изключение на PLD, разлика не е установена. Затова в пресмятанията са използвани само теоретичните функции, като при станция Пловдив – наблюдаваните.

След това е разгледана графиката със стиковани и подредени по азимут от 0о до 3600 функции на приемане – Q компонента. Анализирани са T компонентите и графиките със сортираните спрямо лъчеви параметър функции, за да се определят времената на пристигане на многократните отражения. Дълбочината на границата на Мохоровичич е определена по метода на Зу и Канамори и чрез инверсия. Затова първо са определени тегловните коефициенти въз основа на амплитудите на многократните отражения. След това са определени интервали с вероятност 95%, където се намират стойностите за дълбочината и отношението на скоростите на сеизмичните вълни. Накрая е направена инверсия и са анализирани получените скоростни модели. По-надолу станциите ще бъдат групирани и резултатите обобщени.

### 3.2.1. Сеизмични станции PLD и JMB

Станция JMB и PLD се намират в Горнотракийската низина. Времевият профил, получен чрез стиковане на функциите на приемане за станция JMB, има найпроста структура (фиг. 3.8.) в сравнение с профилите, получени за другите станции от НЦСМ. От друга страна при станция PLD се наблюдава разлика между теоретичните и наблюдаваните функции на приемане (фиг. 3.9. и фиг. 3.10.). Разликата между двете функции се наблюдава близо до време 0. Вероятно допълнителната фаза, която се наблюдава при теоретичните функции е част от енергията на Р вълната. Това означава, че използвания начален скоростен модел не е подходящ за азимутния



диапазон около станцията, където се наблюдава тази допълнителна фаза.

Фиг. 3.8. Времеви профил за станция Ямбол, получен при стиковане на функциите на приемане, подредени по азимут 0°-360°. Функциите на приемане са пресметнати с теоретично определени обратен азимут и ъгъл на падане.



Строежът на земната кора под сеизмична станция JMB е сравнително хомогенен и хоризонтално слоест – границата на Мохоровичич е добре определена в целия азимутен диапазон около станцията, за който имаме данни (фиг. 3.7.); няма индикации за наличие на дебел седиментен слой, както и за голяма зависимост на пресметнатите функции на приемане от азимута. Поради тази причина метода на Зу и Канамори може успешно да се приложи към данните за станция JMB, като се очаква да се получи сравнително малка и добре определена област на решение. При станция PLD в азимутния интервал 50°-90° конвертираната от Мохо фаза се наблюдава двойно. В този азимутен диапазон покрай станцията минава Маришкия разлом. Наблюдаваната двойна фаза може да се обясни с пресичането му от сеизмичните



лъчи. В този диапазон методът на Зу и Канамори не е приложен.

Фиг. 3.10. Времеви профил за станция PLD, получен при стиковане на функциите на приемане, подредени по азимут 0°-360°. Функциите на приемане са пресметнати с обратен азимут и ъгъл на падане, пресметнати от данните. Дълбочината на границата на Мохотровичич за станциите JMB и PLD е определена с вероятност 95 % 29 – 32 km (JMB, фиг. 3.11.) и 32-36 km (PLD). За отношението  $V_P/V_S$  интервала е по-голям и с 95 % вероятност стойността му е между 1,77 и 1,88 за JMB и в интервала 1,7-1,8 за станция PLD.



Best value Vp/Vs=1.820,Depth=30.5

Началните параметри за инверсията за *ъгъл на падане* – 16°-18°, задържане (slowness) – използвани са стойности в диапазона 6,0 – 6,4 s/°, начален скоростен модел – като начален скоростен модел е използван моделът пресметнат от Райкова (Raykova, 2005) за първите около 200 km, а след това са зададени основните слоеве от iasp91 модела до дълбочина 800 km; *входни данни* - използван е 50 s запис – 5 s преди Р вълната и 45 s след това.

От получените в резултат на инверсията скоростни модели (фиг. 3.12.) се вижда, че в района на станция JMB дълбочината на границата на Мохоровичич е 31 km. При станция PLD инверсията е направена в три азимутни интервала, като получените стойности за дълбочината са между 33 и 35 km (фиг. 3.13.).



Фиг. 3.13. Скоростни модели за станция PLD, получени от инверсия на данните в интервала 0°-44° (а), 190°-240° (б) и в интервала 240°-360° (в).

### 3.2.2. Сеизмични станции MPE, PVL, SZH

Трите станции са разположени в северна България. Характерно за техните

функции на приемане е наличието на ясно изразена фаза около 1 s след P фазата (фиг. 3.14.а,б,в). Тази фаза показва наличието на дебел седиментен слой в района на трите станции. При станция MPE тази фаза има прекъсване. Прекъсване се наблюдава и при конвертираната от Moxo фаза. Подобно прекъсване се наблюдава и при другите две станции SZH и PVL. При станция Павликени дори тази фаза има по-малка амплитуда от фазата в кората. Прекъсването при станция SZH би могло да се обясни с разлом, минаващ близо до сеизмичната станция. Като цяло, при трите станции, сложните функции на приемане, които показват силна азимутна зависимост, са индикация за наличие на анизотропни слоеве. Това се потвърждава и от фазите, които се наблюдават на T компонентата.

Резултатите за дълбочината на границата на Мохоровичич, получена по метода на Зу и Канамори с 95 % вероятност са в интервала 29-31 km за станция MPE, 31-33 km при станция PVL и 32-34 km за станция SZH. Интервалите за отношенията на скоростите на сеизмичните вълни са съответно: 1,81 – 1,92 при станция MPE, при станция PVL е 1,74-1,81 и 1,79-1,87 при станция SZH.



Фиг. 3.14. Стиковани и подредени по азимут от 0° до 360° функции на приемане за станции а) MPE, б) PVL и в) SZH, получени чрез теоретично определени ъгъл на падане и обратен азимут.

Инверсията е направена в различни азимутни интервали около сеизмичните станции. При станция MPE инверсията е изключително неустойчива и за да се получи скоростен модел за тази станция, трябва да се зададе начален модел, включващ анизотропни слоеве и да се пресметнат синтетичните функции на приемане. При станция PVL инверсията е стабилна само в интервала 260°-300°, където за дебелината на земната кора се получава около 32 km. При станция SZH са избрани три интервала, в които да се направи инверсия. Получената дебелина и в трите интервала е 34 km.

### 3.2.3. Станции KDZ и RZN

Двете станции се намират съответно в Източните и Централните Родопи. Границата на Мохоровичич има по-голяма дълбочина в посока от изток на запад в тази част от България. Тя е най-плитка при станция KDZ и най-дълбока в района на станция MMB.

При станциите KDZ и RZN границата на Мохоровичич е добре определена в целия азимутен диапазон и не се наблюдават особености в кората, както при станциите от Северна България (фиг. 3.15.).



Фиг. 3.15.а, 6 Стиковани и подредени по азимут от 0° до 360° функции на приемане за станция а) KDZ и б) RZN, получени чрез теоретично определени ъгъл на

### падане и обратен азимут.

Дълбочината, определена по метода на Зу и Канамори за станция KDZ е в интервала 29-32 km, а отношението на скоростите на сеизмичните вълни в интервала – 1,74-1,87. При станция RZN дълбочината на границата на Мохоровичич е определена на 35-37 km, а отношението на скоростите в интервала 1,74-1,84. Инверсията е направена в четири азимутни интервала около станция KDZ и в пет около станция RZN. За дълбочината при станция Кърджали се получава т 29-30 km, дебелина. Интересен резултат от инверсията тук е наличието на нискоскоростен слой, вероятно седименти, в някои азимутни диапазони. Този слой е с дебелина до 1,5 km. При станция RZN дълбочината от инверсията е определена на 34-35 km. При тази станция на дълбочина 42-45 km скоростта на сеизмичните вълни намалява и около 50 km отново се увеличава. Този ниско скоростен слой е получен и от Raykova (2005). Съществуването му може да се обясни с дълбочинното навличане на Западните Родопи върху Източните.

### 3.2.4. Станции MMB, KKB, VTS и PGB

Сеизмичните станции MMB и KKB се намират в Западни Родопи. Дебелината на земната кора под станция MMB е най-голяма за цялата територия на България. При двете станции е наблюдаван наклон на границата на Мохоровичич. Това е възможно благодарение на големия брой използвани земетресения, които осигуряват много добро азимутно покритие с данни. При станция MMB наклон на границата на Мохоровичич се наблюдава в малък интервал около станцията (фиг. 3.16.). За разлика от нея при станция KKB наклон се наблюдава в целия азимутен диапазон около станцията. Този ефект се вижда по-добре на графиката със сумираните през 100 функции (фиг. 3.17.).



Инверсията и метода на Зу и Канамори при станция ММВ и при станция ККВ не дават добри резултати (фиг. 3.33.а,б). Все пак може да се отделят някакви азимутни интервали, в които са определени вероятните минимална и максимална дълбочина на границата на Мохоровичич. Те са съответно около 40 km и около 50 km. При станция ККВ се наблюдава интервал, в които има прекъсване на границата на Мохоровичич. В този интервал се намира Крупнишкия разлом, което и обяснява този резултат. От фиг. 3.32. се вижда, че дълбочината границата на Мохоровичич се променя от юг на север, като става по-дълбока. Тук също е направен опит да се определят максималната и минималната дълбочини. Те са съответно 27-29 km и 40-42 km.



Фиг. 3.17. Стиковани и подредени по азимут от -180° до 180° функции на приемане за станция ККВ, получени чрез теоретично определени ъгъл на падане и обратен азимут. В посока север, в средата на графиката, се наблюдават множество конвертирани фази, които показват наличието на разломна структура в района. Наблюдава се и наклон на границата на Мохоровичич, като от юг на север нейната дълбочина се увеличава.

Best value Vp/Vs=1.640,Depth=41.5



Фиг. 3.18. a) Област на решения от метода на Зу и Канамори за станция ККВ; б) резулатати от инверсията за станция ККВ.

Станция VTS предлага най-добрите условия от всички сеизмични станции на НЦСМ за прилагане на метода на функциите на приемане. От друга страна пресметнатите функции имат изключително сложен характер (фиг. 3.19.). Конвертираната от Мохо фаза е представена от две отделни, ясно различими фази.

На Т компонентата (фиг. 3.20.) се виждат кохерентни положителни и отрицателни фази в целия азимутен диапазон. Това означава, че при ротацията на сеизмограмите част от енергията на Р вълната е останала на Т компонентата. Както беше вече споменато при другите станции, този ефект се наблюдава, когато има наличие на анизотропен слой или геоложка структура в дълбочина. Такава структура е Витошкия разлом, който минава в подножието на Витоша и се намира сравнително близо до сеизмичната станция. При станция VTS се наблюдава също и зависимост на функциите на приемане от азимута



За станция VTS не е правена инверсия и не е прилаган метода на Зу и Канамори за определяне на дълбочината. Не е намерен интервал, в който да има еднакви фази и да няма индикации за наличие на анизотропия или сложни геоложки структури. Беше потърсена аналогия на получените функции на приемане от други региони на Земята. Известна прилика има само с резултати получени от зони на субдукция, каквато не би трябвало да се очаква в района на станция VTS. Като понататъшни изследвания след приключване на настоящата работа се предвижда да се направи начален скоростен модел, базиран на известни до сега геоложки и геофизични данни от района. Този модел след това ще бъде използван, за да се



пресметнат синтетичните функции на приемане и те ще бъдат сравнени с реално получените.

Фиг. 3.20. Стиковани и подредени по азимут от 0° до 360° Т компоненти за станция VTS. Конвертираната от Мохо фаза за станция PGB се вижда сравнително добре в целия азимутен диапазон около станцията (фиг. 3.21.). Особеност се наблюдава в диапазона 0°-50°, където близо до Ps фазата се наблюдава още една фаза. Полярността й се променя с азимута, като в интервалите 0°-50° и 130°-290° тя е положителна, а в интервала 60°-130° е отрицателна. Това отново е индикация за наличието на анизотропия (Eckhard&Rabbel, 2011).





От метода на Зу и Канамори е определен интервала 36-38 km, в който с вероятност 95 % се намира дълбочината на границата на Мохоровичич. За отношението на скоростите на сеизмичните вълни интервала е 1,71-1,81. Инверсията е направена в два азимутни интервала, където за дълбочината се получават 36 km.

### 3.2.5. Станции PRD и PSN

Двете сеизмични станции са единствените от НЦСМ, разположени близо до Черно море. Функциите на приемане за двете станции бяха само частично пресметнати, защото показаха двойна и неясна конвертирана от Мохо фаза (фиг. 3.22.). Функциите на приемане съдържат фази с честоти от 1 s до 10-20 s. Димитрова (2009) показва, че в двете сеизмични станции се регистрират микросеизми от Черно море. Тези колебания имат максимум в честотния диапазон 4-8 s, който изцяло попада в диапазона от честоти на функциите на приемане.



Фиг. 3.37. Стиковани и подредени по азимут от 0° до 360° функции на приемане за станция PRD, получени чрез теоретично определени ъгъл на падане и обратен азимут.

Подобни ефекти от морски микросеизми не се споменават от други автори, използвали метода на функциите на приемане. Поради сложността на проблема анализа на получените резултати и пресмятането на останалите функции на приемане за сеизмичните станции PRD и PSN беше изоставен.

### Глава 4 Изследване на строежа на зоната на преход в мантията за територията на България и околните земи

# 4.1. Кратък обзор на изследванията на мантията под Балканския полуостров

Изследването на строежа на горната мантия представлява огромен интерес от гледна точка на изучаването на динамиката на Земята. Нейните характеристики определят степента на обмен на топлина и материя между горната и долната мантия. От сеизмична гледна точка тези граници са местата където има скок на скоростта на сеизмичните вълни. Въз основа на различни лабораторни изследвания (Ito&Takahashi 1989, Katsura&Ito, 1989, Wood, 1990) се предполага, че преходи между различни минерали под влияние на високото налягане са причина за съществуването на тези граници на дълбочина 410 km и 660 km. Те заграждат област от мантията, наречена зона на преход. Различни сеизмични методи могат да бъдат използвани за изследването на потоплите и по-студените участъци в земната мантия, както и други анизотропни структури в Земята. През последните години все повече се използва метода на функциите на приемане. Анализа на Р и най-вече S функциите на приемане дават много добри резултати при определянето на скоростните граници в горната мантия и зоната на преход (Vinnik et al. 2004, Sodoudi et al. 2006, Vinnik et al. 2007). Голяма част от изследванията се провеждат в зоните на субдукция и под океаните и затова те са сравнително добре изучени. За сметка на това има много малко информация за структурата на горната мантия и зоната на преход под континенталните щитове. Малък брой са изследванията също и на горната мантия за България. Те обикновено обхващат земната кора и астеносферата (Christoskov 1972, Спасов и Ботев 1987, Ботев и др. 1996, Raykova 2005), но поради използваните данни или ограниченията на методите за изследване резултати за по-дълбоките части на мантията или отсъстват, или са със слаба детайлност. Това затрудни сравняването на получените в настоящата дисертация резултати с предишни изследвания.

### 4.1.1. Изследване на структурата на мантията под Балканския полуостров

В района на Югоизточна Европа има една зона на активна субдукция, която е сравнително добре изучена. На юг от България в Егейско море Африканската плоча се подпъхва под Европейската. Някои автори успяват да я проследят в дълбочина до Северна Гърция ( Faccenna et al. 2003, Sodoudi et al. 2006). На север на територията на Румъния, в района на Вранча има зона на палеосубдукция, където част от земна кора потъва вероятно във ветикална посока (Heidbach et al. 2007). Територията на България е разположена между двете зони и липсват изследвания до по-голяма дълбочина.

Спасов и Ботев (1987) изследват анизотропията в земната кора и горната мантия на територията на България и част от съседните държави. По един от профилите получават анизотропен слой близо до повърхността. Авторите обясняват получения резултат за анизотропни слоеве в горната мантия под Родопския масив с палеосубдукция между Източната и Западната му части. Според техните резултати, тя се простира на дълбочина най-много 250 km.

Единственото изследване, което дава информация за структурата на мантията

на дълбочина по-голяма от 250 km е на Yegorova at all (1998). Те използват гравиметричен метод за определяне на плътността под Балканския полуостров, до дълбочина 670 km, която се смята за долна граница на зоната на преход в мантията. Авторите установяват повдигане на граница 410 в Централните Балкани, в Средногорието. Това повдигане достига до 350 km според техните резултати. Аналогично на повдигането на тази граница в Западна Европа, където това е индикация за активност, и тук авторите предполагат, че повдигането на границата се дължи на процеси характерни за краищата на младите платформи, каквато е Мизийската платформа.

Направеният обзор показва, че практически отсъстват данни и резултати за мантията, затова провеждането на настоящото научно изследване е актуално и важно за получаването на първоначални добре дефинирани резултати за зоната на преход в мантията. Съществуваща сеизмологична мрежа на територията на България (НЦСМ) и натрупаните за периода на работата й данни позволяват провеждането на такова изследване.

### 4.2. Петрология на мантията

През 60-те години на миналия век различни групи от учени успяват да докажат, че границите в мантията се дължат основно на фазови преходи между различните минерали, съдържащи се в нея. Най-общо се приема, че наличието на сеизмични граници на дълбочина около 410 и 660 km, се дължи на фазови преходи в мантия с преобладаващо съдържание на оливин. Студената мантия се асоциира с дебела преходна зона, докато горещата мантия предполага по-тънка зона. Аналогично повишаването на температурата на мантията води до повишаване на налягането и увеличаване на дълбочината на граници 410 и 520 и до намаляване на налягането (и съответно дълбочината) на граница 660. Следователно в областите с по-висока температура зоната на преход в мантията има по-малка дебелина.

От друга страна химическата структура също влияе на дълбочината на границите в мантията. Водата (H<sub>2</sub>O) в мантията се съдържа в огромно количество. Като има предположение, че е повече отколкото в океаните (Khan&Shankland,

2012). Наличието на вода може да доведе до определянето като по-плитка граница 410, а скоростите в този регион като по-ниски спрямо места под райони без наличето на вода.

# 4.3. Допълнителни техники, приложени към метода на функциите на приемане, за изследване на строежа на мантията

При прилагането на метода на функциите на приемане за изследването на земната кора, се разгледаше началото на записа – 45 s след P вълната. За изследване на мантията е необходимо да се вземат под внимание 80 s от записа. Използвани са същите земетресения, както в първата част, за станциите – VTS, KKB, MMB, RZN, KDZ, PLD, JMB, PGB, MPE, PVL и SZH. В изследването не са включени също и сеизмичните станции PRD и PSN (Глава 3.2.5.).

Стиковането на функциите на приемане и сортирането им по азимут при изследването на структурата на мантията не е много информативно. При по-дълбоко разположените граници, които предизвикват конвертиране на фазата, точките, където лъчите преминават през дадената граница се намират на по-голямо разстояние от сеизмичната станция (фиг. 4.1.). В този случай стикованите функции отразяват структури, които се намират на около 100 km от сеизмичната станция и позволява да се определи дали има фази конвертирани от граници 410 и 660 в записите от съответната станция.

При изследването на мантията по-добро представяне на резултатите е да се определят точките, в които сеизмичните лъчи пресичат съответната граница. Създава се карта за всяка граница и се определят зоните, където има покритие с данни. През данните се прокарва профил и се прави миграция, за да се получи дълбочинен разрез.

### 4.3.1. Миграция

Първите конвертирани фази, определени въз основа на получените функции на приемане могат да бъдат обратно проектирани по пътя на лъча върху пространствените местоположения на точките на конвертиране към техните истински местоположения. По този начин се подобрява пространствената резолюция, а

времената на пристигане и траекториите на лъчите се превръщат в дълбочини и локализират точките на конвертиране в мантията. Процесът е подобен на миграцията в сеизмопроучването (Kosarev et al., 1999). Траекторията на лъча се пресмята като се използва едномерен глобален скоростен модел. В изследването е използван iasp91. Допуска се, че областите на конвертиране са равнини. За подобряването на пространствената корелация може да се използва и филтър за пространствено изглаждане. В този случай пространството се разделя на блокове и обратно проектираните амплитуди произлизащи от близко разположени блокове се групират, за да се подобри отношението сигнал шум. След миграцията данните се представят с два цвята като разрез в дълбочина. С червено са означени областите където има положителни фази, а със синьо тези, в които има отрицателни фази.

### 4.3.2. Разделителна способност на метода

Метода на функциите на приемане използва конвертирани от P към S сеизмични вълни. За горната мантия коростта на S вълните е около 5-6 km/s. Данните са филтрирани в интервалите 2-10 s и 5-10 s. След като се заместят стойностите в  $\lambda$ =VT за точността на определянето на дълбочината на дадена граница в горната мантия се получават около 6\*5=30 km. Това означава, че отклонения от дълбочината на границата спрямо началния скоростен модел от порядъка на 10 km не би трябвало да се разглеждат като реални промени в дълбочината. Все пак по някои профили се наблюдава отместване на цялата зона с еднакви фази с около 10 km. Затова те са отразени и интерпретирани като промени в дълбочината на границата.

### 4.4. Резултати

На фиг. 4.1. са представени карти на точките, в които траекториите на сеизмичните лъчи от различните земетресения пресичат граница 410 в мантията. Вижда се, че се има области, които са покрити с повече точки. Въз основа на картата са избрани 6 профила, които пресичат територията на България в различни посоки. За всеки профил е направена миграция до дълбочина 800 km и резултатите са представени и анализирани по-надолу.



Фиг. 4.1. Карта за точките на пресичане на граница 410 km.

В основния текст на дисертацията резултатите са представени по групи профили. Тук ще бъдат обобщени.

Като цяло за територията на България може да се каже, че се наблюдават ясно основните граници в горната мантия. Това са границата астеносфера – мантия, чиято дълбочина варира в интервала 190-220 km , граница 410 и граница 660 (фиг. 4.2.). На някои от профилите се виждат фази определящи граница 410 и 660 на по-голяма (A3, B2, C2 и C3) или по-малка (A1, B1 и C2) дълбочина. Обикновено интерпретацията на подобни фази е, че има анизотропия в горната мантия. Тя се обуславя от наличието на по-топли или по-студени области в мантията, които от своя страна са индикация за наличие на конвекция. Друго обяснение за това отклонение в дълбочината на основните граници и съответно дебелината на зоната на преход в мантията, е наличието на вода в мантията. Това обикновено е характерно за зоните на субдукция. Там подпъхващата се плоча внася вода в горната мантия на по-голяма дълбочина.





Фиг. 4.2.а,б,в,г,д,ж Резултати след миграция по профили а) А1, б) А3, в) В1, г) В2, д) С2 и е) С3. Всеки профил се простира от югозапад на североизток.

Областите, в които зоната на преход е с различна от средната дебелина (Shearer et al. 2000) от 245 km, се намират в Северна България и в района около станция VTS. Ако допуснем, че за територията на България промяната в дебелината на зоната на преход в мантията, е предизвикана единствено от промяна на температурата на дадено области, то в Северна България се очертава зона с по-топла мантия. А в района на сеизмична станция VTS се получава интересен резултат. Граница 410 е с по-малка дълбочина, докато граница 660 – с по-голяма. Това отклонение от началния скоростен модел би трябвало да се интерпретира като низходящ поток от по-студена мантия. Ако се разгледа глобалната конвекция в мантията, възходящите и низходящите потоци в мантията са с огромен диаметър. В случая на станция VTS диаметъра на аномалията е не повече от 100 km. За да се даде обяснение на тези резултати е необходимо да се направят допълнителни изследвания на района като се използват и други методи. Това се налага и поради сложните резултатите за структурата на земната кора, които са получени за същия район (Глава 3.8. ).



Фиг. 4.3. Карта на плътността на топлинния поток за България (Бояджиева, Гашаров, 2001).

От фиг. 4.3.

се вижда, че в района на станция VTS се наблюдава малка област с повишен толинен поток. От друга старана в Северна България също се наблюдава по-голяма плътност на толиния поток, като областта е доста по-обширна. За другите аномалии представени на фиг. 4.11. не е открита аналогия с резултатите от изследването на границите в мантията. Обяснение за това може да е недостатъчните данни за тези части от страната. Друго обяснение може да бъде, че аномалиите в плътността на топлинния поток се дължат на източници, разположени по-близо до земната повърхност в тези обласи. За разлика от тях вероятно аномалията в Северна България се дължи на топлинен поток от по-дълбоки слоеве. За обясняването на аномалията в района на станция VTS, са необходими допълнителни изследвания, с прилагенто и на други геофизични методи.

На територията на страната се наблюдават фази, които дават индикация за наличие на граници в зоната на преход в мантията. Добре се очертава граница 330, за която някой автори съобщават, че се наблюдава най-вече под Европа и Азия. Имаме и частични индикации за наличие на граница на дълбочина около 500 km. Наблюдават се и фази, основно в краищата на някои от профилите (A4, B3 и C3 например), за които не е намерено обяснение и са необходими допълнителни проучвания. Появата на тези фази може да е заради структура в дълбочина в района на Вранча или под територията на Егейско море и Мраморно море.

### Глава 5 Заключение

Изследването в настоящата дисертация стана възможно благодарение на модернизирането на НОТССИ.

Резултатите от анализа на функциите на приемане за 13 от сеизмичните станции на НЦСМ, екипирани с широколентови сеизмометри, показаха сложна структура на земната кора с наличие на анизотропни слоеве, разломи и силна азимутна зависимост на функциите за повечето от станциите. Благодарение на големия брой използвани в изследването данни при две от станциите беше получен наклон на границата на Мохоровичич. Беше определена нейната дълбочина под единайсетте сеизмични станции. Получените резултати не противоречат на определените при предишни изследвания дълбочини. Определените интервали, в които дълбочината на границата е с вероятност 95 % допълва по-старите изследвания. Това показва, че методът на функциите на приемане е приложен успешно към данните от НЦСМ за изследване структурата и дебелината на земната кора в България.

За първи път в България е изследвана зоната на преход в мантията по сеизмични данни. Получени са основните граници, които определят зоната на преход и е установено отклонение от тяхната средна дълбочина в някои части на страната. Установени са индикации за наличието на граници в зоната на преход на дълбочина 300 и 500 км, които са характерни за горната мантия под континентите (граница 520 км) и в частност под Европа и Азия (граница 330 км). Определена е дълбочината на нискоростостния слой – астеносферата на територията на страната. Наблюдавани са също допълнителни фази в зоната на преход, които не са привързани към известна граница. Територията на страната е сравнително далече от зони на субдукция, следователно тези фази не може да се обяснят и като идващи от Мохо на подпъхващата се плоча. Тяхната природа за сега не е установена.

### ГЛАВА 6 Приноси на дисертационния труд

Представени са по-важните приноси от дисертационния труд. Всички приноси

са дадени в самата дисертация.

- За нуждите на НЦСМ са създадени dataless файлове, които допълват файловете с данни във формат mSEED. Без тях не може да се осъществи пълноценно обмена на данни с други мрежи, както и за да могат да се използват различни програми за обработка на данните, т..к те изискват информация на записващата система. Унифициран формат за тази цел е SEED формат, който се формира от dataless файловете заедно с данните в mSEED формат.
- Прегледани са голяма част от данните във формат mSEED, записани в периода от пускането на сеизмичната станцията (декември 2005 за повечето станции) до юли 2010 г. Описано е качеството на данните за всяка една станция за всеки един файл от избраните за преглед. Установен е проблем при регистрацията на данните във формат mSEED от юли 2010 г, който прави файловете с данни нечетими от различни програми за обработка на сеизмичната информация. Заради този проблем данните след това не са включени в дисертацията.
- За първи път данните от модернизираната НЦСМ във формат mSEED са използвани в реално изследване на структурата на Земята. Използвания период от почти четири години регистрация може да се счита за представителен. От получените резултати се вижда, че цифровите данни са с добро качество и може да бъдат използвани и за други научни изследвания. Създадена е база данни, от цифровите записи за всяка станция на първите 100 s от записа, заедно с координатите на всяко събитие, неговата дълбочина и азимут.
- Пресметнати са функциите на приемане за 11 от 13-те станции от НЦСМ и след това бяха анализирани изображенията със стикованите функциите на приемане.
- Пресметната е дебелината на земната кора под сеизмичните станции от Националната сеизмична мрежа. Определен е интервал от 3 km за всяка станция, в който с вероятност 95% се намира истинската дълбочина на

границата на Мохоровичич. Определени са също и интервали, в които с вероятност 95% се намира и истинската стойност на отношението на скоростите на сеизмичните вълни за всяка станция.

- Доброто азимутно покритие с данни дава възможност да се наблюдава наклон на границата на Мохоровичич, ако такъв съществува в района на станцията. На територията на България наклон на Мохо се наблюдава при станциите ММВ в азимутния диапазон 240°-310° и при станция ККВ в азимутния диапазон 310°-20°.
- Установено бе наличието на разломи близо до някои от станциите ККВ, PLD, SZH. Под станции ККВ и ММВ е получен наклон на границата на Мохоровичич. За всички останали станции, с изключение на станция ЈМВ данните предполагат наличие на анизотропни структури. Тези резултати потвърждават сложността на структурата на земната кора в България.
- За първи път в България данни от сеизмичните станции на територията на страната са използвани за изследване на структурата на горната мантия до дълбочина 800 km, което включва изцяло и зоната на преход в мантията. Идентифицирани са фази от на основните граници в зоната на преход в мантията.
- Потвърдено е наличието на нискоскоростен слой астеносфера. Установено е, че тя се простира до дълбочина между 190 и 220 km в различните части на страната.
- Освен фазите от астеносферата, както и горната и долната граници на зоната на преход (410 km и 660 km) са идентифицирани и други фази. Някои от тях са привързани към граници 330 km и 520 km, които не се срещат повсеместно.
- Зоната на преход в мантията е с променлива дебелина под България.
   Установени са две зони с малки отклонения в дебелината.

### Публикации по темата на дисертацията:

**Георгиева, Г.** "Структура на границата Мохо в югозападна България в близост до сеизмичните станции VTS, KKB, MMB", 6 – та Национална конференция по геофизика, публикация на CD

**Georgieva, G.**, Nikolova. S, "The Moho depth and crustal structure beneath Bulgaria, obtained from receiver function analysis", Proceeding of the Bulgarian Academy of Sciences, Vol. 66, No.5, 2013

### Публикации извън темата на дисертацията:

Simeonova S., Irena Aleksandrova, Dimcho Solakov, Iliana Popova, **Gergana Georgieva**, 2006. Observed macroseismic effects from intermediate Vrancea, Romania earthquakes(1940,1977) on the territory of the town of Rousse. Proceedings, Geosciences, Sofia, 323-326.

### Цитирано в

Kouteva M., and I. Paskaleva<sup>-</sup> 2008. Seismic monitoring: A Contribution to the sustainable development of the Russe region of Bulgaria. In Harmonization of Seismic Hazard in Vrancea Zone with Special Emphasis on Seismic Risk Reduction, Edts A.Zaicenco, I.Craifaleanu, I.Paskaleva. NATO Science for Peace and Security Series-C. Environmental Security, Springer, 183-196.

Солаков Д., С.Симеонова, Л.Христосков, И.Александрова, И. Попова, **Г. Георгиева**, 2007. Земетръсни сценарии за градовете София, Русе и Враца, в сборник от Втора Научно-Практическа Конференция по Управление в Извънредни Ситуации и Защита на Населението, 09 ноември 2007, София, ЦИНСО-БАН, С., 264-272

Solakov D., S.Simeonova, I.Aleksandrova, I.Popova, **G.Georgieva**, 2009. Earthquake Scenarios: cases study for the cities of Rousse and Vratsa. 5th Congress of Balkan Geophysical Society — Belgrade, Serbia10 – 16 May 2009, 6497 computer file on CD.

Dimcho Solakov, Stella Simeonova, Ludmil Christoskov, Irena Aleksandrova, Iliana Popova, and **Gergana Georgieva**; EARTHQUAKE SCENARIOS FOR THE CITIES OF SOFIA, ROUSSE, AND VRATSA; *INFORMATION & SECURITY. An International Journal, Vol.24, 2009, 51-64* 

**Georgieva.G**, I. Radev, I. Popova, E. Mihaylov, G. Marinov, M. Ilieva, K. Matev, M. Atanassova, 2009. Complex investigation of the recent geodynamics in the region of Krupnik-Kresna; 5th Congress of Balkan Geophysical Society — Belgrade, Serbia10 – 16 May 2009, 6497 computer file on CD

**G. Georgieva**, S. Nikolova, L. Dimitrova, 2009. "Monitoring of the seismicity in the region of LSN Provadia", 5th Congress of Balkan Geophysical Society — Belgrade, Serbia10 – 16 May 2009, 6497 computer file on CD

Паскалева И., Кутева М., Димитрова Л., Георгиев И., Николова Св., **Георгиева Г.**, Някои коментари относно комплексния динамичен мониторинг на

мировското солно находище, *IV* International Conference on Mining and Geomechanics, June 3-6, 2010-02-19

Paskaleva, I. - Nikolova, S. - Dimitrova, L., **Georgieva, G**.: Monitoring networks — Way for improving risk assessment from natural and manmade hazards : Case study salt mine Provadia (NE Bulgaria), Acta geodaetica et geophysica Hungarica, ISSN 1217-8977, 2010. (vol. 45) no. 3. 388-402. old.

L.Dimitrova, S.Nikolova, **G.Georgieva**, R.Raykova, I.Ivanova1, I.Asparuhova1, Processing and analysis of seismicity in Provadiya region in 3 year period, 6 – та Национална конференция по геофизика, публикация на CD

### Доклади по темата на дисертацията:

**Georgieva G.** "Upper mantle structure beneath Bulgaria.", International School and Workshop on Nonlinear Mathematical Physics and Natural Hazards, 28.11-02.12.2013 Sofia.

**Георгиева Г.** "Структура на горната мантия за територията на България", Втори национален конгрес по физически науки, 25-29.09.2013, София.

**Georgieva. G.** "Earth's crust of Bulgaria by P receiver functions", Science and Technology 2013 Conference, CTBTO, Vienna – 17-21. June. 2013

**Georgieva G**, The Moho's structure in beneath the Rhodopes massif obtained from receiver function analysis, 4th International Scientific Conference of young scientists and students "New Approaches and Achievements in Earth Sciences", 5-6. October 2011, Bacu

**Георгиева, Г.** "Структура на границата Мохо в югозападна България в близост до сеизмичните станции VTS, KKB, MMB", 6 – та Национална конференция по геофизика, публикация на CD, 17. 12.2010

**Georgieva G.** "The Moho's structure in West Bulgaria obtained from receiver function", XIX CONGRESS OF THE CARPATHIAN-BALKAN GEOLOGICAL ASSOCIATION Thessaloniki, Greece, 23-26 September 2010

**Georgieva G.**, "First results on Moho's structure from receiver function analysis for Bugaria", ESC, 6-10 September 2010, Montpellier, France

### Доклади извън темата на дисертацията:

**Georgieva G.**, S. Nikolova, J. Malek, L. Dimitrova, "Seismicity in close vicinity of Mirovo salt dome", **ESC**, 6-10 September 2010, Montpellier, France

**Georgieva G.**, S. Nikolova, L. Dimitrova, "Monitoring of the seismicity in the region of LSN Provadia", 5th Congress of Balkan Geophysical Society, 10-16 May 2009, Belgrade, Serbia;

Solako<u>v</u> D., S. Simeonova, I. Alexandrova, I. Popova, **G. Georgieva**, "Earthquake scenarios: cases study for the cities of Ruse and Vratsa ", 5th Congress of Balkan Geophysical Society, 10-16 May 2009, Belgrade, Serbia;

**G. Georgieva**, I. Radev, I. Popova, E. Mihaylov, G. Marinov, M. Ilieva, K. Matev, M. Atanassova, "Complex investigation of the recent geodynamics in the region of Krupnik-Kresna ", 5th Congress of Balkan Geophysical Society, 10-16 May 2009, Belgrade, Serbia;

### Участие в научни проекти

- 1. Модернизация на Националната Оперативна Телеметрична Система за Сеизмологична Информация НОТССИ , финансиран от ПКЗНБАК. 2005-2006. приключил, участник.
- 2. Анализ на цифровите сеизмични данни на станция Витоша за определяне на собствените колебания на Земята и анализ на приливните вълни. Договор с МОН. Договор N H3- 1513/2006 приключил, участник.
- 3. Обработка на информация от Локална Сеизмологична Наблюдателна Мрежа около площадката на АЕЦ "Белене". Договор N 0042/2008г. сключен между НЕК АД и ГФИ-БАН. приключил, участник.
- 4. Регистрация, анализ, обработка и интерпретация на данните от Локална Сеизмологична Мрежа в района на гр. Провадия. Договор с Провадсол АД N 22/11.10.2006г. приключил, участник.
- 5. EMIRA: Environmental Monitoring Implement for Risk Assessment of natural and man-made hazard. National Science Fund, Ministry of Education and Science, 2005 2008. № ИКИ-11/01.09.2005 г. с фонд "Научни Изследвания" към МОН. приключил, участник.
- Регистрация, обработка и интерпретация на сеизмологичната информация от Локална Сеизмична Мрежа (ЛСМ) в района на АЕЦ"Козлодуй". Договор N Д278035/2007г. сключен между "АЕЦ Козлодуй" ЕАД и ГФИ, БАН. временно участник
- 7. Система за мониторинг на солното находище в Провадия път за оценка и намаляване на естествените и технологични рискове. Договор с МОН Договор N Д 01-406/16,06,2006. приключил, участник.

## Литература

Agostinetti, P., A. Amato; *Moho depth and Vp/Vs ratio in peninsular Italy from telseismic receiver functions*; J. of Geoph. Res., 114, 2009, B06303, doi:10.1029/2008JB005899

Akaogi, M., Ito, E., Navrotsky, A.; Olivine-modified spinel-spinel transitions in the system Mg2 SiO4 -Fe2 SiO4 : calorimetric measurements, thermochemical calculation, and geophysical application.; J. of Geoph. Res., 94, 1989, 15671-15685

Ammon, C.;*The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms*;Bull. Seism. Soc. Am., 81, 1991, 2504-2510

Ammon, C., G. Randall, G. Zandt; *On the nonuniqueness of receiver function inversion*; J. of Geoph. Res., 95, 1990, 15303-15318

Anderson, D.; Phase changes in the upper mantle; Science, 157, 1967, 1165–1173

Anderson, D.; Petrology of the mantle; Mineral. Soc. Amer. Spec. Pap. 3, 1970, 85-

93

Bina, C.; Mantle discontinuities; Rev. Of Geoph., 29, 1991, 783-793

Birch F;*Density and composition of mantle and core*;J. of Geoph. Res.,69/20,1964,4377-4388

Botev E., E. Spassov; *Main features of the lithosphere in the central part of the Balkan region*; Gerl. Beitr. Geoph., 98, 5, 1989, 388-397

Botev E., Ju. Burmakov, A. Treussov, L. Vinnik;*Crust and upper-mantle inhomogeneities beneath the central part of the Balkan region*; Phys. Earth planet. Inter, 51, 1988, 198-210

Bowman, J., B. Kennett; *An investigation of the upper mantle beneath northwestern Australia using a hybrid seismograph array*; Geophys. J. Int., 101, 1990, 411-424

Christoskov, L.; On the amplitude curves of body waves for short epicentral distances and their oscillatory character; Zeitschr. Für Geoph., 38, 1972, 429-239

Cloetingh, S., P. Ziegler, F. Beekman, P. Andriessen, L. Matenco, G. Bada, D. Garcia-castellanos, N. Hardebol, P. Dezen, D. Sokoutis;*Lithospheric memory, state of stress and rheology: neotectonic controls on Europe's intraplate continental topography*;Quatern. Scien. Rev., 24, 2005, 241-304

Cwojdzinski, S.;*Mantle plumes and dynamics of the Earth interior – towards a new model*;Geol. Rev., 52, 2004, 817-826

Dachev H., I. Vaptzarov, L. Filipov, D. Solakov, S. Simeonova, S. Nikolova, P. Sokolova, E. Botev, Tz. Georgiev; *Seismology, geology, neotectonics, seismotectonics and* 

seismic hazard assessment for the PNPP Belene site, Report of Project: Investigations and activities for increasing of the seismic safety of the PNPP Belene site; 1995, Geoph. Inst., BAS, S, I, pp 250

de Boorder, H., W. Sparkman, S. White, M. Wortel;*Late Cenozoic mineralization*, *orogenic collapse and slab detachment in the European Alpine Belt*;Earth and Planetary Sc. Lett. 164, 1998, 569-575

Dey-Sakar, S., R. Wiggins; *Upper mantlestructure in western Canada*; J. of Geoph. Res., 81, 1976, 3619-3632

Dziewonski, A., D. Anderson ;*Preliminary reference Earth model.*;Phys. Earth planet. Inter, 25, 1981, 297-356

Eckhard, C., W. Rabbel;*P*-receiver functions of anisotropic continental crust: a hierarchic catalogue of crustal models and azimuthal waveform patterns;Geophys. J. Int., 187, 2011, 439-479

Faccenna, C., L. Jolivet, C. Piromallo, A. Moreli; *Subduction and the depth of convectio in the Mediterranean mantle.*; J. of Geoph. Res., 108, 2003, 2099

Geissler, W., R. Kind, X. Yuan; *Upper mantle and lithospheric heterogeneities in central and eastern Europe as observed by teleseismic receiver function.*; Geophys. J. Int., 174, 2008, 351-376

Gossler, J., R. Kind;*Seismic evidence for very deep roots of continents*;Earth and Planetary Sc. Lett. 138, 1996, 1-13

Grad, M., T. Tiira; *Moho depth of the European Plate from teleseismic receiver functions*; J. of Seismol., 16, 2012, 95-105

Grad, M., T. Tiira, ESC Working group; *The Moho depth map of the European Plate*; Geophys. J. Int., 176, 2009, 279-292

Graves, R., D. Helmberger; *Upper mantle cross section from Tonga to Newfound-land*; J. of Geoph. Res., 93, 1988, 4701-4711

Gurrola, H., J. Minster, T. Owens; *The use of velocity spectrum for stacking receiver functions and imaging upper mantle discontinuities*; Geophys. J. Int., 117, 1994, 427-440

Heidbach, O., P. Ledermann, D. Kurfess, G. Peters, T. Buchmann, L. Matenco, M. Negut, B. Sperner, B. Müller, A. Nuckelt, G. Schmitt;*Attached or not attached: slab dy-namics beneath Vrancea, Romania*;Int. Symp. On Strong Vrancea Earthquakes and risk Mitigation, 2007, Romania

Helfrich, G. ;*Topography of the transition zone seismic discontinuities*;Rev. Of Geoph. 38, 1, 2000, 141-158

Helmberger, D., R. Wiggins; *Upper mantlestructure of midwestern United States*; J. of Geoph. Res., 76, 1971, 3229-3245

Inoue, T., Weidner, D., Northrup, P., Parise, J.;*Elastic properties of hydrous ringwoodite* (γ-*phase*) *in Mg2 SiO4*;Earth and Planetary Sc. Lett. 160, 1998, 107-113

Ito,E., Takahashi, E.;*Postspinel transformations in the system*  $Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4$  and some geophysical implications;J. of Geoph. Res., 94, 1989, 10637-10646

Jolivet, L., C. Faccenna, C. Piromallo; *From mantle to crust: Streching the Mediter-ranean*; Earth and Planetary Sc. Lett. 285, 2009, 198-209

Katsura, T. E. Ito; *The system*  $Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4$  *at high pressures and temperatures: Precise determination of stabilities of olivine, modified spiel, and spinel.*; J. of Geoph. Res., 94, 1989, 15663-15670

Kennett, B., E. Engdahl; *Traveltimes for global earthquake location and phase identification.*; Geophys. J. Int., 105, 1991, 429-465

Kennett, B., E. Engdahl, R. Buland; *Constraints on the velocity structure in the Earth from tavel times.*; Geophys. J. Int., 122, 1995, 108-124

Kind, R. ; The reflectivity method fr a buried source; J. Geoph., 44, 1978, 603-612

Kind, R. ;*Receiver-Functions – Eine neue Methode in der Seismologie*;Zweijaresbericht, GFZ, 2000/2001, 39-48

Kind, R., G. Kosarev, N. Petersen;*Receiver functions at the stations of the German Regional Seismic Network (GRSN)*;Geophys. J. Int., 121, 1995, 191-202

Knapp, J., C. Knapp, V. Raileanu, L. Matenco, V. Mocanu, C. Dinu;*Crustal constraints on the origin of the mantle seismicity in the Vrancea Zone, Romania: The case for acive continental lithospheric delamination.*;Tectonophysics, 410, 2005, 311-323

Kosaev, G., L Makeyeva, L. Vinnik;*Inversion of teleseismic P-wave particle motions for crustal structure in Fennoscandia*;Phys. Earth planet. Inter, 47, 1987, 11-24

Kustowski, B., G. Ekström, A. Dziewonski; *Anisotropic shear-wave velocity structure of the Earth's mantle: A global model*; J. of Geoph. Res., 113, 2008, B06306, doi:10.1029/2007JB005169

Langston, C.; *Structure under the Mount Rainier, Washington, inferred from telesismic body waves*; J. of Geoph. Res., 84, 1979, 4749-4762

Langston, C.; *The effect of planar dipping structure on source and receiver responses for constant ray parameter*; Bull. Seism. Soc. Am., 67, 1977, 1029-1050

Le Fevre, L., D. Helmberger; *Upper mantle P velocity structure of the Canadian Shield*; J. of Geoph. Res., 94, 1989, 17749-17765

Li, X., G. Bock, A. Vafidis, R. Kind, H.-P. Harjes, W. Hanka, K. Wylegalla, M. van der Meijde, X. Yuan;*Receiver function study of the Hellenic subduction zone: imaging* 

crustal thickness variations and the ocean Moho of the descending African lithosphere;Geophys. J. Int., 155, 2003, 733-748

Long M.D., T.W. Becker; *Mantle dynamics and seismic anisotropy*; Earth and Planetary Sc. Lett. 297, 2010, 341-354

Martin, M., F. Wenzel, CALIXTO working group;*High-resolution teleseismic body-wave tomography beneath SE Romania – II. Imaging of a slab detachment scenario*;Geophys. J. Int., 164, 2006, 579-595

Martin, M., J. Ritter, CALIXTO working group;*High-resolution teleseismic bodywave tomography beneath SE Romania – I. Implications for three-dimensional versus onedimensional crustal corretion strategies with a new crustal velocity model*;Geophys. J. Int., 162, 2005, 448-460

Matenco, L., G. Bertotti, K. Leever, S. Cloetingh, S. M. Schmid, M. Tărăpoancă, C. Dinu; *Large-scale deformation in a locked collisional boundary: Interplay between subsidence and uplift, intraplate stress, and inherited lithospheric structure in the late stage of the SE Carpathians evolution*; Tectonics, 26, 2007, TC4011, doi:10.1029/2006TC001951

Morelli, A., A. Dziewonski;*Body wave traveltimes and a spherically symmetric P-and S-wave velocity model*;Geophys. J. Int., 112, 1993, 178-194

Owens, T., G. Zandt, S. Taylor; *Seismic evidence for an ancient rift beneath the Cumberland Plateau, Tennessee: A detailed analysis of broadband teleseismic P wave-forms*; J. of Geoph. Res., 89, 1984, 7783-7795

Panza G, R. Raykova, E. Carminati, C. Doglioni; *Upper mantle flow in the western Mediterranean*; Earth and Planetary Sc. Lett. 257, 2007, 200-214

Papazachos, C.;*Crustal P- and S-velocity structure og te Serbomacedonian Massif* (Northern Greece) obtined by non-linear inversion of travelrimes.;Geophys. J. Int., 134,1998, 25-39

Paul, A., D. Hatzfeld, H. Karabulut, P. Hatzidimitriou, D. Childs, S. Nikolova, C. Péquegnat, F. Hubans, A. Schmid, M. Aktar, A. Mutlu, T. Afacan, Y. Ozakin, D. Samut, C. Papazachos, I. Karagianni, D. Kementzetzidou, E. Karagianni, Z. Roumelioti, D. Vamvakaris, M. Scordilis, H. Lyon-Caen ;*The SIMBAAD Experiment in W-Turkey and Greece: A dense seismic network to study the crust and mantl structures*; ACU Fall Meeting, 2008, abstr #T21A-1926

Phinney, R. ;*Structure of the Earth's crust from spectral behavior of long-period body waves*;J. of Geoph. Res., 69/14, 1964, 2997-3017

Raykova, R.; *Structure of the Earth's crust and upper mantle in southeastern Europe from surface waves*; PhD Thesis, Geoph. Inst, Sofia, Bulgaria, 2005, pp 293

Raykova, R., S. Nikolova; *Tomography and velocity structure of the crust and uppermostmantle in southeast Europe obtained from surface wave analysis*; Stud. Geophys. Geod., 51, 2007, 164-180

Ren. Y., G. Stuart, G. Houseman, B. Dando, C. Ionecu, E. Hegedüs, S. Radovanovic, Y. Shen, South Carpathian Project Working Group; *Upper mantle structure beneath the Carpathian-Panonian region: Implication for the geodynamics of continental collision*; Earth and Planetary Sc. Lett. 349-350, 2012, 139-152

Revenaugh, J., T. Jordan; *A study of mantle layering beneath the western Pacific*; J. of Geoph. Res., 94, 1989, 5787-5813

Rigden, S., Gwanmesia, G., Fitzgerald, J., Jackson, I., Liebermann, R.; *Spinel elasticity and seismic structure of the transition zone of the mantle*; Nature, 354, 1991, 143-145

Shearer P;*Seismic imaging of upper-mantle structure with new evidence for a 520km discontinuity*;Nature, 344, 1990, 121-126

Shearer P;*Upper mantle seismic discontinuities*;Earth's Deep Inter.: Mineral Phys. and Tomogr. from the Atomic to the Glob. Scale, AGU Geophys. Monogr. 117, 2000, 115-131

Sheehan, A., P. Shearer, H. Gilbert, K. Dueker; *Seismic migration processing of P-SV converted phases for mantle discontinuity structure beneath the Snake river plain, west-ern US*; J. of Geoph. Res., 105, 2000, 19055-19065

Sodoudi, F., R. Kind, D. Hatzfeld, K. Priestley, W. Hana, K. Wylegalla, G. Stavrakakis, A. Vafidis, M. Bohnhoff;*Lithospheric structure of the Aegaen obtained from P and S receiver functions*;J. of Geoph. Res.,111,2006

Sprner, B., D. Ioane, R. Lillie;*Slab behaviour and its surface expression: new in*sights from gravity modelling in the SE-Carpathians;Tectonophysics, 382, 2004, 51-84

Stein, S., M. Wysession; *An introduction to seismology, earthquakes, and Earth structure*; 2003, Blackwell Publ. Ltd, ISBN 978-0-86542-078-6

Świeczak, M., M. Grand and TOR and SVEKALAPKO working Groups; *Upper mantle seismic discontinuities topography variations beneath Eastern Europe.*; Acta Geophys. Pol., 53, 3, 2004, 251-270

Trifonova P, Zhelev Zh., Petrova T., Bojadgieva K.;*Curie point depths of Bulgarian territory inferred from geomagnetic observations and its correlation with regional structure and seismicity*;Tectonophysics, 473, 2009, 362-374

van der Meijde, M., S. Van der Lee, D. Giardini;*Seismic discontinuities in the Medirerranean mantle*;Phys. Earth planet. Inter, 148, 2005, 233-250

Vinnik, L.;*Detection of waves converted from P to SV in the mantle*;Phys. Earth planet. Inter, 15, 1977, 39-45

Vinnik, L., A. Singh, S. Kiselev, R. Kumar; *Upper mantle beneath foothills of the western Himalaya: subducted litospheric slab or a keel of the Indian shield*?; Geophys. J. Int., 171, 2007, 1162-1171

Vinnik, L., C. Reigber, I. Aleshin, G. Kosarev, M. Kaban, S. Oreshin, S. Roecker;*Receiver function tomography of the central Tien Shan.*;Earth and Planetary Sc. Lett., 225, 2004, 131-146

Wajeman, N.; *Detection of underside P reflections at mantle discontinuities by stacking broadband data*; Geophys. Res. Lett, 15, 7, 1988, 669-672

Wessel, P., W. Smith; New, improved version of Generic Mapping Tools released; EOS Trans. Amer. Geophys. U., 79 (47), 1998, 579

Willott, H.;*Constraining the Seismic Structure of the Upper Mantle beneath Southeast Europe*;Earth and E-nviroment, 8, 2012, 134-179

Wood, J. ;Postspinel transformations and the width of the 670-km discontinuity: A comment on "Postspinel transformations in the system Mg2SiO4 – Fe2SiO4 and some geo-physical implications" by E. Ito and E. Takahashi;J. of Geoph. Res., 95, 1990, 12681-12685

Wood, J. ;*The effect of H2O on the 410kilometer seismic disontinuity.*;Science, 268, 1995, 74-76

Wood, J., D. Rubie; *The effect of alumina on phase transitions at the 660-kilometer discontinuity from Fe-Mg partitioning experiments*; Science, 273, 1996, 1522-1524

Wortel, M., W. Sparkman; *Subduction and slab detachment in the Mediterranean-Carpathian Region*; Science, 290, 2000, 1910-1917

Yegorova T., V. Kozlenko, V. Starostenko, E. Shen, E. Botev; *Density inhomogeneities of the upper mantle of the Central Balkans*; Geophys. J. Int., 132,1998, 283-294

Yuan, X., R. Kind, E. Sandvol;*Lithospheric and upper mantle stucture of southern Tibet from a seismological passive source axperiment*;J. of Geoph. Res., 102, 1997, 27491-27500

Zandt, G., C. Ammon;*Continental crust composition constrained by measurements of crustal Poisson's ratio*;Nature, 374, 1995, 152-154

Zhu, L.;*Estimation of crustal thickness and Vp/Vs ratio beneath the Tibetan Plateau from teleseismic converted waves*;(abstract), Eos Trans. AGU, 74(16), Spring Meet. Suppl., 202, 1993

Zhu, L., H. Kanamori; *Moho depth variations in southern California from teleseismic receiver functions*; J. of Geoph. Res., 105/B2, 2000, 2969-2980 Ботев, Е., А. Треусов, В. Ефтимова; Скоростен мдел на земната кора и горната мантия в България по данни от регистрацията на земетресения и взривове.; Бълг. геоф. сп., 22, кн. 2, 1996, 50-61

Дачев, Х. ;Строеж на земната кора в България;Техника, 1988, София, 334 ст.

Димитрова, Л.;*Анализ и автоматизация на сеизмичните наблюдения в цифровата система на НОТССИ*;Дис. за пол. на н.о.с. доктор, НИГГГ, София, 2009, ст. 201

Добрев, Т., В. Иванова, Р. Радков;*Комплексиране при геофизичните проучвания*; Техника, 1989

Соллогуб, В., А. Гутерх, Д. Просен; Структура земной коры Централной и Восточной Европы по данным геофизических исседований; Наукова думка, 1980, 206 ст.

Спасов, Е., Е. Ботев; *Нееднородности и анизотропия в горната мантия на* Балканите по телесеизмични данни; Бълг. геоф. сп., 13, кн. 4, 1987, 66-75

Христосков Л.;*Сеизмология*, *част I и част II*; Университетско издателство "Св. Климент Охридски", 2005, София

Якимов, Я. ;*Сеизмичните проучвания в Североизточна България – състояние и проблеми*;Сп. на Бълг. Геол. Дружество, 52, кн.2, 1991, 67-76