



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

**НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО ГЕОФИЗИКА,
ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОГРАФИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

На дисертация за получаване на образователна и научна степен
„Доктор“

на Валентина Николаева Протопопова

**Геодинамика на територията на България и
прилежащите земи по сеизмологични данни**

Научна специалност: 01.04.06 “Сеизмология и вътрешен строеж на Земята”

Научен ръководител: **Проф. Емил Ботев**

Съръководител: **Проф. Ценка Христова**

София, 2015 год.

Данни за дисертационния труд:

Брой страници	184
Брой фигури	53 (от които 28 с две подточки и 2 с три подточки)
Брой таблици	6 (от които 1 с включени 12 изображения)

Защитата на дисертацията ще се състои на
от в заседателната зала на НИГГГ – БАН.

Материалите по защитата са на разположение в канцеларията на НИГГГ – БАН,
ул. „Акад. Г.Бончев“, бл.3

СЪДЪРЖАНИЕ

Уводни бележки	4
Цел и задачи на дисертацията	5
Структура на дисертацията	6
Глава 1. Сеизмологична мрежа, използвани данни	8
1.1.Национална сеизмологична мрежа	8
1.2. Чуждестранни станции и данни	8
Глава 2. Сеизмични източници, механизми на земетресения, скоростен модел, използван софтуер	10
2.1.Сеизмични източници	10
2.2.Механизми на земетресения	10
2.3.Скоростен модел на земната кораи софтуер	12
Глава 3. Сеизмотектонско зонирание, механизми на земетресения за района на изследване	13
3.1. Балкански полуостров – геолого-тектонски сведения	13
3.2. Основни сеизмологични и фокално - геодинамични характеристики на сеизмичните зони	13
3.2.1.Сеизмична зона Вранча	16
3.2.2.Сеизмична зона Неготинска крайна (Видинска зона)	18
3.2.3.Сеизмична зона Горна Оряховица.....	20
3.2.4.Сеизмична зона Североизточна България	23
3.2.5.Софийска сеизмична зона	26
3.2.6.Струмска сеизмична зона	29
3.2.7.Родопска сеизмична зона	33
3.2.8.Средногорска сеизмична зона.....	36
3.2.9.Бургаска сеизмична зона	40
Глава 4. Моделиране на регионалното напрежение.....	41
4.1. Получаване на тензора на регионалното напрежение.....	41
4.2. Сеизмологични данни за изследване на полето на напреженията за територията на България и прилежащите земи	43
4.2.1.Сеизмична зона Вранча	44
4.2.2.Сеизмична зона Неготинска крайна (Видинска зона)	45
4.2.3.Сеизмична зона Горна Оряховица.....	46
4.2.4.Сеизмична зона Североизточна България	48

4.2.5.Софийска сеизмична зона	49
4.2.6.Струмска сеизмична зона.....	51
4.2.7.Родопска сеизмична зона	54
4.2.8.Средногорска сеизмична зона.....	58
Глава 5. Геодинамичен анализ на получените резултати.....	61
4.1. Обобщен анализ на получените резултати.....	61
4.2. Върху геодинамиката на централната част на Балканите	66
Глава 6. Заключение.....	74
Приноси.....	76
Научни публикации включени към дисертацията	78
Други научни публикации.....	78
Изнесени доклади.....	79
Участия в научни проекти.....	80
Библиография	81

Уводни бележки

Геодинамиката е относително нов раздел на геологията. Тя възникна през 60-те години на миналото столетие и е тясно свързана с появата и развитието на новата глобална тектоника. Счита се, че литосферата е съставена от няколко големи тектонски плочи, които се движат хоризонтално една спрямо друга, а в зависимост от взаимодействието между тях се определят характера на процесите на сеизмичност, магнетизъм, палеомагнетизъм, седиметация, металоогения и формиране на структури. Земята с нейните обвивки (кора, мантия, ядро) представляват единна геодинамическа система, чиито източниците на енергия, причина за нейната тектонска активност, се намират вътре в нея. Химическите и механичните процеси, които протичат в недрата на Земята, обуславят нейната геодинамическата активност, която е неравномерна във времето и пространството, като се предполага, че съществува периодичност в главните етапи от нейната еволюция. (Апланов, 2001).

Дълги години учени по целия свят изучават Земята - нейната повърхност, строеж и свойства, с цел определяне на непротиворечив модел за закономерността и генезиса на геодинамичните процеси. Познаването на геодинамиката във всяка област е задължителна стъпка за достигане на относителен метод за предсказване на сеизмични събития.

Земетръсните източници и средата, в която се разпространяват сеизмичните вълни, се характеризират с тяхната скритост и недостъпност. Определянето на физическите свойства на източника определят процесите на възбуждане на вълните и как се излъчва сеизмична енергия. Създаването на модерна сеизмологична мрежа, позволява наблюдението на концентрацията на сеизмичните огнища, като по тях може да се определят перифериите на литосферните плочи и разломи. Чрез изследване на механизмите в огнищата на земетресенията се дефинират типовете отместване на литосферните плочи или крилата на тектонските разломи едно спрямо друго. От по-обстойното изучаване на физическите свойства на различните земетръсни огнища и средата, в която се разпространяват сеизмичните вълни, се получава информация за цялостната геодинамична обстановка. От получените сведения за геодинамиката на територията на България, прибавени към информация от изследванията провеждани на териториите на съседните държави, помагат за изясняването на цялостната картина за геодинамиката в района на централната част на Балканския полуостров.

Цел и задачи на дисертацията

Основна цел на предлаганата дисертационна разработка е на базата на моделирането, анализа и комплексната количествена интерпретация на механизмите на реализация на земетресенията на територията на България и прилежащите земи да се осветли генезиса на регионалните напрежения като основа на геодинамичните процеси в централната част на Балканите. Произтичащите от тази основна цел задачи са формулирани в следната последователност:

- Да се потърсят и анализират всички досегашни решения на фокални механизми на земетресения на територията на страната и непосредствено прилежащите земи през последните повече от три десетилетия.
- С цел хомогенизация и съгласуваност на фокалните параметри да се извърши детайлна проверка, тестване и евентуално рекалкулиране на съществуващите решения, като всички параметри на фокалните механизми се унифицират и представят във вид удобен за моделиране на напреженията в земната кора.
- Да се получат възможно най-голям брой нови решения на механизми на огнищата на слаби земетресения с параметри, удовлетворяващи изискванията за моделиране на регионалните напрежения.
- За целите на количественото моделиране на регионалните напрежения да се предложи предварително сеизмично зонироване с акцентуване на основните сеизмологични параметри (в това число и фокални параметри) за всяка сеизмична зона.
- Да се приложи инверсният метод разработен от Gephart and Forsyth (1984) и Gephart (1990) за моделиране на регионалните напрежения по сеизмологични данни за фокалните механизми на земетресенията и получаване на параметрите на регионалния тензор на геотектонските напрежения във всяка зона.
- Да се направи обобщена оценка и сравнителен анализ на получените регионални напрежения по сеизмологични данни.
- Получените резултати да се дискутират в светлината на модерни геодинамични хипотези и съвременни геолого-геодезични данни за предвижванията на земекорните блокове във и около района на изследване.

Структура на дисертацията

В изпълнение на основната цел и така поставените задачи предлаганата дисертация е структурирана в уводни бележки с включени цел и задачи, пет глави по съдържанието на темата, заключение с включени научни или научно-приложни приноси, списък с публикациите по темата на дисертацията и други публикации на автора, списък на изнесените доклади, списък с участията в научни проекти и използваната литература.

В Глава 1 са разгледани етапите на изграждане, развитие и хронологията на експлоатация на станциите от Националната Оперативна Мрежа за Сеизмична Информация (НОТССИ). Описани са целите и задачите на трите локални мрежи за сеизмичен мониторинг, разположени около АЕЦ „Козлодуй“, АЕЦ „Белене“ и в района на Мировското солно находище в близост до гр. Провадия. Посочени са източниците на сеизмологични данни. Представено е разпределението и списък с международните кодове на чужди сеизмични станции, данни от които са използвани при определянето на фокалните механизми на огнищата на земетресения.

В Глава 2 са описани основните методи на тектонски нарушения, предизвикващи земетресения и свързаните с тях математични модели. Представени са комбинациите от сили, описващият ги тензор на сеизмичния момент и вида на фокалния им механизъм. Описан е методът за определяне на фокални механизми. Представени са основните типове земетръсни разломи и техните диаграми на механизма. Представен е използваният скоростен модел на земната кора и методът за неговия избор. Направен е кратък обзор на използвания модерен софтуер за визуализиране на сеизмограми, за определяне на кинематичните параметри на земетресения, за определяне на механизми на огнищата на земетресения, както и за специализирания софтуер, представящ получените резултати върху географски карти.

В Глава 3 е разгледано и описано разположението на големите морфотектонски области в България с техния основен геоложки строеж. Направено е сеизмотектонско зонироване на територията на България и прилежащите земи, като са описани основните тектонски морфоструктури във всяка зона. Представени са нагледно получените фокални механизми за всяка зона и съответстващите им проекции на осите на компресия и експанзия. Направено е разделяне на получените фокални механизми към отделните огнищни области за зоните, в които е възможно.

В Глава 4 е представен инверсният метод, разработен от Gephart and Forsyth (1984) и Gephart (1990), за определяне на регионалния тензор на сеизмотектонските напрежения. Определени са посоките на трите главни напрежения за всяка зона като цяло и отделно за всяка огнищна област. Направена е оценка на грешката на получените решения. Направен е сравнителен анализ на локалните съвпадения и несъответствия между получените от автора на дисертацията тензори на регионалните напрежения за отделните сеизмични зони и предложени решения от други автори.

В Глава 5 е проведен обобщен анализ на получените резултати за параметрите на регионалните геодинамични напрежения в отделните сеизмични зони. Представен е кратък анализ на геодинамичната обстановка в централната част на Балканите по геоложки и геодезични данни за преместванията на земната повърхност. Получените от автора резултати за регионалните напрежения в отделните сеизмични зони са сравнени както с модерни геодинамични хипотези, така и с последните резултати за скоростите на премествания на повърхността, напреженията и ъгловите деформации определени по GPS измервания.

В глава 6 са изложени заключителни думи по дисертационния труд и постигнатите приноси.

ГЛАВА 1

СЕЙЗМОЛОГИЧНА МРЕЖА, ИЗПОЛЗВАНИ ДАННИ

1.1. Национална сеизмологична мрежа

През 1980 година в България е създадена Национална Оперативна Телеметрична Система за Сеизмична Информация (НОТССИ), състояща се от 14 станции, оборудвани с късопериодни сензори S-13 на фирмата Teledyne-Geotech, аналогова апаратура с висока чувствителност, която позволява непрекъснато следене и достоверна регистрация на сеизмичността в страната и съседните региони. През 2005 г. по проект „Модернизация на Националната Оперативна Телеметрична Система за Сеизмична Информация“ се извършват редица дейности свързани с въвеждане на нова цифрова апаратура, която позволява надеждна регистрация на земетресения в много голям магнитуден диапазон, добър и лесен анализ на записа на сеизмограмите и оценка на природата на източника на регистрираните сигнали (Димитрова, 2009).

Цифрови записи на вълнови форми от националната цифрова сеизмологична мрежа до 2013 г., включваща локални сеизмологични мрежи „Козлодуй“ и „Провадия“, както и вълнови форми от аналоговите (включително цифровани аналогови записи) от български станции са използвани за целите на дисертацията.

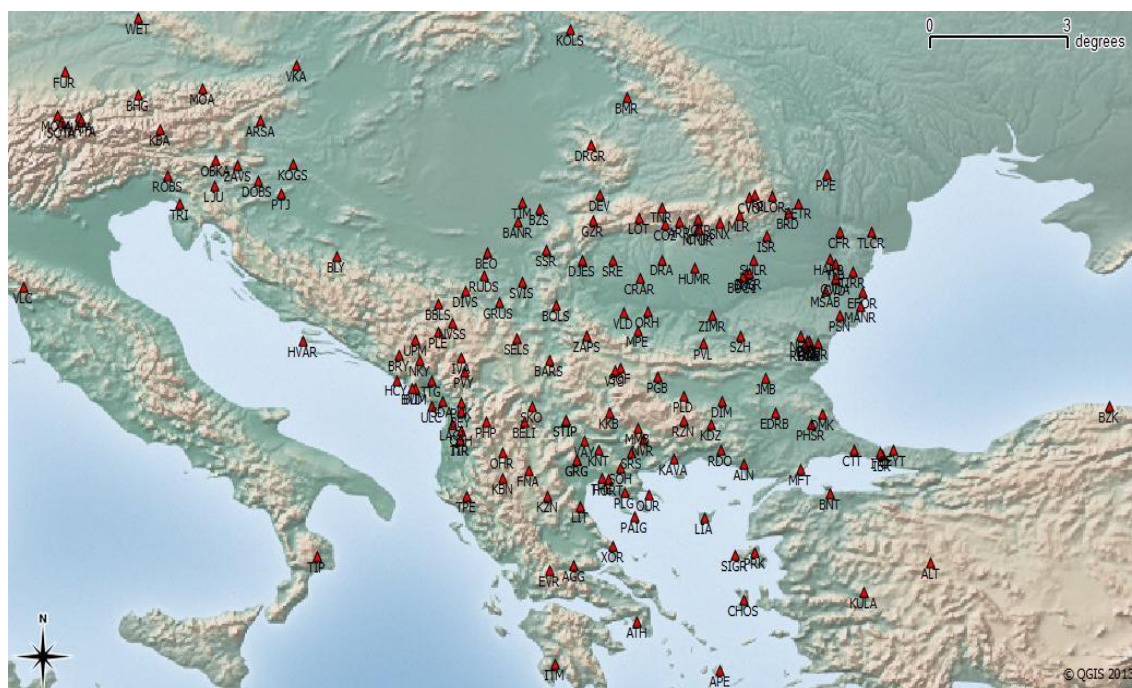
1.2. Чуждестранни станции и данни

В дисертацията са използвани също данни от станции, които се намират извън територията на България. Извършва се международен обмен на сеизмологични данни в реално време, което позволява повишаване на точността на епицентралните оценки и улеснява определянето на механизмите на огнищата на земетресения за събития по граничните на България райони, без да се добавят нови станции към националната мрежа.

За целите на дисертацията са използвани също общо достъпни цифрови записи на вълнови форми (ORFEUS Data Center, 2013), каталожни данни от национални и международни web сайтове, портали, сеизмологични центрове, каталози и статии (ISC web site, EMSC/CSEM, Solakov and Simeonova, 1993, Georgiev, 1987, Oncescu et al., 1990, Botev et al., 2002, Botev et al., 2006, Димитров, 2009). Използвани са данни от 175 сеизмични

станции на територията на Европа, Азия и Африка, от които 21 на територията на България (13 постоянно поставени и две локални мрежи).

На фиг. 1.2.1. е дадено териториалното разпределение на използваните български и по-голямата част от чуждестранните сеизмични станции, данни от които са използвани за целите на настоящата дисертация. Географските координати, международните кодове, надморската височина и държавата, в която се намират са посочени в Таблица 1.2.1.



Фиг. 1.2.1. Разположение на част от използваните сеизмологични станции. Международните кодове на станциите са посочени в Таблица 1.2.1. от дисертацията. Карта: Made with Natural Earth; QGIS Development Team (2012).

ГЛАВА 2

СЕИЗМИЧНИ ИЗТОЧНИЦИ, МЕХАНИЗМИ НА ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ, СКОРОСТЕН МОДЕЛ, ИЗПОЛЗВАН СОФТУЕР

2.1. Сеизмични източници

Математичните модели на система от точкови източници са широко навлезли в практиката за определяне на механизма на земетресенията, тъй като физичната им постановка е добре обоснована. Счита се, че решението на механизъм на точков източник (концентрирани сили) отразява само началния стадий на образуване на разлома в реалното огнище, като от началната до крайната фаза на разрушението се формира само една във физико-механичен смисъл разломна повърхнина (Christoskov, 1999).

2.2. Механизми на земетресения

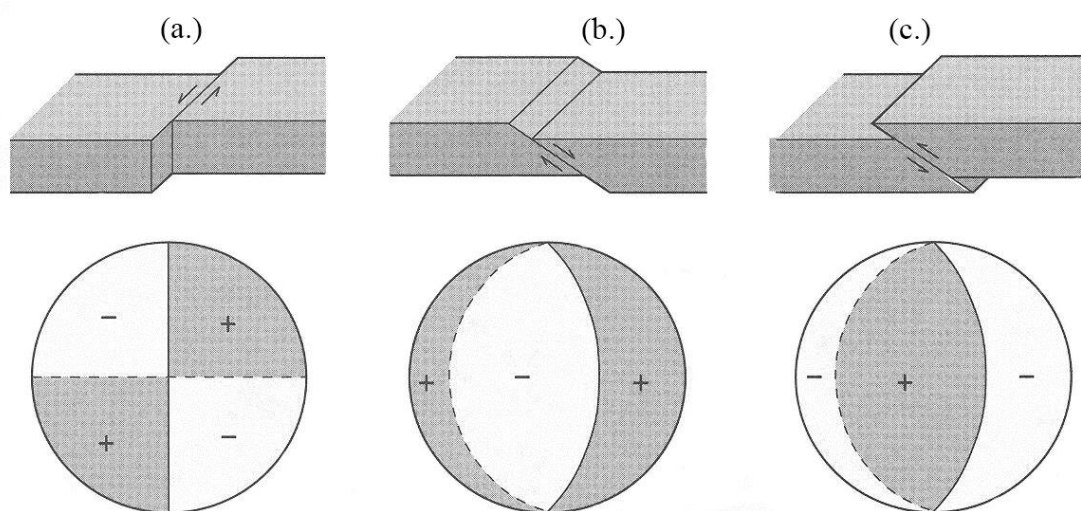
Първите стъпки за определяне на механизма на огнищата на земетресения са направени от Omori and Galitzin през 1905 г. и Shida през 1917 г., които забелязват редуващо се разпределение на полярностите (компресия и дилатация) на първото встъпление на Р-вълната в четири квадранта, разделени от две ортогонални нодални равнини (главна и спомагателна). Знакът на Р-вълната се определя от вертикалната Z компонента на сеизмограмите, регистрирани в сеизмичните станции, като „+“ или „С“ означава компресия, а „-“ или „D“ – декомпресия (дилатация). Механизмът на разрушение се представя чрез единична сфера хомогенен материал около хипоцентъра, чрез двумерната проекция на долната полусфера на фокалния механизъм.

На фиг. 2.2.5. са показани схеми на основните типове земетръсни разломи и относителните движения по двете им крила, а под тях са дадени съответстващите им диаграми на механизма в долна фокална полусфера. При относително движение насочено по посока на разломната равнина ($\lambda=0^\circ$ - ъгъл на отместване на двете крила едно спрямо друго), има случай на отсед. Отседите биват левостранни (фиг. 2.2.5.а), когато за наблюдател от разломната линия лявото крило се придвижва към него, а дясното се отдалечава, или десностранни - обратното. При паралелно движение по посоката на наклона и относително понижаване на висящото крило се образува разсед и $\lambda=-90^\circ$ (фиг.

2.2.5.b), а при относително издигане на висящото крило се образува възсед и $\lambda=+90^\circ$ (фиг. 2.2.5.c), (Христосков, 2007).

Съгласно възприетата конвенция за дефиниране на ъгъл λ (Aki and Richards, 1980, Gadomska, 1983), при преместване ΔU , водещо до относително пропадане на висящото крило спрямо лежащото, $-180^\circ \leq \lambda \leq 0^\circ$, а когато ΔU предизвиква относително издигане на висящото крило спрямо лежащото, то $0^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$.

За намиране на големината на преместването ΔU са необходими допълнителни данни, например от преки геодезични измервания при излаз на разломната равнина на земната повърхност и др. (Христосков, 2007).



Фиг. 2.2.5. Основни типове земетръсни разломи и техните диаграми на механизма, проектирани в долната фокална полусфера на Вулф: а) отсед ($\lambda=0^\circ$); б) разсед ($\lambda=-90^\circ$); в) възсед ($\lambda=+90^\circ$); Квадрант „+“ означава компресия, „-“ – декомпресия (дилатация); Разломната равнина е пълтна линия, а спомагателната – пунктирана (Udias, 1999).

Рядко разломите биват чист отсед, разсед или възсед. Обикновено приплъзването по разломните линии е комбинация от разсед и отсед (фиг.2.2.5.) или възсед и отсед. В райони със сложен тектонски строеж съществуват множество разнообразни предварително формирани ослабени зони – разломи или пукнатини, по които могат да се реализират земетресения, следователно механизмите на огнищата им ще се различават както по вид, така и по азимут и ъгъл на затъване на разломната равнина.

Осите на компресия Р и декомпресия Т лежат на 45° отстояние от нодалните равнини в центъра на квадрантите на компресия и дилатация съответно. Нулевият вектор В е пресечната ос на двете нодални равнини, като по тази ос стойностите на компресия и

декомпресия са нула. Оста на компресия Р, нулевият вектор В и оста на екстензия Т, получени при решаване на механизъм за огнище на земетресение се проектират в три взаимно перпендикулярни направления (декартова координатна система с център центърът на фокалната сфера) и се явяват съответно максималното (σ_1), междинното (σ_2) и минималното (σ_3) главни напрежения на компресия (McKenzie, 1969).

2.3. Скоростен модел на земната кора и софтуер

Скоростният модел е избран аналитично – при сравнение на кинематичните параметри (географски координати на епицентър, дълбочина и др.) за повече от 40 решения на земетресения на територията на България (1990-2013 г.), изчислени с програмите DHYPO (Солаков и Добрев, 1987) и HYPO 71 (Lee and Lahr, 1972, 1975), с 6 различни скоростни модела: Pearce, 1977; Oncescu et al., 1990; Solakov and Simeonova, 1993; Botev et al., 1996; Димитрова, 2009 и заложения в програмата DHYPO модел – табл. 2.3.1., който се различава минимално от предложните от Solakov and Simeonova, 1993 и Botev et al., 1996.

Таблица 2.3.1. Използван скоростен модел

№	Скорост на Р вълната	дълбочина
1	5.570 km/s	0.000 km
2	6.490 km/s	15.000 km
3	7.800 km/s	35.000 km
4	8.100 km/s	50.000 km

Най-добро съвпадение на изчислените с двете програми резултати показва скоростният модел на Земната кора, заложен в програмата DHYPO. Отклонението в изчислението на географски координати на епицентър не надвишава 0.02° , а тези на дълбочина на фокуса - 2.8 km, за събития регистрирани от цифровата сеизмична мрежа (след 2006 г.) и 0.05° и 5 km съответно, за събития регистрирани от аналоговата сеизмична мрежа.

Използваният софтуер е описан в т. 2.4. в Глава 2 от дисертацията.

ГЛАВА 3

СЕИЗМОТЕКТОНСКО ЗОНИРАНЕ, МЕХАНИЗМИ НА ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ ЗА РАЙОНА НА ИЗСЛЕДВАНЕ

3.1. Балкански полуостров – геолого-тектонски сведения

България се намира в централната част на Балканския полуостров, който е разположен в Алпийската орогенна система. Алпийският орогенен пояс на Европа и Азия е продукт от развитието на Тетиския океан. Съвременната тектонска обстановка в района се характеризира със сложен геоложки строеж и геодинамика, предизвикани от колизията на Арабската, Анадолска и Африканската плоча с Евроазиатската (McKenzie 1970; Jackson and McKenzie 1984, 1988; Jackson 1992, 1994 и др.). Сложното взаимодействие на плочите и свързаните с тях деформации на земната кора в Източно-Средиземноморския регион се изразява с много разрушителни земетресения през целия исторически период на регистрирането им. McKenzie (1970) и Jackson and McKenzie (1988) определят границите на плочите, за да изяснят деформациите и изследват принципите, контролиращи континенталната тектоника в региона. Те предполагат съществуването на Егейска плоча, която се движи с различна скорост от тази на Анадолската плоча и на екстензионна зона с посока север-юг в Западна Турция (McClusky et al., 2000)

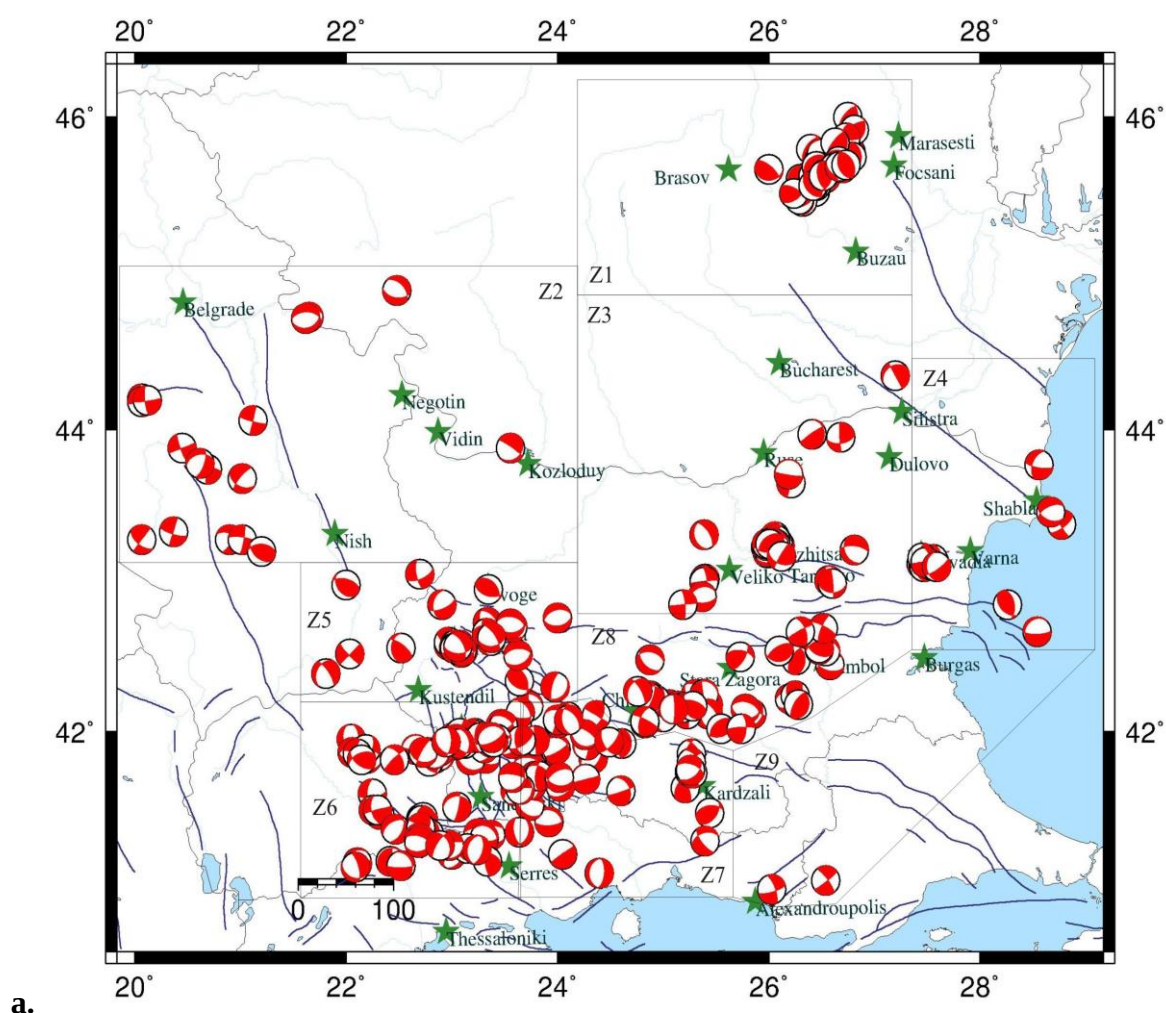
България се разделя на няколко големи морфотектонски области, които се различават съществено една от друга по геолого-историческо развитие и строеж (Бончев, 1955). В дисертацията е разгледано въведеното от Бончев разделяне на морфотектонските области на Балканите, именно пет основни области – Мизийска плоча, Балканиди, Южни Карпати, Краищици и Родопски. От своя страна Балканидите през 1940 г. са разделени на три различни ивици (Бончев, 1940) - Предбалкан, Старопланинска система и Средногорие.

3.2. Основни сеизмологични и фокално-геодинамични характеристики на сеизмичните зони

Територията на страната се характеризира с висока степен на земетръсна опасност, като тази оценка се дава на база големия брой силни и слаби земетресения, някои от които със значими катастрофални последици в недалечното минало. В настоящия момент, тази

земетръсна опасност води до още по-значим риск от разрушителни последствия при по-силни земетресения, поради по-високата степен на урбанизация на нашите земи (Ценов и Ботев, 2007). Сеизмологичните изследвания в България показват, че територията на страната е била арена на силни земетресения от древни времена до сега (Вацов, 1902; Григорова и др., 1979; Христосков и др., 1979; Христосков, 1992 и др.).

Районът на България и прилежащите и земи е разделен на девет отделни зони със специфични сеизмични и фокално-геодинамични характеристики фиг. 3.2.1.а. Взео е под внимание съвременният морфоструктурен план на тектонските нарушения и основните сеизмоогнищни зони на територията на страната (Бончев, 1946; Йовчев и др., 1971; Zagorchev, 1992; Vrablyanski and Milev, 1993; Barrier, 2004; Калайджиев, 2007; Алексиев, 2012, Georgiev et al., 2007).



Фиг. 3.2.1. Разпределение на определените 338 фокални механизма за територията на България и прилежащите земи. **а.** Зонално разпределение: Z1 - Z9 сеизмични зони: Z1 – Вранча (Румъния), Z2 - Неготинска крайна (Видинска), Z3 - Горна Оряховица, Z4 -

Североизточна България, Z5 - Софийска, Z6 - Струмска, Z7 - Родопска, Z8 - Средногорска, Z9 - Бургаска; Тектонска карта: Barrier et al. (2004), Georgiev et al.(2007);

На фиг. 3.2.1.а. са представени 338 решения за механизми на по-силни земетресения, включително ретро-решенията за двете катастрофални земетресения през 1928 г. в района на гр. Пловдив и тяхното условно разделяне в девет отделни сеизмични зони. Зонирането представено на тази фигура е близко до това предложено от Botev (2000) Botev et al. (2002), което се основава на комплексен анализ на няколко известни зонирания (Григорова и др., 1980; Bonchev et al., 1982; Христосков и Петков, 1987; Христосков, 2000). Наименованията на зоните в повечето случаи е аналогично избрано по примера на цитираните работи, с добавяне на зона Вранча, която е изцяло на румънска територия, но има сериозно макросеизмично въздействие върху територията на България, а зона Неготинска крайна (известна още като Видинска сеизмична зона) е разширена и обхваща по-голяма част от сръбска територия, тъй като на българска територия зоната има слаба съвременна сеизмичност, а откъм Сърбия, зоната оказва известно макросеизмично въздействие по нашите земи. За удобство по-голямата част от зоните са изчертани с правоъгълници, а зони Z7, Z8 и Z9 – с многоъгълници.

Подробен списък на всички 338 земетресения с определени фокални механизми е представен в таблица 3.2.1. в дисертацията, включващ информация за дата (Date), час и минута на всяко събитие (Time), географски координати (Lat, Long в градуси), дълбочина (Н в километри) магнитуд (M_L локален), , азимутален ъгъл (Strike1, 2), ъгъл на затъване (Dip1, 2) и ъгъл на отместване (Rake1, 2) на двете нодални равнини, азимутален ъгъл (az) и ъгъл на затъване (pl) за осите на компресия (P), екстензия (T) и нулева ос (B) (всички мерни единици на ъгли са в градуси), тегловен коефициент на всяко събитие (Q) определени според нуждите на програмата за определяне на регионалния тензор на напреженията (1 е най-нисък, а 4 е най-висок - по-подробна информация е представена в Глава 4), зона (Zone – аналогични на фиг. 3.2.1.а.), в която попадат фокалните механизми и източника на информация (Ref.).

Всички авротски фокални механизми на земетресения с тегловни коефициенти 3 и 4 са с отклонения на ъглите на нодалните равнини до $\pm 10^\circ$, ъглите на нодалните равнини на фокалните механизми с тегловен коефициент 2 не надвишават отклонения от $\pm 13^\circ$, а механизмите с тегловен коефициент 1 – $\pm 15^\circ$ съответно, като при по-голямата част от механизмите с тегловни коефициенти 1 и 2 само един от ъглите (азимутален ъгъл, ъгъл на затъване или ъгъл на отместване на двете крила) надвишава отклонението от $\pm 10^\circ$.

3.1.1. Сеизмична зона Вранча (Z1 на фиг. 3.2.1.): Включва източните части на Южните Карпати на територията на Румъния, като се намира на северната граница на Мизийската плоча. Основната морфоструктура е планината Вранча. Предкарпатската депресия (Фоксанска депресия) се определя от т. нар. „Прикарпатска линия“ (Popescu, 1965), представляваща една дългоживуща система от разломи. През мезо-неозоя по „Прикарпатската линия“ е станало значително потъване на Предкарпатската депресия, в резултат на което тя е запълнена с мощни наслаги. И до днес, дълбоко в мантията коров реликт от древна субдукция провокира множество съвременни, а някои силни междиннофокусни земетресения (Йовчев и др., 1971).

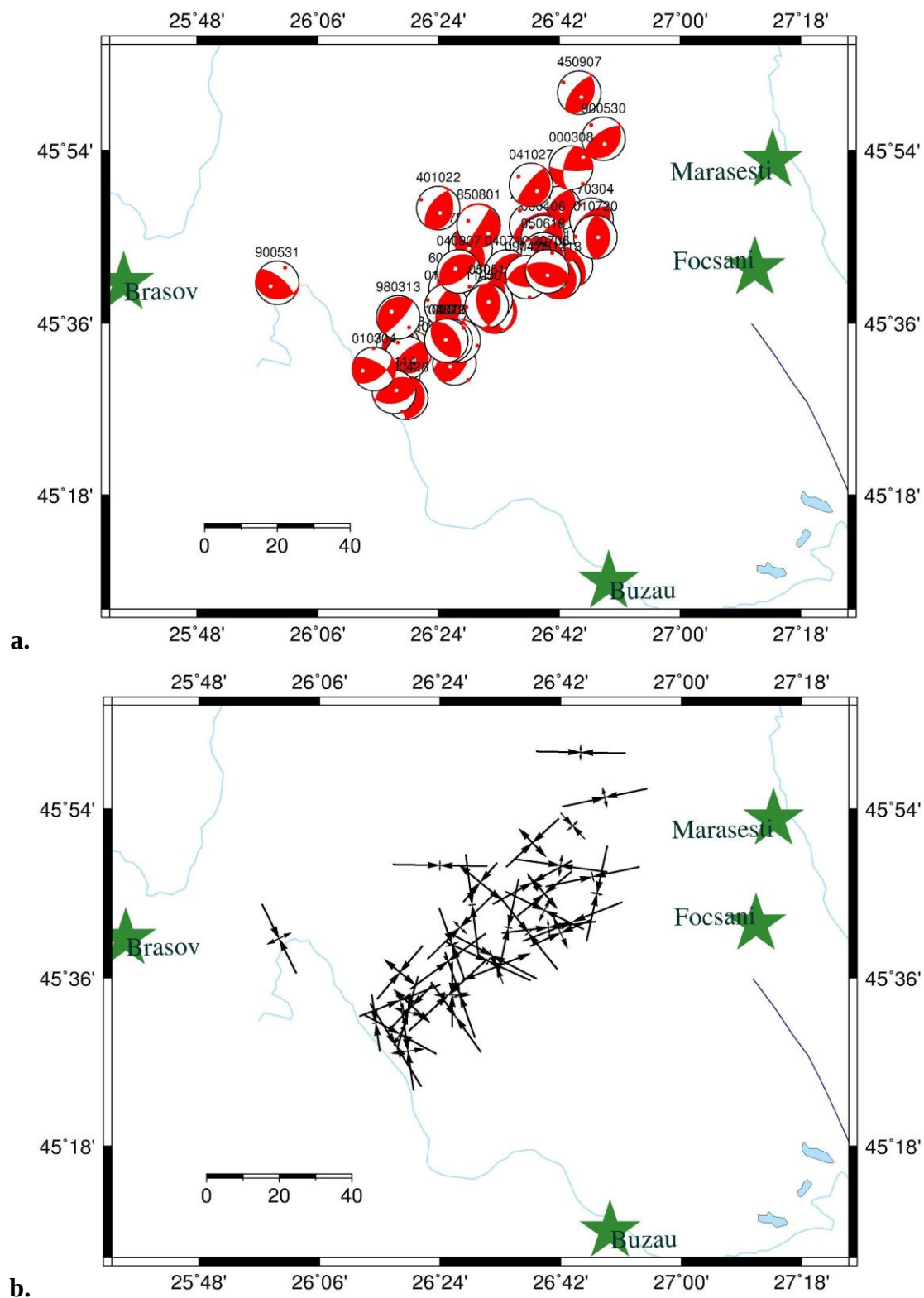
Вранчанска сеизмична зона се характеризира с относително дълбоки хипоцентри (80-160 km, рядко по-дълбоки). Зоната често оказва сериозно макросеизмично въздействие върху североизточните части на България, като по-силните събития се усещат по цялата територия на стараната и могат да причинят сериозни материални щети и по-лошо – човешки жертви. По тази причина зоната се разглежда в дисертационния труд.

На фиг. 3.2.2.a. са представени 37 фокални механизма на огнищата на земетресения в периода 1940 – 2013 г. Магнитудите на земетресенията варират от 4.6 до 7.4 по Рихтер. Земетресенията са междиннофокусни с дълбочина варираща от 73km до 166 km, а само едно събитие се отличава с по-значителна дълбочина от 265 km. 36 от 37-те фокални механизма на земетресенията са от възседен тип, някои с малки отседни компоненти, с азимутални направления на поне една нодална равнина в посока югозапад-североизток.

Фиг. 3.2.2.b. илюстрира проекциите на осите на компресия Р и декомпресия Т, получени от решенията на механизмите на земетресенията. Зоната е подложена на режим на компресия, но не се очертава ясен тренд на групиране на осите на компресия. Очертава се известно север-северозапад – юг- югоизток направление на осите на минимална компресия Т. Ъглите на затъване на Р-осите значително надвишават тези на Т-осите. Тези данни потвърждават установеният от Георгиев (1993) модел на регионалното тектонско поле на напреженията за тази област.

Условията на реализиране на сеизмичните огнища в земната мантия и разпространението на сеизмичните лъчи се различават съществено в сравнение със земетресенията реализирани в земната кора (до 40-50 km). За подобни събития се използва различен скоростен модел, който да отговаря на специфичните условия на региона. По

тези причини фокалните механизми за региона на сеизмична зона Вранча не са определяни от автора на дисертацията.



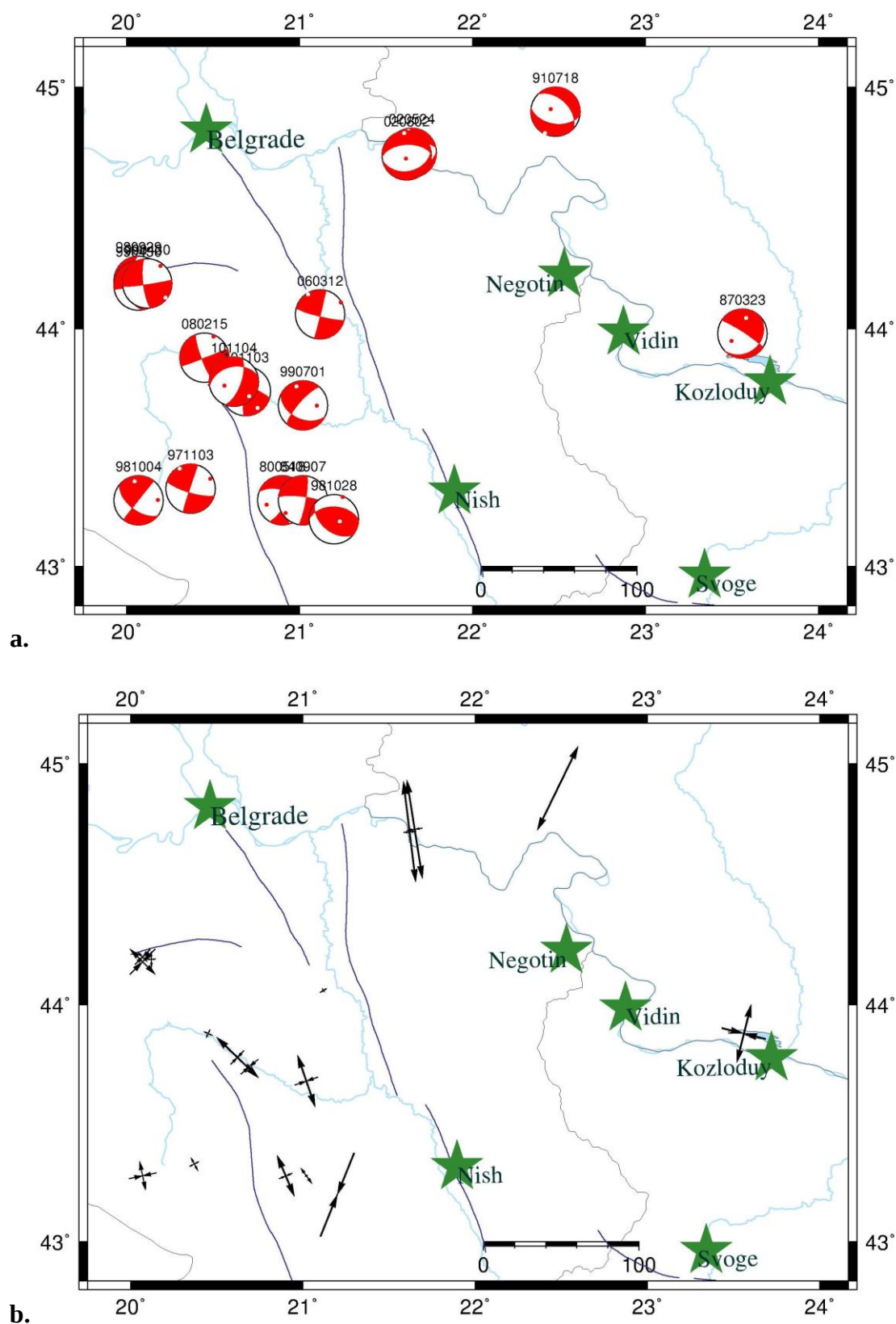
Фиг. 3.2.2.а. Териториално разпределение на 37 фокални механизма в сеизмична зона Вранча, Румъния; **б.** хоризонтални проекции на осите на компресия Р и декомпресия Т. Тектонска карта: Barrier et al. (2004), Georgiev et al.(2007).

3.1.2. Сеизмична зона Неготинска крайна (Видинска зона) (Z2 на фиг. 3.2.1.) – В тази зона се включват най-западните части на Мизийската платформа, Предбалканът и Южните Карпати – силно изтеглена на сръбска и румънска територия. Основната тектонска морфоструктура на българска територия е Ломската грабенова депресия. Източната граница на зоната се асоциира с долината на река Искър. Северозападните части на България са една стабилна в сеизмично и тектонско отношение зона от Мизийската платформа. Зоната има слаба съвременна сеизмична активност на българска територия - най-слабата сеизмичност за територията на цялата страна, но известно макросеизмично влияние от към сръбската част на зоната, в близост до градовете Ниш и Неготин. На румънска и сръбска територия, зоната се намира на границата между Вардарската тектонска зона и Сръбско-Македонския масив.

Земетресенията с определени фокални механизми са 17 на брой, с Магнитуд $M_L > 4$ и дълбочина до 10 км (фиг. 3.2.3.a.). 15 от предложените механизми са разположени на сръбска територия и само два са на румънска. На българска територия няма определени механизми.

В западната част на зоната преобладават отседният и отседно-разседният тип фокални механизми, със субхоризонтални оси на максимална компресия (Р-оси) и максимална декомпресия (Т-оси). Осите на компресия са в направление североизток-югозапад, а тези на декомпресия в направление северозапад-югоизток, с малко по-малки ъгли на затъване, като определят слабо доминиращ екстензионен режим в региона (фиг. 3.2.3.b.). Има само един възседен фокален механизъм с минимална отседна компонента, който се намира в близост до гр. Ниш.

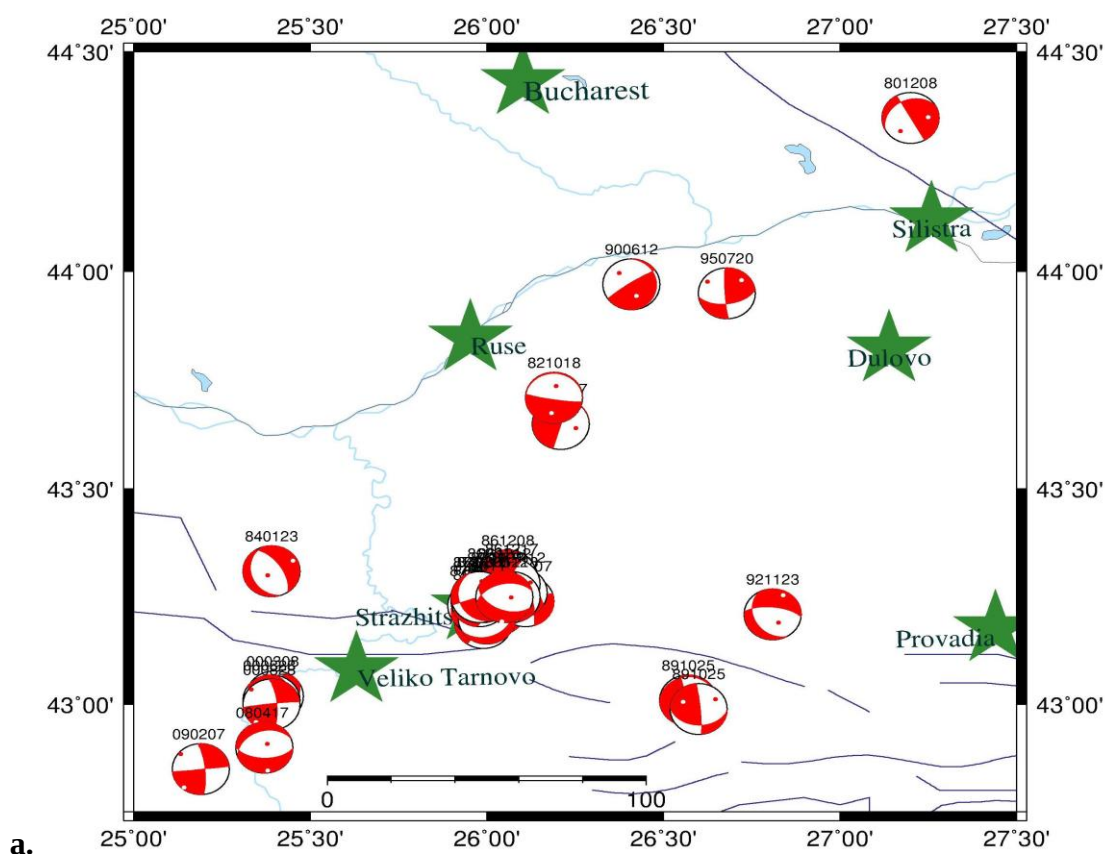
В северната част на зоната се разполагат едва 4 фокални механизма от разседен тип, с нищожна отседна компонента (фиг. 3.2.3.a.). Преобладава известна екстензия с направление североизток-югозапад (фиг. 3.2.3.b.), но малкият брой налични решения на механизми на огнищата на земетресения в региона е недостатъчен за потвърждаване на екстензионен режим, въпреки че тези данни потвърждават установеният от Георгиев (1993) модел на регионалното тектонско поле на напреженията за областта на Карпато-Балканската дъга.

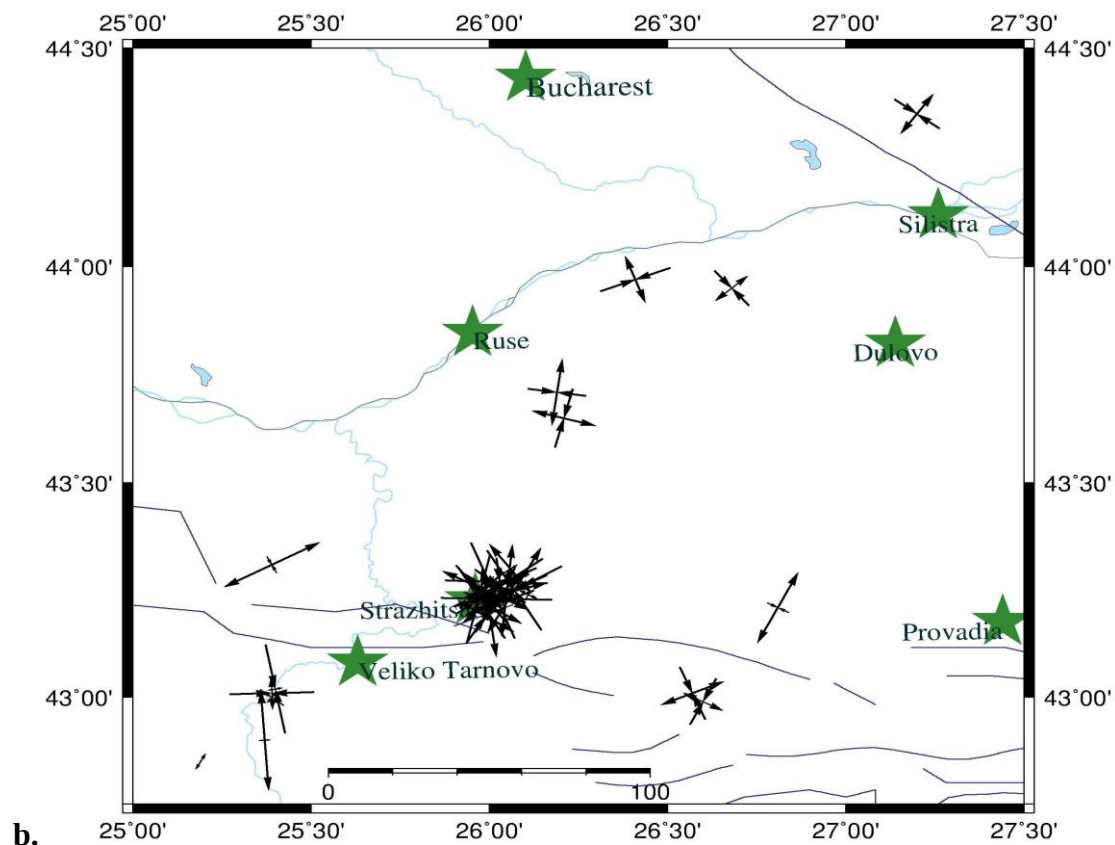


Фиг. 3.2.3.а. Териториално разпределение на 17 фокални механизма в сеизмична зона Неготинска крайна; **б.** хоризонтални проекции на осите на компресия Р и декомпресия Т. Тектонска карта: Barrier et al. (2004), Georgiev et al.(2007).

3.1.3. Сеизмична зона Горна Оряховица (Z3 на фиг. 3.2.1.а.) се намира в централната част на Северна България и включва централните части на Мизийската платформа и Предбалкана, както и северната ивица от същинския Балкан или Стара планина (Botev, 2000; Botev et al., 2002; Ботев, 2011). В тази зона се включва Попово-Масларевският хорстовиден вал, където се локализирант няколко издигания: Буховско-Буйновско, Поповско, Ресенско-Масларевско. В северозападните части на Горно-Оряховската зона се намира Беленската грабенова система.

В Горнооряховска сеизмична зона са определени общо 41 фокални механизма, като възседният и разседният тип са приблизително еднакъв брой (фиг.3.2.4.а.). Средната дълбочина на хипоцентъра на земетресенията е около 13 км, като има само едно събитие, което е с дълбочина под 5 км. През последните 25 години зоната се характеризира със сравнително ниска сеизмичност. Едва 9 от наличните 41 броя фокални механизма са определени след 1990 г., всички останали събития са станали в периода 1980-1989 г., като основният брой е реализиран 1986-1987 г. по Стражишката разломна система.





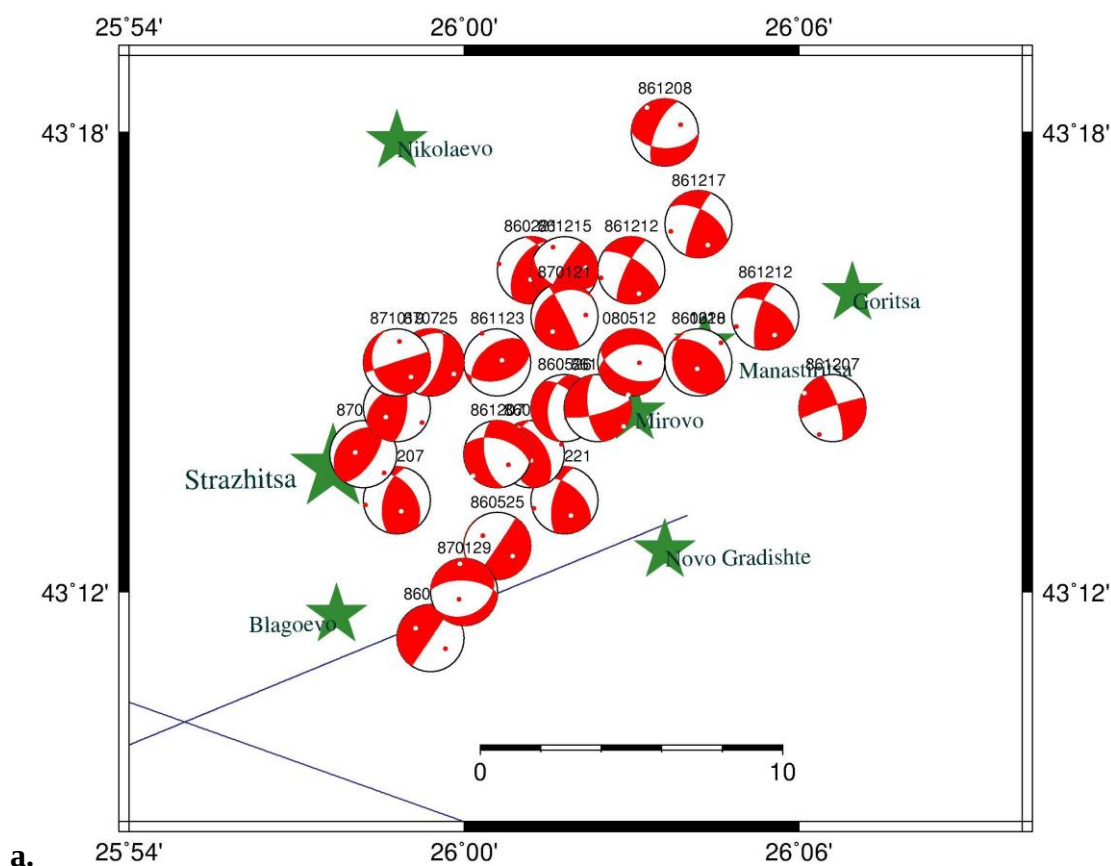
Фиг. 3.2.4.а. Териториално разпределение на 41 фокални механизма в сеизмична зона Горна Оряховица; **б.** хоризонтални проекции на осите на компресия Р и декомпресия Т. Тектонска карта: Barrier et al. (2004), Georgiev et al.(2007).

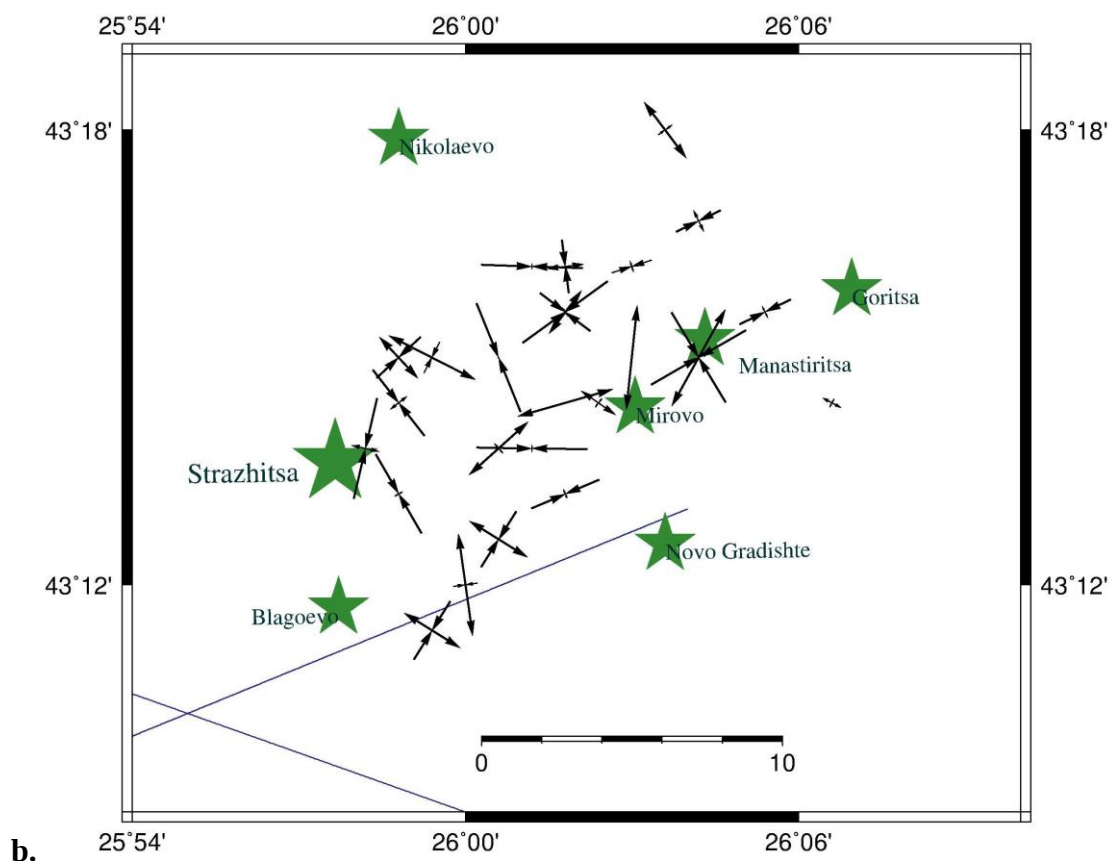
Нодалните плоскости на събитията за сеизмична зона Горна Оряховица са с големи вариации, поради което не може да се говори за обединяващ тренд в техните азимутални направления и наклони. От проекцията на осите на компресия Р и екстензия Т (фиг. 3.2.4.б.) на дифузно разпръснатите по зоната фокални механизми, се забелязва известен екстензионен режим в север-североизток – юг-югозападно направление, но той не може да бъде категорично потвърден, поради малкия брой налични решения на механизми.

По североизточното продължение на Ресенско-Масларевския ров е разположена Стражишката депресия, в чиято източна покрайнина (и продължението и на североизток) през 1986 г. се реализира много дълга земетръсна поредица с максимален магнитуд $M_s=5.7$ (Oncescu et al., 1990). Тази сеизмична проява се свързва с 25 км дълъг сегмент на кватернерно активния Стражишки разлом. Забелязва се известно североизток-югозапад направление на поне една от нодалните равнини, като ъглите на затъване са с големи вариации. В тази огнищна зона преобладаващият вид разломно движение е възседния

фокален механизъм, но значима част от решенията на механизмите (10 от общо 27 на брой) са разседно-отседни (фиг.3.2.5.а.).

Разглеждайки проекциите на осите на компресия (Р-осите) на локалните напрежения в огнище Стражица, се забелязва ясен режим на компресия, като по линията с.Благоево - с.Горица компресията е с североизток-югозападен тренд, а успоредната на тази линия, започваща от гр.Стражица, компресионният режим се променя от югоизток-северозапад до североизток-югозападен. Тази голяма промяна в посоката на локалните напрежения вероятно се дължи на известна хетерогенност в средата, което се потвърждава от работата на Oncescu et al. (1990). Това потвърждава резултатите от прецизните триангулационни измервания, извършени в сеизмичната зона в района на гр. Стражица от Дянков (1988), които показват, че в региона доминира всестранно свиване. Характерно за наклоните на Т-осите е отсъствието на субвертикално положение, като рядко надвишават дори 70° , въпреки доминиращия компресионен режим. Повече от 25% от тях са със субхоризонтални ъгли (от 0° до 15°).



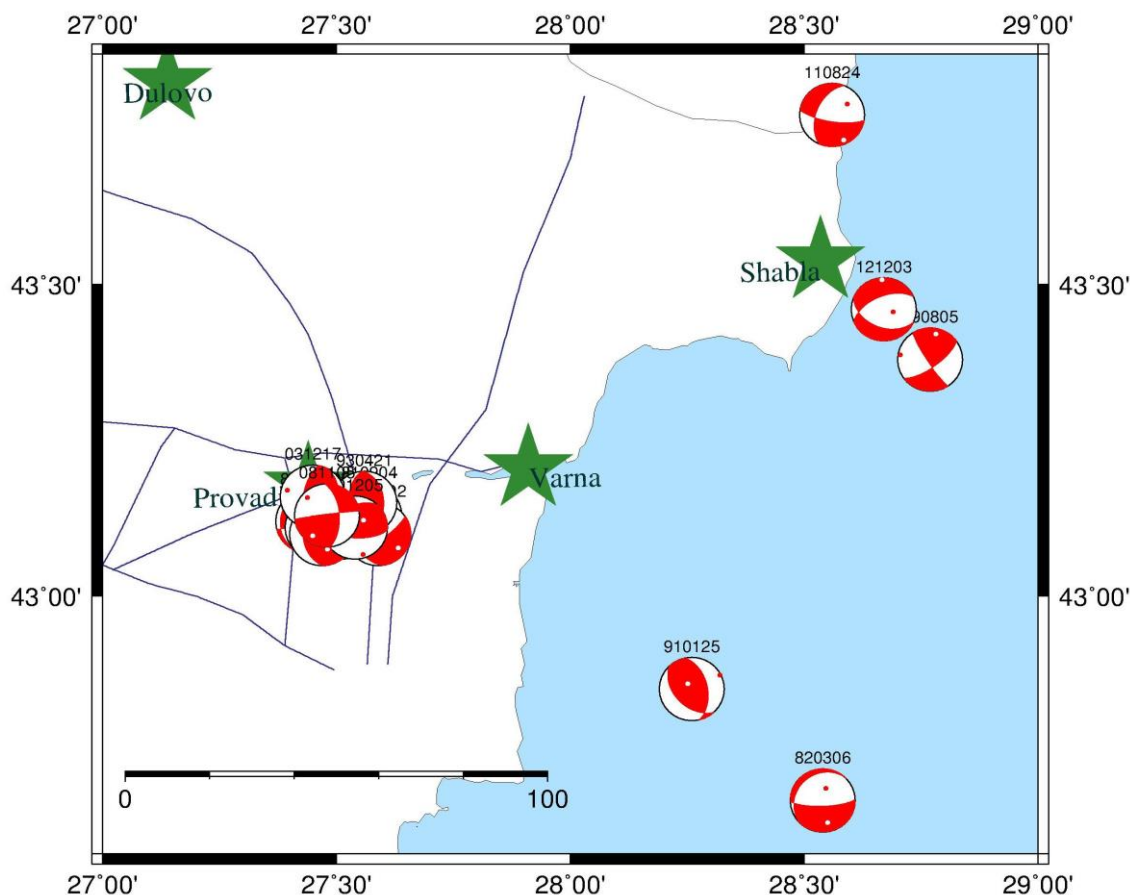


Фиг. 3.2.5.а. Териториално разпределение на 27 фокални механизма в сеизмична зона Горна Оряховица, огнище Стражица. **б.** хоризонтални проекции на осите на компресия Р и декомпресия Т. Тектонска карта: Barrier et al. (2004), Georgiev et al.(2007).

3.1.4. Сеизмична зона североизточна България (Z4 на фиг. 3.2.1.) включва Източната периферна част на Мизийската платформа и Предбалкана, както и северната ивица от Източна Стара планина (Botev, 2000; Botev et al., 2002; Ботев, 2011). Основната тектонска морфоструктура тук е Северобългарското хорстово подуване, което има асиметричен строеж и югоизток-северозападна ориентировка. Шабленската сеизмична зона съдържа система разломи, ориентирани в посока север–североизток – юг–югозапад, отделяйки платформата от падината на рифтогенния басейн в западната част на Черно Море.

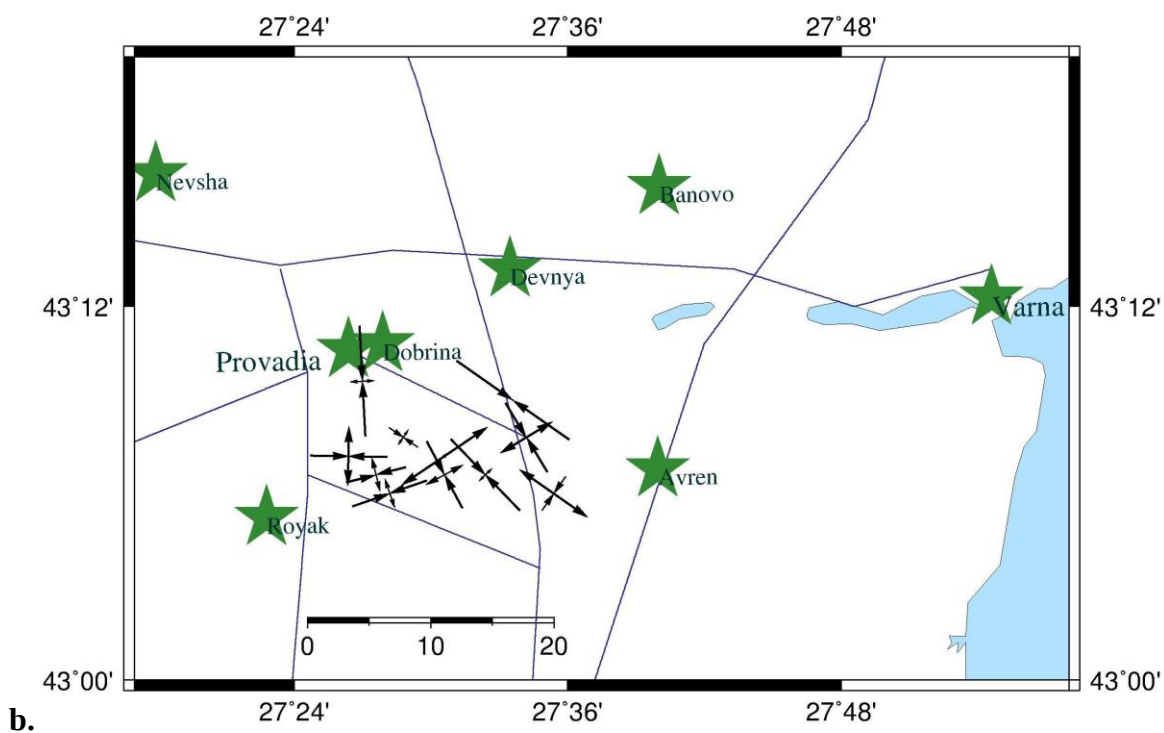
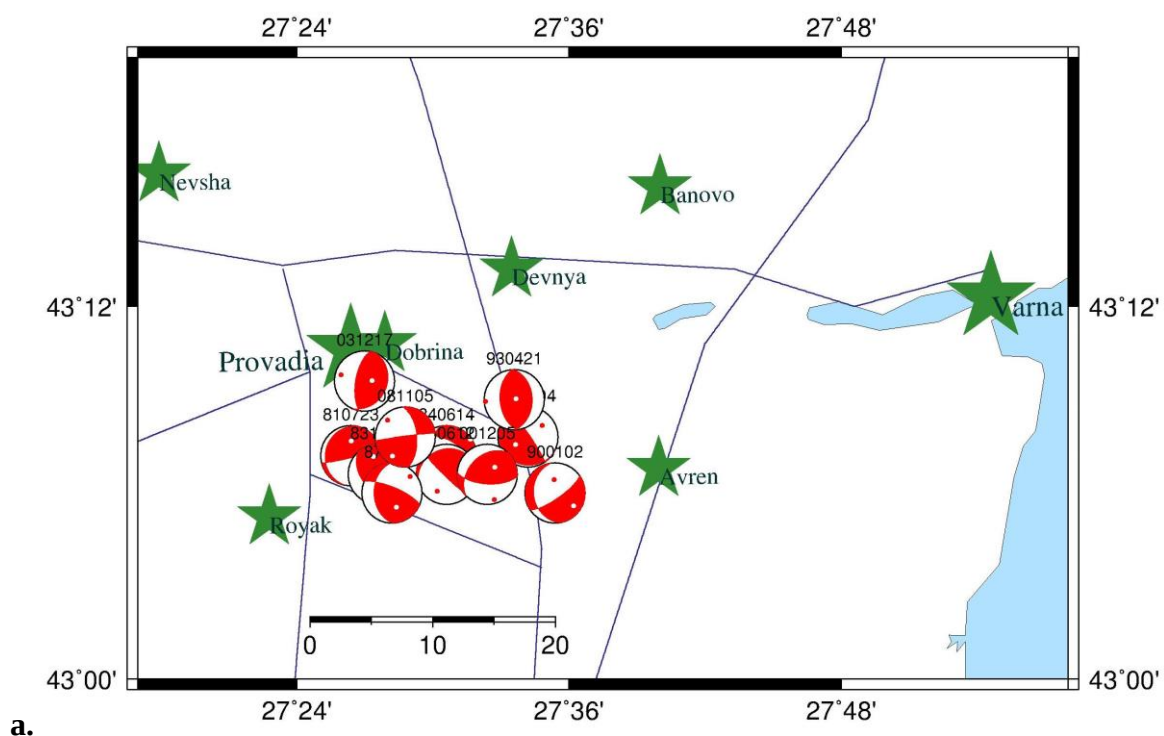
Дълбочината на земетресенията с определени фокални механизми рядко надвишава 10 km. Процента на възседните фокални механизми в зоната е относително голям. В източната част на зоната – акваторията на Черно море са определени едва 5 фокални механизма – два разседно-отседни, два възседно-отседни и един отседно-възседен (фиг. 3.2.6). Основната причина за ниския брой решения е големият азимутален GAP (максимален ъгъл без станции), който се разкрива от изток. Единствено за по-силни

събития може да се търсят данни от станции, намиращи се на изток от Черно море. Няма ясен азимутален тренд на разпространение на нодалните равнини, осите на опън и натиск и съответстващите им ъгли на затъване за събитията в акваторията на Черно море.



Фиг. 3.2.6. Териториално разпределение на 16 фокални механизма в сеизмична зона Североизточна България. Тектонска карта: Barrier et al. (2004), Georgiev et al.(2007), Георгиев и др. (1985), Боков и Чемберски (1987), Botev et al. (2007).

Дългогодишната експлоатация на Мировското солно находище предизвиква негативни геомеханични въздействия и повишаване на слабата сеизмична активност в района. След въвеждане в експлоатация на Провадийската сеизмична локална мрежа се вижда, че количеството на слабата сеизмичност в района е съпоставима с количеството слаби трусове в известните с катастрофални земетресения Струмска и Средногорска зони (Botev et al., 2004; Милев и др., 2005). Само две от единайсетте определени фокални механизма за огнище Провадия са от разседен тип (фиг. 3.2.7.а.). Някои от механизмите притежават известна отседна компонентата. Не се забелязва общ тренд в направлението на нодалните плоскости. Не се забелязва също обединяващ тренд в направленията и наклоните на Р- и Т-осите на локалните напрежения (фиг. 3.2.7.б.).



Фиг. 3.2.7.а. Териториално разпределение на 11 фокални механизма в сеизмична зона Североизточна България, огнище Провадия; **б.** хоризонтални проекции на осите на компресия Р и декомпресия Т. Тектонска карта: Barrier et al. (2004), Georgiev et al.(2007), Георгиев и др. (1985), Боков и Чемберски (1987), Botev et al. (2007).

Някакво обяснение за значителния процент възседни механизми по Калиакренската и даже Провадийската разломни системи - и двете успоредни на Черноморския бряг, може да се потърси в тектонския натиск на плочата с океански тип земна кора предизвикан от меридионалното отваряне на кората в централната част на Черно море (Botev et al., 2002).

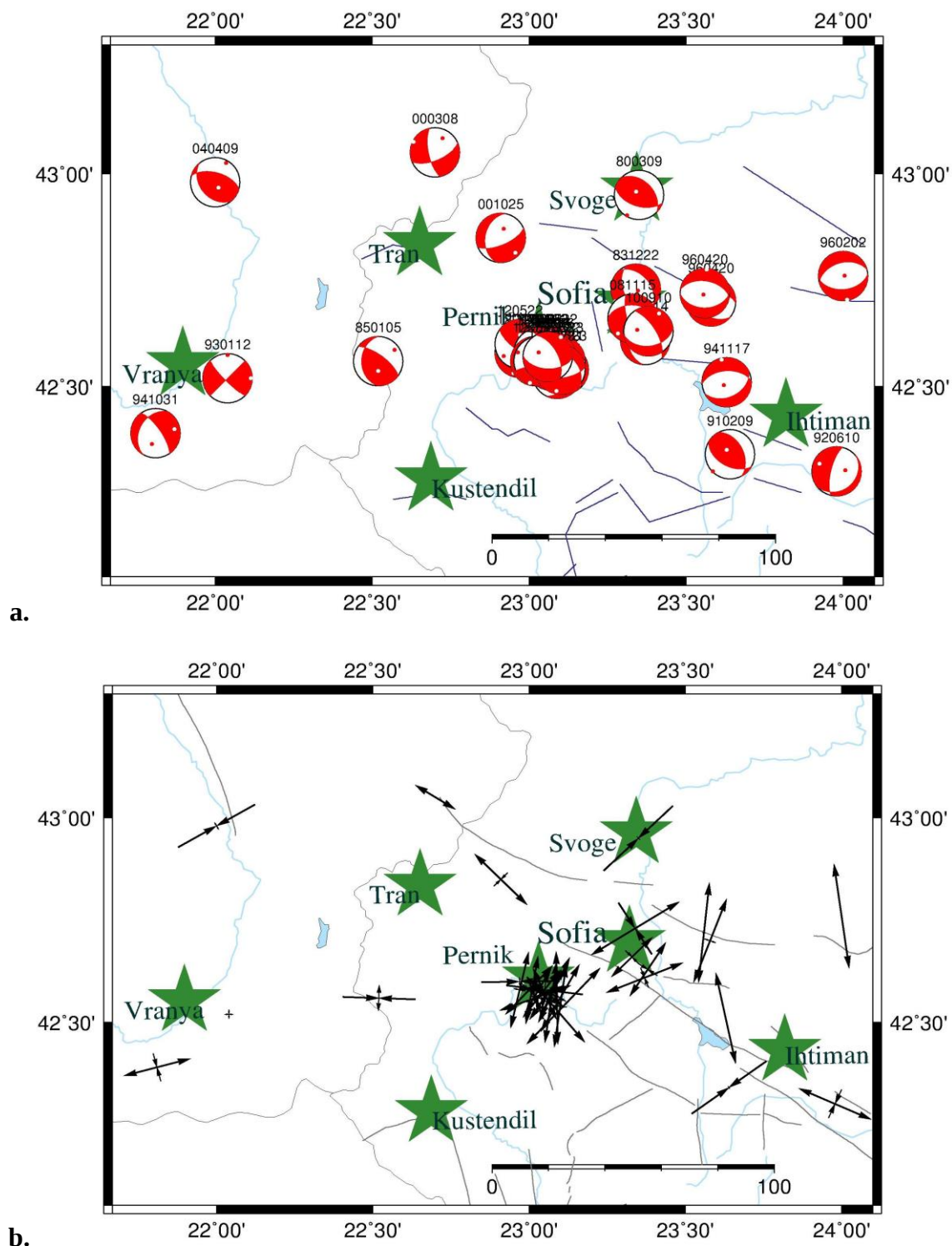
3.1.5. Софийската сеизмична зона (Z5 на фиг. 3.2.1.), включва западната част на Маришката структурна провинция, както и южната ивица от Западна Стара планина. На запад зоната се изтегля в сръбска територия, а на юг граничи със Струмската зона. Основната тектонска морфоструктура тук е Софийската асиметрична грабенова депресия, която притежава северозападно ориентирано удължаване. Основни кватернерно активни разломи тук са Витошкият, разположен в южната периферия на Софийския грабен и северно разположеният Задбалкански дълбочинен разлом (Йовчев и др., 1971).

Западните части на Софийската зона се отделят от някои автори (Бончев, 1962; Botev, 2000; Botev et al., 2002; Ботев, 2011) на отделна Кюстендилска зона, тъй като основната тектонска морфоструктура тук е Краищидната купуловидна нагъната формация, която се различава значително по геолого-тектонски строеж и сеизмичност от Софийската грабенова система. В дисертацията подобно разделение се обезсмисля, от гледна точка на едва шест определени фокални механизма на огнищата на земетресения, които са разпръснати по цялата област.

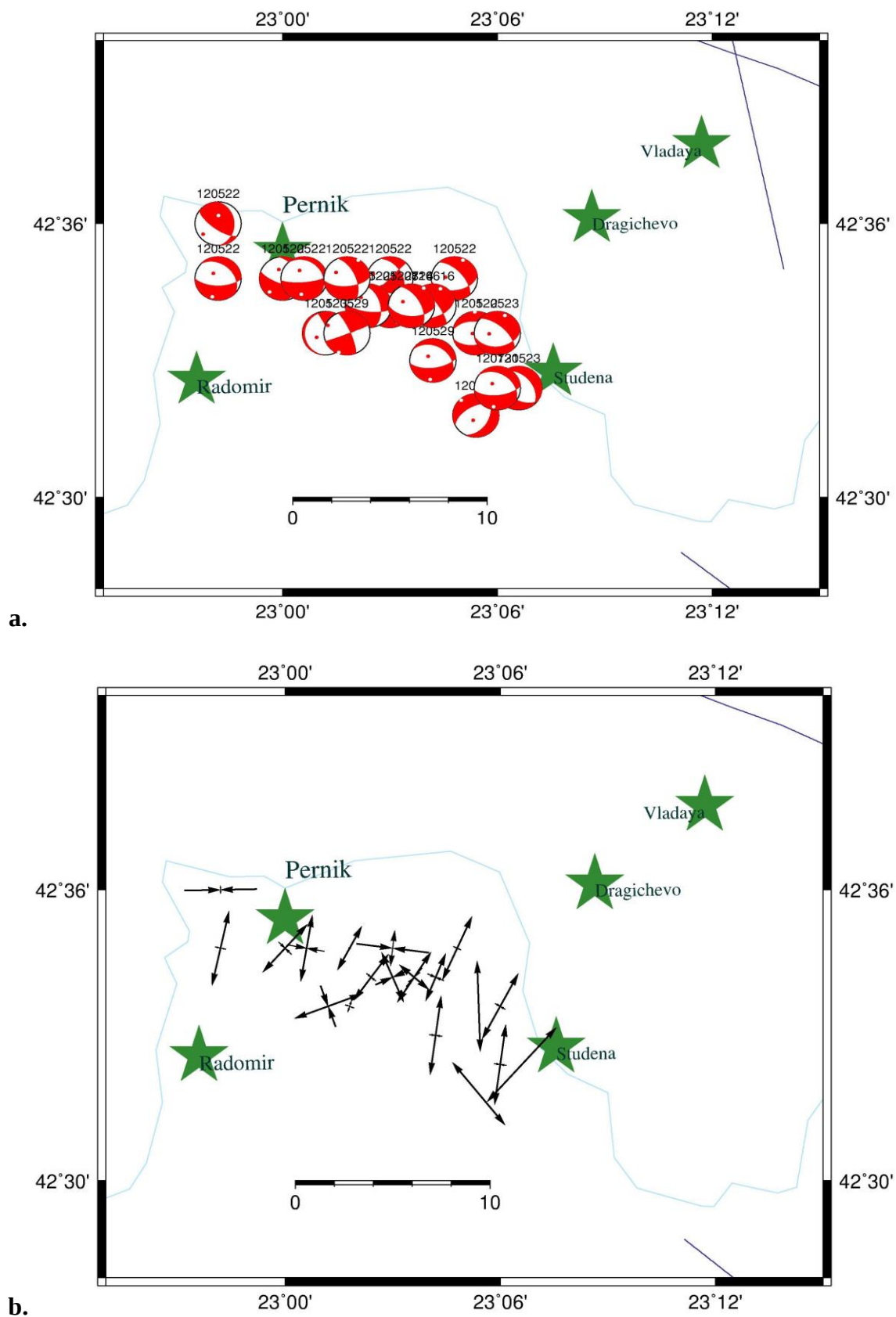
Земетресенията с обработени фокални механизми в сеизмична зона София са 37 на брой (фиг. 3.2.8.a.). Западно разположените пет земетресения се асоциират по-скоро с Кюстендилската сеизмична зона, както беше споменато по-горе. На територията на Софийската депресия определените фокални механизма са шест, като те са от нормален разседен тип, някои с малки отседни компоненти и нодалните им плоскости са субпаралелни на бордовете на грабена, разположени на север и на юг. Интересно е, че нодалните равнини на почти всички останали фокални механизма около Софийската котловина следват същия запад-северозапад – изток-югоизток тренд на разломяване, включително трите възседни фокални механизма. Наклоните на двете нодални равнини също показват еднотипност при градусите на затъване - средни стойности 51-53°.

Осите на декомпресия (Т-осите) на локалните напрежения за района на Софийската котловина притежават субхоризонтална север-североизток – юг-югозапад ориентация, а Р-осите са субвертикални (фиг. 3.2.8.b.). Този резултат, се съгласува добре с геоложката

концепция за Късно-Алпийската еволюция на Софийската депресия с добре известна продължителна фаза на потъване на самия грабен (Бончев, 1962).



Фиг. 3.2.8.a. Териториално разпределение на 37 фокални механизми в Софийска сеизмична зона; **b.** хоризонтални проекции на осите на компресия Р и декомпресия Т. Тектонска карта: Barrier et al. (2004), Georgiev et al.(2007).



Фиг. 3.2.9.а. Териториално разпределение на 20 фокални механизми в Софийска сеизмична зона, Огнище Перник; **б.** хоризонтални проекции на осите на компресия Р и декомпресия Т. Тектонска карта: Barrier et al. (2004), Georgiev et al.(2007).

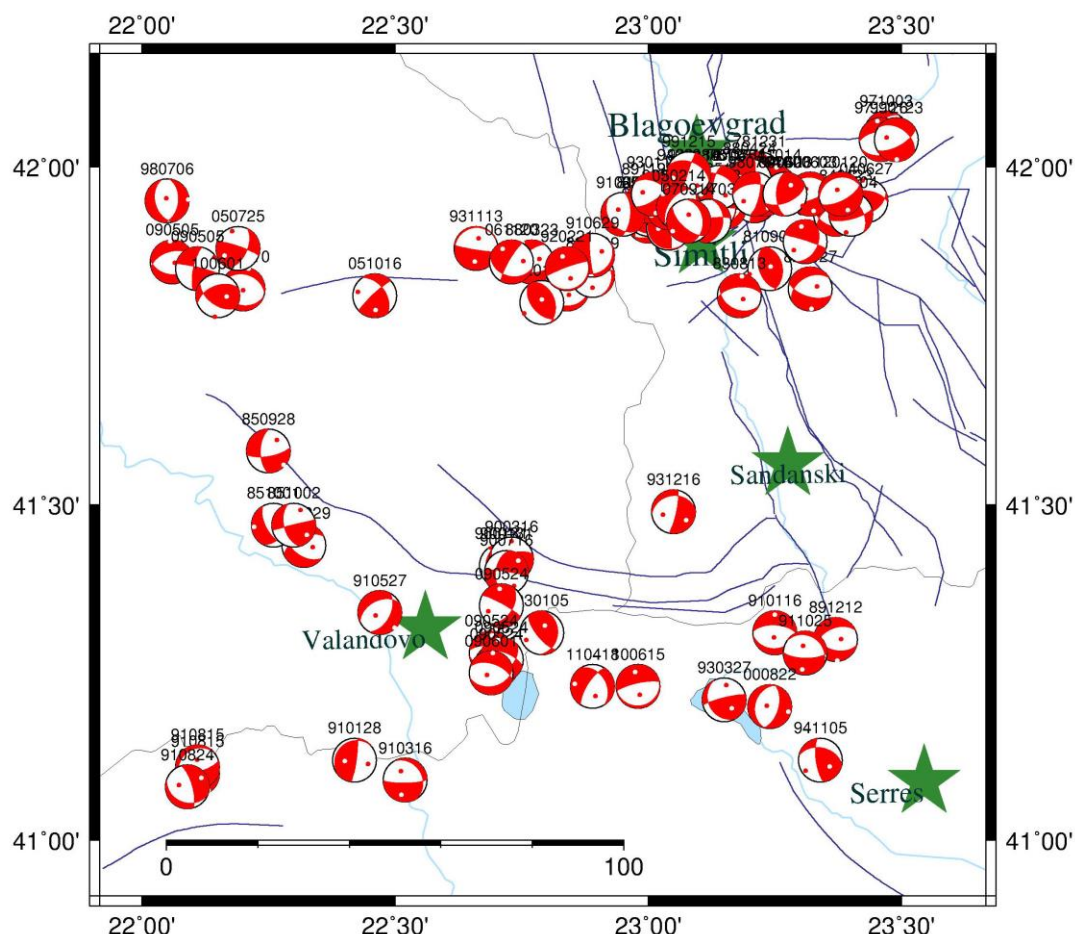
На фиг. 3.8.9.а. са представени фокалните механизми определени от регистрираното на 22 май 2012 г. край град Перник земетресение ($M_L = 5.8$) и 19 от по-силните афтершоци ($M_L \geq 3$). Всички земетресения притежават поне една нодална равнина с направление северозапад – югоизток (средно 311°), която може да бъде приета за разломна. Това северозапад – югоизточно направление на разломната равнина съвпада с направлението на разломът Перник-Белчин, като средното затъване на разломната равнина е около 50° . 18 от определените фокални механизми показват дясностоящо, разседно разломяване с малки отседни компоненти, един механизъм е чисто отседен, а най-северозападният е възседен с малка разседна компонента.

Фокалният механизъм на главното събитие е определен от 49 първи встъпления на Р-вълната, като се смята, че то е реализирано по разлом без повърхностни изяви, причинено от регионалния екстензионен режим в района (Botev et al., 2013b). За екстензионен режим свидетелстват също проекциите на осите на компресия Р и екстензия Т (фиг. 3.2.9.b), получени от определените фокални механизми. Осите на опън показват субхоризонтален (средно 15° затъване) екстензионен режим в север-североизток – юг-югозападно направление, като осите на компресия са със средно затъване около 51° . Този екстензионен режим съответства на определения за южна България (Van Eck and Stoyanov, 1996 и др.) и потвърждава хипотезите, че неотектонските движения в района на Балканския полуостров са причинени в следствие на дълготрайни движения във вътрешната част на Егейския и централните части на Балканския региони.

3.1.6. Струмската сеизмична зона (Z6 на фиг. 3.2.1.) е разположена в Югозападна България и обхваща южната част на Струмската структурна провинция, както и западната част на Родопската структурна провинция (Рилският и Пиринският хорст) и източната на Сърбо-македонския масив (Беласишка и Огражденска планина). На запад зоната се простира в сръбска и македонска територия, а на юг навлиза в Гърция (Botev, 2000; Botev et al., 2002; Ботев, 2011).

Високата честота на слабите земетресения в последните три десетилетия определя и големия брой определения на фокални механизми в тази зона (фиг. 3.2.10). Над 80% от 92-те решения на механизми в зоната са с преобладаващо нормален разседен характер, но и със значителна отседна компонента на движение по нодалните плоскости, като преобладава изток-запад направление на поне една от нодалните равнини. Това направление съвпада с ориентацията на Крупнишката и Беласишка разломни системи. Поради голямото наличие на различни по вид и насоченост разломни структури е

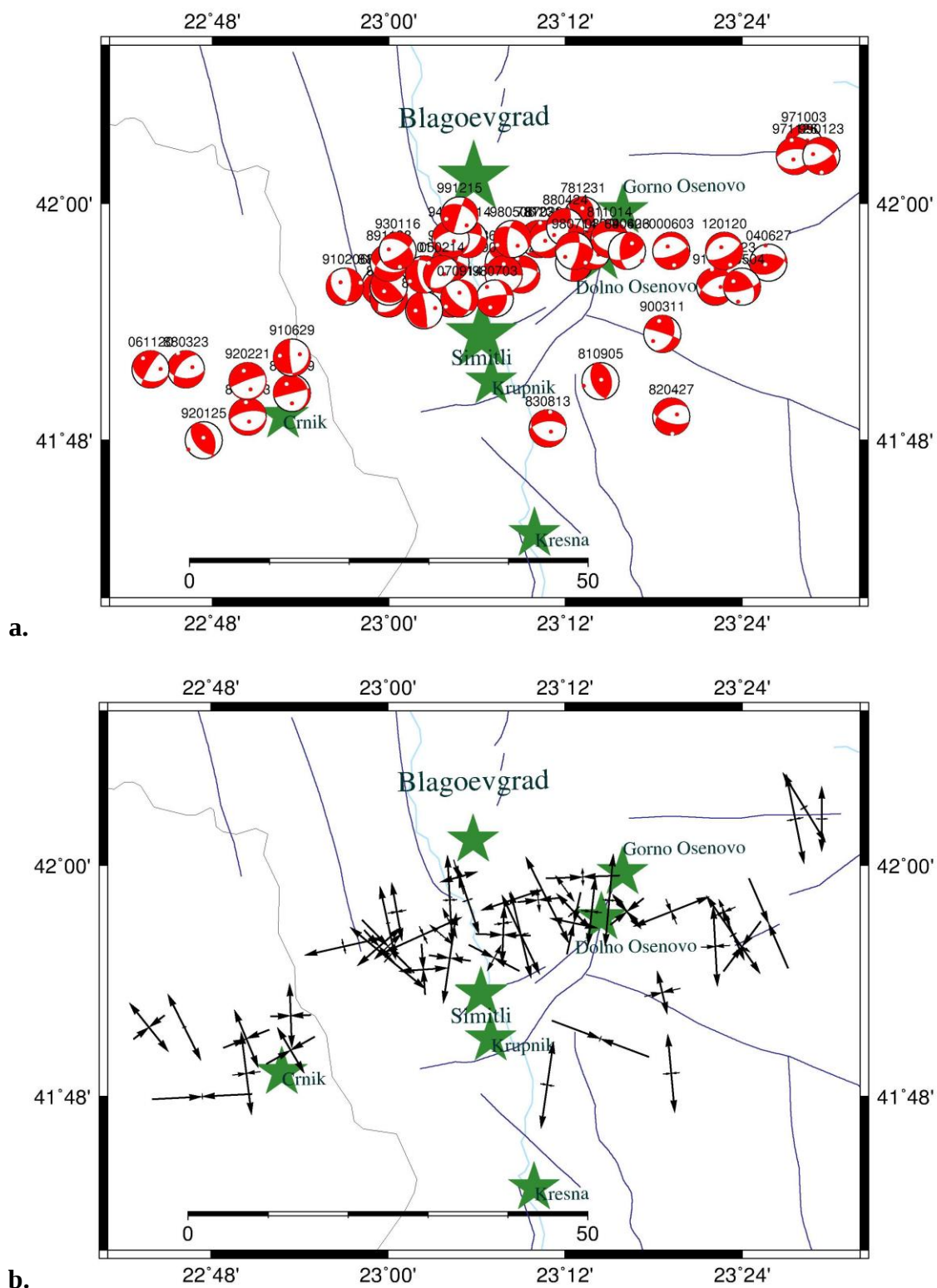
изключително сложно отнасянето на всеки фокален механизъм към конкретен разлом, въпреки съвместните геоложки, геодезични и сеизмολожки изследвания проведени от Meyer et al. (2002), Georgiev et al. (2006a), Tranos et al. (2006) и др., които изследват вида, посоките на затъване и активността на основните разломи в Крупнишката и Беласишката разломни системи.



Фиг. 3.2.10. Териториално разпределение на 92 фокални механизма в Струмска сеизмична зона. Тектонска карта: Barrier et al. (2004), Georgiev et al.(2007).

На фиг. 3.2.11.а. са представени 54 от 60-те фокални механизма за Крупнишката разломна система, които са на или в близост до българската територия. Ясно си личи изток-запад направлението ($70^\circ - 90^\circ$) на поне една от нодалните равнини за повечето от фокалните механизми, които могат да се отнесат към Крупнишката разломна система. Интересен е фактът, че около 15% от определените фоклани механизми показват север-юг направление на нодалните равнини, което съвпада с направлението на първоранговата Струмска разломна система. Едва около половината от получените решения показват ъгли

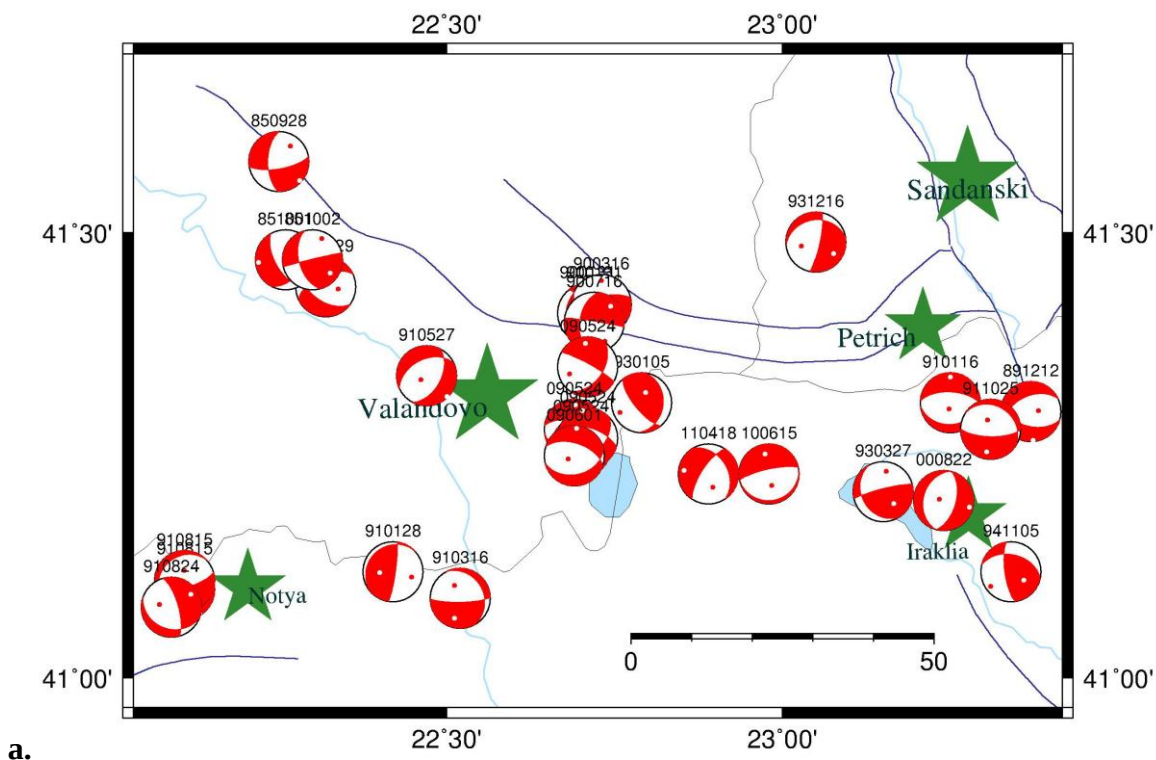
на затъване между 40° и 60° , поради което може да се каже, че няма ясен тренд за групиране на този параметър.

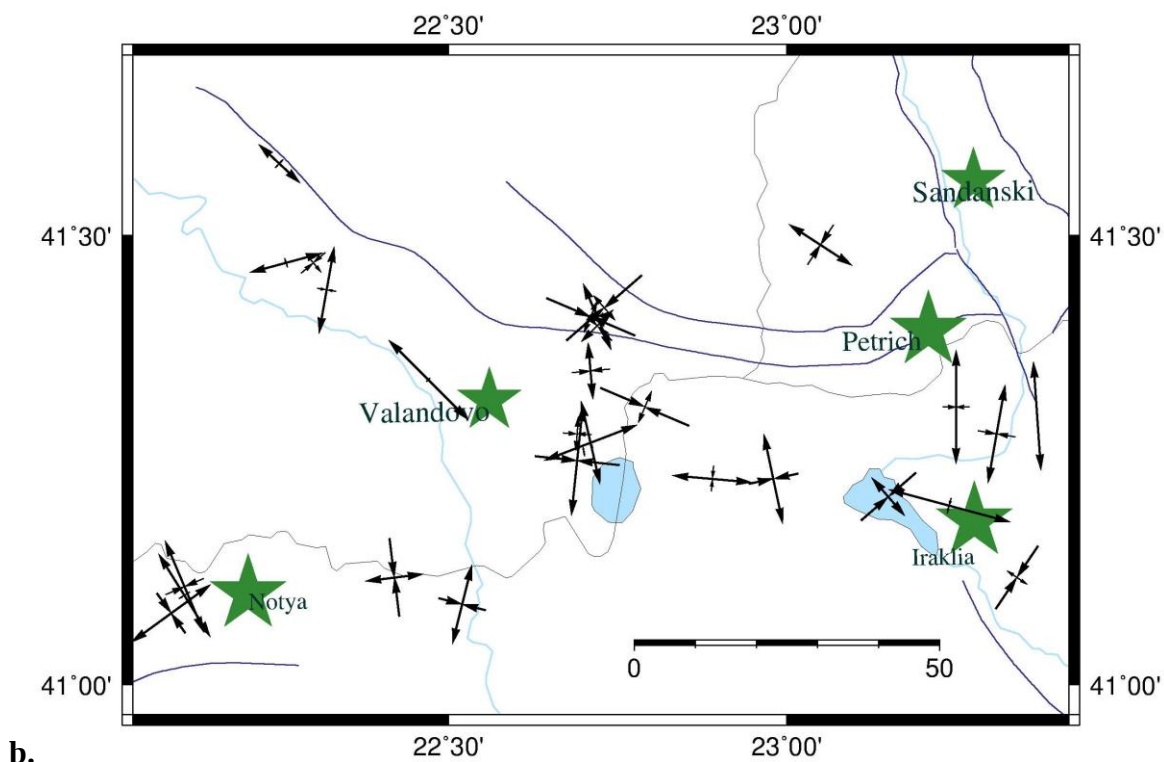


Фиг. 3.2.11.а. Териториално разпределение на 54 фокални механизма в Струмска сеизмична зона, Крупнишка разлома система; **б.** хоризонтални проекции на осите на компресия Р и декомпресия Т. Тектонска карта: Barrier et al. (2004), Georgiev et al.(2007).

Проекциите на осите на опън, получени от определените фокални механизми, показват почти субхоризонтално север-северозапад – юг-югоизток направление, което показва екстензионен режим и в тази област. Този екстензионен режим се потвърждава и от изследванията проведени от други автори (Georgiev, 1987; Van Eck and Stoyanov, 1996; Dobrev et al., 2014 и др.). Няма ясен тренд на разпространение на Р-осите, Единствено 15-те процента от решенията, които биха могли да се отнесат към разломите от Струмската разломна система показват, отново субхоризонталност на осите на опън, но в изток-североизток – запад-югозападно направление. Ъглите на затъване на Р-осите надвишават значително тези на Т-осите, като за решенията от разседен тип са в границата 40° - 80° .

Поне една от нодалните равнини от Беласишката разломна система също следва изток-запад направление (фиг. 3.2.12.а.). Преобладаващият тип разломно движение и тук е разседното, като около половината от механизмите имат и сериозна отседна компонента. Възседните механизми са много малък брой. На практика, голяма част от тези случаи се свързват с действителни прояви на известни с отседните си характеристики тектонски разломи. Наклоните на нодалните плоскости са основно (80%) в границите от 40° до 80° , което също отговаря на представите за реалното залягане на разломните равнини по тази система.





Фиг. 3.2.12.а. Териториално разпределение на 32 фокални механизма в Струмска сеизмична зона, Беласишка разломна система; **б.** хоризонтални проекции на осите на компресия Р и декомпресия Т. Тектонска карта: Bartier et al. (2004), Georgiev et al.(2007).

Липсва ясно изразен тренд на ориентация на Т-осите (фиг. 3.2.12.б.). Те са близкхоризонтални (средно 25° ъгъл на затъване), като едва около половината показват предимно север-северозапад – юг-югоизток азимутално направление. Няма единен тренд за Р-осите.

3.1.7. Родопската сеизмична зона (Z7 на фиг. 3.2.1.) е разположена в централната част на Южна България и обхваща значителна част на Рило-Родопската структурна провинция. На юг-югоизток зоната се изтегля в гръцка територия, а на север и запад граничи със Средногорската и Струмската зона (Botev, 2000; Botev et al., 2002; Ботев, 2011). Основната тектонска морфоструктура тук е планината Родопи, на Сеизмичността през периода на високоточна регистрация на земетресенията (след 1980) е още по-слаба, свързва се с активността на тектонските структури в централните и северозападни части на Родопския масив. Това са основно разломните системи на Местенската, Чепинската, Доспатската, Девинската и Ардинската депресии (Ботев, 2011).

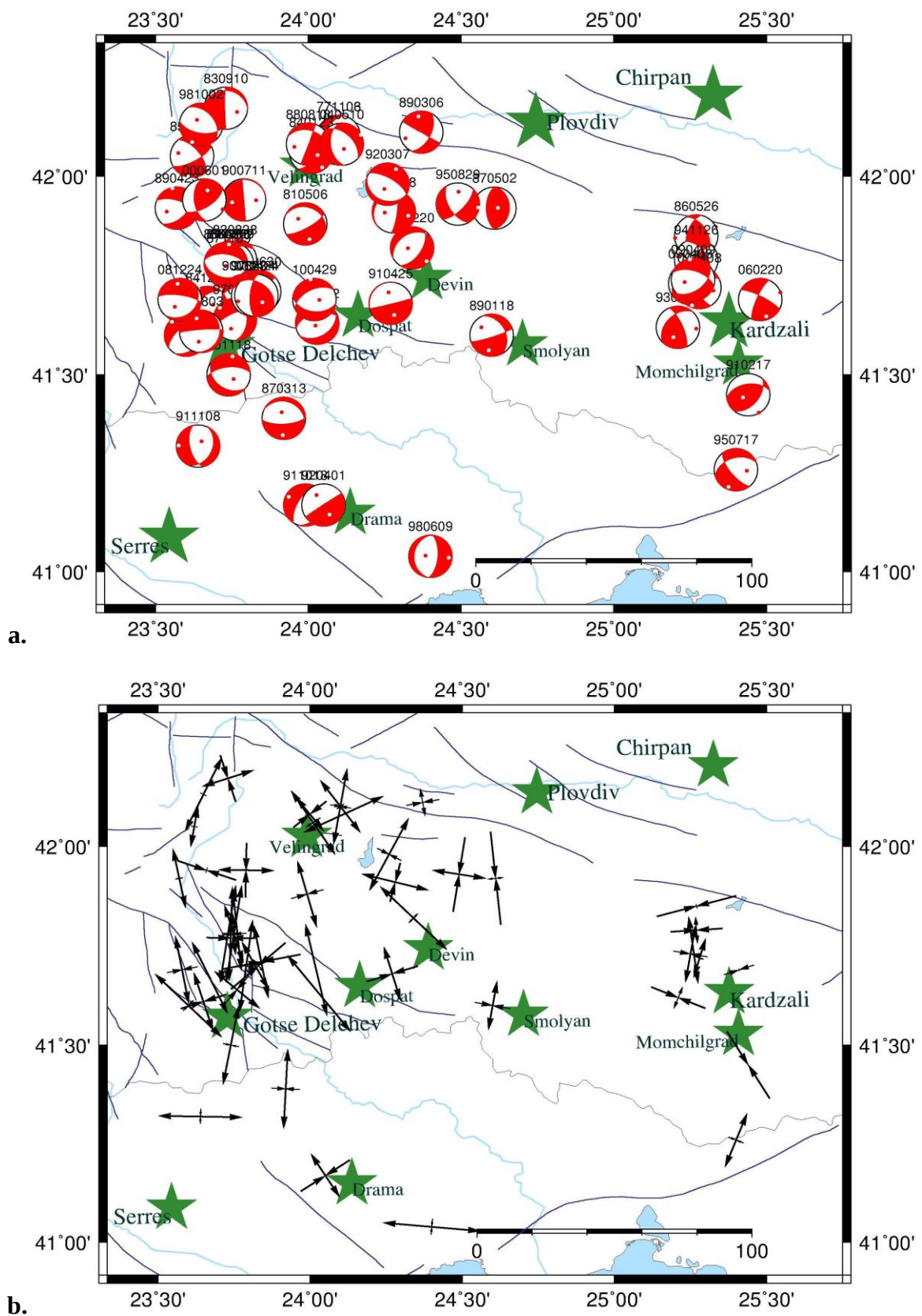
Рило-Родопският масив се отличава с изключително сложен тектонски строеж, като посредством Брацигово-Доспатското понижение, той може да се отдели на два блока

– западен и източен. Зоната обхваща много и различни по вид и насоченост разломни структури. Структурите в Западнородопският блок са с предимно северозапад-югоизточно направление, съвпадащо с направлението на Струмската разломна система, а в Източнородопският – изток-запад до изток-североизток – запад-югозапад, съвпадащо с направлението на Маришката разломна система (Йовчев и др., 1971).

Епицентрите на 53-те земетресения с решения на фокалните механизми са дифузно разпределени по цялата територия на зоната (фиг.3.2.13.a.). Биха могли да се свържат с разломните системи на Местенска, Чепинската, Доспатската, Девинската и Ардинската депресии. Георгиев и др. (2002), Georgiev et al. (2006a) провеждат съвместните геоложки, геодезични и сеизмоложки изследвания на основните разломи в източната част на Родопите (реките Места и Доспат), като изследват вида, посоките на затъване и активността им, а Dobrev (2008) изследва разломите в областта около Перперикон (източни Родопи) и връзката им със съвременната сеизмичност. Ефектите предизвикани от земетресенията през 1977 г. са детайлно изследвани от Солаков и др. (1983), преди въвеждането на сеизмологична мрежа на територията на България.

В тази зона преобладава отново разседният тип разломно движение с малки отседни компоненти, като няма ясен тренд на разпространение на нодалните равнини. Вариациите в наклона на нодалните плоскости също са достатъчно големи - не се набелязва определена тенденция за групиране на този параметър. Единствено в района на Ардинската депресия решенията на фокалните механизми с възседно-отседно и разседно-отседно тип движения са в равновесие. Очертава се преобладаващо направление на нодалните плоскости в посока север-северозапад – юг-югоизток, но вариациите на наклоните също са доста големи.

Осите на опън, получени от определените фокални механизми (фиг.3.2.13.b.) показват почти хоризонтална ориентация на Т-осите, с преобладаващо север-северозапад – юг-югоизток направление за западната част на изследвания регион. Осите на максимална компресия (Р-осите) клонят към вертикална ориентация – над 70% от ъглите на наклона са по-големи от 45°. Няма преобладаващ тренд на Р-осите, с изключение на случаите със субхоризонтални оси, които показват изток–запад преобладаващо направление. Ъгълът на затъване на Р-осите е по-голям в сравнение с този на Т-осите. При огнище Кърджали преобладава субхоризонтална ориентация на Р-осите, с изток–запад направление.

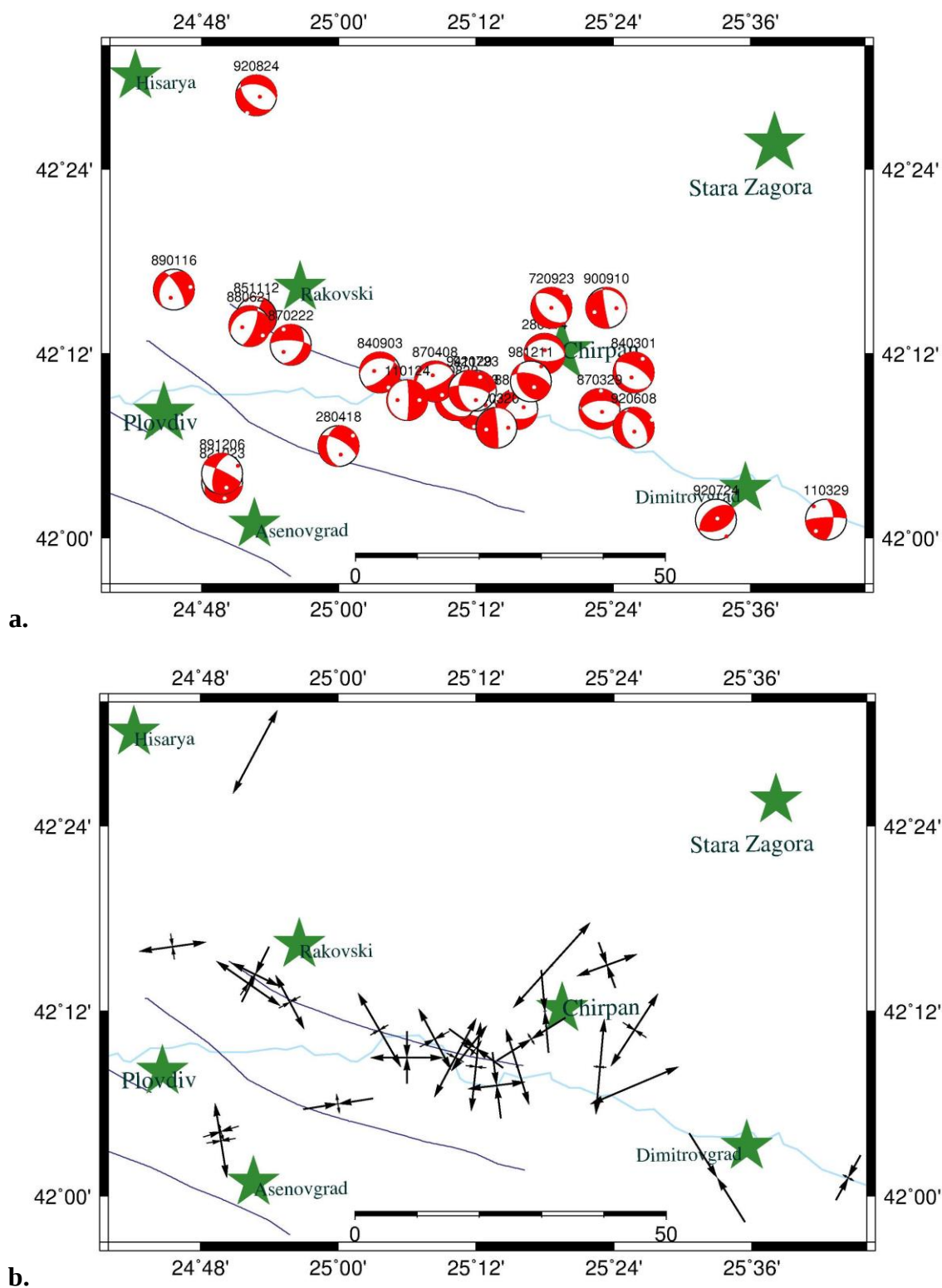


Фиг. 3.2.13.а. Териториално разпределение на 53 фокални механизми в Родопска сеизмична зона; **б.** хоризонтални проекции на осите на компресия Р и декомпресия Т. Тектонска карта: Barrier et al. (2004), Georgiev et al.(2007).

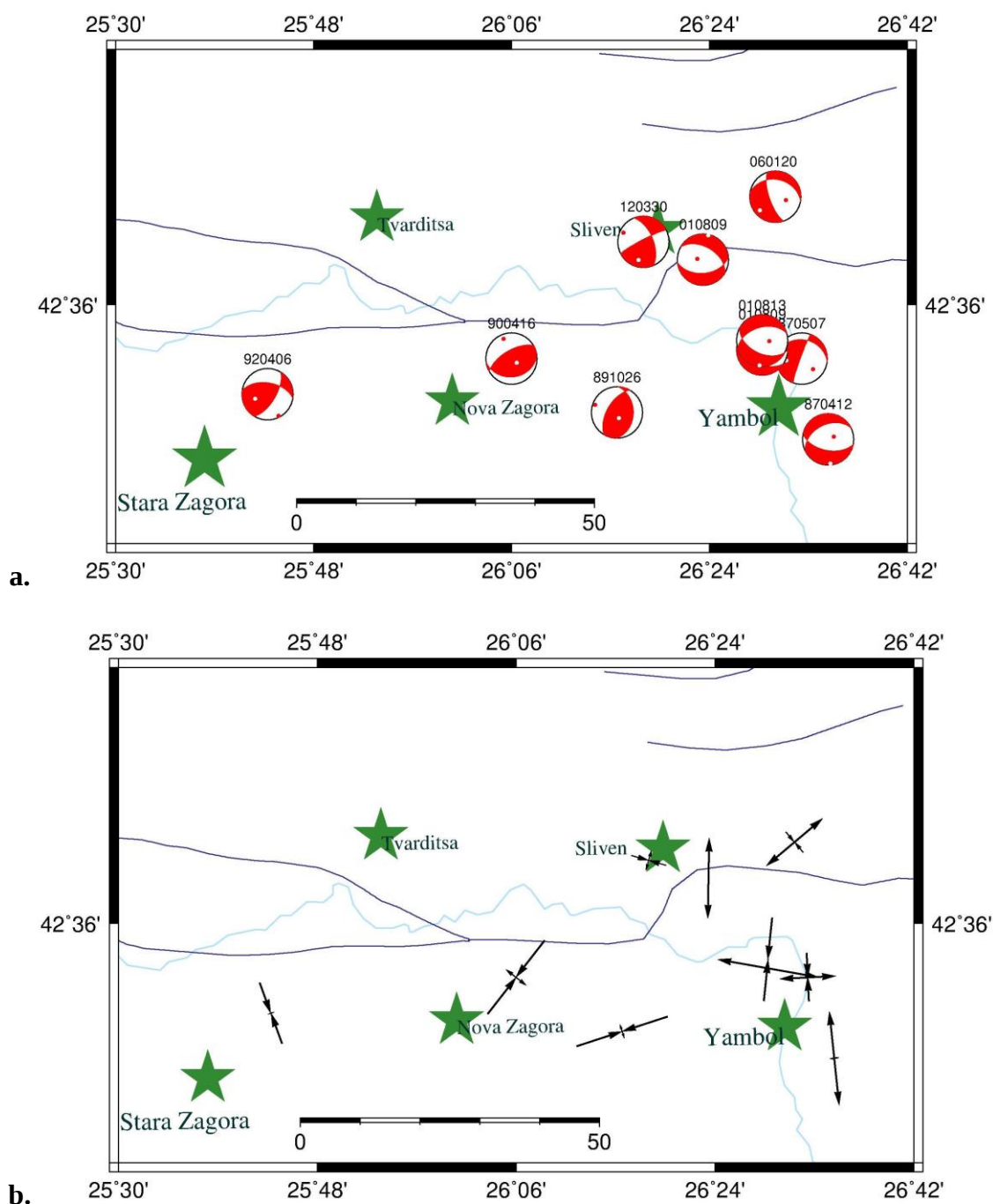
3.1.8. Средногорска сеизмична зона (Z8 на фиг. 3.2.1.) включва централната част на Средногорската структурна провинция, както и южната ивица от Централна Стара планина и северните склонове на Рило-Родопския масиф. Източната граница на зоната се свързва с меридионално ориентираната долина на река Тунджа (Botev, 2000; Botev et al., 2002; Ботев, 2011). Основната тектонска морфоструктура тук е Горнотракийската депресия – най-голямата негативна структура на територията на страната, силно разломена част от земната кора. Сеизмичността в зоната се свързва с тектонската активност на Маришката и Тунджанската разломни ситеми.

Като цяло Средногорската зона включва данни за механизмите на разкъсване на 44 земетресения, като на фиг. 3.2.14.а. са представени 28-те решения по Маришката разломна система (представени в Protopopova et al., 2014). Повечето от тях (81%) са с нормално разседно движение по нодалните плоскости, някои с малки отседни компоненти. Ориентацията на тези плоскости не манифестира ясен тренд на ориентация, въпреки че се формира известно преобладаващо изток - запад направление. Средното азимутално направление на поне една от нодалните равнини е около 110° , което означава изток-югоизток – запад-северозапад направление, което съвпада с направлението на Поповошния и Чирпанския разломи (Dimitrov et al., 2006; Димитров, 2009). Наклонът на нодалните равнини варира в много широки граници – от 30° до 90° , със средна стойност около 50° . Тези особености на фокалните равнини се съгласуват с тектонския строеж на сложно построената Средногорската зона и по скоро на Маришката разломна система, която се разглежда като система от няколко суперпозирани басейна с удължение в изток - запад направление.

Няма ясен тренд на разпространение на проекциите на осите на екстензия, освен субхоризонталното им разположение (фиг. 3.2.14.б.). Те варират от северозапад – югоизточно направление за механизмите разположени в западната част на зоната (биха могли да се отнесат към Поповишкия разлом), до североизток – югозападно направление за механизмите в източната част (към Чирпанския разлом). Болшинството (70%) от Т-осите са субхоризонтални с наклон в интервала 0° - 30° , само два случая надвишават 60° , средно около 26° , докато Р-осите са предимно субвертикални със слабо изразено северозапад-югоизточно направление и стойности между 10° и 90° , средно около 51° . Само 6 случая са със субхоризонтални Р-оси (съответстващи на преобладаващо отседно движение), чието направление варира в широки граници.



съответства на определения за Средногорска сеизмична зона (Van Eck and Stoyanov, 1996; Алексиев и Георгиев, 1996) и като цяло за територията на България (Protopopova et al., 2013). Това потвърждава хипотезите, че неотектонските движения в района на Балканския полуостров са причинени в следствие на дълготрайни движения във вътрешната част на Егейския и централните части на Балканския региони.

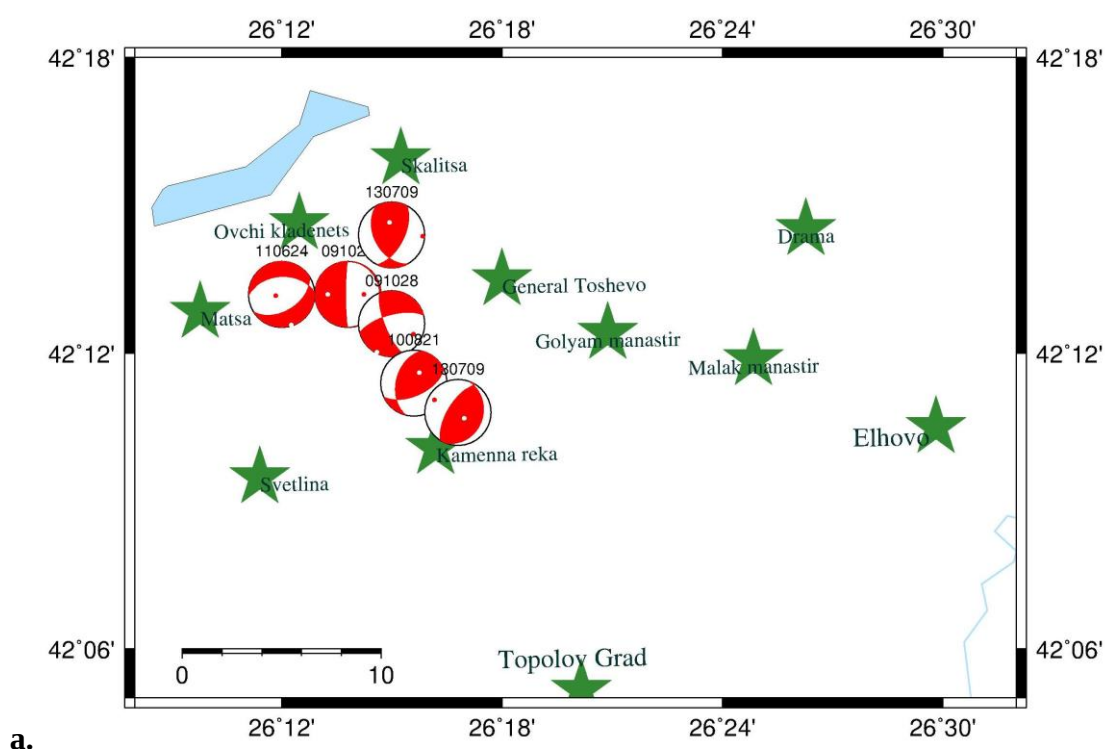


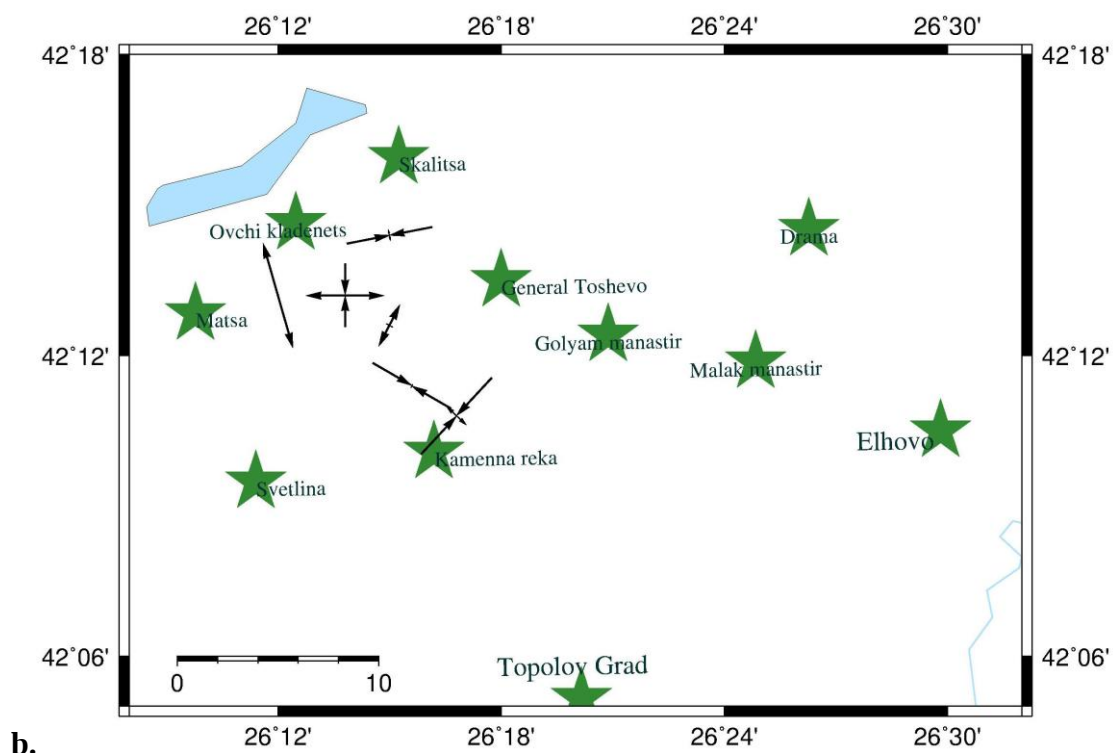
Фиг. 3.2.15.а. Териториално разпределение на 10 фокални механизма в Средногорска сеизмична зона, Тунджанска разломна система; **б.** хоризонтални проекции на осите на компресия Р и декомпресия Т. Тектонска карта: Barrier et al. (2004), Georgiev et al.(2007).

Едва 10-те фокалните механизма по Тунджанската разломна система са разпръснати в широки граници между градовете Стара Загора, Сливен и Ямбол, като следват областта оформена от поречието на р.Тунджа. Броят на разседните движения е почти равен на този на възседните (фиг. 3.2.14.a.). Забелязва се известно изток-западно направление на поне една от нодалните равнини, което съвпада като цяло с направлението на разломните системи в Средногорската сеизмична зона. Ъглите на затъване на нодалните равнини са с малки вариации, като средната им стойност е около 50° .

Проекциите на осите на максимална и минимална компресия не показват никакво групиране (фиг. 3.2.14.b.). Те са хаотично разпръснати и със различно направления и ъгли на затъване. Трудно може да се каже какъв е режимът на силите в региона.

Броят на регистрираните земетресения за периода 2009-2011 г. в огнище Манастирски възвишения е 252 (Botev et al., 2011). Магнитуда на земетресенията варира в границите $M_L = 0.8 - 4.0$, като с $M_L > 3.5$ са само 6 бр., с определени фокалните механизми на огнищата (фиг. 3.2.16.a.). Възседният и разседният тип движение са в равновесие. Забелязва се преобладаващо направление на поне една от нодалните равнини в югозапад – североизточна посока. Епицентрите на най-силните трусове са разположени предимно по североизточния борд на централния блок на Манастирските възвишения (Botev et al., 2011). Проекциите на осите на принципните напрежения са с хаотични насочености и ъгли на затъване (фиг. 3.2.16.b.).





Фиг. 3.2.16.a. Териториално разпределение на 6 фокални механизма в Средногорска сеизмична зона, Огнищна зона Манастирски възвишения; **b.** хоризонтални проекции на осите на компресия Р и декомпресия Т. Тектонска карта: Barrier et al. (2004), Georgiev et al.(2007).

3.1.9. Бургаската сеизмична зона (Z9 на фиг. 3.2.1.) включва източната част на Средногорската структурна провинция, както и южната ивица от Източна Стара планина на север и Странджа планина на юг . Източната граница се асоциира с Черноморското крайбрежие (Votев, 2000; Votев et al., 2002;). Двете решения на механизми на земетресения се намират по долното течение на р.Марица, в близост до гр. Александруполис, едното на гръцка, а другото на турска територия (Фиг. 3.2.1.). И двете решения на механизми са с отседен тип движение и съответно субхоризонтални оси на опън с направление югоизток –северозапад и оси на компресия североизток –югозапад.

ГЛАВА 4

МОДЕЛИРАНЕ НА РЕГИОНАЛНОТО НАПРЕЖЕНИЕ

4.1. Получаване на тензора на регионалното напрежение

Инверсните методи за намиране на моделен еднороден тензор на напреженията за даден регион, по решения на механизми на земетресения, се базират на изследването на Bott (1959) върху механиката на образуване на разломи, съгласно което векторът на преместването по произволна разломна равнина съвпада по посока с компонентата на тангенциалното напрежение в същата равнина. При това условие за разрушаване на материала в даден обем, всяко решение за механизъм на земетресение в него налага строги ограничения върху посоките на напреженията, които могат да генерират наблюдаваното преместване, т.е. всеки механизъм на земетресение е съвместим само с относително ограничена съвкупност от тензори на напреженията. По такъв начин, изследвайки застъпването на съвкупностите от тензори на напреженията, всяка от които е съвместима с конкретен механизъм на земетресение, може да се определи съвкупността от напрежения, които действат в региона. Основният подход при тези методи се състои в намирането на еднороден тензор на напреженията, който минимизира ъгловото отклонение между наблюдавания върху всяка разломна равнина вектор на преместването и посоката на моделираното тангенциално напрежение. Прилагането на инверсни методи за решаване на обратната задача за полето на напреженията, позволява да се получат надеждни оценки за преобладаващите напрежения в сложни в тектонско отношение региони.

Посредством прилагане на инверсия метод разработен от Gephart and Forsyth (1984) и Gephart (1990) – програмата FMSI (focal mechanisms stress inversion), чрез множество от различни по вид решения за механизми на огнището на земетресения, е определено регионалното поле на напреженията за отделните огнищни зони в България и прилежащите земи. Използваната методика е описана детайлно от Христова (1997).

Използваната методика дава ориентацията на главните напрежения σ_1 , σ_2 , σ_3 (съответно максималното, междинното и минималното напрежение на компресия) и

големината на междинното главно напрежение σ_2 относно максималното σ_1 и минималното σ_3 главни напрежения чрез параметъра R,

$$R = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_3 - \sigma_1}, \quad 4.1.1.$$

като мярка за относителните големина на напреженията, а също така се получава реалистична оценка за грешката (misfit) на решението. Параметърът R ($0 \leq R \leq 1$) позволява теоретически да се определи преобладаващият режим на напреженията. Съгласно формула 4.1.1. когато R е около 0.5 то има приблизително равенство в големините на трите главни напрежения и случай на симетрична компресия. При R клонящо към 0, големината на междинното нормално напрежение е приблизително равна на тази на максималното ($\sigma_2 \approx \sigma_1$) и има случай на режим на двуосна девиаторна компресия, а при R клонящо към 1 ($\sigma_2 \approx \sigma_3$) има случай на едноосна девиаторна компресия и режим на преобладаваща екстензия (Христова, 1997).

За дефиниране на грешката на модела (отклонението между наблюдения и модел) Gephart and Forsyth (1984) определят ъгловото отклонение на вектора на преместване относно двете нодални равнини, за произволна ориентация на тензора на напреженията и всяко индивидуално решение на механизми от изследваната извадка данни. Ъгловото отклонение на вектора на преместване от дадено индивидуално решение за механизъм на всяко земетресение представлява най-малкият ъгъл на ротация около произволна ос, при който ориентацията на една от двете нодални равнини и векторът и на преместване съвпадат с предсказаните от модела. Средното отклонение на моделния тензор на напреженията относно извадка данни за механизми на земетресенията (най-малката стойност на индивидуалните ъглови отклонения), е прието за грешка Θ на решението на тензора на напреженията в метода на Gephart and Forsyth (1984). Търсенето на този тензор се реализира по предварително зададена мрежа от възможни посоки на напреженията σ_1 и σ_3 със стъпка 5° или 10° . Определянето на най-доброто приближение за тензор на напрежението се осъществява посредством „Pole Rotation“ (FMSIPR), „приблизителен“ (FMSIA) и „точен“ (FMSIE) метод на Gephart and Forsyth (1984).

Според проведените от Wyss and Liang (1992) анализ върху грешката на полученото решение, авторите показват, че при изчислена грешка по-малка от 6° , може да се смята, че полето на регионалните напрежения е абсолютно хомогенно. Грешка по-голяма от 6° показва локални хетерогенности в полето на напреженията. Също така при

разглеждането на индивидуалните решения на фокални механизми, ако нодалната равнина с по-малкото отклонение от определения мисфит, надвишава 20° , то това решение е несъвместимо с приетото хомогенно поле на напреженията. Тогава трябва да се търси обем от механизми, за които грешката не надвишава 6° , като се прибегне до разделянето на фокалните механизми по дълбочина или те се разпределят към конкретни разломни структури.

4.2. Сеизмологични данни за изследване на полето на напреженията за територията на България и прилежащите земи

Както е известно за целите на геодинамичния анализ на тектонски активните области с преобладаваща приповърхностна (корова) сеимичност, от съществено значение е вида на тектонското напрежение в приповърхностен план. Теоретично режимът на преобладаващите напрежения зависи както от големината на параметъра R , така и от вида на наклоните (субхоризонтален, субвертикален) на съответните оси на максимална компресия σ_1 и екстензия σ_2 .

Подходът за прилагане на инверсия метод на Gephart and Forsyth (1984) се състои от няколко последователни стъпки:

- Наличните 338 решения на механизми на огнищата на земетресения са разделени на девет сеизмични зони (фиг. 3.2.1. от Z1 до Z9) и представени в Глава 3.
- Механизмите от всяка сеизмична зона са разделени на огнищни зони за областите, които е възможно механизмите да бъдат отнесени към някоя (система от няколко) структура.
- На механизмите от всяка група се придава различен тегловен коефициент в зависимост от магнитуда на земетресенията, който определя броя пъти на участие на всеки механизъм при провежданите изчисления (1 за $2.5 \leq M \leq 3.4$; 2 за $3.5 \leq M \leq 4.4$; 3 за $4.5 \leq M \leq 5.5$; 4 за $M \geq 5.5$).
- Първоначално се прилага „приблизителният“ (FMSIA) метод с голяма стъпка на последователно търсене (10°) върху цялата извадка от механизми за всяка област, като началните посоки и ъгли на затъване на напреженията на максимална (σ_1) и минимална (σ_3) компресия се определят и задават от приблизителното пространствено групиране на P и T осите. Методът се прилага двукратно, като първоначално се задават

конуси с ъгъл на търсене 45° за σ_1 и 90° за σ_3 , а след това изчисленията се повтарят, но при ъгли на търсене 90° за σ_1 и 45° за σ_3 около първоначално зададената посока.

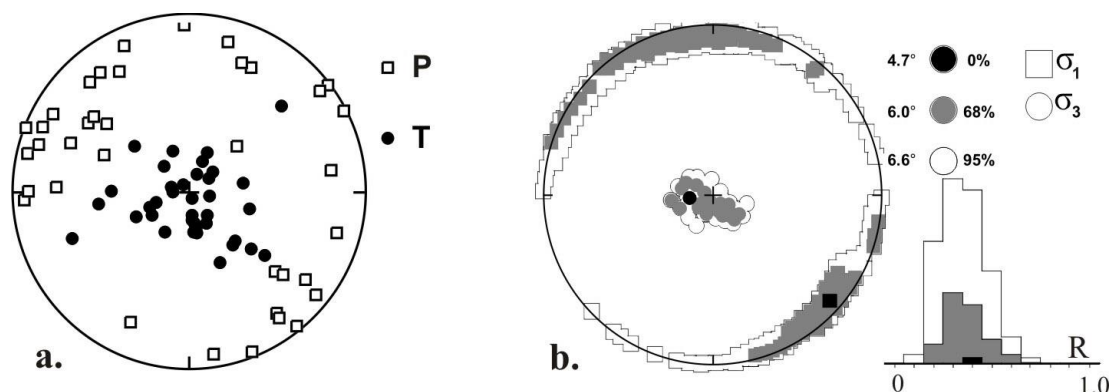
- Получените най-добри стойности на напреженията на максимална и минимална компресия чрез FMSIA метода, се използват като входни стойности при прилагането на „точния“ (FMSIE) метод с малка стъпка на последователно търсене (5°), като се използва същата извадка от механизми и същият размер на конусите.

Зонирането е идентично на представеното в Глава 3 (фиг. 3.2.1.а. от Z1 до Z9 и в таблица 4.2.1.). Единствено в Бургаска сеизмична зона не е определян регионален тензор на напреженията, поради липса на достатъчен брой определени фокални механизми (едва два броя, намиращи се в близост до гр. Александруполис, фиг.3.2.1.а.).

4.2.1. Сеизмична зона Вранча (Z1 в таблица 4.2.1.): Разпределението на осите на опън и натиск на използваните 37 бр. фокални механизма на огнищата на земетресения са показани на фиг. 4.2.1.а., откъдето ясно се вижда северозапад-югоизточното субхоризонтално направление на осите на компресия и почти субвертикалната стойност на осите на екстензия. Решението за полето на регионалните напрежения показва слабо доминиращ субхоризонтален компресионен режим $R = 0.4$ в югоизточно направление и почти вертикална посока на оста на минимална компресия - посоки на трите главни напрежения (pl/az) $\sigma_1 = 7^\circ/132^\circ$, $\sigma_2 = 8^\circ/41^\circ$, $\sigma_3 = 79^\circ/261^\circ$, фиг. 4.2.1.б. От диаграмата на 68% и 95% доверителни интервали се вижда, че параметърът R заема стойности в малка граница около 0.4, като се намира в интервала 0.2 - 0.5. Сравнително ниската стойност на грешката $\Theta = 4.7^\circ$ е показател за добра еднородност в полето на напреженията, т.е. не е необходимо наличните фокални механизми да бъдат разделяни по дълбочина (от 73 km до 166 km) и също може да се заключи, че наличните механизми имат малки наблюдателни грешки.

Сходни резултати показва работата на Polonic et al. (2005), които определят тензорите на напреженията в цялата източна част на Карпатската верига. Авторите разделят наличните фокални механизми за всяка област на две – до 70 km и от 70 km до 200 km. Получените стойности на осите на главните напрежения за огнищната зона Вранча (Фоксанската депресия), в областта от 70 km до 200 km са (pl/az) $\sigma_1 = 30^\circ/139^\circ$, $\sigma_2 = 18^\circ/50^\circ$, $\sigma_3 = 70^\circ/270^\circ$, $R = 0.22$. Тези резултати съвпадат с получените от автора на дисертацията, като потвърждават югоизточното направление на компресионния режим.

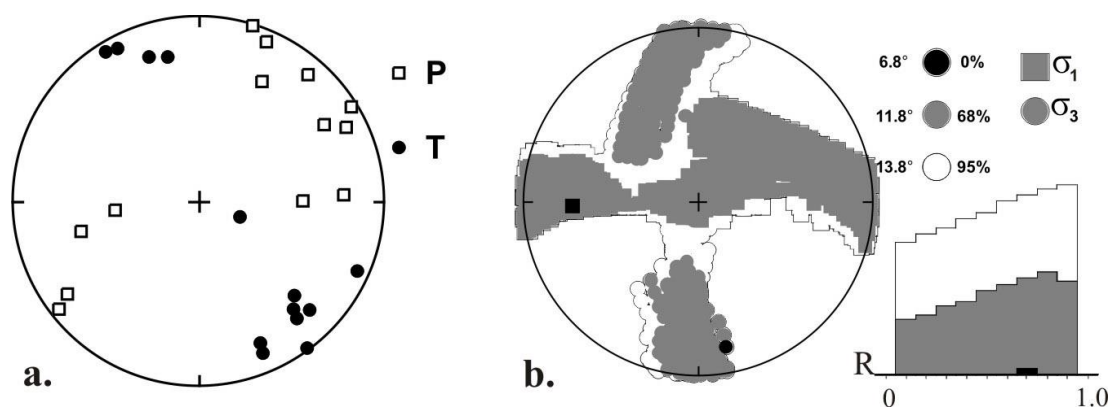
Единственото отклонение е малко по-големият ъгъл на затъване на оста на максимална компресия - $\sigma_{1pl} = 30^\circ$, дължаща се на броя и вида на използваните фокални механизми.



Фиг. 4.2.1. Долна фокална полусфера на Вулф: **a.** Проекции на осите на опън Т и натиск Р на 37 бр. фокални механизма в сеизмична зона Вранча; **b.** Решение за полето на регионалните напрежения с диаграма на 68% и 95% доверителни интервали.

4.2.2. Сеизмична зона Неготинска крайна (Видинска зона) (Z2 в таблица 4.2.1.): За определяне полето на регионалните напрежения са използвани 13-те бр. фокални механизма, намиращи се в западната част на зоната (фиг. 3.2.3.a.). На фиг. 4.2.2.a. е показано разпределението на осите на опън и натиск на използваните фокални механизми, откъдето се вижда северозапад – югоизточно направление на екстензия и североизток – югозападно направление на компресия и двете сравнително субвертикални. Северно стоящите 4 бр. фокални механизма на огнищата на земетресения са изключени от проведеното изследване, след като съвместно с тях грешката на определените главни оси надвишава 11° , което говори за сериозна хетерогенност в полето на напреженията. След тяхното изключване грешката на проведеното изследване достигна $\Theta = 6.754^\circ$, която е сравнително приемлива.

От диаграмата на 68% и 95% доверителни интервали се вижда, че параметърът R се апроксимира със стойности от 0.1 до 0.9 и има застъпване на областите на компресия и екстензия в стереографската проекция фиг. 4.2.1.b. Тези не добри резултати вероятно се дължат на локални хетерогенности в полето на напреженията в определяния обем или грешки в определянето на фокалните механизми. Най-достоверна е стойността на $R = 0.7$, което предполага, че големината на междинното нормално напрежение е по-близка до тази на минималното ($\sigma_2 \approx \sigma_3$), има случай на едноосна девиаторна компресия и режим на преобладаваща екстензия в юг-югоизточно направление - посоки на напреженията (pl/az) $\sigma_1 = 29^\circ/268^\circ$, $\sigma_2 = 56^\circ/54^\circ$, $\sigma_3 = 16^\circ/169^\circ$.



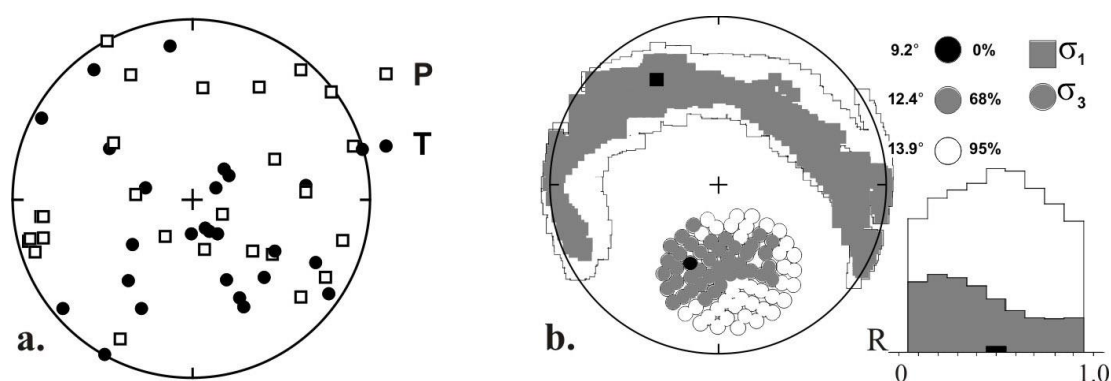
Фиг. 4.2.2. Долна фокална полусфера на Вулф: **а.** Проекции на осите на опън Т и натиск Р на 13 бр. фокални механизма в сеизмична зона Неготинска крайна; **б.** Решение за полето на регионалните напрежения с диаграма на 68% и 95% доверителни интервали.

4.2.3. Сеизмична зона Горна Оряховица (Z3 в таблица 4.2.1.):

Проведените изчисления за определянето на полето на регионалните напрежения за цялата Горноряховска зона, показват изключително голяма грешка ($\Theta \approx 12^\circ$), което говори за сериозна хетерогенност в полето на напреженията. Направените опити за групиране на фокалните механизми в по-малки области също не дават добри резултати, тъй като механизмите са пръснати по цялата област, без да се набелязва някакъв групиращ параметър (фиг. 3.2.4.а.). Единственото място, на което има струпване на фокални механизми е в **Стражишката депресия**, където през 1986 г. се реализира много дълга земетръсна поредица с максимален магнитуд $M=5.7$ (Oncescu et al., 1990).

Броят на определените фокални механизми в огнищна зона **Стражица** е 27, но при провеждане на изчисленията с всички налични механизми се получава грешка $\Theta > 11^\circ$. Тази голяма грешка може да бъде намалена при редуциране на използваната извадка фокални механизми, чрез разпределянето им по различните по вид и насоченост разломни структури, което е изключително сложна задача и не е провеждано в настоящата дисертация. Въпреки това, бе направен опит за намаляване на грешката при повторно провеждане на изчисленията, като се изключат данните за фокалния механизъм на земетресението от 2008 г. (080512 в таблица 3.2.1.) (всички останали земетресения са реализирани в периода 1986 – 1987 г.), се получава грешка $\Theta = 9.139^\circ$, съпоставима с получената от Oncescu et al. (1990) средна грешка $\Theta = 9^\circ$, въпреки, че авторите са използвали едва 15 механизма за определяне на регионалния тензор на напреженията по метода на Gephart and Forsyth (1984). Oncescu et al. (1990) провеждат изчисленията повторно, като изключват два от използваните механизми (861207 в 14:17 ч. и 861215 в таблица 3.2.1.) и редуцират грешката до 6° . Авторите обясняват тази разлика в получените

грешки за събитие 861215 с локални хетерогенности в полето на напреженията (с епицентър в югоизточния край на зоната), а събитие 861207 в 14:17 ч. - главният шок с магнитуд 5.7, е освободил първоначално натрупаното напрежение, а след това останалите събития са реализирани под различно поле на регионалните напрежения. Хипоцентърът на събитие 080512 е в близост до този на събитие 861215, поради което може да се съди, че двете земетресения са реализирани в среда с локални хетерогенности в полето на напреженията. При повтаряне на изчисленията с изключването на трите гореспоменати събития грешката намалява на 8° .



Фиг. 4.2.3. Долна фокална полусфера на Вулф: **а.** Проекции на осите на опън Т и натиск Р на 26 бр. фокални механизма в сеизмична зона Горна Оряховица, огнищна зона Стражица; **б.** Решение за полето на регионалните напрежения с диаграма на 68% и 95% доверителни интервали.

Van Eck and Stoyanov (1996) също използват метода на Gephart and Forsyth (1984), на базата на 23 фокални механизма, като получават равенство в стойностите на трите главни напрежения ($R = 0.5$). Определените стойности на трите главни напрежения са (pl/az) $\sigma_1 = 11^\circ/252^\circ$, $\sigma_2 = 45^\circ/151^\circ$, $\sigma_3 = 43^\circ/352^\circ$, а стойността на грешката е $\Theta = 17.14^\circ$, която свидетелства за голяма хетерогенност в полето на напреженията за избраната извадка от механизми. Като източник на данни авторите са използвали каталога на Solakov and Simeonova (1993).

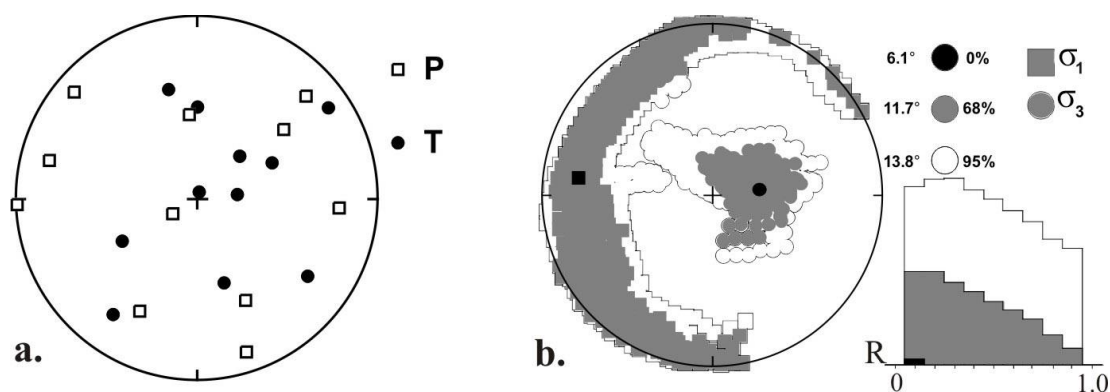
На фиг. 4.2.3.а. е показано разпределението на осите на опън и натиск на използваните 26 броя фокални механизма, като не се забелязва групиращ параметър на осите. От диаграмата на 68% доверителен интервал се вижда, че с най-голяма вероятност параметъра R заема стойностите 0.2-0.3 (фиг. 4.2.3.б.), което се обяснява с големия брой възседни фокални механизми. Най-достоверна е стойността на $R = 0.5$, което означава, че има равенство на трите главни напрежения с посоки (pl/az) $\sigma_1 = 29^\circ/330^\circ$, $\sigma_2 = 26^\circ/83^\circ$, $\sigma_3 =$

49°/199°. Изчислените от автора на дисертацията стойности на тензора на напреженията се различават от получените от Oncescu et al. (1990) стойности (pl/az) $\sigma_1 = 40^\circ/60^\circ$, $\sigma_2 = 46^\circ/270^\circ$, $\sigma_3 = 15^\circ/163^\circ$ и от изчислените от Van Eck and Stoyanov (1996), които са обясними с различния брой и вид на използваните фокални механизми. Авторът на дисертацията е използвал комбинация от фокални механизми за определяне на тензора на регионалните напрежения предложени от Oncescu et al. (1990) (всички) и Solakov and Simeonova (1993) (не фигуриращите в списъка на предната работа). От стереографската проекция на фиг. 4.2.3.b. се вижда, че определените от Oncescu et al. (1990) стойности за трите главни напрежения се включват в 68% и 95% доверителните интервали.

Botev et al. (2002) прилагат също метода на Gephart and Forsyth (1984), но върху цялата Горнооряховска зона, като получават стойности за трите главни напрежения (pl/az) $\sigma_1 = 67^\circ/84^\circ$, $\sigma_2 = 22^\circ/244^\circ$, $\sigma_3 = 7^\circ/337^\circ$, $R = 0.3$ и грешка 5.2, като използват 22 фокални механизма, разпръснати по цялата зона. Въпреки, че грешката показва хомогенност в полето на напреженията, не може да се смята, че полученото решение е най-добро, поради факта, че механизмите са разположени в голяма област. Като цяло всички получени решения показват доминиращ режим на компресия в областта.

4.2.4. Сеизмична зона Североизточна България (Z4 в таблица 4.2.1.):

Определените фокални механизми на огнищата на земетресения в зоната са 16 – 11 се намират в огнище Провадия и 5 са хаотично пръснати в близост до крайбрежната ивица на Черно море. Грешката в изчислените стойности на трите главни напрежения за цялата зона е около 11°, а с данни от механизмите само за областта на **Провадия** $\Theta = 6.061$.



Фиг. 4.2.4. Долна фокална полусфера на Вулф: **а.** Проекции на осите на опън Т и натиск Р на 11 бр. фокални механизма в сеизмична зона Североизточна България, огнищна зона Провадия; **б.** Решение за полето на регионалните напрежения с диаграма на 68% и 95% доверителни интервали.

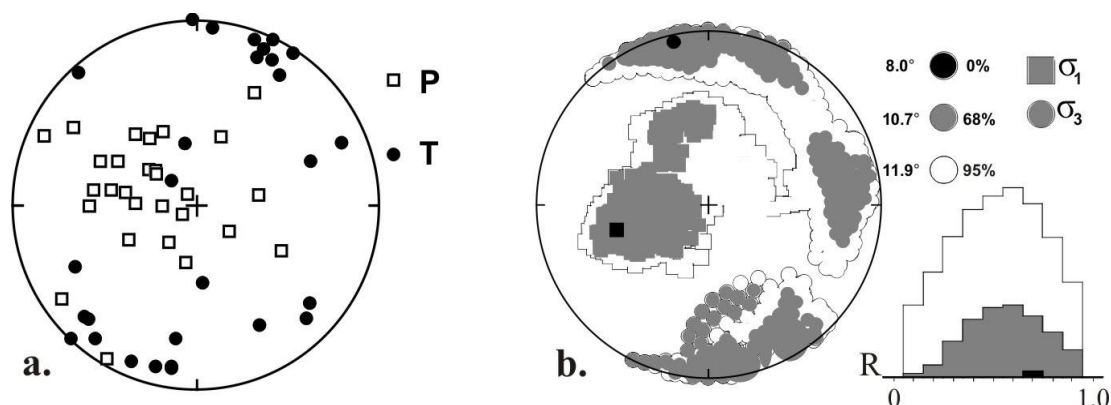
На фиг. 4.2.4.a. е показано хаотичното разпределение на осите на опън и натиск на използваните 11 броя фокални механизми в областта на Мировското солно находище. Решението за полето на регионалните напрежения показва силно доминиращ субхоризонтален компресионен режим $R = 0.1$ в западно направление - посоки на напреженията (pl/az) $\sigma_1 = 22^\circ/277^\circ$, $\sigma_2 = 5^\circ/185^\circ$, $\sigma_3 = 67^\circ/84^\circ$, фиг. 4.2.4.b. От диаграмата на 68% и 95% доверителни интервали се вижда, че праметърът R заема с най-голяма вероятност стойността 0.1, което значи, че големината на междинното нормално напрежение е почти равна на тази на максималното ($\sigma_2 \approx \sigma_1$), т.е. в зоната има режим на двуосна девиаторна компресия. Обяснение за силно доминиращият компресионен режим в западна посока, може да се потърси в тектонския натиск от изток на плочата с океански тип земна кора, предизвикан от меридионалното отваряне на кората в централната част на Черно море (Botev et al., 2002).

Botev et al. (2002) прилагат също метода на Gephart and Forsyth (1984), но върху цялата зона, обединена под името Шабленска, като получават стойности за трите главни напрежения (pl/az) $\sigma_1 = 79^\circ/103^\circ$, $\sigma_2 = 10^\circ/257^\circ$, $\sigma_3 = 5^\circ/348^\circ$, $R = 0.8$ и грешка 7.8, като използват 12 фокални механизма, намиращи се в областта. Грешката показва хетерогенности в полето на напреженията за използваната извадка механизми, което вероятно се дължи на факта, че земетресенията с определени механизми са разположени в пркалено голяма област.

4.2.5. Софийска сеизмична зона (Z5 в таблица 4.2.1.): Броят на определените фокални механизми за Софийска зона е 37, като са включени 5-те механизма за Кюстендилска област. Грешката при определяне на регионалния тензор на напреженията за цялата зона надвишава 10° , което означава хетерогенност в полето на напреженията за избрания обем. По тази причина броят на използваните механизми е редуциран до 28, като са изключени 5-те западно разположени земетресения на сръбска територия и 4-те най-източни, които се асоциират по-скоро с Ихтиманската депресия (фиг. 3.2.8.a.). При тази извадка механизми, изчисленията показват грешката $\Theta = 7.99^\circ$.

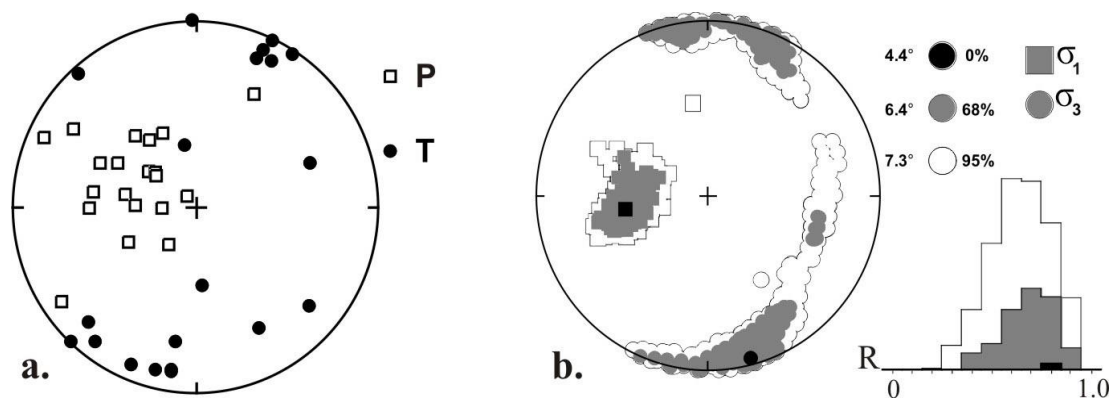
От фиг. 4.2.5.a. се вижда, че осите на опън-Т са разположени предимно субхоризонтално, в направление север-юг. Именно това показва и регионалният тензор на напреженията - (pl/az) $\sigma_1 = 44^\circ/254^\circ$, $\sigma_2 = 46^\circ/83^\circ$, $\sigma_3 = 5^\circ/348^\circ$, фиг. 4.2.5.b. Диаграмата на 68% и 95% доверителни интервали се вижда, че $R = 0.7$, което означава, че в зоната

преобладава умерен, субхоризонтален, екстензионен режим в север-северозападно направление.



Фиг. 4.2.5. Долна фокална полусфера на Вулф: **а.** Проекции на осите на опън Т и натиск Р на 28 бр. фокални механизма в Софийска сеизмична зона; **б.** Решение за полето на регионалните напрежения с диаграма на 68% и 95% доверителни интервали.

Огнищна зона **Перник** не е показвала активност до 2012 г. Именно 20 от определените 28 фокални механизма за Софийска сеизмична зона са реализирани в тази област. Грешката на получения тензор на регионалните напрежения е едва $\Theta = 4.391^\circ$, което означава добра хомогенност на полето на напреженията. Осите на опън-Т са разположени предимно субхоризонтално, в направление север-юг (фиг.4.2.6.а.), което съвпада с направлението на цялата Софийска зона.



Фиг. 4.2.6. Долна фокална полусфера на Вулф: **а.** Проекции на осите на опън Т и натиск Р на 20 бр. фокални механизма в Софийска сеизмична зона, огнищна зона Перник; **б.** Решение за полето на регионалните напрежения с диаграма на 68% и 95% доверителни интервали.

Стойностите на трите главни напрежения са близки до определените за цялата Софийска котловина - (pl/az) $\sigma_1 = 50^\circ/260^\circ$, $\sigma_2 = 40^\circ/71^\circ$, $\sigma_3 = 4^\circ/165^\circ$, фиг. 4.2.6.б., като

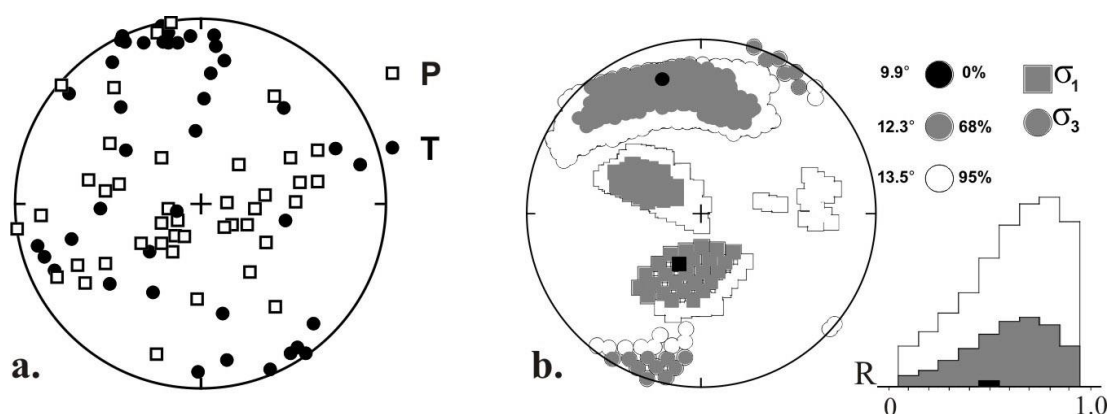
единствената разлика е, че посоката на напрежението на минимална компресия е обърнато (ъгълът на затъване) на 180° - от север-северозапад на юг-югоизток. Стойността на параметъра $R = 0.8$, също не се различава съществено, което показва, че в зоната преобладава екстензионен режим в юг-югоизточно направление. 68% и 95% доверителни интервали са много близко обособени около осите на главните напрежения.

Georgiev et al. (2008) определят регионалния тензор на напреженията ($pl/az - \sigma_1 = 69^\circ/113^\circ$, $\sigma_2 = 17^\circ/271^\circ$, $\sigma_3 = 13^\circ/19^\circ$) в областта по метода на Gephart and Forsyth (1984), с едва 4 налични фокални механизма. Авторите определят слабо доминиращ ($R = 0.6$) север-североизточен субхоризонтален режим на екстензия, но получената грешка е с твърде голяма стойност $\Theta = 12.2$. Kotzev et al. (2004) използват 6 фокални механизма по същия метод, като за стойности на трите главни напрежения получават $pl/az - \sigma_1 = 43^\circ/323^\circ$, $\sigma_2 = 35^\circ/92^\circ$, $\sigma_3 = 28^\circ/204^\circ$, като уточняват, че малкият брой фокални механизми е недостатъчен за определяне на достоверно поле на напреженията и не посочват грешка на полученото решение. Всички автори, провели изследвания в областта са единодушни по отношение на екстензионния режим в района с главно север-юг посока на минимална компресия, което подкрепя определената посока на екстензия от автора на дисертацията.

4.2.6. Струмска сеизмична зона (Z6 в таблица 4.2.1.): Броят на определените фокални механизми в Струмска сеизмична зона са 92. Грешката при определяне на тензора на напреженията за зоната достига 12° , което показва хетерогенност в полето на напреженията. Грешката може да се намали съществено, като се редуцира броят на използваните фокални механизми, чрез разделянето им по различните разломи. Поради голямото наличие на различни по вид и насоченост разломни структури в региона, е изключително сложно отнасянето на всеки фокален механизъм към конкретен разлом, въпреки съвместните геоложки, геодезични и сеизмологични изследвания проведени от Meyer et al. (2002), Georgiev et al. (2006a), Tranos et al. (2006) и др., които изследват вида, посоките на затъване и активността на основните разломи в зоната. Отчетливо наличните фокални механизми могат да се разделят на Крупнишка (60 бр. фокални механизма) и Беласишка разломни системи (32 бр. фокални механизма), които са перпендикулярни на основната Струмска разломна система. От фиг. 4.2.7.а. и фиг. 4.2.8.а. се вижда, че няма обединяваща посока на осите на опън и натиск в **Крупнишка** и **Беласишка** разломни системи, освен известна субвертикалност на осите на компресия. Преобладават оси на опън в посока север-юг, но около 15% от осите, са

ориентирани в посока изток-запад, които най-вероятно създават високата хетерогенност в избраната извадка.

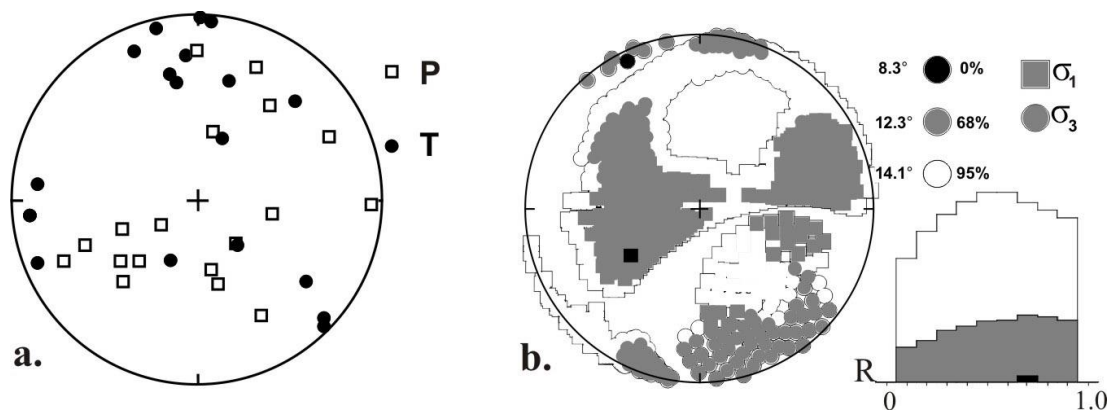
При определянето на регионалния тензор на напрежения, който въздейства върху **Крупнишката** разломна система се наложи редуциране на броя фокални механизми от 60 на 41 (фиг. 4.2.7.a. и b.). Изключени са най-западните механизми (разположени на македонска територия фиг. 3.2.10), които видимо се откъсват от останалите. По този начин грешката е сведена до $\Theta = 9.918^\circ$, което също показва локални нееднородности в полето на напрежения, но по-сериозна редукция на механизмите се оказва изключително сложна задача и не бе проведено в настоящата дисертация.



Фиг. 4.2.7. Долна фокална полусфера на Вулф: **a.** Проекции на осите на опън Т и натиск Р на 41 бр. фокални механизма в Струмска сеизмична зона, Крупнишка разломна система; **b.** Решение за полето на регионалните напрежения с диаграма на 68% и 95% доверителни интервали.

Въпреки голямата грешка, 68% и 95% доверителни интервали не се застъпват на стереографската проекция (фиг. 4.2.7.b.) и показват доминираща север-северозападна, субхоризонтална посока на екстензионната ос (pl/az - $\sigma_1 = 64^\circ/203^\circ$, $\sigma_2 = 15^\circ/80^\circ$, $\sigma_3 = 4^\circ/344^\circ$), като малка част от доверителните интервали показват североизток-югозападна посока на екстензия. Разликата в ориентацията на тези екстензионни области вероятно се дължи на гореспоменатите различия в насочеността на различните разломни структури, които са подложени на различни напрежения. При тази извадка механизми, отношението на трите главни напрежения за **Крупнишка** област е в равновесие $R = 0.5$, като 68% и 95% доверителните интервали в диаграмата на напреженията показва преобладаващ екстензионен режим.

Kotzev et al. (2004) определят регионалния тензор на напреженията по метода на Gephart and Forsyth (1984). На базата на 23 фокални механизма, авторите определят северно-южен, екстензионен режим със стойности на трите главни напрежения (pl/az) $\sigma_1 = 42^\circ/274^\circ$, $\sigma_2 = 42^\circ/109^\circ$, $\sigma_3 = 7^\circ/12^\circ$, но не посочват грешка на получените резултати. Botev et al. (2006) също определят регионалните напрежения в Крупнишката разломна система по метода на Gephart and Forsyth (1984), на базата на 25 фокални механизма, като потвърждават север-юг посока на екстензия. Определените стойности на трите главни напрежения са (pl/az) $\sigma_1 = 43^\circ/92^\circ$, $\sigma_2 = 33^\circ/260^\circ$, $\sigma_3 = 3^\circ/179^\circ$, но също не посочват грешка на получените резултати. Van Eck and Stoyanov (1996) отново използват метода на Gephart and Forsyth (1984), на базата на 41 фокални механизма, като получават идентична посока на екстензия, но получената стойност на параметъра $R = 0.4$, говори по-скоро за режим на слаба компресия. Определените стойности на трите главни напрежения са (pl/az) $\sigma_1 = 18^\circ/262^\circ$, $\sigma_2 = 71^\circ/104^\circ$, $\sigma_3 = 6^\circ/355^\circ$, а стойността на грешката е $\Theta = 11.04^\circ$, които посоки на напреженията напълно съвпадат с определените от автора на дисертацията север-юг субхоризонтална екстензия в региона. Всички резултати показват екстензия в посока север – юг.



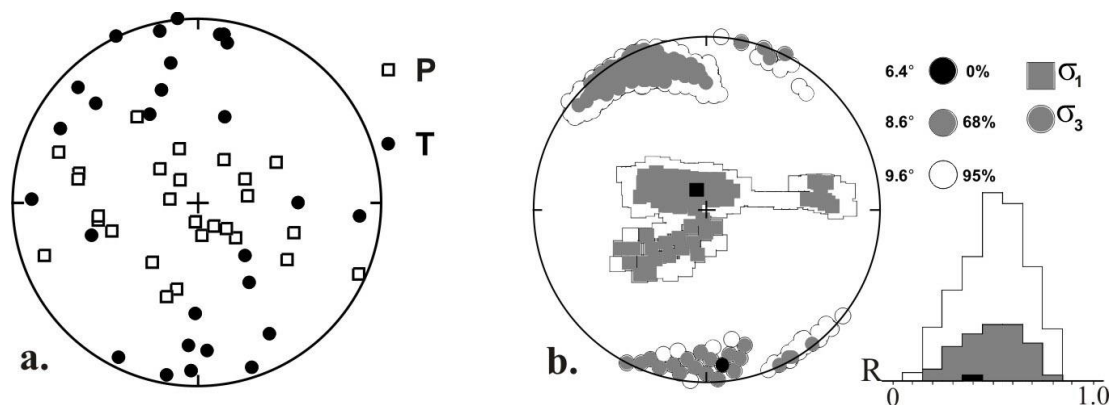
Фиг. 4.2.8. Долна фокална полусфера на Вулф: **a.** Проекции на осите на опън Т и натиск Р на 19 бр. фокални механизма в Струмска сеизмична зона, Беласишка разломна система; **b.** Решение за полето на регионалните напрежения с диаграма на 68% и 95% доверителни интервали.

Броят на фокалните механизми в **Беласишката** разломна система също е редуциран от 32 на 19, като грешката е сведена до $\Theta = 8.302^\circ$. (фиг. 4.2.8.a. и b.). Изключени са механизмите, намиращи се западно от гр. Валандово (фиг. 3.2.10), които видимо се откъсват от останалите. Въпреки това, 68% и 95% доверителни интервали на

осите на максимална и минимална компресия показват застъпване на стереографската проекция (фиг. 4.2.8.b.), което показва сериозни локални хетерогенности в полето на напреженията или грешки при определянето на фокалните механизми. Открояват се съвпадащи посоки на трите главни напрежения ($pl/az - \sigma_1 = 51^\circ/235^\circ$, $\sigma_2 = 38^\circ/70^\circ$, $\sigma_3 = 7^\circ/334^\circ$), с тази на Крупнишката разломна система. Параметърът $R = 0.7$, което показва доминиращ субхоризонтален, екстензионен режим в север-северозападна посока.

Botev et al. (2006) определят регионалните напрежения в Беласишката разломна система по метода на Gephart and Forsyth (1984), на базата на едва 6 фокални механизма, като потвърждават субхоризонталната север-юг посока на екстензия. Определените стойности на трите главни напрежения са (pl/az) $\sigma_1 = 50^\circ/94^\circ$, $\sigma_2 = 12^\circ/235^\circ$, $\sigma_3 = 10^\circ/173^\circ$, но не посочват грешка на получените резултати.

4.2.7. Родопска сеизмична зона (Z7 в таблица 4.2.1.): Епицентрите на 53-те земетресения с решения на фокалните механизми са дифузно разпределени по цялата територия на зоната (фиг.3.2.13.a.). Грешката при определянето на регионалния тензор на напреженията за цялата област надвишава 10° , което е ясен признак за хетерогенност в полето на напреженията. За намаляване на грешката, наличните фокални механизми са отнесени към разломните системи на **Местенска, Чепинската, Доспатската, Девинската и Ардинската** депресии.



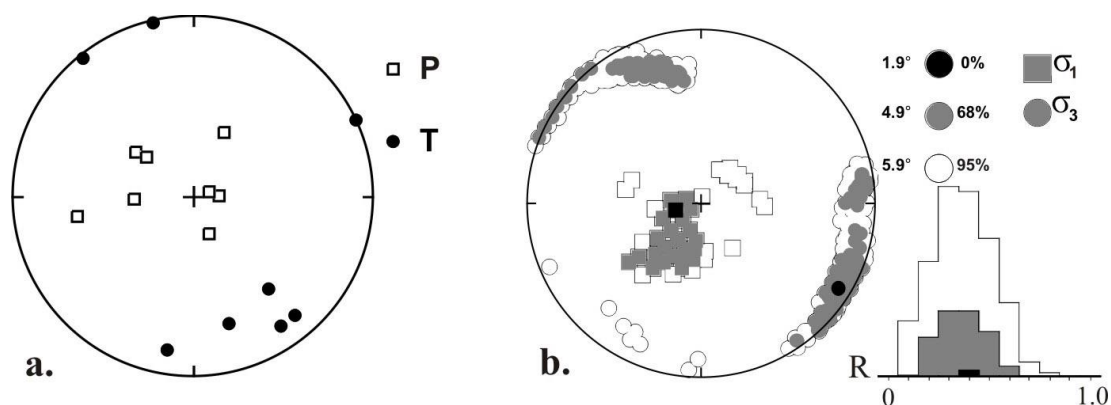
Фиг. 4.2.9. Долна фокална полусфера на Вулф: **а.** Проекции на осите на опън Т и натиск Р на 28 бр. фокални механизма в Родопска сеизмична зона, Местенска разломна система; **б.** Решение за полето на регионалните напрежения с диаграма на 68% и 95% доверителни интервали.

Най-голям брой фокални механизми (общо 28) в Родопска сеизмична зона са съсредоточени по **Местенската** разломна система. От разпределението на осите на

минимална Т и максимална Р компресия (фиг. 4.2.9.a.), се наблюдава доминиращо север-северозапад - юг-югоизток направление на опън. Тензорът на регионалните напрежения потвърждава субхоризонталната посока на опън в южно направление и почти субверикална посока на максимална компресия (фиг. 4.2.9.b.) (pl/az) $\sigma_1 = 80^\circ/334^\circ$, $\sigma_2 = 3^\circ/83^\circ$, $\sigma_3 = 10^\circ/174^\circ$, които много добре се очертават от 68% и 95% доверителните интервали. В зоната преобладава слабо доминиращ компресионен режим $R = 0.4$, като според диаграмата на 68% и 95% доверителните интервали има равенство в стойностите на трите главни напрежения. Гореизложените резултати са придружени от една добра стойност на мисфит $\Theta = 6.424^\circ$, която говори за добра хомогенност в полето на регионалните напрежения в района на Местенската депресия.

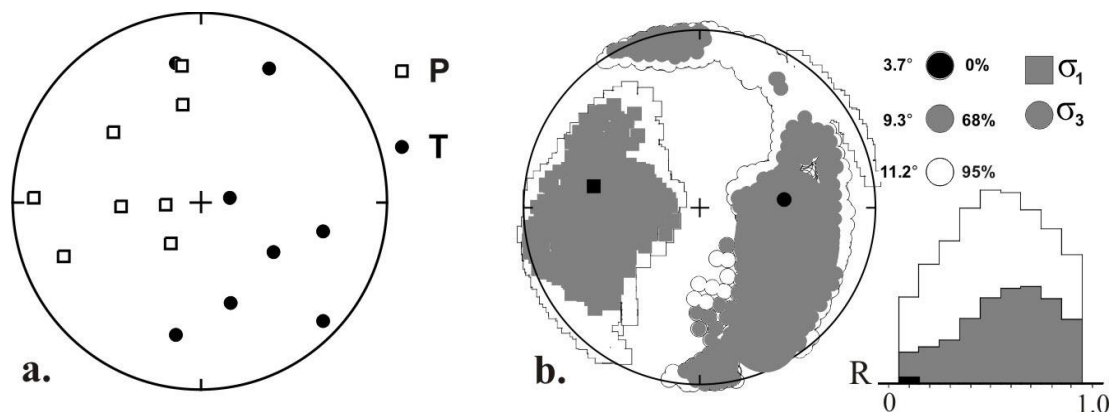
Botev et al. (2006) определят тензора на регионалните напрежения за Местенската депресия по метода на Gephart and Forsyth (1984), на базата на 8 фокални механизма. Определените стойности на трите главни напрежения са (pl/az) $\sigma_1 = 46^\circ/54^\circ$, $\sigma_2 = 31^\circ/314^\circ$, $\sigma_3 = 15^\circ/147^\circ$, като потвърждава север-южната посока на на екстензия в зоната, но посоката и ъгъла на затъване на оста на максимална компресия силно се различават, което се дължи на броя и вида използвани фокални механизми.

Изхождайки от твърдението, че структурите в Западнородопския блок са с предимно северозапад-югоизточно направление, зародени по едно и също време и под еднакви условия (Йовчев и др., 1971), и поради малкия брой определени фокални механизми в **Чепинската и Доспатската** депресии (по 4 бр. във всяка), е направено обединяване на механизмите. Грешката при определянето на регионалния тензор на напреженията е едва $\Theta = 1.926^\circ$, която вероятно се дължи на макия брой налични фокални механизми. Разпределението на осите на опън Т и натиск Р (фиг. 4.2.10.a.) изключително много наподобява разпределението на осите в Местенската разломна система - север-северозапад - юг-югоизток направление на опън. Тензорът на регионалните напрежения също потвърждава субхоризонталната посока на опън, но направлението е югоизточно, а посоката на максимална компресия също е почти субверикална (фиг. 4.2.10.b.) (pl/az) $\sigma_1 = 78^\circ/253^\circ$, $\sigma_2 = 9^\circ/31^\circ$, $\sigma_3 = 8^\circ/122^\circ$, както при регионалния тензор на напреженията на Местенската депресия, като 68% и 95% доверителните интервали са много добре очертани. Дори параметърът $R = 0.4$, показва идентичен слабо доминиращ компресионен режим.



Фиг. 4.2.10. Долна фокална полусфера на Вулф: **a.** Проекции на осите на опън Т и натиск Р на 8 бр. фокални механизма в Родопска сеизмична зона, Чепинска и Доспатска разломни системи; **b.** Решение за полето на регионалните напрежения с диаграма на 68% и 95% доверителни интервали.

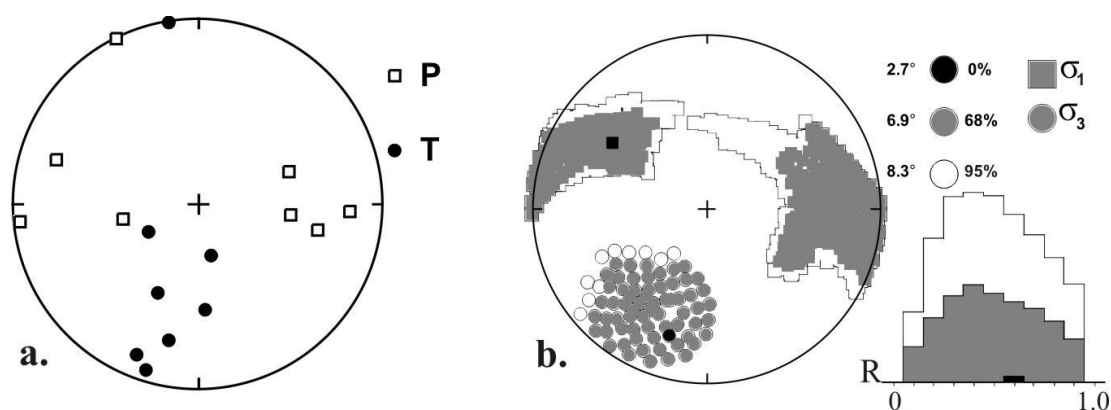
Всички тези прилики между получените резултати за Местенската, Чепинската и Доспатската разломни системи, показват, че върху източнородопските разломни структури в действителност действат идентични регионални напрежения. Тези резултати се потвърждават също от проведените геоложки, геодезични и сеизмоложки изследвания на основните разломи в източната част на Родопите (реките Места и Доспат), от Георгиев и др. (2002), Georgiev et al. (2006a), като изследват вида, посоките на затъване и активността им.



Фиг. 4.2.11. Долна фокална полусфера на Вулф: **a.** Проекции на осите на опън Т и натиск Р на 8 бр. фокални механизма в Родопска сеизмична зона, Девинска разломна система; **b.** Решение за полето на регионалните напрежения с диаграма на 68% и 95% доверителни интервали.

Не толкова добри са резултатите при определяне на регионалния тензор на напреженията в **Девинската** депресия. Наличните едва 8 фокални механизма на огнищата

на земетресения (разположението на осите е показано на фиг. 4.2.11.a.) показват застъпване на 95% доверителните интервали на осите на опън и натиск (фиг. 4.2.11.b.), въпреки малката грешка $\Theta = 3.656^\circ$. Параметърът $R = 0.1$, което значи, че големината на междинното нормално напрежение е приблизително равна на тази на максималното ($\sigma_2 \approx \sigma_1$), т.е. в зоната има режим на двуосна девиаторна компресия в западна посока ($pl/az - \sigma_1 = 39^\circ/281^\circ$, $\sigma_2 = 8^\circ/184^\circ$, $\sigma_3 = 50^\circ/85^\circ$), но според диаграмата на 68% и 95% доверителните интервали, режимът би трябвало да бъде по-скоро екстензионен. Тези противоречиви резултати вероятно се дължат на малкия брой определени фокални механизми или на грешки в определянето на някои от тях.



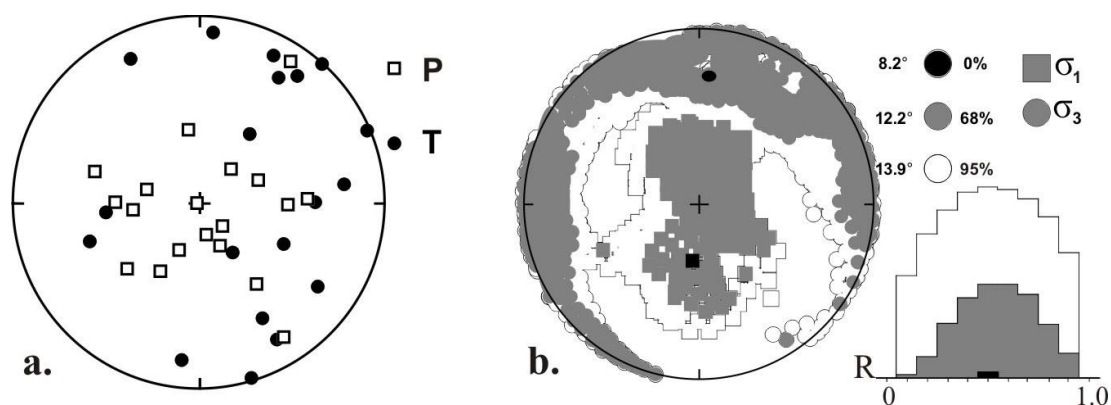
Фиг. 4.2.12. Долна фокална полусфера на Вулф: **a.** Проекции на осите на опън Т и натиск Р на 8 бр. фокални механизма в Родопска сеизмична зона, Кърджалийска депресия; **b.** Решение за полето на регионалните напрежения с диаграма на 68% и 95% доверителни интервали.

Броят на определените фокални механизми в **Кърджалийската** разломна система е 9, като е изключен най-южният механизъм на фиг. 3.2.13.a., който се намира на гръцка територия. Осите на опън Т и натиск Р са показани на фиг. 4.2.12.a., като се забелязва север-юг посока на екстензия и изток-запад посока на компресия. Така изглежда и регионалният тензор на главните напрежения (фиг. 4.2.12.b.), като има лек превес на екстензията в региона ($R = 0.6$) в южна посока ($pl/az - \sigma_1 = 35^\circ/305^\circ$, $\sigma_2 = 44^\circ/78^\circ$, $\sigma_3 = 25^\circ/196^\circ$). Диаграмата на 68% и 95% доверителните интервали показва по-скоро равновесие на трите главни напрежения, а малката грешка $\Theta = 2.728^\circ$ показва добра хомогенност на напреженията. Dobrev (2008) определя северозапад-югоизточна посока на компресия в областта на руйните на Перперикон, която посока съвпада с определната максимална компресия от регионалния тензор на напреженията.

Kotzev et al. (2004) определят регионалния тензор на напреженията за цялата Родопска зона по метода на Gephart and Forsyth (1984). На базата на 13 фокални механизма, авторите определят северно-южен екстензионен режим със стойности на трите главни напрежения (pl/az) $\sigma_1 = 13^\circ/267^\circ$, $\sigma_2 = 39^\circ/18^\circ$, $\sigma_3 = 48^\circ/171^\circ$, но не посочват грешка на получените резултати. Определената екстензионна посока съвпада с определените от автора на дисертацията субхоризонтална посоки на екстензия за Местенската, Чепинската, Доспатската и Ардинската депресии, но ъгълът на затъване определен от Kotzev et al. (2004) е по-близък до този на Девинската разломна система (50°). Посоките на максимална компресия са близки, но отново има разминаване при определяне на ъглите на затъване. Kotzev et al. (2004) са определили субхоризонтален ъгъл на затъване на оста на компресия (13°), докато изчислените ъгли на максимална компресия за западните Родопи са почти субвертикални ($\approx 80^\circ$) и намаляват до към 35° в източните Родопи. Тези разлики се дължат на броя и вида на използваните механизми.

4.2.8. Средногорска сеизмична зона (Z8 в таблица 4.2.1.): Епицентрите на 45-те земетресения в областта, с решения на фокалните механизми са съсредоточени в три разломни системи – **Маришка, Тунджанска и Манастирски възвишения**. Грешката при определянето на регионалния тензор на напреженията за цялата област надвишава 13° , което е ясен признак за хетерогенност в полето на напреженията. За намаляване на грешката, наличните фокални механизми са разпределени към трите гореспоменати разломните системи.

За определяне на регионалния тензор на напреженията в **Маришката** разломна система са използвани 19 от наличните 28 бр. фокални механизма. Причината за намаляване на броя на използваните механизми е голямата грешка в региона $\Theta = 12^\circ$, която е ясен признак за хетерогенност в полето на напреженията. Изключени са 7-те фокални механизма, които видимо се откъсват от основната група (фиг. 3.2.14.а.), както и механизмите на двете силни земетресения от април 1928 г., тъй като високият им магнитуд им дава най-голям тегловен коефициент при определянето на регионалния тензор на напреженията, а същевременно използваните косвените методи за определяне на техните механизми не дават абсолютно категорично решение. По този начин грешката е намалена на $\Theta = 8.213^\circ$, което също показва известна хетерогенност в полето на напреженията. Допълнителна редукция на механизмите, чрез разпределянето им към различните по вид и насоченост разломи се оказва изключително сложна задача и не бе проведено в настоящата дисертация.



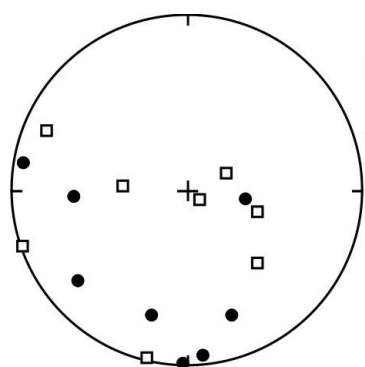
Фиг. 4.2.13. Долна фокална полусфера на Вулф: **а.** Проекции на осите на опън Т и натиск Р на 19 бр. фокални механизма в Средногорска сеизмична зона, Маришка разломна система; **б.** Решение за полето на регионалните напрежения с диаграма на 68% и 95% доверителни интервали.

На фиг. 4.2.13.а. е дадено разпределението на осите на опън и натиск на 19-те използвани фокални механизма. Не се забелязва обединяващ тренд в посоката на екстензия, като единствено има известна субвертикалност на Р-осите. Това се потвърждава и от посоките на регионалните напрежения (фиг. 4.2.13.б., pl/az - $\sigma_1 = 63^\circ/186^\circ$, $\sigma_2 = 0^\circ/95^\circ$, $\sigma_3 = 27^\circ/5^\circ$), като има равенство в стойностите на трите главни напрежения, $R = 0.5$. Областите на екстензия и компресия на 95% доверителните интервали имат застъпване, показващо локални хетерогенности в полето на напреженията.

Kotzev et al. (2004) определят тензора на регионалните напрежения, на базата на 12 фокални механизма по метода на Gephart and Forsyth (1984), като определят север-североизток – юг-югозападна посока на екстензия. Определените стойности на трите главни напрежения са (pl/az) $\sigma_1 = 51^\circ/134^\circ$, $\sigma_2 = 35^\circ/283^\circ$, $\sigma_3 = 16^\circ/24^\circ$, като няма посочена стойност на грешката. Van Eck and Stoyanov (1996) също определят регионалните напрежения в Маришката разломна система по метода на Gephart and Forsyth (1984), на базата на 17 фокални механизма, като определят север-юг посока на екстензия, но параметърът $R = 0.4$, говори по-скоро за режим на слаба компресия в средата. Определените стойности на трите главни напрежения са (pl/az) $\sigma_1 = 45^\circ/270^\circ$, $\sigma_2 = 45^\circ/95^\circ$, $\sigma_3 = 4^\circ/5^\circ$, а стойността на грешката е $\Theta = 10.96^\circ$, които стойности напълно подкрепят определените от автора на дисертацията север-юг, субхоризонтална екстензия в региона.

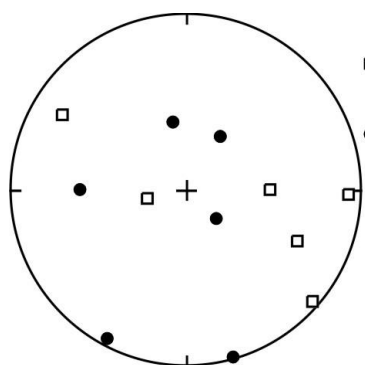
Броят на определените фокални механизми в **Тунджанската** разломна система е 10, но поради високата грешка ($\Theta = 11^\circ$), е направено редуциране на броя на използваните

механизми на 8, с което грешката е намалена на $\Theta = 7.548^\circ$. Изключени са двата най-западно разположени фокални механизма на фиг. 3.2.15.a., които видимо се откъсват от останалата извадка. На фиг. 4.2.14. е показано разпределението на осите на опън и натиск. Няма ясен тренд на разпространение на осите, като се забелязва струпване на осите предимно в югозападния квадрант на стереографската проекция. Определените посоките на трите главни напрежения са (pl/az) $\sigma_1 = 56^\circ/37^\circ$, $\sigma_2 = 4^\circ/300^\circ$, $\sigma_3 = 34^\circ/207^\circ$, а параметърът $R = 0.1$ показва доминиращ режим на компресия. Доверителните интервали на компресия и екстензия не са показани, тъй като имат големи застъпвания и заемат почти цялата площ на стереографската проекция. Тези лоши резултати в областта вероятно се дължат на сериозна хетерогенност в полето на напреженията в областта или на недостатъчен брой, или грешно определени фокални механизми.



Фиг. 4.2.14. Долна фокална полусфера на Вулф:
 □ P Проекции на осите на опън T и натиск P на 8 бр.
 • T фокални механизма в Средногорска сеизмична зона, Тунджанска разломна система.

Подобни не особено добри резултати са получени и в областта **Манастирски възвишения**. Броят на определените фокални механизми е едва 6, с малка стойност на грешката $\Theta = 3.718^\circ$. На фиг. 4.2.15. е показано разпределението на осите на масимална P и минимална T компресия. Посоките на трите главни напрежения са (pl/az) $\sigma_1 = 23^\circ/84^\circ$, $\sigma_2 = 33^\circ/337^\circ$, $\sigma_3 = 47^\circ/202^\circ$, а параметърът $R = 0.9$ показва режим на доминираща екстензия. Доверителните интервали на компресия и екстензия не са показани, тъй като заемат почти цялата площ на стереографската проекция. Тези лоши резултати в областта вероятно се дължат на недостатъчния брой определени фокални механизми.



Фиг. 4.2.15. Долна фокална полусфера на Вулф:
 □ P Проекции на осите на опън T и натиск P на 6 бр.
 • T фокални механизма в Средногорска сеизмична зона, огнище Манастирски възвишения.

ГЛАВА 5

ГЕОДИНАМИЧЕН АНАЛИЗ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

5.1. Обобщен анализ на получените резултати

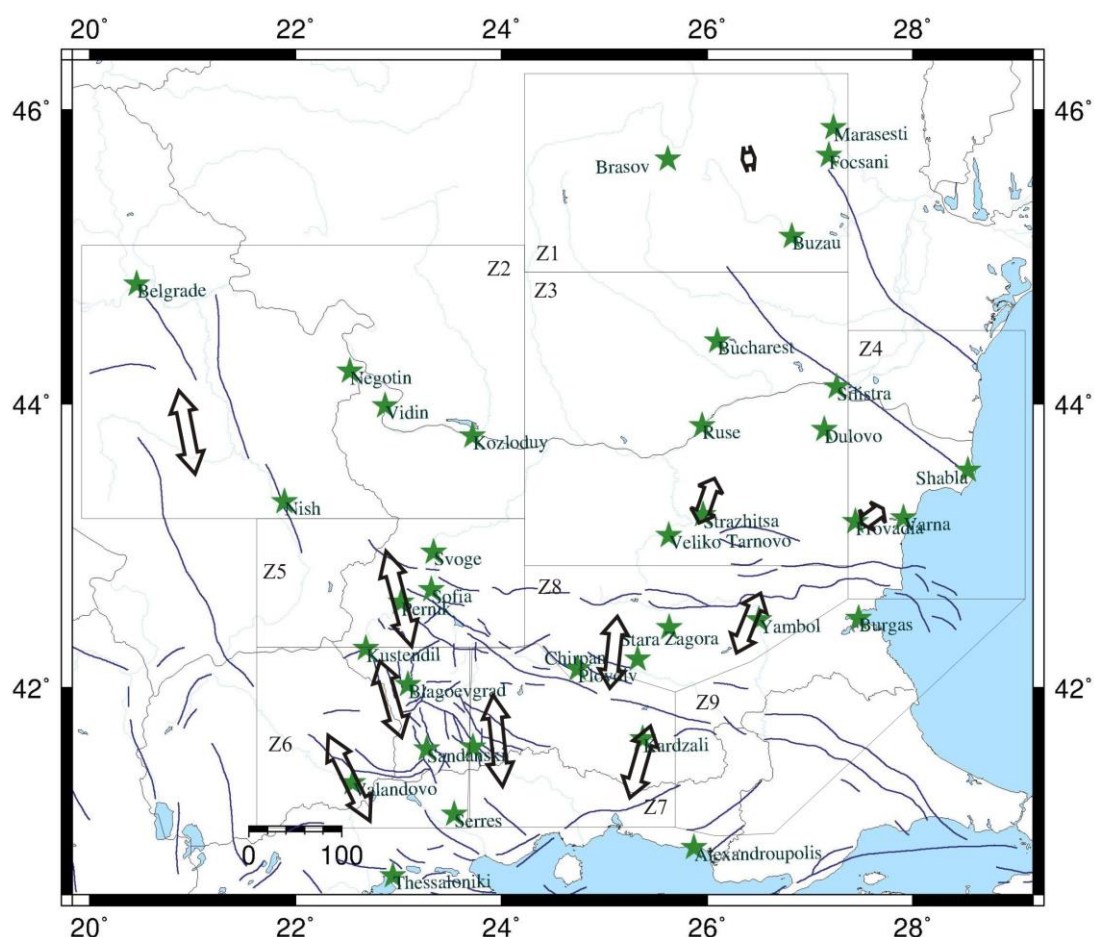
Относно параметрите на решенията на механизмите в окончателния каталог можем да обобщим, че чисто отседните механизми са много малко на брой и почти всички земетресения са предимно от разседен тип, а значително по-малко случаи - от възседен тип, но и в двата случая с известна (в някои случаи значителна) отседна компонента. Като цяло нормалните разседни движения са значимо преобладаващи (около 3/4) за почти целия район на изследване (с изключение на сеизмична зона Вранча), като териториално това преобладаване намалява от югозапад на североизток, където разседният и възседент тип движение са в равновесие. Като цяло осите на декомпресия на геодинамичното напрежение са в преобладаващо близхоризонтално направление – средно 26° спрямо хоризонта, а осите на максимална компресия са значително по-вертикално разположени - средно 44° спрямо хоризонта (от Глава 3). За преобладаващия нормален разседен тип механизми доминиращото азимутално направление на осите на декомпресия (или екстензия) за цялата страна е почти север – юг с леко отклонение на запад с ъгъл на затъване средно 15° спрямо хоризонта (предимно в интервала от 0° до около 30° ъгъл на затъване). Осите на компресия в случаите на ясни възседни движения са със значително по-голяма степен на вариации - от 5° до 55° ъгъл на затъване (средно 20° спрямо хоризонта) и като цяло показват изток-югоизток – запад-северозапад азимутално направление.

За целите на геодинамичния анализ на тектонски активните области с преобладаваща приповърхностна сеимичност (каквато е територията на България), от съществено значение е видът на тектонското напрежение в приповърхностен план. Теоретично, режимът на моделираните чрез метода на Gephart and Forsyth (1984) на преобладаващите регионални напрежения зависи както от големината на параметъра R , така и от вида на наклоните (субхоризонтален, субвертикален) на съответните оси на максимална компресия σ_1 и екстензия σ_3 , при определяне тензорите на регионалните напрежения в отделните зони. Най-общо, за всички зони прави впечатление доминирането на условия за нормален разседен тип движения – параметърът R демонстрира наличието на преобладаващ екстензионен режим на напрежение, а осите на декомпресия σ_3 (или

екстензия) са с почти хоризонтална ориентация. Практически геодинамичните условия в земните недра рядко позволяват вариране на параметъра R в широки граници около нормалната стойност $R = 0.5$. В този смисъл получените от нас резултати демонстрират известна несъгласуваност (или наличие на силно нееднородна среда). В три от зоните параметърът R достига или надвишава стойност 0.8, а в три от огнищните области показва стойност 0.1. Значителното изменение на параметъра R в повечето зони сочи, че големините на принципните моделни напрежения в отделните зони се различават значимо една спрямо друга – индикация за твърде нееднородна по напрегнатост земна кора като цяло.

От обобщения анализ на картината на разпределението на регионалните напрежения представени по зони в Глава четвърта се вижда (фиг. 5.1.2.), че централната част на Северна България се характеризира със слаби север-североизточни – юг-югозападни екстензионни напрежения в приповърхностен хоризонтален план, което е показател за наличие на нормален екстензионен режим. Максималните компресивни напрежения са ориентирани в направление изток-запад. Решението за полето на регионалните напрежения (фиг. 5.1.2.) за Североизточна България показва доминиращ субхоризонтален компресионен режим в западно направление, а екстензията е предимно вертикална - проекцията в хоризонтално направление е с много малки стойности. От тектонска гледна точка прави впечатление, че получените параметри на полетата на регионални напрежения за Горно-Оряховската и Североизточната зона се съгласуват помежду си в известна степен. Този факт вероятно обективно отразява единния тектонски произход на зоните принадлежащи на относително стабилната и еднородна Мизийска структурна провинция. Нормален екстензионен режим се наблюдава в Средногорската зона, където максималните екстензионни напрежения са ориентирани също в север-североизточно – юг-югозападно направление. Максималните компресивни напрежения тук са с междинно направление, относително по-полегато в сравнение със Северна България. Доминиращ субхоризонтален декомпресионен (екстензионен) режим със север-северозападна – юг-югоизточна ориентация демонстрира Софийска сеизмична зона. Нормален екстензионен режим с практически хоризонтална насоченост със север-северозапад – юг-югоизточна ориентация се създава в Струмската зона, където се наблюдават и значителен процент отседни движения. Компресивните напрежения тук са значително полегати, с изток-североизточна ориентация и биха могли да доведат до хоризонтални придвижвания по предварително оформени разломни плоскости с

подходящо направление. Родопската зона се характеризира с параметри на тензора на напреженията за открито отседен режим – максималните компресивни напрежения са практически хоризонтални с посока изток-запад, а екстензионните са по нормалата им, със близкхоризонтален наклон. Прави впечатление, че екстензионният режим в западните Родопи е съизмерим като направление с този в Струмската сеизмична зона – север-северозапад – юг-югизток, докато направлението на екстензионния режим в Източно-Родопския блок наподобява повече този на Средногорската структурна провинция – север-североизток – юг-югозапад. От друга страна значимото разминаване в параметрите на тензорите на регионалните полета на напреженията в Струмската и в Родопската зона вероятно отразява влиянието на силно хетерогенния и метаморфозиран строеж на иначе общата им структурно-тектонска основа - Македоно-Родопския масив.



Фиг. 5.1.2. Хоризонтална проекция на осите на минимална компресия (или на опън) на моделираните тензори на регионалните геодинамични напрежения за отделните сеизмични зони. Z1-Z9 сеизмични зони: Z1 - Вранча, Z2 - Неготинска крайна, Z3 - Горна Оряховица, Z4 - Североизточна България, Z5 - Софийска, Z6 - Струмска, Z7 - Родопска, Z8 - Средногорска, Z9 - Бургаска; Тектонска карта: Barrier et al. (2004), Georgiev et al.(2007).

Като цяло за територията на страната отбелязваме, че доминиращата близкочоризонтална екстензия в преобладаваща посока север-юг (според определените принципни оси на тензорите на регионалните напрежения - фиг. 5.1.2.) кореспондира добре с образуването на съответните депресионни структури с посока изток-запад, например Ресенския ров в Горно-Оряховската сеизмична зона (Z3), Софийският грабен в Софийска сеизмична зона (Z5), Симитлийския и Струмешнишкия грабен в Струмската сеизмична зона (Z6), Горнотракийската грабенова система в Средногорската сеизмична зона (Z8), и др. Екстензията не съвпада отчетливо с основните морфоструктури, а се разполага напречно на тях, което предполага един относително млад етап на деформация. Екстензионните процеси са по-значими в Западна България и най-вече в Югозападна България, където осите на декомпресия от определените тензори на регионалните напрежения са почти хоризонтални и са с лека ориентация на север-северозапад – юг-югоизток. В същото време тензорите на напрежения от централната към източната част на района на изследване променят направленията на осите на декомпресия към север-североизток – юг-югозападна посока. По такъв начин маркираме меридионална ивица на раздел в ориентацията на напреженията на опън в централната част на страната, определена от линията между Софийска и Средногорска зона. Трябва да отбележим, че на фона на общата доминираща екстензия в хоризонтално направление се наблюдават и локални зони на относителна компресия (не означени на фиг. 5.1.2), вероятно в резултат на разликите от относителното придвижване на отделни земекорни блокове. Така например, в североизточна посока (към акваторията на Черно море) екстензия в хоризонтално направление почти липсва или е с много малки стойности, като доминира режимът на компресия. Още по на север, във Вранчанската сеизмична зона, в близкочоризонтален план се реализира значителна компресия, която маркира палеосубдукционните особености на сеизмичната зона.

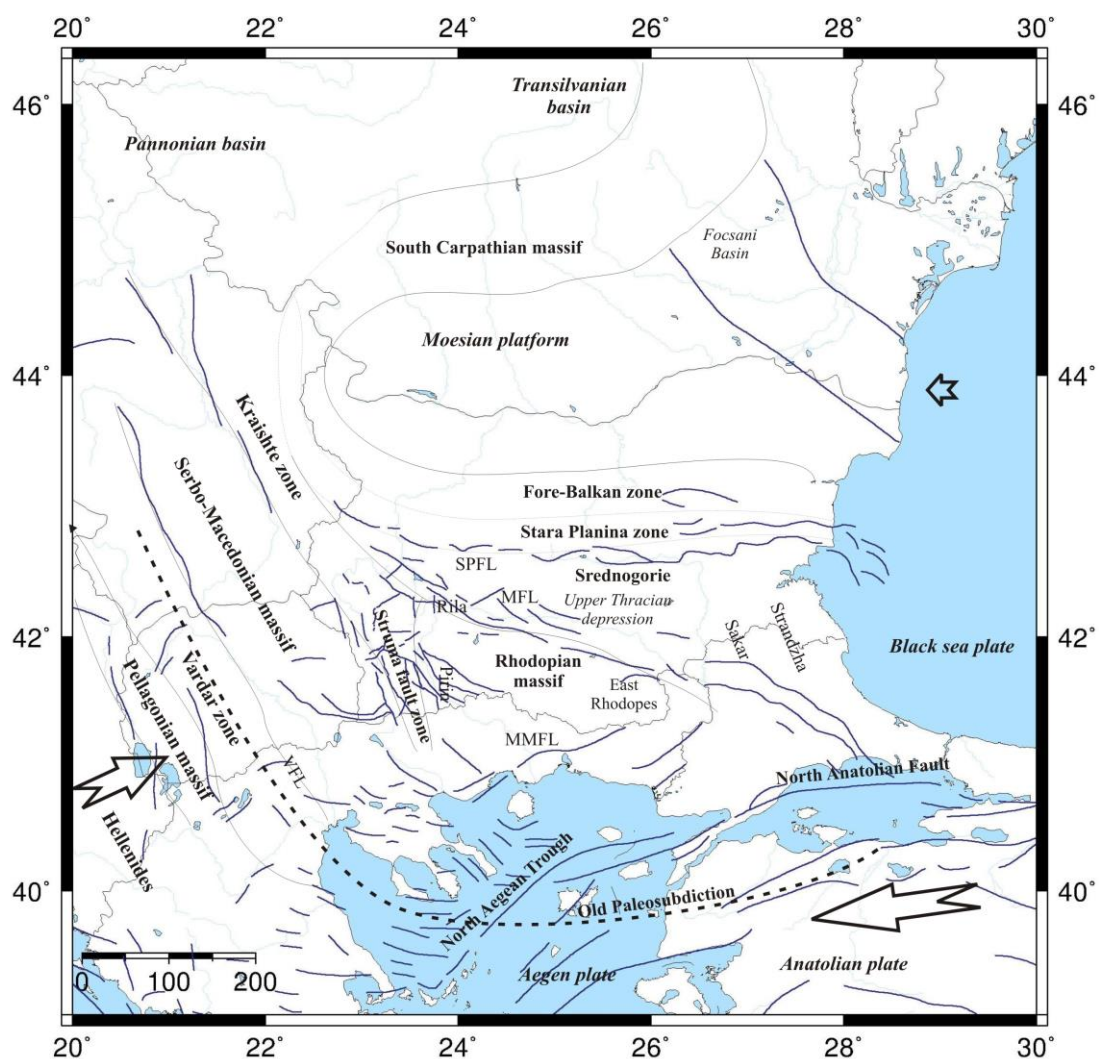
От изключително значение за верификацията на получените резултати при моделирането на геодинамичните напрежения по данни от регистрацията на приповърхностната сеизмичност в територията на страната са изследванията за относителното придвижване на отправни точки от повърхността на земекорните блокове. Въпреки, че съвременните тектонски движения за района на България са значително по-слаби в сравнение с тези в най-активните земетръсни райони, съвременните геодезически методи, с помощта на най-новите геодезически GPS приемници позволяват да се определя хоризонталното положение на точките с милиметрова точност при натрупване на

разломяване, където земните маси са подложени на много по-големи сили на гравитационно въздействие - затова механизмите на конкретните земетресения са с преобладаващо нормален (разседен) характер.

5.2. Върху геодинамиката на централната част на Балканите

Основният резултат от анализа на фокалните механизми и тензорите на регионалните геодинамични напрежения по сеизмологични данни е преобладаването на екстензионен режим в почти всички сеизмични зони на страната. Както е известно, съществуващите съвременни субдукционни процеси в района на Хеленската арка (Южна Гърция) предизвикват основно екстензионен режим в разположения на север Егейски регион (Христова, 1997; McClusky et al., 2000; Burchfield et al., 2005; Hollenstein et al., 2008 и др.). Съществуването на такъв екстензионен геодинамичен режим по българските земи едва ли може да бъде обяснен единствено с тези съвременни субдукционни процеси, доколкото територията на България се намира относително далече от Гръцкото заддъгово пространство (Hellenic arc). Едновременно с това, съществуват много хипотези с доказателства за палеосубдукционни процеси под Централните Балкани, които поддържат поне два обобщаващи варианта - за едни по-стари палеосубдукции от югозапад на североизток и от юг на север под Вардар-Измирската аркоподобна зона (фиг. 5.2.1.), и една по-млада палеосубдукция ориентирана от запад-югозапад към изток-североизток в Йонийския и Адриатически басейни (Boccaletti et al., 1974; Ботев, 1985; Babushka et al., 1986; Spakman, 1986; Ботев и др., 1987; Shanov et al., 1987; Dabovski et al., 1989; Riazkov and Shanov, 1990; Shanov et al., 1992; Kondopoulou et al., 1996; Papazachos and Nolet, 1997; Шанов, 1998; Hatzfeld et al., 1999; и др.). Този колизионен процес влияе на югозападните движения на Анадолската и Северно-Егейската плоча по Северно-Анадолската разломна зона в Егейско море, като предизвикват образуването на екстензионна зона на север от Северно-Егейският праг (North Aegean Trough) (McClusky et al., 2000, Vernant et al., 2014). Същите автори, предполагат, че регионът на северна Гърция и югозападна България извършва малки движения спрямо Евразия, като има ключово положение в регионалната неотектоника и в съвременната тектоника, тъй като е разположен между няколко важни разломни линеамента – Струмски (с посока север-северозапад – юг-югоизток), Маришки (с посока запад-югозапад – изток) и най-северните разклонения на Северноанадолската разлона система. Развитието на тези субдукционни процеси се приемат от повечето автори (гореспоменатите) като основна причина за формирането на съвременната дебела земна кора (варираща между 35 и 56 km според Георгиева, 2013) и дълбоки литосферни

“корени” (високоскоростен обем) под Македоно-Родопското пространство (Централни Балкани). Геодинамичните особености в тази област са тясно свързани с еволюцията на структурите на горната мантия под Балканския полуостров. Установените корово удебеляване и ниска плътност на кората и най-горната мантия, потвърдени със съвременно числено моделиране и от Ботев, 1985; Ботев и др., 1987; Ботев и др. 1988, индуцират изостатически компенсирано издигане на повърхността с мантиен диапиризм и последващ приповърхностен екстензионен колапс на късно-алпийското Македоно-Родопско пространство (Zagorchev, 1992).

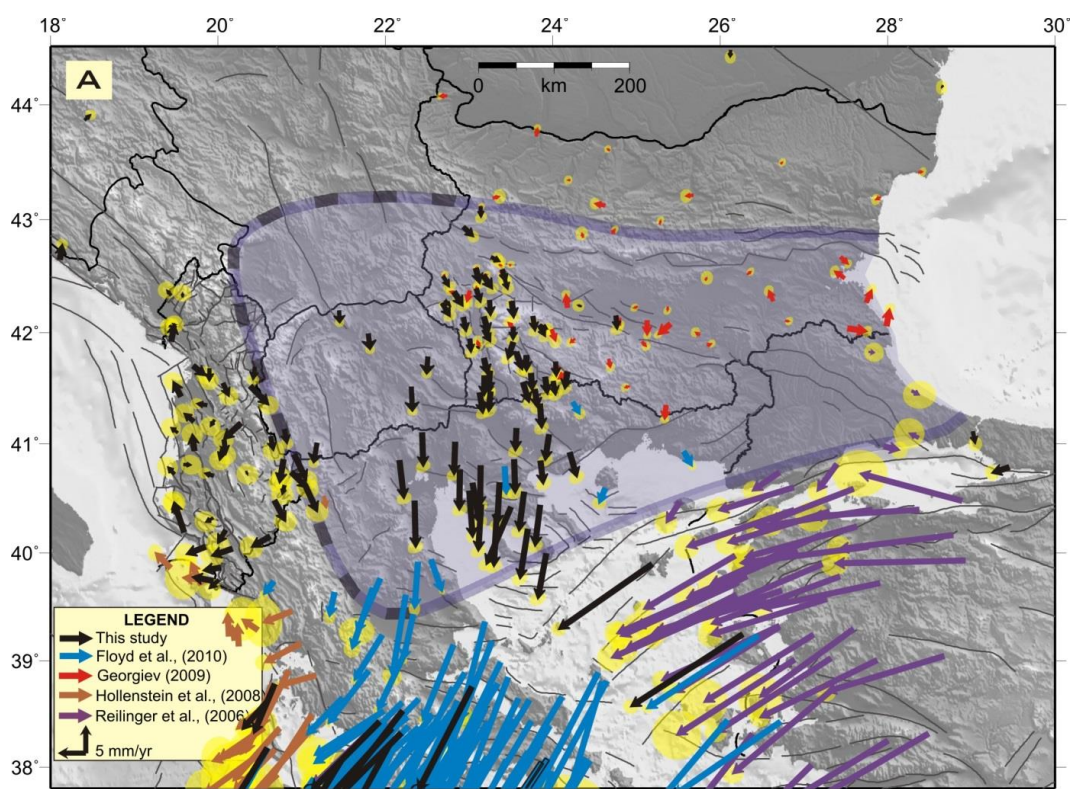


Фиг. 5.2.1. Върху палеогеодинамиката на централната част на Балканския полуостров. Стрелките показват посоките на движение на основните тектонски плочи. Тектонска карта: Barrier et al. (2004), Georgiev et al.(2007) с допълнения.

Съществуването на съвременна тектонска (сеизмична) активност във и около Македоно-Родопския район се свързва със съвременното издигане на региона, който се характеризира с най-дебелата земна кора в Централни Балкани (Беляшки, 2008; Михайлов,

2008;). Приповърхностният колапс на най-удебелената част на Централните Балкани е довел до формиране на първостепенни куполообразни области като Пелагонойския, Сръбско-Македонския, Родопския масиви - фиг. 5.2.1 (Zagorchev, 1992; 1996). Аналогична хипотеза за формирането на второстепенни куполообразни структури с приповърхностен екстензионен колапс, водещ до екстензионен режим на повърхността, изказва и Шанов (1998), въз основа на геоложки данни за високотемпературни формирания във и около Родопския масив.

Според Papadopoulos et al. (1986), Kondopoulou et al. (1996), Hatzfeld et al. (1999) и др. съществуват доказателства за значимо влияние на ориентираните на запад движения на Анадолийската плоча върху Балканското пространство след късния миоцен. За нашето пространство това влияние се състои основно в отваряне на югоизточните маргинални части на Родопската и Средногорската зони, с последваща ротация на Странджа и Сакар по часовниковата стрелка (фиг. 5.2.1). Съгласно Цанков и Николов. (1998), късно-миоценската ротация на Родопския масив предизвиква разтягане и отваряне на земната кора, маркирано от мантийни диапири по границата между Родопския и Средногорския масив. Като следствие по нататък във времето се формира Горнотракийската депресия.



Фиг. 5.2.3. Хоризонтални скорости по GPS данни за Източно-Средиземноморския регион (Matev, 2010)

Съвременното влияние на движенията на Анадолийската плоча върху Балканското пространство се илюстрира великолепно от резултатите на модерните GPS геодезически измервания. GPS-измерванията на повърхностната корова деформация през последните години (Kotzev et al., 1998; Papazachos et al., 1998; McClusky et al., 2000; Kotzev et al., 2004; Georgiev et al., 2006b, 2007; Milev and Vassileva, 2007; Matev, 2010; Mouslopoulou, 2014) показват, че най-големите хоризонтални движения (около и над 35 mm/yr) се регистрират в централната и южна част на Егейската зона (фиг. 5.2.3.). В същото време някои измервания в Северна Гърция показват значително по ниски скорости в южно направление (9-11 mm/yr). Получената значима разлика в скоростите на придвижване говори за съществуването на екстензионна провинция в района на Северно Егейска Гърция. По данни на българските изследователи, Georgiev et al. (2006b, 2007, 2011, 2013), Matev, (2010), Югозападна България се характеризира със скорости около 3-4 mm/yr в южна посока (фиг. 5.2.3.). Съгласно същите автори няколко точки на измерване в Североизточна България демонстрират и по-ниски скорости (1-2 mm/yr) на придвижване в подобно направление. Според Milev and Vassileva (2007) скоростите на придвижване в областта на Фоксанската депресия (Вранча) са в порядъка 3-4 mm/yr, като отново направлението е южно.

Различните скорости на движенията в северна Гърция и в югозападна и северна България, биха могли да се свържат с наличието на субхоризонтални екстензионни напрежения в южна и югозападна България. От картината на фиг. 5.2.3 се вижда, че пространството между Северноегейския ров и Маришкият разломен линеамент (MFL на фиг. 5.2.1.) играе ролята на буферна зона (граница) между северната част на Егейската плоча (с високи хоризонтални скорости) и относително бавно движещите се части на централно балканските области (Георгиев, 2010; Matev, 2010). Екстензионният режим в областта на Северна Гърция (маркиран от разликата в скоростите) и непосредственото влияние на високите скорости на запад-югозапад в северната част на същинската Егейска и Анадолийската плоча, допълнително подпомагат отварянето на югоизточното маргинално продължение на Средногорската структурна провинция (фиг. 5.2.1).

От хоризонтална проекция на осите на екстензия на моделираните тензори на регионалните геодинамични напрежения за отделните сеизмични зони (фиг. 5.1.2.) ясно се вижда намаляването на ъгъла на затъване на осите на екстензия от север на юг, респективно увеличаването на екстензионния режим, което напълно се обяснява с гореизложения геодинамичен модел за региона. Освен това, прави впечатление, че

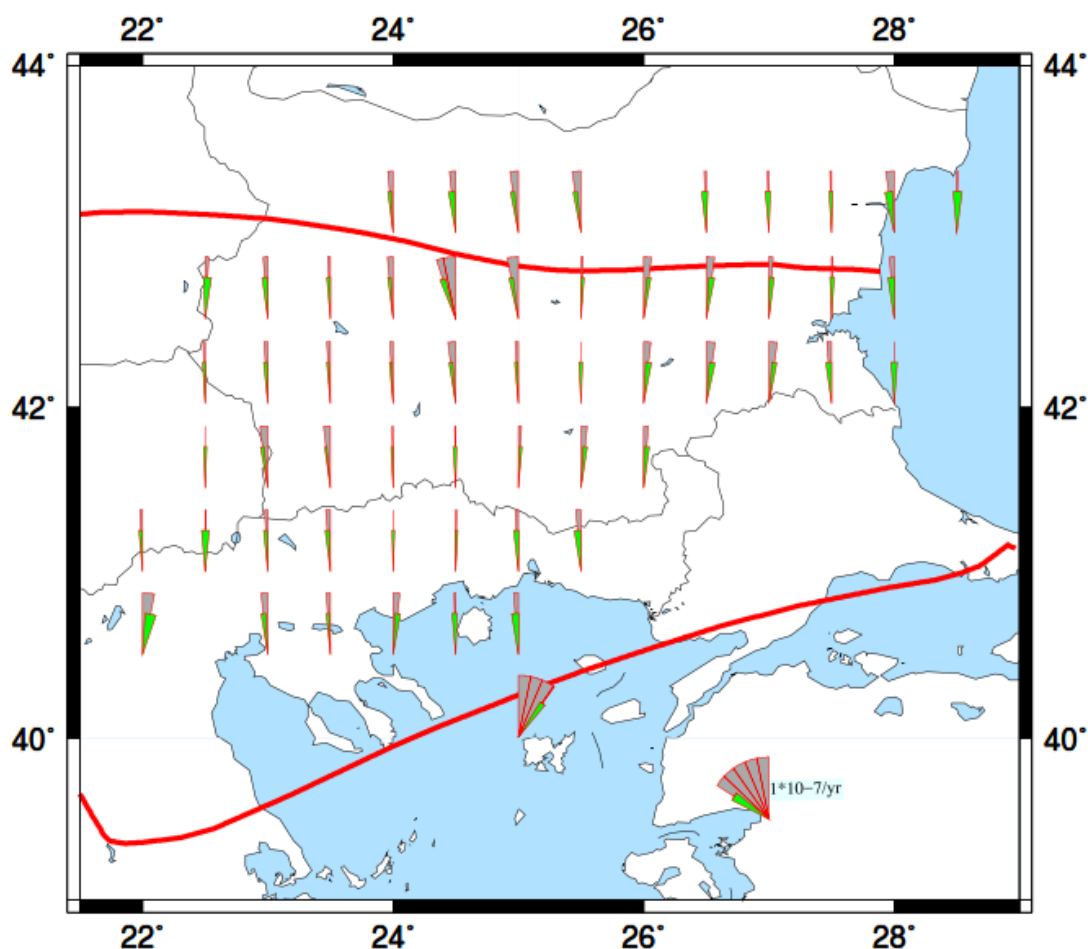
екстензията в източна България е насочена в север-североизток – юг-югозападно направление, докато в западна България екстензията се измества в север-северозапад – юг-югоизточно направление, като се маркира меридионална ивица на раздел в ориентацията на напреженията на опън в централната част на страната, определена от линията между Софийска и Средногорска зона. Сравнявайки тези резултати с получените от Георгиев (2015 г., частна кореспонденция) с напреженията на земната кора (strain rate), получени от хоризонтални скорости чрез GPS измервания (фиг. 5.2.5), прави впечатление много доброто съвпадение в посоките на напреженията на екстензия за всички зони - север-североизток – юг-югозападно направление за източна България и север-северозапад – юг-югоизточно направление за западна, и меридионално отваряне в централна България.



Фиг. 5.2.5. Напрежения на земната кора (strain rate), получени от хоризонтални скорости чрез GPS измервания от фиг. 5.1.3. (Solakov et al., 2015), (Георгиев, частна кореспонденция).

Нещо повече, разглеждайки получените ъглови деформации (share rate) на земната кора, получени от хоризонталните скорости чрез GPS измервания от същия автор, представена на фиг. 5.2.6. (Георгиев, 2015 г., частна кореспонденция), се вижда, че като

цяло ъглови деформации липсват, но точно на границата Софийска - Средногорска зона ротацията на напреженията е с най-големи стойности и се изменя посоката на екстензия от север-североизток – юг-югозападно направление за източна България, до север-северозапад – юг-югоизточно направление за западна България.



Фиг. 5.2.6. Ъглови деформации (share rate) на земната кора, получени от хоризонтални скорости чрез GPS измервания от фиг. 5.1.3. (Solakov et al., 2015), (Георгиев, частна кореспонденция).

Съвпадението в посоките между получените регионални напрежения по сеизмологични данни, определени по метода на Gephart and Forsyth (1984) и получените напрежения (strain rate), и ъглови деформации (share rate) на земната кора, получени от хоризонталните скорости чрез съвременните геодезически методи, с помощта на най-новите геодезически GPS приемници, позволяват да се потвърди с голяма достоверност посоката на екстензионният режим в региона. Категорично екстензията се увеличава от север към юг, като същевременно с това има завъртане на екстензионния режим от север-

северозапад – юг-югоизточно направление за Сърбия, Македония и западна България, до север-североизток – юг-югозападно направление за източна България.

Получените резултати от анализа на наличните фокални механизми, получените от тях тензорите на напреженията в сеизмичните зони на българска територия и прилежащите земи, подкрепени с получените данни от напреженията на земната кора (strain rate) и техните ъглови деформации (share rate), получени от хоризонтални скорости чрез GPS измервания, показват значимо съответствие с изложения по-горе геодинамичен анализ на ситуацията в областта на Централните Балкани. Получените преобладаващи екстензионни напрежения за българската територия с преобладаващо направление север-юг, се обясняват чрез двата основни регионални геодинамични процеса – постколизияният приповърхностен колапс на орогените в Македоно-Родопския масив (подпомаган в днешно време от притискането в дълбочина на Адриатическата плоча от запад) и високите хоризонтални скорости на придвижване на юг в Егейската зона (Георгиев, 2010; Matev, 2010), изложени по-горе.

Екстензионният режим на напреженията в Средногорската зона се подвърждава от различни признаци на рифтогенеза и се съгласува с интерпретацията на днешната екстензионна тектоника за късноалпийската еволюция на зоната с продължаващо и в момента потъване на основните депресионни структури, изброени в предната точка (Беляшки, 2008; Алексиев, 2012). Тези морфоструктури са обградени от неотектонски и кватернерно активни разломни системи и са запълнени с неоген-кватернерни седименти със значителна дебелина (Фиг. 5.2.1.). Според Alexiev (1999), Цанков и Николов (1998), Цанков и др. (1998) и др., различните геоморфоложки критерии, приложени за разпознаване на активните разломи, показват преобладаващо листрично разломяване през кватернера. Това листрично разломяване, както и кватернерната активност на самите депресии, е признак за дълговременна субхоризонтална екстензия, която продължава и до наши дни. Според същите автори, съществуването на листрично разломяване е отличителна характеристика на повечето неотектонски и кватернерни депресии не само в Средногорската зона. В предварително заложеното и повсеместно листрично разломяване може да се търси и причината за честото несъвпадение между главните оси на тензорите на напреженията и осите на напрежения, реализирали всяко едно конкретно земетресение. Несъвпаденията между главните оси на напреженията и индивидуалните такива, получени от фокалните механизми, води до предположението, че земната кора не може да се разглежда с хомогенни якостни характеристики (или като равномерно издръжлива на

напрежение). За обемите на равномерно напрегнати материали е характерно приблизително съвпадение на главните и индивидуалните оси на напреженията. Но ако в средата съществува повърхнина със занижени якостни характеристики или отслабени зони (като предишни разломни повърхнини), ориентацията на принципните оси на тензорите на напреженията може да се различава съществено от тази на индивидуалните. Това се дължи на факта, че много малки тангенциални напрежения върху тази повърхнина са в състояние да провокират приплъзване по повърхнината, даже в случаите, когато тя не е разположена благоприятно към направленията на действащите регионални напрежения. В чисто тектонски план, този феномен се благоприятства и засилва при условията на предварително заложеното в земната кора няколкократно листрично разломяване, каквито са условията на много места в България. В резултат се получава и сравнително не добра обусловеност на решенията по метода на Gephart and Forsyth (1984) при недостатъчно данни, поради малкия брой достатъчно силни земетресения на територията на страната през последните десетилетия.

ГЛАВА 6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представената дисертационна работа е резултат от многогодишните усилия на автора по изучаване на модерните методи за определяне параметрите на земетръсните източници, фокалните механизми на земетресенията в България, изследване на напреженията и геодинамичните особености на земните недра на територията на страната и непосредствено прилежащите земи. В продължение на години авторът участва в провеждане на редица оперативни наблюдения, създава специфичните за фокалните механизми бази от данни, занимава се с обработката на тези данни, изучава и използва поредица модерни компютърни програми. Кандидатът приема активно участие и в някои изследвания, провеждани при външно финансиране. Като цяло дисертацията е посветена на тематика, която се разработва в рамките на планова задача на департамент „Сеизмология” с бюджетно финансиране.

Дисертационната работа е посветена на моделирането, анализа и комплексната количествена интерпретация на механизмите на реализация на земетресенията на територията на България и прилежащите земи, с което да се осветли генезиса на регионалните напрежения в отделните сеизмични зони като основа на геодинамичните процеси в централната част на Балканите.

В процеса на изследване бяха поставени и изпълнени поредица основни и помощни задачи. Потърсени са и са анализирани всички досегашни решения на фокални механизми на земетресения на територията на страната и непосредствено прилежащите земи през последните повече от три десетилетия. С цел хомогенизация и съгласуваност на фокалните параметри се извърши детайлна проверка, тестване и евентуално рекалкулиране на съществуващите решения, като всички параметри на фокалните механизми са унифицирани и представени във вид удобен за моделиране на напреженията в земната кора. Получени са възможно най-голям брой нови решения на механизми на огнищата на слаби земетресения с параметри, удовлетворяващи изискванията за моделиране на регионалните напрежения. За целта са тествани различни видове интерпретаторски и компютърни програми за определяне механизмите на огнищата на земетресенията, докато се стигна до избора на програмата FOCMEC (FOCaI MECanism

Determinations, Snoke, 2009), която е доказала качество и сигурност на получените резултати, като същевременно дава възможност да се направи обективна оценка на грешката на полученото решение. За целите на количественото моделиране на регионалните напрежения се изготви предварително сеизмично зонирание с акцентуване на основните сеизмологични параметри (в това число и фокални параметри) за всяка сеизмична зона. Приложи се инверсният метод, разработен от Gephart and Forsyth (1984), за получаване на параметрите на регионалния тензор на геотектонските напрежения във всяка зона, на базата на сеизмологични данни за фокалните механизми на земетресенията. Направена е обобщена оценка и сравнителен анализ на получените регионални напрежения по сеизмологични данни. Получените резултати са дискутирани в светлината на модерни геодинамични хипотези и съвременни геолого-геодезични данни за придвижванията на земекорните блокове в и около района на изследване.

За постигането на гореизложените цели и резултати е направен обширен литературен обзор и анализ на наличните фокални механизми; съществуващите епизодични сведения за тензорите на напрежения в някои сеизмични зони; съществуващите сеизмични зонирания на базата на сеизмологични, геоложки, геотектонски, гравиметрични, геодезични и др. изследвания, наличните модерни геодинамични хипотези за движенията в областта на Балканския полуостров и България.

Изучени са и са изпробвани различни по вид компютърни програми, като след анализ на методиката и получените резултати са използвани само част от тях.

ПРИНОСИ

1. **За първи път е изследван толкова голям обем от данни – аналогови, цифровани аналогови и цифрови архив с вълнови форми на НОТССИ, общо достъпни архиви с цифрови записи на вълнови форми на сеизмограми, каталожни данни от национални и международни web сайтове, портали, сеизмологични центрове, каталози и статии. В резултат са използвани данни от 175 сеизмични станции на територията на три континента. Разпределението на сеизмичните станции е представено с помощта на авторски карти. Събрани са данни за повече от 500 земетресения с потенциална възможности за определяне на механизма на огнището.**
2. **С помощта на авторски обобщения и илюстрации са представени основните типове комбинации от сили, които характеризират сеизмичните източници, описващият ги тензор на сеизмичния момент и вида на фокалния им механизъм. Описан е методът за определяне на фокални механизми по първо встъпление на Р-вълната, който метод е пояснен с помощта на редица авторски фигури, а други са преработени от автора с цел по-добро представяне на методиката.**
3. **Използваният скоростен модел на Земната кора за определянето на фокалните механизми на огнищата на земетресения е избран аналитично – при сравнение на кинематичните параметри (географски координати на епицентър, дълбочина и др.) за повече от 40 решения на земетресения на територията на България (1990-2013 г.), изчислени с програмите DHYPO и HYPO 71 с 6 различни скоростни модела, като е търсено най-доброто сходство между изчислените решения с двете програми.**
4. В резултат на прилагането на съответните процедури по анализ, тестване, рекалкулация и сравнителен анализ на първоначалната извадка от над 500 земетресения за първи път се достигана до толкова голям брой, достатъчно достоверни решения на механизми - 338 броя, от които 128 са оригинални авторски решения. По този начин е създадена първата систематизирана и хомогенизирана банка от данни съдържаща решения на механизмите на по-силните земетресенията на територията на България и прилежащите земи, почти изцяло на основата на регистрирани земетресения от създаването на НОТССИ до 2013 г.

5. За целите на моделирането на регионалните тензори на геодинамичното напрежение е предложено сеизмотектонско зонирание на България и прилежащите земи на базата на обзор и анализ на основните геоложки морфоструктури и сеизмо-тектонските сведения за областта на централната част на Балканския полуостров. **Представено е разпределението на фокалните механизми и проекциите на осите на опън и натиск за всяка зона изцяло чрез авторски интерпретации и илюстрации.**
6. За първи път е приложен методът за оценка на регионалните тензори на геодинамичното напрежение на Gephart and Forsyth (1984) на основата на създадената единна и хомогенизирана база данни **във всички основни огнища на осем от деветте сеизмични зони** за централната част на Балканите.
7. За първи път е определено разпределението на напреженията за територията на страната, като се установи доминиращата близхоризонтална ос на екстензия, увеличаваща се от север на юг.
8. Екстензионният режим е с преобладаващо север-северозапад – юг-югоизток направление в западната част на територията на изследване и север-североизток – юг-югозападна ориентация за източната, като се маркира меридионална ивица на раздел в ориентацията на напреженията на опън в централната част на страната.
9. За първи път е направена съпоставка между посоките на получените регионални напрежения по сеизмологични данни и напреженията (strain rate) и ъгловите деформации (shear rate), получени от хоризонталните скорости по геодезически GPS данни за района на България, които категорично потвърждават увеличаваща се екстензия от север към юг, като същевременно с това има завъртане на екстензионния режим от север-северозапад – юг-югоизточно направление за Сърбия, Македония и западна България до север-североизток – юг-югозападно направление за източна България.
10. Дискутирани са получените резултати в светлината на модерните геодинамични хипотези за централната част на Балканите. Получена е добра корелация между тях.

Научни публикации включени към дисертацията

1. Some geodynamic anomalies around the Monastery uplifts in Bulgaria , E. Botev, I. Georgiev, D. Dimitrov, V. Protopopova, Proceedings of 6th Congress of Balkan Geophysical Society - Budapest, Hungary, 3-6 October 2011, CD;
2. Fault plane solutions and geodynamics of Bulgarian territory and some adjacent lands, V. Protopopova, I. Georgiev, D. Dimitrov, E. Botev, Proceedings of 7th Congress of Balkan Geophysical Society – Tirana, Albania, 7-10 October 2013, CD;
3. Fault plane solutions of the 2012 M_w 5.6 Pernik (SW Bulgaria) earthquake and the strongest aftershocks, V. Protopopova, Bulg. Geoph. Journal, Sofia, v.39, 2013, 43-51;
4. Focal mechanisms of some earthquakes in the western part of Maritza seismic zone, V. Protopopova, E. Botev, I. Georgiev, Proceeding Papers of Scientific conference with international participation Geography and Regional Science, Pazardzhik, Bulgaria, 30-31 October 2014;
5. Focal mechanisms of some earthquakes in Rhodope seismic zone, E. Botev, V. Protopopova, I. Georgiev, D. Dimitrov, Proceedings of 7th National Geoph. Conference, Sofia, Bulgaria, 20-23 May 2015, CD;

Други научни публикации

1. Data and analysis of the events recorded by NOTSSI in 2011, E. Botev, V. Protopopova, I. Popova, B. Babachkova, S. Velichkova, I. Tzoncheva, S. Dimitrova, V. Boychev, D. Lazarov, P. Raykova, Bulgarian Geoph.Journal, Sofia, v.38, 2012, 34-43;
2. Data and analysis of the events recorded by NOTSSI in 2012, E. Botev, V. Protopopova, I. Popova, Bl. Babachkova, S. Velichkova, I. Tzoncheva, Pl. Raykova, Vl. Boychev, D. Lazarov, Bulgarian Geoph.Journal, Sofia, v.38, 2012, 93-102;
3. Investigation of the 22 May 2012 Earthquake, Pernik, Bulgaria, D. Dimitrov, I. Georgiev, V. Protopopova, E. Botev, Proceedings of 7th Congress of Balkan Geophys. Society – Tirana, Albania, 7-10 Oct. 2013, CD;
4. Data and analysis of the events recorded by NOTSSI in 2013, E. Botev, V. Protopopova, I. Popova, B. Babachkova, S. Velichkova, I. Aleksandrova, Pl. Raykova, Vl.Boychev, Bulgarian Geoph.Journal, Sofia, v.39, 2013, 70-81;
5. The 2012 M_w 5.6 earthquake in Sofia seismic zone and some characteristics of the aftershock sequence, S. Simeonova, D. Solakov, I. Aleksandrova, P. Raykova, V. Protopopova, AIP conference proceedings, Plovdiv, Bulgaria, 10-12 October 2014;
6. Seismicity and nowadays movements along some active faults in SW Bulgaria, N. Dobrev, E. Botev, V. Protopopova, I. Georgiev, D. Dimitrov, AIP conference, Plovdiv, Bulgaria, 10-12 October 2014, Bulgarian Chemical Communications, Vol. 42, 2015, pp. 1–10; **Imp.f. 0.349**
7. Monitoring of the seismicity in Bulgaria, E. Botev, L. Dimitrova, V. Protopopova, B. Babachkova, S. Velichkova, I. Aleksandrova, I. Popova, P. Rajkova, Proceeding Papers of Scientific conference with international participation Geography and Regional Science, Pazardzhik, Bulgaria, 30-31 Oct. 2014;

8. On the seismicity in upper Thracian Valley, E. Botev, V. Protopopova, D. Dimitrov, Proceeding Papers of Scientific conference with international participation Geography and Regional Science, Pazardzhik, Bulgaria, 30-31 October 2014;
9. Long term movements and seismicity in the region of Simitly, N. Dobrev, E. Botev, V. Protopopova, I. Georgiev, D. Dimitrov, Proceeding Papers of Scientific conference with international participation Geography and Regional Science, Pazardzhik, Bulgaria, 30-31 October 2014;
10. Assessment of the efficiency of seismological equipment in extreme weather conditions in Bulgaria - first stage of Livingston Island seismicity study, L. Dimitrova, G. Georgieva, P. Raykova, V. Gurev, I. Aleksandrova, M. Popova, V. Protopopova, Proceedings of 7th National Geoph. Conference, Sofia, Bulgaria, 20-23 May 2015, CD;
11. Geophysics anomalies in Upper-Thracian valley and their connections with the main faults from 14 and 18 April 1928 very strong seismic events and with the recent weak seismicity, D. Dimitrov, E. Botev, V. Protopopova, M. Everhard, E. Mihailov, I. Cholakov, I. Georgiev, Proceedings of 7th National Geophysical Conference, Sofia, Bulgaria, 20-23 May 2015, CD;
12. On the completeness of Bulgarian earthquake data, M. Tsekov, E. Botev, A. Mokreva, V. Protopopova, Proceedings of 7th National Geophysical Conference, Sofia, Bulgaria, 20-23 May 2015, CD
13. A study of the 2012 Mw5.6 earthquake aftershock sequence, D. Solakov, S. Simeonova, Pl. Raykova, I. Aleksandrova, V. Protopopova, M. Popova, Proceedings of 8th Congress of Balkan Geophysical Society – Chania, Crete, Greece, 4-8 October 2015, CD.

Изнесени доклади

1. Data and analysis of the events recorded by NOTSSI in 2011, E. Botev, V. Protopopova, I. Popova, B. Babachkova, S. Velichkova, I. Tzoncheva, S. Dimitrova, V. Boychev, D. Lazarov, P. Raykova, Bulgarian Geoph. Journal, Sofia, v.38, 2012, 34-43;
2. Fault plane solutions and geodynamics of Bulgarian territory and some adjacent lands, V. Protopopova, I. Georgiev, D. Dimitrov, E. Botev, Proceedings of 7th Congress of Balkan Geophysical Society – Tirana, Albania, 7-10 October 2013, CD;
3. Investigation of the 22 May 2012 Earthquake, Pernik, Bulgaria, D. Dimitrov, I. Georgiev, V. Protopopova, E. Botev, Proceedings of 7th Congress of Balkan Geophys. Society – Tirana, Albania, 7-10 Oct. 2013, CD;
4. A detailed study of the Pernik (Bulgaria) seismic sequence of 2012. D. Solakov, S. Simeonova, I. Georgiev, P. Raykova, L. Dimitrova and V. Protopopova, Report of the European Geoscience Union, General Assembly, 27 April – 02 May 2014, Vienna, Austria.
5. The 2012 Mw5.6 earthquake in Sofia seismic zone and some characteristics of the aftershock sequence, S. Simeonova, D. Solakov, I. Aleksandrova, P. Raykova, V. Protopopova, AIP conference proceedings, Plovdiv, Bulgaria, 10-12 October 2014;
6. Seismicity and nowadays movements along some active faults in SW Bulgaria, N. Dobrev, E. Botev, V. Protopopova, I. Georgiev, D. Dimitrov, AIP conference, Plovdiv, Bulgaria, 10-12 October 2014, Bulgarian Chemical Communications, Vol. 42, 2015, pp. 1–10;

Imp.f. 0.349

7. Focal mechanisms of some earthquakes in the western part of Maritza seismic zone, V. Protopopova, E. Botev, I. Georgiev, Proceeding Papers of Scientific conference with international participation Geography and Regional Science, Pazardzhik, Bulgaria, 30-31 October 2014;
8. Monitoring of the seismicity in Bulgaria, E. Botev, L. Dimitrova, V. Protopopova, B. Babachkova, S. Velichkova, I. Aleksandrova, I. Popova, P. Rajkova, Proceeding Papers of Scientific conference with international participation Geography and Regional Science, Pazardzhik, Bulgaria, 30-31 Oct. 2014;
9. On the seismicity in upper Thracian Valley, E. Botev, V. Protopopova, D. Dimitrov, Proceeding Papers of Scientific conference with international participation Geography and Regional Science, Pazardzhik, Bulgaria, 30-31 October 2014;
10. Long term movements and seismicity in the region of Simitly, N. Dobrev, E. Botev, V. Protopopova, I. Georgiev, D. Dimitrov, Proceeding Papers of Scientific conference with international participation Geography and Regional Science, Pazardzhik, Bulgaria, 30-31 October 2014;
11. Focal mechanisms of some earthquakes in Rhodope seismic zone, E. Botev, V. Protopopova, I. Georgiev, D. Dimitrov, Proceedings of 7th National Geoph. Conference, Sofia, Bulgaria, 20-23 May 2015, CD;
12. Assessment of the efficiency of seismological equipment in extreme weather conditions in Bulgaria - first stage of Livingston Island seismicity study, L. Dimitrova, G. Georgieva, P. Raykova, V. Gurev, I. Aleksandrova, M. Popova, V. Protopopova, Proceedings of 7th National Geoph. Conference, Sofia, Bulgaria, 20-23 May 2015, CD;
13. Geophysics anomalies in Upper-Thracian valley and their connections with the main faults from 14 and 18 April 1928 very strong seismic events and with the recent weak seismicity, D. Dimitrov, E. Botev, V. Protopopova, M. Everhard, E. Mihailov, I. Cholakov, I. Georgiev, Proceedings of 7th National Geophysical Conference, Sofia, Bulgaria, 20-23 May 2015, CD;
14. On the completeness of Bulgarian earthquake data, M. Tsekov, E. Botev, A. Mokreva, V. Protopopova, Proceedings of 7th National Geophysical Conference, Sofia, Bulgaria, 20-23 May 2015, CD

Участия в научни проекти

1. Програма за мултидисциплинарно обучение на млади учени – „Път към управление на природния риск.“ – Осъществяван, с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси“ 2007-2013, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз, 2010-2011;
2. Регистрация, анализ, обосновка и интерпретация на данни при мониторинг на локалната сеизмичност около АЕЦ Козлодуй;
3. Регистрация, анализ, обосновка и интерпретация на данни при мониторинг на локалната сеизмичност около Мировско солно находище, гр. Провадия;
4. Изследване на строежа и динамиката на земната кора и горна мантия в тектонски активни региони по сеизмологични данни;
5. Черноморска мрежа за сеизмична безопасност ESNET 2013-2014г.;
6. Оценка на сеизмичната опасност в областта на инд. зона „Аурубис България“, гр. Пирдоп, 2015 г.;
7. Създаване на информационна база за изучаване на сеизмичността и структурата на земната кора на о.Ливингстън и околностите чрез комплексни проучвания на Бълг. Антарктическа база 2015-2016;

Библиография

- Алексиев, Г. и Георгиев, Цв., 1996. Геодинамични проблеми на Краищенски-Средногорската морфоструктурна зона. Проблеми на Географията, БАН, 11-21.
- Алексиев, Г., 2012. Морфотектоника на Балканския полуостров. АНДИ-МГ, София.
- Апланов, С. В., 2001. Геодинамика. Изд. "Санкт-Петербургски университет", с. 360.
- Беляшки, Т., 2008. Карта на съвременни вертикални движения на земната кора на територията на Република България. Отчет за новото сеизмично райониране. Архив НИГГГ-БАН.
- Боков, П. и Чемберски, Хр., 1987. Геоложки предпоставки за нефтогазоносността на Североизточна България. Техника, София, с. 332.
- Бончев, Ек., 1940. Алпийски тектонски прояви в България. Сп. на БГД, год. XII, кн. 3, София.
- Бончев, Ек., 1946. Основи на тектониката в България. Год. на Дир. Геол. и минни проуч., отд. А, т. 4, София.
- Бончев, Ек., 1955. Геология на България. Наука и изкуство, София.
- Бончев, Ек., 1962. По въпроса за тектонската връзка между Балканидите и Южните Карпати. Тр. върху геол. на България, сер. страт. и тект., кн. IV, София.
- Ботев, Е., 1985. Строење литосфери Балканского региона по сейсмическим данным. Дис. за полл. на н.о.с. Доктор, Москва.
- Ботев, Е., Бурмаков, Ю., Велев, А., Винник, Л., Дачев, Хр., Треусов, А., 1987. Исследване скоростного строения земной коры Болгарии по данным взрывной сейсмологии. Българско геофиз. Сп, XIII, N1, стр. 24-30.
- Ботев, Е., Бурмаков, Ю., Винник, Л., Треусов, А., 1988. Трехмерная скоростная модель тектоносферы Балканского полуострова по данным сейсмической томографии. Литосфера Центральной и Восточной Европы. Геодинамика, Наук. Думка, Киев, 49-55.
- Ботев, Е., 2011. Сеизмотектоника на България по данни за механизмите на земетресенията. География 4-5, стр. 24-36.
- Вацов, С., 1902. Земетресенията в България през XIX век. Ц.М.См., С., Д.П., 1-93
- Георгиев, Г. В., Мандев, П. Д., Вълчева С. П., Минчева, Т. К., Желев, С. К., 1985. Нефтогазоносна перспектива на мезозойските седименти в Провадийската синклинала и Горночифлишкия хорст. Год. На Софийски университет, Геология, 78, кн.3, 150-170.
- Георгиев, И., Димитров, Д., Пашова, Л., Николов, Г., Ботев, Е., Шанов, С., Господинов, Сп., Здравчев, И., Алесандров, Б., 2002. Изследване на съвременните геодинамични процеси в района на реките Места и Доспат.
- Георгиев, Цв., 1993. Модел на съвременното регионално тектонско поле на напреженията в Мизийската платформа по данни от механизми на напреженията. Бълг. Геофиз. Сп., т. XIX, № 4, 101-107.
- Георгиев, И., 2010. Държавна и перманентна GPS мрежи на Република България – обработка на измерванията, анализ и приложение в геодинамиката. Дис. за полл. на н.о.с. Доктор на техническите науки, НИГГГ, София.
- Георгиева, Г., 2013. Анализ на дългопериодни вълнови форми от земетресения с цел изучаване на строежа на земната кора и горната мантия. Дис. за полл. на н.о.с. Доктор, НИГГГ, София.

Григорова, Е., Сокурова, Д., Христосков, Л., Рижикова, С., 1979. Каталог на земетресенията в България за периода 1900-1977 г. Фонд на Геофиз. и-т БАН, София.

Григорова, Е., Христосков, Л., Рижикова, С., Сокурова, Д., 1980. Сеизмични линеаменти и активност на сеизмогенните етажи в България. Геодинамика на Балканите, Техника, София, 25-36.

Димитрова, Л., 2009. Анализ и автоматизация на сеизмичните наблюдения в цифровата система на НОТССИ, Дис. за полл. на н.о.с. Доктор, НИГГГ-БАН, София.

Димитров Д., 2009. Геодезически изследвания на сеизмогенни зони. ЦЛВГ -БАН, Дисертационен труд за получаване на научната степен дтн.

Дянков, Ив., 1988. Геодезични изследвания на територията, засегната от земетресението на 7-ми декември 1986 г. Стражица. НИГИФ.

Йовчев, Й., Атанасов, Ант., Богданов, Ст., Бояджиев, Ст., Боянов, Ив., Йорданов, М., Кънчев, Ил., Савов, С., Чешитев, Г., 1971. Тектонски строеж на България. Техника, София.

Калайджиев, С., 2007. Разломните зони и ендегенното рудообразуване в източната част на Балканския полуостров. Изд. къща „Св. Ив. Рилски“, София.

Милев, Т., Йосифов, Д., Даскалов, И., Ботев, Е., 2005. Геодинамични последствия от експлоатацията на Провадийското солно находище. Първа национална научно-практическа конференция по управление в извънредни ситуации, БАН, 10 ноември.

Михайлов, Е., 2008. Гравиметрична карта на Република България. Отчет за новото сеизмично райониране. Архив НИГГГ-БАН.

Солаков, Д., Христова, Ц., Симеонова, С., 1983. Изучаване размерността на Велинградското земетресение от 3. XI. 1977 г. Българско геофизично списание, т.IX, №4, 105-112.

Солаков, Д., Добрев, Ч., 1987. Програма за определяне на основните кинематични параметри на земетресенията на персонален компютър „Правец“. Бълг. геофиз. сп. БАН, т.XIII, № 4, 100-104.

Христова, Ц., 1997. Дълбочинни структури в егейския регион – морфология и сеизмологични характеристики, Дис. за полл. на н.о.с. Доктор, НИГГГ, София.

Христосков, Л., Сокурова, Д., Рижикова, С., 1979. Нов каталог на земетресенията в България за периода I в.пр.н.е.-XIX в., Фонд на Геофиз. и-т БАН, София.

Христосков, Л., Петков, К., 1987. Карта на сеизмичното райониране на НРБ в новите норми за проектиране на сгради и съоръжения в земетръсните райони. Териториално селищно устройство и архитектура, №2-3, 14-22.

Христосков, Л., Григорова, Е., 1979. Енергетична и пространствено-временна характеристика на разрушителните земетресения в България след 1900 г. Изв. Геофиз. и-т БАН, т. XII, 79-107.

Христосков, Л., 1992. 100 години сеизмология в България. Българско геофиз. сп., БАН, т.XXI, No1, 3-21.

Христосков, Л., 2000. Земетресенията – риск и контрамерки. София, издателство М и М, стр.62.

Христосков, Л., 2007. Сеизмология. Част II. Земетръсни източници и вълново поле в Земята. Университетско издателство „Св. Климент Охридски“, София.

Цанков, Ц. и Николов Г., 1998. Съвременен геодинамичен аспект на Българската геодезия. Симпозиум “50 години на CLHG в България”, София, 53–62.

Цанков, Ц., Куртев, К., Шанов, Ст., Нколов, Г., 1998. Относно произхода на Горнотракийската депресия (югоизточната част на Балканския полуостров). Сборник доклади от Симпозиума „Геодинамични изследвания, свързани със земетресенията от 1928 г. в Чирпан-Пловдив“, 9-ти октомври, стр. 113-118.

Ценов, Л., Ботев, Е., 2007. Земетръсна опасност и управлението на сеизмичния риск. Последствия от земетресенията в края на 20 век у нас. II-ра национален научно-практическа конференция по управление в извънредни ситуации и защита на населението, София, 9 Ноември, просийдинги 234-244.

Шанов, Ст., 1998. Сеизмотектонски модел на Маришкия сеизмичен район. Сборник доклади от Симпозиума „Геодинамични изследвания, свързани със земетресенията от 1928 г. в Чирпан-Пловдив“, 9-ти октомври, стр.101-112.

Aki, K. and Richards, P.,G., 1980. Quantative seismology: Theory and Methods, New York, 801.

Alexiev, G., 1999. The role of intense destructive taphrogenesis in shaping the morphostructural patterns of Bulgaria territory. Problems of Geography, BAS, Sofia , 4, 46-57.

Babushka, V., Plomerova, J., Spassov, E., 1986. Lithosphere thickness beneath the territory of Bulgaria – a model derived from teleseismic P residuals. Geol. Balcanica, 16, N5, 51–54.

Barrier, E., Chamot-Rooke, N., Giordano, G., 2004. Geodynamic map of the Mediterranean, Sheet 1- Tectonics and Kinematics, CGMW, France.

Boccaletti, M., Manetti, P., Peccerillo, A., 1974: The Balkanides as an instance of back-arc thrust belt: possible relations with the Hellenides. Bull. Geol. Soc. Am., 85, 1077 – 1084.

Bonchev, E., Boune, V. I., Christoskov, L., Karagjuleva, J., Kostadinov, V., Reisner, G. J., Rizhikova, Sn., Shebalin, N. V., Sholpo, V. N., Sokerova, D., 1982. A method for compilation of seismic zoning prognostic maps for the territory of Bulgaria. Geologica Balcanica, 12.2, 3-48.

Botev, E., Treussov, A., Efrimova, V., 1996. A velocity model of crust and upper mantle of Bulgaria on data of earthquake and explosion records, Bulgarian Geophysical Journal, XXII (2), 49-62.

Botev, E., 2000. On the Seismotectonics of the Bulgarian territory. Final Report N236 / ICPT Program for training and research in Italian laboratories. Trieste, Italy, 87 pp.

Botev, E., Slejko, D., Bressan, G., Bragato, B., 2002. Stress and strain modeling of the Bulgarian area from the focal mechanisms. 3th Balkan Geophysical Congress and Exhibition, 24-28 June 2002, Sofia, Book of abstracts, 329-330.

Botev, E., Dimitrova, S., Tzoncheva, I., 2004. Seismicity patterns in the Provadia region recorded by NOTSSI before and after the Provadia local seismic network construction. 4th National Geophysical Conference, 4-5 October.

Botev, E., Georgiev, I., Dimitrov, D., 2006. Recent seismicity, stress and strain in South-western Bulgaria. Geodasy 17, BAS, 53-68.

Botev, E., Slejko, D., Bressan, G., Bragato, P., Glavcheva, R., 2007. In the geodynamics of Bulgarian lands through seismological data. Monograph on the Geodynamics of the Balkan Peninsula within the Framework of CERGOP–2. Warszawa, 2007, pp 149–168.

Botev, E., Georgiev, I., Dimitrov, D., Protopopova V., 2011. Some geodynamic anomalies around the Monastery uplifts in Bulgaria. Proceedings of 6th Congress of Balkan Geophysical Society, Budapest, Hungary, 3-6 October, CD.

Botev, E., Protopopova, V., Popova, I., Babachkova, B., Velichkova, S., Tzoncheva, I., Dimitrova, S., Boychev, V., Lazarov, D. Raykova, P., 2013b. Data and analysis of the events recorded by NOTSSI in 2012, Bulgarian Geophysical Journal, Sofia, v.38, 93-102.

Bott, M. H. P., 1959. The mechanics of oblique slip faulting. Geol. Mag., v.96, no.2, p.109-117.

Burchfield, B. C., King, R. W., Todosov, A., Kotzev, V., Durmirdzanov, N., Serafimovski, T., Nurce, B., 2005. GPS results Macedonia and its importance for the tectonics of the Southern Balkan extensional regime. Tectonophysics, 413, 239-248.

Christoskov, L., 1999. Review on the mathematical models for conventional seismic sources. Part I: Introductory considerations, concentrated force, linear dipoles and some combination. Bulgarian Geophysical Journal, v.XXV, 1-4, 150-169.

Dabovski, Ch., Bojanov, I., Harkovska, A., Tzankov, Tz., Zagorchev, I., Karagjuleva, Ju., Kostadinov, V., Paskalev, M., 1989. Late Alpine collisional orogen on the Balkan peninsula, Extended abstracts of the XIV Congress of the Carpatho- Balkan geological association, Sofia, pp.499-502.

Dimitrov, D., Camelbeek, T., Ruegg, J. C., Georgiev, I., Botev, E., 2006. Surface seismic deformation in the Plovdiv region (Bulgaria) by space geodesy and seismology data. SENS, Second scientific Conference with international participation, 14-16 June, Varna, Bulgaria.

Dobrev, N., 2008. Faulting and rock deformation established at the ruins of Perperikon (Eastern Rodopes) and their relation to recent seismic activity. Proceedings of International Conference, Sofia, 29-30 October, Publishing house "St. Ivan Rilski", 295-298.

Dobrev, N., Botev, E., Protopopova, V., Georgiev, I., Dimitrov, D., 2014. Seismicity and nowadays movements along some active faults in SW Bulgaria. AIP conference, Plovdiv, Bulgaria, 10-12 October 2014, Bulgarian Chemical Communications, Vol. 42, 2015, pp. 1-10;

Gadomska, B., 1983. The mechanism of earthquakes - a review of the graphical representation of fault-plane solutions. Inst. Seism. Univ. Helsinki, Report S-6.

Georgiev, I. Dimitrov, D., Pashova, L., Shanov, S., Nikolov, G., Botev, E., 2006a. Geodetic constraints on kinematics and dynamics in South-western Bulgaria. Geodesy 17, 70-84.

Georgiev, I., Gabenski, P., Gladkov, G., Tashkov, T., Danchev, P., Dimitrov D., 2006b. National GPS network: Processing the observations from the Main Order, Geodesy, 18, 209-213.

Georgiev, I. Dimitrov, D., Belijashki, T., Pashova, L., Shanov, S., Nikolov, G., 2007. Geodetic constraints on kinematics of southwestern Bulgaria from GPS and leveling data, Geological Society, London, Special Publications, 2007; 291: 143-157.

Georgiev, I., Beliyashki, T., Dimitrov, D., Pashova, L., Botev, E., Shanov, S., Nikolov, G., Ilieva, M., 2008. New results for the geodynamics of the region south of Sofia. Geodesy 19, BAS, 50-64.

Georgiev, I., Dimitrov, D., Briole, P., Botev, E., 2011. Velocity field in Bulgaria and northern Greece from GPS campaigns spanning 1993-2008. 2nd INQUA-IGSP-567 International workshop on active tectonics, earthquake geology, archeology and engineering, Corinth, Greece, 54-56.

Gorgiev, I., Dimitrov, D., Botev, E., 2013. Crustal Motion Monitoring in Bulgaria and Surrounding Regions by Permanent GPS Array. Proceedings of 7th Congress of Balkan Geophysical Society – Tirana, Albania, 7-10 October 2013, CD.

- Georgiev, Tz., 1987. Fault plane solutions, pressure and tension axes for some earthquakes in SW Bulgaria. *Bulg. Geoph. J.*, v.13, N3, 102-108.
- Gephart, J. W. and Forsyth, D.W., 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquakes focal mechanism data: Application to the San Fernando earthquake sequence. *J. Geophys. Res.*, 89, 9305 – 9320.
- Gephart, J. W., 1990. FMSI: A FORTRAN program for inverting fault/slickenside and earthquake focal mechanism data to obtain the regional stress tensor. *Comput. Geosci.*, 16, 953-989.
- Hatzfeld, D., Ziazia, M., Kementzetzidou, D., Hatzidimitriou, P., Panagiotopolos, D., Makropoulos, K., Papadimitriou, P., Deschamps, A., 1999. Microseismicity and focal mechanisms at the western termination of the North Anatolian Fault and implications for continental tectonics. *Geophys. J. Int.* 137, 891-908.
- Hollenstein Ch., Müller, M., Geiger, A., Kahle, H. G., 2008. Crustal motion and deformation in Greece from a decade of GPS measurements, 1993-2003. *Tectonophysics*, 449, 17-40.
- Jackson, J., McKenzie, D. P., 1984. Active tectonics of the Alpine-Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 77, 185–246.
- Jackson, J., 1992. Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in eastern Turkey. *Geophys. J. Res.*, 97, 12471–12479.
- Jackson, J., 1994. Active tectonics of the Aegean region. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 22, 239-71.
- Jackson, J., McKenzie, D. P., 1988. The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East. – *Geophysical Journal*, 93, 45–73.
- Kondopoulou, D., Atzemoglou, A., Pavlides, S., 1996. Paleomagnetism as a tool for testing geodynamic models in the North Aegean: convergences, controversies and a further hypothesis. *Paleomagnetism and tectonics of the Mediterranean region*, *Geol. Soc. Sp. Publ.*, 105, 277–288.
- Kotzev, V., Burchfiel, B., King, R., McClusky, S., Reilinger, R., 1998. Crustal deformation in Bulgaria: Results from regional GPS measurements 1994–1997. *Proceed. Of Symposium “50 years CLHG in Bulgaria”*, Sofia, 25–37.
- Kotzev, V., Georgiev, Tz., Nakov, R., Burchfiel, B. C., King R. W., 2004. Crustal strain in Bulgaria. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*, T. 57, No 6, 99-104.
- Lee, W. H. K. and Lahr, J. C., 1972. HYP071: A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes, Open File Report, U. S. Geological Survey, 100 pp.
- Lee, W. H. K. and Lahr, J. C., 1975. HYP071 (Revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes, U. S. Geological Survey Open File Report 75-311, 113 pp.
- Matev, K., 2010. GPS constrains on current tectonics of Southwestern Bulgaria, Northern Greece, and Albania. PhD Thesis, Grenoble Institute, France.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurcan, O., Hamburger, O., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotsev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Moshin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Peilnger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksoz, M., Veis, G., 2000. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 105, №B3, 5695-5719.
- McKenzie, D. P., 1969. The relation between fault plane solutions for earthquakes and the directions of principal stresses, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 59, 591-601.

- McKenzie, D. P., 1970. Plate tectonics of the Mediterranean region. *Nature*, 226, 239–243.
- Meyer, B., Armijo, R., Dimitrov, D., 2002. Active faulting in SW Bulgaria: possible surface rupture of the 1904 Struma earthquakes. *Geophys. J. Int.*, 148, 246–255.
- Milev, A. and Vassileva, K., 2007. Geodynamics of the Balkan Peninsula and Bulgaria. *International Symposium on strong Vrancea earthquakes and risk mitigation*, 4–6 October, Bucharest, Romania.
- Mouslopoulou, V., Saltogianni, V., Gianniou, M., Stiros, S., 2014. Geodetic evidence for tectonic activity on the Strymon Fault System, northeast Greece. - *Tectonophysics*, 633, p. 246–255.
- Oncescu, M.C., Trifu, C.I., Hristova, T., Simeonova, S., Solakov, D., 1990. A detailed analysis of the Strazhitsa (Bulgaria) seismic sequences of 1986: location, focal mechanism and regional stress tensor. *Tectonophysics*, 172, 121–134.
- Papadopoulou, G. A., Kondopoulou, D. P., Leventakis, G. A., Pavlides, S. B., 1986. Seismotectonics of the Aegean region. *Tectonophysics*, 124, 67–84.
- Papazachos, C. B. and Nolet, G., 1997. P and S deep velocity structure of the Hellenic area obtained by robust nonlinear inversion of travel times. *J. Geophys. Res.*, 102, 8349–8367.
- Papazachos, B. C., Papadimitriu, E., Kiratzi, A., Papazachos, C. B., Louvari, E., 1998. Fault plane solutions in the Aegean sea and surrounding area and their tectonic implications. *Boll. Di Geof. Eor. Ed Apl.*, 1998, v. 39 (3), 199–218.
- Pearce, R. G., 1977. Fault plane solutions using relative amplitudes of P and pP. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 50, 381–394.
- Polonic, G., Zugravescu, D., Negoita, V., 2005. The present-day stress field pattern in the Eastern Carpatian bend area. *Rev. Roum. Bucuresti, Geophysique*, 49, 3–30.
- Popescu, M., Patrut, Y., Paraschiv, D., Molnar, M., 1965. Present stage of geological knowledge of the Moesian platform Rumania. KBGA, VII Congress, Proceedings, Geotectonic, Sofia.
- Protopopova, V., 2013. Fault plane solutions of the 2012 MW 5.6 Pernik (SW Bulgaria) earthquake and the strongest aftershocks. *Bulg. Geoph. Journal*, Sofia, v.39, 43–51.
- Protopopova, V., Botev, E., Georgiev, I., 2014. Focal mechanisms of some earthquakes in the western part of Maritza seismic zone. *Proceeding Papers of Scientific conference with international participation Geography and Regional Science*, Pazardzhik, Bulgaria, 30–31 October.
- Riazkov, H. and Shanov, St., 1990. Deep cross section of the Rhodopes according to geophysical data. *Geol. Rhodopica*, 2, 1–8.
- Shanov, St., Riazkov, H., Bojanov, I., 1987. The Rhospoe region in the light of the new geophysical interpretations. *Abstracts of the First Bulg./Greek Symp. On Geol. Phys. Geogr. of the Rhodope massif*. Smolian, 19–20.
- Shanov, St., Spassov, E., Georgiev, Tz., 1992. Evidence for the existence of a paleosubduction zone beneath the Rhodopian massif (Central Balkans). *Tectonophysics*, 206, 307–314.
- Snoke, J. A., 2009. FOCMEC: FOCal MECanism Determinations, Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA, Manual.
- Solakov, D. and Simeonova, S., 1993. Bulgaria catalogue of earthquakes 1981 – 1990. Bulgarian Academy of Sciences, Geophysical institute, Seismological department.

- Solakov, D., Simeonova, S., Dimitrova, L., Slavcheva, K., Raykova, P., Popova, M., Georgiev, I., 2015. Local network deployed around the Kozlodiy NPP – a useful tool for seismological monitoring. Report of the European Geoscience Union, General Assembly, 12-17 April, Vienna, Austria.
- Spakman W., 1986. Subduction beneath the Eurasia in connection with the Mesozoic Tethys. *Geol.Mijnbouw*, 65, 145–155.
- Tranos, M., Karakostas, V., Papadimitriou, E., Kachev, V., Rangelov, B., Gospodinov, D., 2006. Major active fault of SW Bulgaria: implications of their geometry, kinematics and the regional active stress regime. *Geological Society of London*, 260, 671-687.
- Udias, A., 1999. *Principles of Seismology*. Cambridge University Press, Madrid, Spain, 359-371.
- Van Eck, T. and Stoyanov, T., 1996. Seismotectonics and seismic hazard modelling for Southern Bulgaria, *Tectonophysics*, 262, 77-100.
- Vernant, P, King, R., Floyd, M., Ozener, H., Ergintav, S., Karakhanyan, A., Kadirov, F., Sokhadze, G., ArRajehi, A., Nankali, H., Georgiev, I., Ganas, A., Paradissis, D., McClusky, S., Gomez, F., Reilinger R., 2014. A new Arabia-Africa-Eurasia GPS velocity field (1994-2014) and East Mediterranean block model: Implications for continental deformation in a zone of active plate interaction. American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA, 15-19 December 2014, Abstract.
- Vrablyanski, B. and Milev, G., 1993. Neotectonic features of the Struma fault zone. *Acta. Mont. Igt ASCR*, 90 (4), 111-132.
- Wyss, M. and Liang, B., 1992. Compression of orientations of strain tensor based on fault plane solutions in Kaoiki, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, 97, B4, 4769– 4790.
- Zagorchev, Iv., 1992. Neotectonics of the central parts of the Balkan peninsula: basic features and concepts. *Geologische Rundschau*, v.81, N3, 635-654.
- Zagorchev, I., 1996. Late Alpine (Paleogene-earliest Neogene) and neotectonic development of the central parts of the Balkan peninsula. *Zeitschrift der Deutscher Geologischen Gesellschaft*, v. 24, N1–2, 91–112.
- ORFEUS Data Center, 2013. <ftp://www.orfeus-eu.org/pub/data/POND/>.
- ISC web site - International Seismological Centre, On-line Bulletin, <http://www.isc.ac.uk>, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2013.
- EMSC/CSEM, <http://www.emsc-csem.org/>
- QGIS Development Team, 2012. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org/>.
- Made with Natural Earth. Free vector and raster map data@[naturalearthdata.com](http://www.naturalearthdata.com). <http://www.naturalearthdata.com/>.