



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ГЕОФИЗИЧЕН ИНСТИТУТ
“АКАД. Л. КРЪСТАНОВ”

София 1113, ул. “Акад. Г. Бончев” бл. 3, тел: (02)9793322, факс:(02)9713005
www.geophys.bas.bg, e-mail: office@geophys.bas.bg

Отчет ГФИ 07-03

**Сеизмично райониране на Република България,
съобразено с изискванията на Еврокод 8
“Сеизмично осигуряване на строителни конструкции”
и изработване на карти за сеизмичното райониране с
отчитане на сеизмичния хазарт върху
територията на страната**

Ръководител на договора:

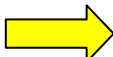


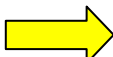

ст.н.с. д-р Димчо Солаков

Директор на Геофизичен Институт:

ст.н.с. д-р Николай Милошев

София, Ноември 2009 г.

СЪДЪРЖАНИЕ

	СТР.	
ВЪВЕДЕНИЕ	3	
ОБХВАТ НА РАБОТАТА	5	
ДЕФИНИЦИИ	6	
ИЗПОЛЗУВАНИ ОЗНАЧЕНИЯ И СИМВОЛИ	8	
I. СЕИЗМИЧНА ОПАСНОСТ (СЕИЗМИЧЕН ХАЗАРТ)	9	
I.1 ВЕРОЯТНОСТЕН АНАЛИЗ НА СЕИЗМИЧНИЯ ХАЗАРТ (PSHA)	12	
I.1.1 Математически модел за оценка на сеизмичния hazard	14	
I.1.2 Моделиране на сеизмичните източници	16	
I.1.3 Модели за затихване на земните движения	19	
I.1.4 Компютърни програми за оценка на сеизмичния hazard	20	
I.2 ОТЧИТАНЕ НА НЕТОЧНОСТИТЕ В СЕИЗМИЧНИЯ ВХОД	21	
I.3 ДЕАГРЕГАЦИЯ	22	
II. ОЦЕНКА НА СЕИЗМИЧНИЯ ХАЗАРТ ЗА ТЕРИТОРИЯТА НА БЪЛГАРИЯ	24	
II.1 СЕИЗМОЛОГИЧНА БАЗА ДАННИ	25	
II.2 МОДЕЛ НА СЕИЗМИЧНИТЕ ИЗТОЧНИЦИ	28	
II.3 МОДЕЛИРАНЕ НА СЕИЗМИЧНАТА АКТИВНОСТ В ИЗТОЧНИЦИ	35	
II.4 МОДЕЛИ ЗА ЗАТИХВАНЕ НА МАКСИМАЛНОТО И СПЕКТРАЛНИТЕ УСКОРЕНИЯ	40	
II.5 ГЕНЕРИРАНЕ НА КАРТИ ЗА СЕИЗМИЧЕН ХАЗАРТ В МАКСИМАЛНО УСКОРЕНИЕ	42	
II.6 ОТЧИТАНЕ НА НЕТОЧНОСТИТЕ В СЕИЗМИЧНИЯ ВХОД	46	
II.7 КАРТИ НА СЕИЗМИЧНАТА ОПАСНОСТ ЗА СЪСЕДНИ НА БЪЛГАРИЯ СТРАНИ	47	
III. ДЕАГРЕГАЦИЯ НА СЕИЗМИЧНИЯ ХАЗАРТ	52	
IV. АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ PSHA И ДЕАГРЕГАЦИЯТА НА СЕИЗМИЧНИЯ ХАЗАРТ	61	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	74	
ЛИТЕРАТУРА	75	

ВЪВЕДЕНИЕ

В сеизмично активните райони на планетата, включително и в България, земетресенията и последствията от тях са най-катастрофалните природни бедствия. Обяснението е в спецификата на явлението земетресение – краткотрайно и силно въздействие с изключително не хуманни последствия върху значителни по площ територии.

През последните десетилетия се наблюдава тенденция за увеличаване на щетите от земетресенията, която се обяснява с три главни фактора. Първият е свързан с големия ръст на човешките и материали ресурси в силно земетръсните райони, които едновременно са много благоприятни в климатично отношение и богати на природни дадености. Вторият фактор се обуславя от очевидното подценяване на реалната земетръсна опасност, водещо до принижаване и даже елиминиране на противоземетръсните мерки, преди всичко в строителството. Третият фактор опира до възможностите на науката да предлага достатъчно ефективни решения за намаляване на последствията, преди всичко, да предсказва земетресенията и характеристиките на очакваните силни земетръсни въздействия, да предлага сигурни методи за обезпечаване на строителството. Въпросът за същинското прогнозиране - едновременното определяне на силата, мястото и времето на земетресението все още няма еднозначно решение в световен мащаб, въпреки сериозните изследвания в последните 50-60 години в страни като Япония САЩ, Русия, Китай и др. Това не означава безпомощност в борбата срещу земетръсната стихия. Особено важен е фактът, че земетръсната опасност е природна даденост и все още не може да бъде контролирана от човека, а сеизмичният риск зависи от човешкия фактор и може да бъде управляван. В много от земетръсно застрашените страни, включително и в България, има надеждно решение на най-важната част от прогнозната задача - къде и колко силни земетресения могат да се очакват. Използването на такива оценки и съвременните методи на сеизмичното инженерство могат да намалят в много голяма степен щетите и жертвите при земетресение. Стратегията за намаляване на сеизмичния риск включва, като основни, две задължителни стъпки: създаването на съвременни карти за сеизмичната опасност на дадена територия и строителство, съобразено със сеизмичната опасност – антисеизмично строителство.

България е разположена в централната част на Балканския полуостров, който от тектонска гледна точка е елемент от континенталната граница на Евразия. Тази граница се намира между стабилната част на Европейския континент (Мизийска платформа) на север и офиолитовите структури (Вардар и Измир-Анкара) на юг. Земетръсната активност на територията на страната и близките ѝ околности е една от най-изявените прояви на съвременната регионална геодинамика. Неотектонските движения на Балканския полуостров са контролирани от екстензионалния колапс на късно алпийския ороген и са под влиянието както на процесите протичащи зад Егейската арка, така и на сложните вертикални и хоризонтални движения в Панонския регион.

От сеизмологична гледна точка, България е разположена в Алпо-Хималайския сеизмичен пояс, характеризиращ се с висока сеизмичност. В исторически план, в България са документирани силни земетресения. Най-силното земетресение е с магнитуд 7.8, реализирано в югозападната част на страната. Силни земетресения (с магнитуд 7 и по-висок) са станали и в североизточна и южна България. Освен това, сеизмичността на териториите на съседните страни, Гърция, Турция, Бивша Югославия и Румъния (особено силно е сеизмичното въздействие на междиннофокусните земетресения в област Вранча, Румъния) оказва съществено влияние върху оценката на сеизмичния опасност за територията на България.

В България норми за проектиране в сеизмични райони се прилагат от около 50 години. Сега действащата нормативна уредба (от 1987 г.) в голяма степен е съвместима с изискванията, заложи в ЕС8. Най-съществените съображения (съгласно концепцията за създаване на карта на сеизмичното райониране, разработена от ГФИ-БАН, 2002 г.) за изработване на нови сеизмичните карти като “сеизмичен вход” за ЕС8 се свеждат до следното:

1. Нормите за проектиране на сгради и съоръжения в земетръсни райони (1987) се основават на прогнозна карта на очакваните сеизмични въздействия за период 1000 години, в която самите въздействия са изразени в степени 7, 8, 9 и по-висока, по скалата на Медведев-Шпонхойер-Карник (MSK-64). На тези степени на въздействие са приписани съответни сеизмични коефициенти. В ЕС8 вместо сеизмични степени (коефициенти), като изход от анализа на сеизмичния хазарт, се използват ускорения (и/или скорост, и/или премествания), предизвикани от сеизмичните въздействия

2. ЕС8 препоръчва да се използват две нива на обезпеченост за два периода на повтораемост на сеизмичните въздействия - 475 и 95 години. Следователно, карти за сеизмично райониране трябва да се изработят за две нива на обезпеченост, т.е. за два периода на повтораемост на въздействията.

3. Типът на параметрите на сеизмичните въздействия и периодите на повтораемост за картите на сеизмичното райониране следва да са дефинирани (съгласувани) в Националното приложение за ЕС8.

4. Премаването от национални норми към ЕС8 предполага новите карти за сеизмично райониране за България да са съгласувани по стойности на параметрите в граничните сеизмични зони със съседни страни прилагачи ЕС8, т.е. да се обезпечи непрекъснатост на полето на сеизмичните въздействия.

5. Създаването на карти за сеизмично райониране в съответствие с ЕС8 е сложна и комплексна задача, която изисква участие на специалисти по сеизмология, геология, тектоника, неотектоника, геоморфология, инженерна и хидрогеология, геодезия, сеизмично инженерство и др.

ОБХВАТ НА РАБОТАТА

Цел на настоящото изследване е вероятностен анализ на сеизмичния hazard и предоставяне на сеизмологична информация за изработване на Национално приложение. Основното предимство на вероятностния анализ на сеизмичния hazard (PSHA) е, че интегрирайки върху всички сеизмични източници, модели на сеизмична активност и модели за затихване на сеизмичните земни движения се изчислява обща вероятност силата на земните движения да превиши зададена стойност през определен период от време. Деагрегацията на сеизмичния hazard дава възможност да се види връзката между дефинираните сеизмични източници и изчисления hazard и затваря кръга между физическата същност на земетръсната опасност, отчитане на всички възможни сеизмични събития с принос за тази опасност и представяне на земетръсната опасност с един (или няколко) набор(а) от параметри, които са директно приложими за проектиране или анализ.

В разработката е компилиран регионален сеизмотектонски модел - синтез на геофизичната, геодезичната геолого-тектонската и сеизмологичната информация. Този модел демонстрира сложната сеизмотектонска обстановка в региона и дава възможност, комбинирайки геолого-геофизични, геодезични и сеизмологичните данни, да се получи обща представа за сеизмогенезиса. Представени са два модела на сеизмичните източници, основаващи се на регионалния сеизмотектонски модел, които се прилагат при оценката на сеизмичния hazard. Моделирана е сеизмичната активност в сеизмичните източници. Избрани и приложени са два модела (за плиткни и междиннофокусни земетресения) за затихване на ускоренията (PGA и спектрални), които са в съответствие със сеизмогенните особености на региона и наблюдаваните силни движения на територията на България. Оценен е сеизмичният hazard в максимално ускорение (PGA) за три периода на повторемост 95, 475 и 1000 години, за почви тип А (съгласно EUROCODE 8). Отчетено е влияние на неточностите в сеизмичния вход върху оценката на сеизмичния hazard. Допълнително е анализирана пространствено - магнитудната зависимост на резултатите от анализа чрез деагрегацията на сеизмичния hazard. Предложени са нормативни карти за строителство на територията на България. Определена е територията с преобладаващо влияние на междиннофокусните земетресения (Вранча, Румъния). Направено е предложение за някои национални параметри.

Изследването е систематизирано в увод, четири глави и заключение.

РАБОТЕН КОЛЕКТИВ

Настоящият отчет, е изготвен от колектив специалисти от ГФИ-БАН, ръководени от ст.н.с. д-р Д. Солаков.

Членове на колектива: ст.н.с. д-р С. Симеонова, акад. Л. Христосков, н.с. И. Аспарухова, н.с. д-р П. Трифонова, инж. Л.Димитрова.

ДЕФИНИЦИИ

Активен разлом

Разлом, по който движенията продължават и понастоящем. Някои от активните разломи могат да бъдат и сеизмоактивни структури.

Епицентър

Точка върху земната повърхност вертикално над хипоцентъра на земетресението

Затихване на сеизмичните вълни

Намаляване на амплитудите на сеизмичните вълни при разпространението им от земетръсното огнище до дадена площадка, отдалечена на определено разстояние от огнището. Обикновено затихването се представя чрез съответни криви (закопи) на затихването, които са функция на магнитуда M и на разстоянието до източника.

Интензивност на сеизмичното земното движение

Обобщаващо понятие за характеризирание на земното движение в дадена точка. То може да се представя чрез ускорението, скоростта на движение на частиците на почвата, амплитудите на преместването, макросеизмичната интензивност (степен) или спектралната интензивност.

Коефициент на значимост

Коефициент, който се свързва с последствията от разрушаване на конструкцията.

Магнитуд

Инструментално получена числена оценка, която характеризира енергията, реализирана от дадено земетресение. Съществуват различни скали за определяне на магнитуда, и поради различията в стойностите на магнитуда се въвеждат корелационни съотношения за преход от една към друга скала. В рутинната сеизмологична практика (в България) се използва магнитуд по продължителност на сеизмичния запис, който е нормиран към M_S (магнитуд по повърхностни вълни).

Макросеизмична интензивност (степен)

Интегрален не инструментален (субективен) показател за силата на земетръсните въздействия върху земната повърхност (хора, сгради и природна среда). Определя се в съответствие с описанията (дефинициите) за различна интензивност (степен) на въздействие според използваната макросеизмична скала.

(В България се прилага 12-степенната скала на Медведев-Шпонхойер-Карник (MSK). Степените по MSK практически не се различават от степените по нововъведената в Европа- Европейска Макросеизмична Скала (EMS), от скалата Меркали-Канкани-Зиберг (MCS (все още използвана в някои западноевропейски страни) и от Модифицираната скала на Меркали (MM), прилагана в САЩ и други страни).

Неотектоника

Раздел на Тектониката, занимаващ се с най-младите тектонски процеси, създали основните черти на съвременния релеф. Възрастта на тези процеси се счита за неоген-кватернерна. *(За България долната граница на неотектонските движения по време се отнася към края на миоцена - началото на плиоцена.)*

Огнище на земетресение

Обем (или повърхнина) в земната среда, където настъпват необратими процеси на разрушение на материала поради достигане на критично напрегнато-деформирано състояние, в резултат на което в околното пространство се излъчват сеизмични вълни.

Сеизмична вълна

Еластична (квазиеластична) вълна, излъчена от земетръсното огнище (сеизмичен източник) и разпространяваща се в земната среда

Сеизмично земно движение

Земно движение вследствие на земетресение, което се наблюдава в дадена точка на земната повърхност.

Сеизмично ниво

Количествена мярка за характеристиките на сеизмичните земните движения.

Сеизмогенна структура

Геоструктура, разлом или разломна зона с проявена сеизмична активност, или с исторически или палеосеизмоложки данни за повърхностно разломяване. Сеизмогенната структура може да генерира силни (макро) земетресения с определена повтораемост

Сеизмичен хазарт (Сеизмична опасност)

Вероятността сеизмичните земни движения да превишат дадено сеизмично ниво за определен период от време.

Сеизмотектонска провинция

Географска област, характеризираща се с подобие на геоложкия строеж и проявената сеизмичност.

Сеизмотектонски модел

Модел на структури способни да генерират земетресения в определен регион при подходяща параметризация на сеизмичната активност.

Тектоника

Дял от геологията, занимаващ се със строежа на земната кора, геоложките структури и закономерностите на тяхното разположение и историческа еволюция.

Хипоцентър

Начална точка на излъчване (и на разрушение на средата) в огнището на земетресението, намираща се на дълбочина h [km] под епицентъра.

ИЗПОЛЗВАНИ СИМВОЛИ И ОЗНАЧЕНИЯ

БАН	Българска Академия на Науките
ГИС	Географска информационна система
ГФИ	Геофизичен Институт
g	Земно ускорение (сила на тежестта) със средна стойност 981 cm/s^2
GMT	Време по Гринуич
γ_1	коефициент на значимост
a_{gR}	референтно максимално ускорение
H	Хипоцентрална дълбочина в km
Hz	Херц (цикли за секунда)
h	Час (като измерение за време)
I	Макросеизмична интензивност
I_0	Епицентрална интензивност за $\Delta=0$
I_{max}	Максимална макросеизмична интензивност (в степени) за $\Delta>0$
km	Километър (10^3 m)
LT	Локално време
M	Магнитуд на сеизмичните събития
M_d	Магнитуд по продължителност на сеизмичните колебания
M_S	Магнитуд по повърхностни вълни
M_w	Магнитуд по сеизмичен момент
m	Метър
min	Минута (като измерение за време)
НОТССИ	Национална Оперативна Телеметрична Система за Сеизмологична Информация
s	Секунда
cm	Сантиметър (10^{-2} m)
T	Период в s
t	Време
T_0	Време в огнището (GMT)
φ и λ	Географски координати (съответно географска ширина и дължина)
Δ	Разстояние в km или градуси ($^\circ$) ($1^\circ \approx 111.2 \text{ km}$)

I. СЕИЗМИЧНА ОПАСНОСТ (СЕИЗМИЧЕН ХАЗАРТ)

Исторически терминът сеизмичен риск е използван за описание и оразмеряване на ефектите от земетресенията, които се простират от земни движения (минавайки през повърхностно разкъсване и индуцирани вторични ефекти) до икономически загуби и жертви. С развитие методите за оценка на риска терминологията става по-прецизна – диференцират се понятията сеизмичен хазарт и сеизмичен риск.

Най-общо сеизмичният хазарт може да се дефинира като всяко физично явление (напр. земни движения или земни нарушения) което е свързано с реализацията на земетресение. Сеизмичният хазарт в определена област е функция на положението и геометрията на потенциалните източници, максималната сила на земетресенията, които могат да се генерират във всеки един от потенциалните сеизмични източници, повторемостта на събития с различна сила в тях и характеристиките на разпространението на сеизмичните вълни в дадения регион.

Сеизмичният риск е вероятността за дадени загуби в определен период от време за дадено място в следствие на земетресение. Обикновено се разглежда проектният период на сградите или съоръженията. Най-общият израз на риска се дава с уравнението (Algermissen, 2007):

$$P(R_i) = \sum_j P(R_i | S_j)P(S_j) \quad (1.1)$$

където $P(R_i)$ е вероятността системата да е в състоянието i , S_j - ниво на сеизмично въздействие j , $P(S_j)$, е вероятността в определения период от време да се случи S_j и $P(R_i/S_j)$ е вероятността системата да бъде в състояние R_i в следствие на сеизмично въздействие S_j .

За да се оцени сеизмичният риск е необходимо да е определен сеизмичният хазарт. Резултатите от анализа на сеизмичния хазарт комбинирани с функции на уязвимост (които оценяват вероятността за поява на различни нива на увреждане на съоръженията като функция на нивото на земните движения) водят до оценка на сеизмичния риск.

Най-общо, анализът на сеизмичния хазарт е свързан с оценката на земните движения на дадена площадка в следствие на множество от сеизмични сценарии (Bommer and Abrahamson, 2006). Всеки сценарий се дефинира чрез силата (магнитуда- M) на земетресението и разстоянието до площадката (D) и трябва да включва избрана стойност на ϵ (разликата между дадена стойност на параметъра и медианната стойност, f , изразена като части от стандартното отклонение σ).

Стойността на избраният за анализ параметър се изчислява (прогнозира) чрез закони за затихване, които се представят в следната форма (Bommer and Abrahamson, 2006):

$$\text{Log}(Y)=f(M,D,\text{тип разломяване,почвени условия на площадката})+\epsilon\sigma \quad (1.2)$$

С тези равенства се дефинира вероятностно разпределение на параметъра на земното движение.

Сеизмичен hazard и EC8 (Европейски стандарт EN 1998-1)

EN 1998 се прилага за проектиране и изграждане на сгради и съоръжения в сеизмични райони. Целта на EN 1998 е в случай на земетресение да осигури:

- защита животът на хората;
- ограничени повреди;
- конструкциите, важни за защита на населението да продължават да функционират.

Стохастичният характер на сеизмичните явления и наличните ограничени ресурси за противодействие на тези въздействия са такива, че постигането на тези цели е само частично възможно и се определя само с вероятностни методи. Степента на защитата, която може да се осигури за различните категории сгради и се определя само с вероятностни методи, е въпрос на оптимално разпределение на ресурсите и следователно се очаква да варира за отделните страни, в зависимост от относителната значимост на сеизмичния риск спрямо рисковете от друг произход и от глобалните икономически ресурси.

Специални конструкции като атомни електроцентрали, нефтени платформи и големи язовири са извън обхвата на EN 1998.

EC8 налага две основни изисквания: за ограничаване на повредите и за неразрушение.

Изискване за неразрушение - конструкцията трябва да се проектира и построи така, че да издържи зададено изчислително сеизмично въздействие, без локално или общо разрушаване, и по такъв начин да запази конструктивната си цялост и остатъчната си носимоспособност след сеизмични събития. Изчислителното сеизмично въздействие се изразява чрез: а) референтно сеизмично въздействие свързано с референтна вероятност P_{NCR} да се случи за период от 50 години или с референтен период на повторяемост T_{NCR} и б) коефициента за значимост γ_L , за отчитане диференцирането на надеждността. Вероятността P_R , за превишаване на дадено сеизмично въздействие в T_L години е свързана със средния период на повторяемост, T_R , на сеизмичното въздействие чрез равенството:

$$T_R = -T_L / \ln(1 - P_R). \quad (1.3)$$

Така за дадено T_L , сеизмичното въздействие може еквивалентно да се определи или чрез неговия среден период на повторяемост, T_R , или чрез вероятността му за надвишаване, P_R в T_L години. Обикновено сеизмичният hazard се представя чрез годишна вероятност за надвишаване на сеизмичните въздействия, P_1 . Вероятността P_1 на референтното сеизмично въздействие може да се получи от равенството:

$$P_{NCR} = 1 - \exp(-50 * P_1) \quad (1.4)$$

Стойностите на P_{NCR} или на T_{NCR} , които се използват в дадена страна се намират в съответното национално приложение. Препоръчителни стойности са $P_{NCR} = 10\%$ и $T_{NCR} = 475$ години.

Изискване за ограничаване на повредите - конструкцията трябва да се проектира и построи, така че да издържи сеизмично въздействие, което има по-голяма вероятност

да се случи, отколкото изчисленото сеизмично въздействие, без появата на повреди и свързаните с тях ограничения за експлоатация, разходите за които биха били прекалено високи в сравнение със стойността на самата конструкция. Сеизмичното въздействие, което трябва да се вземе под внимание за “изискването за ограничаване на повредите” има вероятност за надвишаване P_{DRL} за период от 10 години и период на повтораемост T_{DRL} . При липса на по-точна информация, може да се използва редукиционен коефициент, с който се умножава изчисленото сеизмично въздействие за да се получи сеизмичното въздействие за проверка на изискването за ограничаване на повредите.

За целите на EN 1998 териториите на държавите трябва се разделят на сеизмични райони в зависимост от локалния сеизмичен хазарт. Хазартът в границите на всеки район може да се приеме за постоянен.

За повечето от приложенията на EN 1998 хазартът е определен чрез един параметър, т.е. стойността на референтно максимално ускорение на земна основа тип А, a_{gR} . Референтното максимално ускорение на земна основа тип А, a_{gR} , за ползване в дадена страна или части от страната, може да се вземе от дадените в националното приложение карти за сеизмично райониране.

Референтното максимално ускорение на земната основа, избрано от националните институции за всяка сеизмична зона, съответства на референтния период на повтораемост T_{NCR} на сеизмичното въздействие за изискването за незразрушаване (или еквивалентно на референтната вероятност за надвишаване за период от 50 години, P_{NCR} . За този период на повтораемост е определен коефициентът за значимост γ_I , равен на 1.0. За периоди на повтораемост, различни от приетия, изчислителното ускорение на земната основа тип А, a_g е равно на a_{gR} , умножено по коефициента на значимост γ_I ($a_g = \gamma_I a_{gR}$).

В случаи на ниска сеизмичност могат да се използват съкратени или опростени процедури за проектиране на определени видове или категории конструкции.

Препоръчително е за ниска сеизмичност да се смята тази, при която изчислителното ускорение на земната основа тип А, $a_g = a_{gR} \cdot \gamma_I$ е не по-голямо от $0.1 g$ ($0.98 m/s^2$). (Изборът, дали стойността на a_g или на $a_g S$ да се използва в дадена страна за определяне на границата на ниска сеизмичност, може да се намери в националното ѝ приложение.)

В случаи на много ниска сеизмичност не е необходимо да се прилагат указанията на EN 1998. Препоръчително е за много ниска сеизмичност да се смята тази, при която изчислителното ускорение на земната основа тип А, $a_g = a_{gR} \cdot \gamma_I$ е не по-голямо от $0.05 g$ ($0.49 m/s^2$). (Изборът, дали стойността на a_g или на $a_g S$ да се използва в дадена страна за определяне на границата на много ниска сеизмичност, може да се намери в националното ѝ приложение.)

В обхвата на EN 1998 земетръсното движение в дадена точка на повърхността се представя с еластичен спектър на реагиране за ускорението на земната основа, наричан “еластичен спектър на реагиране”.

Формата на еластичния спектър на реагиране се приема, че е еднаква за двете нива на сеизмичното въздействие-за изискването за неразрушаване (крайно гранично състояние - изчислително сеизмично въздействие) и изискването за ограничаване на повредите.

Изборът на формата на еластичния спектър на реагиране, който се използва в дадена страна или част от страна, се представя в националното ѝ приложение. При избора на подходяща форма на спектъра би трябвало да се вземе под внимание магнитуда на земетресенията, които допринасят най-много за сеизмичния хазарт, дефиниран за вероятностната оценка на хазарта, вместо определените за тази цел консервативни горни граници (т.е. максималното възможно земетресение).

Когато земетресенията, засягащи даден район, са предизвикани от много различни източници, би трябвало да се вземе под внимание възможността да се използва повече от една форма на спектрите, за да може изчислителното сеизмично въздействие да се представи по подходящ начин. При такива обстоятелства е нормално да се изискват различни стойности на a_g за всеки вид спектър на реагиране и всяко земетресение.

От формула (1.1) следва, че ако една конструкция е осигурена примерно за ускорение $a(475)$ (период на повторемост 475 г.), то от сеизмологична гледна точка рискът от разрушение зависи от вероятностите за случване на ускоренията около и по-големи от $a(475)$ или с други думи от темпа с който нараства максималното ускорение с намаляване на вероятността за случване. Този темп зависи от характеристиките на сеизмичността в разглежданата територия и местоположението на площадката. Колкото по-малък е този темп, толкова рискът (от сеизмологична гледна точка) е по-малък. Тъй като за голяма част от територията на България се очаква този темп да бъде сравнително висок, то бе обсъждана идеята референтният период T_{NCR} да бъде 1000 г. (или еквивалентното $P_{NCR} \approx 5\%$). От друга страна, за не малка част от територията на България, за която сеизмичната опасност се определя от изключително активното междиннофокусно огнище Вранча или от други високо активни огнища извън територията на страната се очаква темпът да бъде сравнително нисък. Последно в Концепцията за новото сеизмично райониране на България бе прието референтният период да бъде 475 г. (препоръчаният в EC8).

1.1. ВЕРОЯТНОСТЕН АНАЛИЗ НА СЕИЗМИЧНИЯ ХАЗАРТ (PSHA)

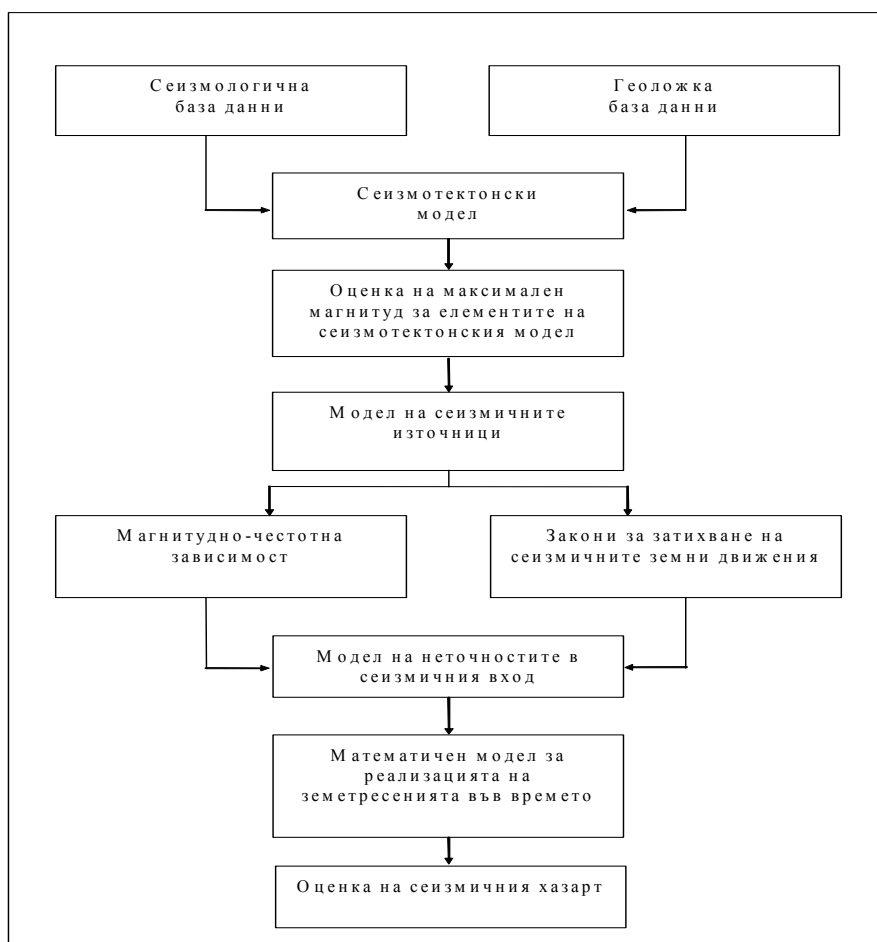
Вероятностният анализ на сеизмичния хазарт представлява оценка на вероятността, силата на земните движения да превиши зададена стойност през определен период от време. Вероятностният подход дава количествена оценка на хазарта на дадена площадка от всички възможни земетресения на всички съществени разстояния като вероятност за надвишаване на дадено ниво на земното движение за интересоващи ни периоди от време (Thenhaus and Campbell, 2003).

Аналитичната процедура за оценяване на тази вероятност е разработена през 60^{те} и 70^{те} години на 20^{ти} век от два университета в Мексико и САЩ (съответно Universidad Nacional Autonoma de Mexico и Massachusetts Institute of Technology) и представена в поредица от публикации. Една от първите разработки, лансиращи идеята за

вероятностна оценка на сеизмичните въздействия е статията на Rosenblueth от 1964 г. (Rosenblueth, 1964). Формалната процедура за вероятностна оценка, включваща пространствено-времевите неточност на бъдещите сеизмични въздействия е представена в работите на Esteva (1967, 1968) и Cornell (1968). Съществен принос в развитието на вероятностния анализ на сеизмичната опасност имат разработките на: Esteva (1969, 1970), Cornell (1971), Merz and Cornell (1973), Cornell and Merz (1975) и програмните продукти описани в McGuire (1976), Bender, Perkins (1982) и др.

Основни модели, необходими при вероятностен анализ на сеизмичния хазарта са: 1) сеизмичните източници; 2) честота на поява на земетресения с различна сила (магнитуд); 3) затихване на земните движения с разстоянието в зависимост от магнитуда на земетресението; и 4) вероятността за случване на дадено земно движение на разглежданата площадка (Thenhaus and Campbell, 2003).

На Фиг.1.1 е представена необходимата входна информация, основните етапи, приложеното моделиране и използваните методики при вероятностна оценка на сеизмичния хазарт се дава с блок схемата.



Фиг.1.1 Блок-схема за оценка на сеизмичния хазарт

Трябва да се отбележи, че геоложката база данни включва информацията от геолого-тектонски, геоморфоложки, геофизични и геодезични изследвания, за съответната територия.

Резултантният хазарт за дадена област се получава чрез сумиране на ефектите от земетресения с различна сила, реализирани в отделните сеизмични източници с различна повторяемост. Разумният подход за отчитане на неточностите в параметрите на сеизмичния вход е един съществен принос на съвременните компютърни програми за определяне на сеизмичен хазарт.

I.1.1 Математичен модел за оценка на сеизмичния хазарт

Във вероятностен смисъл, сеизмичният хазарт се дефинира като вероятността различни нива на движение на почвата да бъдат превишени през определен интервал от време.

Най-общо, в математичния модел, вероятността параметърът Z , характеризиращ движението на почвата, да превиши дадено ниво z , през определен интервал от време t , се дава с израза:

$$P(Z > z | t) = 1 - e^{-v(z)t} \leq v(z)t \quad (1.5)$$

където $v(z)$ е средната честота на превишаване за периода от време t , т. е. средната честота, с която стойностите на параметъра Z , за дадена площадка, ще превишават зададеното ниво z , през периода от време t , в резултат на земетресения в сеизмогенните източници от разглеждания регион. Неравенството в дясната страна на израза е винаги в сила и не зависи от използвания вероятностен модел за реализация на сеизмичните събития и произведението $v(z).t$ дава точна или леко консервативна оценка за вероятности по-малки от 0.1.

“Периодът на повторяемост” на зададеното ниво z се дефинира чрез:

$$R_z(z) = \frac{1}{v(Z \geq z)} = \frac{-t}{\ln(1 - P(Z \geq z))} \quad (1.6)$$

Честотата на превишаване $v(z)$, е функция на неточностите във времето, силата и локализацията на възможните бъдещи земетресения, и на неточностите в нивата на земните движения, които могат да се предизвикат на дадена площадката от земетресение на определено разстояние с определен магнитуд. Изчислява се чрез израза:

$$v(z) = \sum_n \alpha_n(m^0) \int_{m^0}^{m^u} \int_0^\infty f(m) f(r | m) P(Z > z | m, r) dr dm \quad (1.7)$$

където:

- $\alpha_n(m^0)$ е честотата на земетресенията с магнитуд над m^0 (обикновено m^0 е минималният магнитуд от инженерна значимост), генерирани в сеизмичен източник n ;

- $f(m)$ – условна плътностна функция на разпределението на земетресенията с магнитуд между m^o и m^u (m^u е максималният очакван магнитуд за съответния сеизмичен източник);
- $f(r|m)$ - условна плътностна функция на разпределението на разстоянията до активизирания сегмент от разлом, дължината на който е в зависимост от магнитуда на земетресенията;
- и $P(Z < z | m, r)$ е условна вероятност земното движение да надвиши ниво z за земетресение с магнитуд m , реализирано на разстояние r от площадката.

Средната честота на превишаване $v(z)$ зависи от три вероятностни функции: магнитудно-честотно разпределение, условното разпределение по разстояние и условното разпределение на вероятността за превишаване. Тези три разпределения най-общо описват случайните грешки и зависят от модела на сеизмичните източници и модела за затихване на сеизмичните земни движения.

В общия случай се предполага, че експоненциалният магнитуден модел (отсечено експоненциално разпределение) и средната скорост на поява на земетресенията моделират адекватно сеизмичността.

Плътностната функция на отсеченото експоненциално разпределение се дава от:

$$f(m) = \begin{cases} k\beta \exp(-\beta(m-m_0)) & \text{за } m_0 \leq m \leq m_{\max}, \\ 0 & \text{в останалите случаи,} \end{cases} \quad (1.8)$$

където m_0 е минималният магнитуд, от който зависят решенията, свързани със сеизмичния риск (в разглеждания случай минималният магнитуд от инженерна значимост), $k = (1 - \exp(-\beta(m_{\max}-m_0)))^{-1}$, m_{\max} - максималният очакван магнитуд, β - наклонът на графика на повторяемост умножен по $\ln(10)$. Вероятността магнитудът на дадено земетресение да надвишава стойност M ($M \in [m_0, m_{\max}]$) се дава от:

$$P(m > M) = 1 - k + k \exp(-\beta(M - m_0)). \quad (1.9)$$

Средният годишен брой земетресения с магнитуд над M , $N(M)$ се дава от:

$$N(M) = N(m_0) * P(m > M), \quad (1.10)$$

където $N(m_0)$ е средният годишен брой земетресения с магнитуд над m_0 .

При достатъчно регистрирани земетресения с магнитуд над m_0 необходимите параметри се получават от оценката за графика на повторяемост. При недостатъчно данни за параметър β се разглежда оценка, получена за подобни структури, а $N(m_0)$ се получава от регистрираните земетресения по структурата. От съществено значение е получените оценки да са на основата на времеви интервали, за които използваният каталог е пълен.

На основата на геометрията на сеизмичните източници и магнитудните модели за всеки от тях се изчислява разпределението $f(r|m)$. Обикновено се предполага равномерно

разпределение на земетресенията в даден източник. В McGuire (1976) и Bender, Perkins (1982) са дадени процедури за изчисляване на това разпределение.

Вероятността, $P(Z > z | m, r)$, земетресение с магнитуд m на разстояние r от площадката да предизвика сеизмично земно движение (на площадката), превишаващо зададеното ниво z , се изчислява с помощта на закона за затихване на сеизмичните земни движения и разпределението на случайните грешки. Обикновено се предполага нормално разпределение на логаритъма със средно стойност, тази получената от закона и дисперсия – дисперсията на закона.

От статистическа гледна точка, реализацията на земетресенията може да се разглежда като точков процес, при който земетресенията съответствуват на точки случайно разпределени във времето. Ако времевите интервали между последователните събития са експоненциално разпределени процесът е Поасонов. Поасоновият процес добре описва много от природните явления, поради което той е най-често използвания процес за апроксимиране на безкрайни едномерни точкови процеси. В сеизмологичния анализ, Поасоновият процес се прилага като първо приближение за описание разпределението на земетресенията във времето.

Сеизмологичните данни добре се описват с Поасонов процес ако от тях се изключат афтершоковите събития. Поасоновият процес предполага стационарност (постоянна скорост на реализация) и като модел на сеизмичния процес изключва възможността земетресенията да се генерират във времеви клъстери (групи). Една изявена група от земетресения е афтершоковата поредица. Афтершоковите събития са значителна част от реализираните земетресения (особено при плитката сеизмичност) и техният ефект трябва да бъде отразен при моделиране на сеизмичния процес.

1.1.2 Моделиране на сеизмичните източници

Сеизмичен източник – област характеризираща се с подобие на геоложкия строеж и реализирана сеизмичност.

Сеизмичните източници се определят на основата на сеизмологична, геоложка и геофизична информация и се характеризират с: геометрия, пространствено разпределение на земетресенията, енергетично (магнитудно) разпределение, максимално очакван магнитуд.

При изследвания в регионален мащаб най-съществената информация за оценка на потенциалните места за възникване на земетресения (сеизмични източници) са данните за местоположението и характеристиката на тектонските структури и данните за параметрите на пространствено-времето и енергетичното разпределение на сеизмичната активност. При анализа на сеизмичния хазарт е необходимо да се отчитат неточностите и интервалите на вариране за всеки елемент от модела на сеизмичните източници.

Геометрия на сеизмичните източници

Описание на геометрията на източниците е необходимо за да се оцени разстоянието от дадена площадка до източниците, в които могат да се очакват земетресения. За

уточняване геометрията на източника се оценява и дълбочинното разпределение на земетресенията в него.

Източниците могат да бъдат площни, линейни, смесен тип и точкови.

Като площен източник се моделира област в която не влизат дефинираните активни разломи и се предполага равномерно разпределение на сейзмичността (която е с характеристики силно различаващи се от тези на заобикалящите я зони) в нея (Thenhaus and Campbell, 2003). Площните източници, обикновено, се представят чрез система от изпъкнали четириъгълници. Най-често се предполага равномерно разпределение на земетресенията в източника. В този случай като разстояние се разглежда минималното разстояние от източника до площадката.

Линейните източници (т.н. разломен модел) моделират линейни сейзмогенни структури (активни разломи) и се представят чрез система от свързани отсечки (краят на предходната е начало на следващата). Земетресенията по линеен източник се моделират като разкъсване с дължина, зависеща от магнитуда на сейзмичното събитие. В този случай като разстояние се разглежда минималното разстояние от площадката до разкъсването. Всяка точка може да бъде начало (край) на разкъсването, ако дължината му позволява (т.е. цялото разкъсване е в границите на линейния източник).

Като източници от смесен тип се приемат площни сейзмични източници, в границите на които влизат повече от една разломни структури (Thenhaus and Campbell, 2003). Площният източник се разделя на два или повече подизточника. Подизточникът, който не включва разломни структури се определя като област с фонов сеизмичност, в която магнитудът на земетресенията достига до избран прагов магнитуд. В този под източник земетресенията се моделират като равномерно разпределени случайни събития с честота на поява статистически определена от каталога на събитията реализирани само в тази област. Подизточникът, съдържащ разломна структура (или структури) е с максимален (M_{max}) оценен, най-често, по размера на структурата. Земетресенията се моделират като равномерно разпределени случайни събития с честота на поява статистически определена от каталога на земетресенията, реализирани само по структурата. Възможно е (в случай, че наличната информация е не достатъчна) параметърът b (наклон на графика на повторяемост) да е един и същ за подизточниците, а параметърът a (активност) да се оценява отделно за всеки един от подизточниците.

В някои случаи, много отдалечени сейзмогенни структури или сейзмични зони могат да се моделират чрез точкови сейзмични източници. Точковите източници се представят като точка, обикновено геометричния център на структурите или зоната.

Повторяемост на земетресенията

За всеки сейзмичен източник се определя повторяемостта на земетресенията с различни магнитуди (магнитудно-честотна зависимост). Повторяемостта на земетресенията се представя чрез нивото на сейзмичната активност и относителната честота на събития с различна сила (магнитуд) за всеки един от дефинираните сейзмични източници. За

оценка на повторемостта се използва два вида информация: наблюдаваната (историческа и инструментална) сеизмичност и геоложка (геология, геоморфология, тектоника и неотектоника). Съществено е използването на каталог с хомогенна в пространството и времето информация, обхващащ голям магнитуден диапазон и значителен период от време.

Обикновено магнитудно-честотната зависимост се представя чрез отсечено експоненциално разпределение (характеризиращо се със стойността на параметъра b) и скорост на поява за единица време. Магнитудно-честотните зависимости се определят, използвайки закона на Гутенберг-Рихтер (график на повторемост), дефиниран чрез релация от вида: $\text{Log } N(M)dM = a - b M$, където параметрите a (активност) и b (наклон на графика) са константи.

Наклонът на график на повторемост (b) най-често се оценяват по метода на най-малките квадрати (МНК) или по метода на максимално правдоподобие (ММП),

Оценката на параметъра a (активност) трябва да бъде съобразена с наличната сеизмологична информация, като се отчита и пълнотата на каталожните данни.

Необходимо е да се отчита точността на определяне на всеки от параметрите, характеризиращи сеизмичния режим. Влиянието на тези неточности (грешки) върху оценката на сеизмичния хазарт се отчита при анализа на неточностите в сеизмичния вход.

Максимален магнитуд

Максималният магнитуд (M_{\max}) на очакваните земетресения е важен параметър в анализа на сеизмичния хазарт (особено за малки вероятности на надвишаване). Всеки сеизмичен източник се свързва с максимално очакван магнитуд.

Подходи за оценка на M_{\max} :

- на базата на каталога на земетресенията. При наличие на достатъчно информация (надежден каталог на земетресенията за продължителен период от време и достатъчно земетресения);

- чрез емпирични зависимости (ако за дефинираните геоложки структури са известни размерите на отделните сегменти и/или средната скорост на преместване, slip rate), свързващи M_{\max} с дължината на разлома (или сегмента от него), породил земетресението. Това е физически най-добре обоснованата оценка на максималното земетресение, което може да се генерира по една една сеизмогенна структура;

- в практиката често се прилага подходът на “експертно решение”, основаващо се на наличната геоложка информация, историческа и съвременна сеизмичност и/или магнитудно-честотната зависимост за земетресенията, генерирани в съответния сеизмичен източник.

1.1.3 Модели за затихване на земните движения

Най-общо анализа на сеизмичната опасност е свързан с оценката на земното движение на дадена площадка в следствие на множество от земетръсни сценарии. Всеки сценарий се дефинира чрез магнитуд на земетресението и разстоянието от сеизмичния източник

до площадката. Стойността на избран параметър на земното движение (максимално ускорение, максимална скорост и др.) се изчислява (прогнозира) от закон за затихване на избрания параметър – $\ln Y = f(R, M)$ (функция от разстоянието и магнитуда). От съществено значение е, че законът за затихване не задава фиксирана стойност на избрания параметър на земното движение, а дефинира медианна стойност и дисперсия на неговото разпределение. Това означава, че за всяка двойка (R, M) очакваната стойност на параметъра е случайна величина със съответно разпределение т.е. $\ln Y = f(R, M) \pm \sigma$. Изследванията показват, че разпределението на $\ln(Y)$ може да се приеме за нормално. По този начин всеки сценарий се дефинира чрез тройката (R, M, α) , където α задава отклонението от медианната стойност $f(R, M)$ и обикновено се задава в части от σ т.е. $\alpha = \varepsilon \sigma$. Съвременните оценки на сеизмичната опасност разглеждат тази “недетерминираност” на Y с R и M като интегрална част при всяка оценка (Bommer, Abrahamson, 2006).

В последните години Y се разглежда и като функция на типа механизъм, почвените условия под площадката и вида на земетресението (вътрешноплочево или междинноплочево) и съществуват закони, отчитащи тези особености. Трябва да се отбележи, че въвеждането на тези параметри не влияе съществено на стандартното отклонение на законите за затихване, т.е. недетерминираността на параметрите на земното движение са следствие главно на физиката на земетресенията, и законите за затихване трябва да се разглеждат като вероятно разпределение, като това да бъде отчитано при оценката на сеизмичната опасност.

Недостатъчните познания за средата и процесите в огнищата на земетресения, както и случайният им характер, затрудняват адекватното моделиране на факторите, от които зависят основните параметри на сеизмичното земно движение. Поради тази причина за тяхната оценка на практика се прилагат емпирични зависимости от вида:

$$\log_{10} Y = C_1 + C_2 * M + C_4 * \log_{10}(R^2 + h_0^2)^{1/2} + C_a S_a + C_s S_s \pm \sigma, \quad (1.11)$$

където Y параметър на земното движение (максимално ускорение, максимална скорост и др.); R – разстояние в km; M -магнитуд; $C_1, C_2, C_4, h_0, C_a, C_s$ – емпирични коефициенти; S_a, S_s -коефициенти зависещи от почвените условия [скала: $(S_a, S_s) = (0,0)$; твърда почва: $(S_a, S_s) = (1,0)$; мека почва: $(S_a, S_s) = (0,1)$]; σ -стандартна девиация.

Законите за затихване оказват съществено влияние върху оценката на сеизмичния хазарт. Оценката на параметрите (коефициенти и стандартна девиация) на даден закон за затихване силно зависят от количеството и качеството на входните данни - магнитуден интервал, хомогенност на извадката и др. Също така, от съществено значение за тези оценки е да бъде отчетен типът на почвените условия под регистриращите прибори.

Обикновено законите на затихване се получават от статистически анализ на данни за силни движения и/или на макросеизмични данни. За райони, в които данните за силните движения са недостатъчни се прилагат емпирични закони за затихване,

получени въз основа на богата и хомогенна база от инструментални данни за райони със сходни сеизмологични, геоложки и сеизмотектонски характеристики.

Съществен параметър на законите за затихване е стандартната девиация. Най-общо, стойностите на стандартната девиация σ варират в широки граници. Тези стойности зависят от критериите за селекция, количеството и качеството на входните данни, и до голяма степен отразяват неопределеността заложена в едно сложно природно явление, представено със силно опростен модел. Понастоящем, за всички публикувани релации описващи затихването на сеизмичните земни движение, се дава и оценка на стандартната девиация. Първите оценки на този параметър са дадени от Milne and Devenport (1969) и от Esteva (1970), съответно на закони за затихване на макросеизмична интензивност (I) и максималното ускорение (PGA). Включването на σ в оценката на сеизмичния hazard (което води до завишаване на hazarda) става изискване през 80^{те} години на 20 век (Cambell, 1981; Joyner and Boore, 1981), а в наши дни се приема и прилага на практика като неделима част от анализа на сеизмичната опасност (McGuire, 2004; Bommer, Abrahamson, 2006).

1.1.4 Компютърни програми за оценка на сеизмичния hazard

Най-често използваните програми за оценка на сеизмичния hazard са EQRISK (McGuire, 1976) и SEISRISK (Bender; Perkins, 1982; Bender and Perkins, 1987), FRISK88M (Risk Engineering Inc., 1996) FRISK (McGuire, RK, 1987), Crisis 2001 (Ordaz et al, 2001). Проведените тестове показват, че те дават идентични резултати (Grünthal et al., 1999).

За оценката на сеизмичната опасност на територията на България е разработена програма, основаваща се на по-горе цитираните програмни продукти но с някои модификации и подобрения, обусловени от спецификата на сеизмичните източници, определящи сеизмичната опасност за България. Основното неудобство на съществуващите програми е, че използват само един закон за затихване на земните движения за всички източници. Изключение е програмата Crisis 2001 (Ordaz et al, 2001). Тази програма използва табличен вид на законите и не отчита дълбочинно разпределение на сеизмичността. Отчитането и на дълбочинното разпределение е от съществена важност за сеизмичната опасност от междиннофокусните земетресения, каквито са събитията, генерирани в огнище Вранча, Румъния.

Разработената за България програма се основава главно на EQRISK (McGuire, 1976), като са използвани някои изчислителни процедури от SEISRISKIII (Bender and Perkins, 1987). Допълнително са въведени възможности за:

- различени закони за затихване за различните източници;
- възможност за задаване на закона в табличен вид и във вид на функция на разстоянието, магнитуда и дълбочината;
- възможност за прилагане на метода Монте-Карло за оценка влиянието на неточностите в сеизмичния вход върху сеизмичната опасност;
- отчитане на дълбочинно разпределение.

Програмата е приложена за вероятностна оценка на сеизмичния хазарт за редица високо рискови съоръжения на територията на България.

I.2. ОТЧИТАНЕ НА НЕТОЧНОСТИТЕ В СЕИЗМИЧНИЯ ВХОД

Отчитането на неточностите е ключов елемент в анализа на сеизмичния хазарт. Неточностите се разделят на два основни вида: алеаторни (aleatory) още наречени случайни грешки или неопределености; и епистемични (epistemic)-наречени моделни грешки (McGuire, 1993).

Първият тип (случайни или aleatory) са неточностите, произтичащи от случайността присъща на природните явления. Те отразяват случайността присъща на сеизмичния процес и разпространението на сеизмичните вълни. Вероятностните функции съдържащи се в основния аналитичен модел за оценка на сеизмичния хазарт отразяват случайните неточности. Алеаторните неточности са включени директно в изчисленията при вероятностния анализ на хазарта чрез математическото моделиране.

Моделните (епистемични) неточности са следствие на статистически или моделни вариации и са резултат от нивото на познание и базата данни, с която разполагаме. Тези неточности са следствие на недостатъчното ни познание за причините за земетресенията, характеристиката на процесите, земните движения и т.н., т.е. това са неточности в сеизмичния вход. Съществуват редица моделни грешки при оценката на сеизмичния хазарт, например: конфигурацията на сеизмичните източници, техните сеизмични характеристики и др.

Съвременна практика е разглеждането на вариантността на земното движение като неделима интегрална част от PSHA (McGuire, 2004; Bommer и Abrahamson, 2006). Модерните методи за анализ включват неточностите в анализа за да се оцени тяхното влияние върху хазарта. Във вероятностния анализ на сеизмичния хазарт, най-често, неточностите в моделирането се отчитат и включват в изчисленията чрез т.н. логично дърво (Kulkarni et al., 1984; Coppersmith & Youngs, 1986; Bommer et al., 2005), и/или чрез метода на Monte Carlo (Bungum et al., 1986).

Логичното дърво е въведено в Kulkarni et al, (1984) като средство за моделиране и количествена оценка на неточностите в сеизмичния вход и се разглежда като част от вероятностния анализ на хазарта (Coppersmith & Youngs, 1986). Логичното дърво позволява формалното характеризирание на неточностите чрез алтернативни интерпретации, модели, параметри. Важен принцип при разработката на логичното дърво (както е дефинирано в Bommer et al., 2005) е то да включва (чрез своите разклонения на дадено ниво) очакваните физически възможности за параметъра, който отразява съответното ниво. Клоновете на дървото трябва да са разработени по такъв начин, че при натрупване на нови познания, ревизираните оценки за параметрите да са били отразени в дървото. Физически необосновани сценарии не трябва да бъдат включвани в логичното дърво.

Методът Монте Карло се прилага за оценка влиянието на параметри (Bungum et al; 1986), чийто стойности могат да се разглеждат като случайни величини с дадено

разпределение (прилага се за всички параметри, статистически или експертно оценени, каквито са параметрите на графика на повторяемост, максималният очакван магнитуд и др). На практика този подход също може да се разглежда като логична схема, като се генерират по случаен начин клоновете от даден възел. Двата подхода могат да се комбинират, като част от параметрите приемат предварително зададени дискретни стойности, а други се генерират по случаен начин в зависимост от приетото разпределение на съответния параметър. Крайният резултат от изследването на сеизмичния хазарт е разпределение на хазартни криви. На основата на това разпределение се определят средна, медианна и процентни хазартни криви.

I.3. ДЕАГРЕГАЦИЯ

Основното предимство на вероятностния анализ на сеизмичния хазарт (PSHA) е, че интегрирайки върху всички възможни сеизмични източници, модели на сеизмична активност и модели за затихване на сеизмичните земни движения, той дава възможност да се изчисли обща вероятност силата на земните движения да превиши зададена стойност през определен период от време. Съвременният PSHA отчита мултиполни хипотези на входните допускания и отразява относителната надеждност на съвместяване на научните хипотези. Интегралната същност на PSHA е причина за един недостатък на този вид хазартна оценка-губи се концепцията за проектно земетресение, което е необходимо при вземане на някои инженерни решения. През 90^{те} години на 20^{ти} век се публикуват редица изследвания, третиращи проблема за деагрегация на резултатите от PSHA (като напр. Stepp et al., 1993; Chapman, 1995; Mc Guire, 1995 и др.).

Най-общо процедурата, наречена деагрегация е разработена за да се изследва пространствено - магнитудната зависимост на резултатите от анализа на сеизмичния хазарт (по-късно към параметрите M и R се включва и ϵ - брой стандартни девиации, за които стойността на земното движение е под или над медианна стойност от прогнозирана от съответния модел на затихване) за да се оцени едно (или няколко) проектно земетресение. Чрез деагрегацията на сеизмичния хазарт, според McGuire (1995), се постигат два изключително важни резултата. Първият, по-добре се разбира хазарта, изразен чрез M , R и ϵ . Ясно се вижда връзката между дефинираните сеизмични източници и изчисления хазарт. Вторият, затваря се кръгът между физическата същност на земетръсната опасност, отчитане на всички възможни сеизмични събития с принос за тази опасност и представяне на земетръсната опасност с един (или няколко) набор от параметри, които са директно приложими за проектиране или анализ.

Един от основните проблеми при деагрегацията на PSHA е, че в повечето случаи не е възможността да се определи едно проектно земетресение, което да е в съответствие с целия равновероятностен спектър на реагиране (изчислен чрез PSHA). Причина за това е, че различни земетресения са в съответствие с оценените (чрез PSHA) спектрални амплитуди за различен собствен период (T). McGuire (1995) предлага метод, който позволява да се оцени доколко обосновано е представянето на хазарта с едно проектно

заметресение и ако е така, коя е най добрата комбинация от трите параметъра M , R и ϵ , за която изчисленият спектър е в най-добро съответствие с оценения, чрез PSHA, равно вероятностен спектър на реагиране.

На практика за деагрегация на сумарния хазарт най-често се прилага следният подход. Хазарта за избрана годишната вероятност за надвишаване на дадено ниво на сеизмичното въздействие и за определен спектрален период T се разделя на двойки (или тройки) по магнитуд и разстояние (ϵ). Изчислява се относителният принос към сумарния хазарт на всяка от двойките (или тройките) чрез отношението между честотата на надвишаване на дадена двойка (тройка) и общата честота на надвишаване. Резултатът се представя във вид на хистограма, даваща процентния принос на всяка двойка (тройка) към сумарния хазарт. Модите на разпределението определят земетресенията с най-голям принос към сумарния хазарт за избраната годишната вероятност за надвишаване (период на повтораемост) и съответния спектрален период T (Thenhaus and Campbell, 2003).

II. ОЦЕНКА НА СЕИЗМИЧНИЯ ХАЗАРТ ЗА ТЕРИТОРИЯТА НА БЪЛГАРИЯ

България се намира в централната част на Балканския полуостров, който е най-активен възел за Европа от Алпо-Хималайския земетръсен пояс. Земетръсната обстановка на Балканите има своя специфика. Основната част от земетресенията са с плитки огнища на дълбочина до 60 km, което силно увеличава ефектите върху земната повърхност. При висока гъстота на населението и голяма плътност на застрояването, този факт означава значителни последици даже от сравнително слаби земетресения (магнитуд $M=5.0-6.0$). Пример за тава са земетресенията в района на Стражица през 1986 г.

Част от земетресенията, реализирани в пределите на Балкански полуостров, са с огнища на дълбочина 100-200 km (т.н. междиннофокусни земетресения) и са типични за районите на Вранча и Хеленската арка. Силни земетресения от такива огнища оказват неблагоприятни последици на големи разстояния, какъвто е примерът с въздействията в България от земетресението във Вранча през 1977 г.

Територията на България безусловно трябва да бъде причислена към земетръсно опасните зони на Земята. Освен това, сеизмичността на териториите на съседните страни, Гърция, Турция, Бивша Югославия и Румъния оказва съществено влияние върху оценката на сеизмичния хазарт за територията на България (особено силно е сеизмичното въздействие на междиннофокусните земетресения в област Вранча, Румъния). През изминалите векове земите на България са били подложени на силни сеизмични въздействия. В исторически аспект внимание заслужават земетресенията от 1818 г. (VIII-IX MSK) и 1858 г. ($M_S \approx 6.3$, $I_0 = IX$ MSK), реализирани в близост до град София. Събитието от 1858 г. причинява сериозни разрушения в София и предизвиква появата на термални извори в западната част на града. В началото на 20^{ти} век, от 1901 до 1928 г., на територията на България са се реализирали 5 силни земетресения. Това са едни от най-значителните земетресения, реализирани в Европа през 20^{ти} век. С висока интензивност е сеизмичната активност в ЮЗ България през периода 1904-1906 г. Тази сеизмична поредица започва на 4 април 1904 г. с реализацията на две катастрофални земетресения в интервал от 23 минути (първото, с $M_S=7.1$, приемано като форшок е в $10^h 05^{min}$, а второто, с $M_S=7.8$ и $I_0=X$ - главно събитие, е реализирано в $10^h 26^{min}$). Главният удар е усетен в Будапеща (Унгария) и според твърдения на очевидци в град София са наблюдавани вълни по земната повърхност. Повърхностните разкъсвания, причинени от земетресението през 1904 г., все още са видими в Кресненското дефиле. През 1928 г., по долината на р. Марица (в централната част на южна България), се реализира поредица от три разрушителни земетресения (най-силното с $M_S=7.0$). Събитията предизвикват значителни разрушения в градовете Пловдив, Чирпан и Първомай. Силно засегнати са и много други селища. Напълно разрушени са 74000 сгради, загиват 114 човека. След 1928 г., на територията на България, не са реализирани други катастрофални земетресения. Най-силното събитие след 1928 г. е земетресението от 1986 г., с магнитуд $M_S=5.7$, реализирано в централна северна България (близо до гр. Стражица).

II.1. СЕИЗМОЛОГИЧНА БАЗА ДАННИ

Пространствено-времево и енергетично хомогенен каталог на земетресенията (сеизмологична база данни), реализирани в разглеждания регион е най-съществената входна информация за анализ на сеизмичния хазарт (McGuire, 1993). В използвания каталог трябва да са идентифицирани афтершоковите събития, дублираните събития отстранени и оценена пълнотата (във времето за съответни магнитудни интервали) на каталожната информация.

За целите на настоящото изследване е съставен каталог за регион с граници: 39.5-47.5 N; 19.0-30.0 E (Отчет ГФИ, 2007). Наложеният пространствен прозорец е съобразен с изискването, да бъдат обхванати всички сеизмични източници извън територията на България, които оказват съществено влияние върху оценката на сеизмичния хазарт за страната. Създадена е база данни, включваща над 25 000 земетресения.

Данните за земетресенията в региона се базират на информацията, представена в следните основни източници:

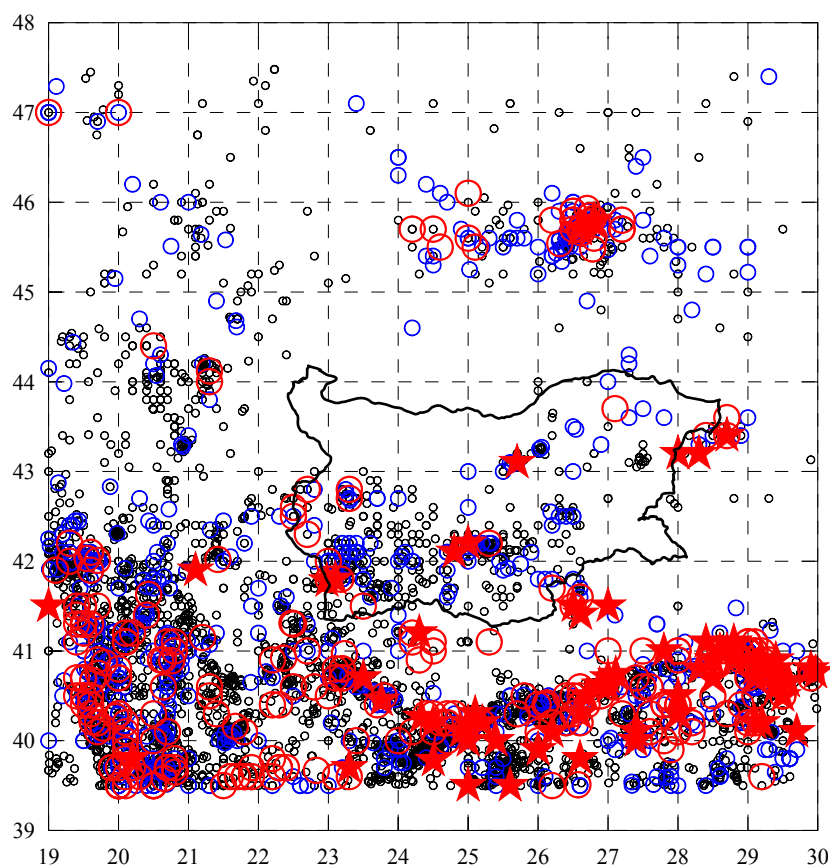
- Каталог на Земетресенията (Shebalin et al., 1974);
- Earthquake Catalogue for Central and Southeastern Europe 342 B-1990 AD (Shebalin et al., 1998);
- Нов Каталог на Земетресенията в България за Периода V Век В.С. - XIX Век (Christoskov et al., 1979);
- Каталог на Земетресенията в България и Прилежащите ѝ Земи за Периода 1900-1977 (Grigorova et al., 1979);
- Български каталог на земетресенията, 1981-1990 (eds. Solakov., Simeonova, 1993);
- A catalogue of earthquakes in the Mediterranean and surrounding area for the period 1901-2004 (Papazachos et al., 2005).

Каталожните данни са сравнени и допълнени с данните, представени в: Sokerova et al. (1992); Papazachos and Papazachou (1989); Регионален каталог на земетресенията на Международния Сеизмологичен Център (ISC, 2000-2003) и Сеизмологични Бюлетени на Българската Национална Оперативна Телеметрична Система за Сеизмологична Информация (1991-2006). Трябва да се отбележи, че приоритет е даден на Националните каталози.

В компилирания каталог за оценка силата на земетресенията е използван магнитуд по повърхностни вълни M_S . За хомогенизиране на каталога магнитудните оценки, представени в различните източници, са сравнени и коригирани. Каталогът е проверен за дублиращи се събития. Афтершоковите събития са идентифицирани и отстранени, чрез прилагане на магнитудно зависимия, пространствено-времеви прозорец, за Балканския регион, предложен от Christoskov and Lazarov (1981). Окончателният каталог съдържа 3316 независими събития с $M \geq 4.0$. Пространственото разпределение на епицентрите на земетресенията с $M \geq 4.0$ в избрания пространствен прозорец е представено на Фиг.2.1.

Сеизмологичните данни условно се разделят на три времеви категории с различна точност на определяне на земетръсните параметри (H_0 , ω , λ , h , M - време в огнището, географска дължина, географска ширина, дълбочина, магнитуд).

Сега съществуващата (от 1981 г.) Българска сеизмична мрежа в рамките на Националната Оперативна Телеметрична Система за Сеизмологична Информация (НОТССИ) към Геофизичен Институт - Българска Академия на Науките осигурява надеждна регистрация и качествена информация за земетресенията ($M \geq 3.0$), станали на територията на България и околностите ѝ (Солаков, 1991). За периода 1991-2006 г. е съставен каталог, в който са включени земетресения с магнитуд $M \geq 3.0$, станали в България и близките ѝ околности.



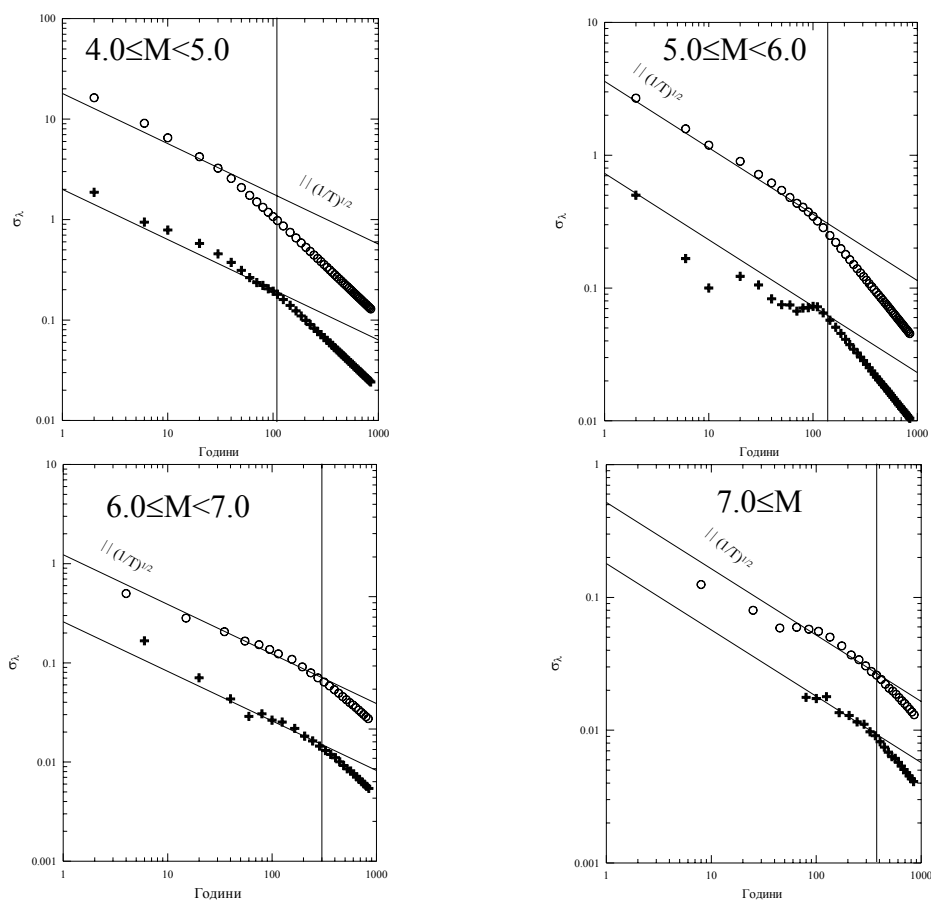
Фиг.2.1 Сеизмичност в избрания пространствен прозорец ($M \geq 4.0$)

Земетресенията в разглеждания регион са плиткочни земетресения ($h < 60$) с изключение на събитията, генерирани в огнище Вранча, Румъния, където дълбочина на сеизмичната активност достига от 90 до 200-220 km (т.н. междиннофокусни земетресения). От анализа на дълбочинното разпределение (Boncev et al., 1982; Sokerova et al., 1992) е установено, че основната част от земетресенията са станали в Земната кора на дълбочина до 50 km. Хипоцентрите на земетресенията са локализирани предимно в горната част на кората, малко са събитията възникнали в долната част от Земната кора. Най-силните от тези събития ($M_s \geq 7.0$) са реализирани в горната част на кората (10-25 km). Максимална плътност на сеизмичността се наблюдава в дълбочинен слой между 5 и 25 km.

Установено е (Отчет ГФИ, 2007), че сеизмичността на територията на България е неравномерно разпределена в пространството, което дава основание земетресенията да се групират в географски определени зони, наречени сеизмични зони. От гледна точка на вече проведените за централни Балкани, сеизмотектонски анализ, привързването на земетресенията към сеизмични зони е по-адекватно моделиране от дефинирането на линейни разломни структури и тримерни разломни области. Сеизмичността, реализирана на територията на България се привързва към основни сеизмични зони, дефинирани в работите на Sokerova et al. (1992) и Dachev et al. (1995) въз основа на пространственото разпределение на сеизмичността и възможните огнищни зони, предложени в работата на Voncev et al. (1982). Това са сеизмични зони: Шабла, Горна Оряховица, София, Марица, и Кресна.

За изследване пълнотата на каталожните данни в основния каталог ($M \geq 4.0$) е приложен тестът на Stepp (1971). Честотата на поява $\lambda(I) = N(I) \text{ год}^{-1}$ (N брой на земетресения с магнитуд $M \pm \Delta M$) се моделира като Поасонов процес във времето. Тогава за период от T години вариансът σ_λ^2 на λ е λ/T . При стационарност σ_λ трябва да е успоредно на $1/\sqrt{T}$.

Резултатите, представени на Фиг.2.2 показват, че за $M_S > 7.0$ каталогът може да се счита пълен за период от 400 години, за $M_S \geq 6.0$ последните 250-300 години, около 120 години за $M_S > 5.0$ и след 1900 г. за $M_S \geq 4.0$.

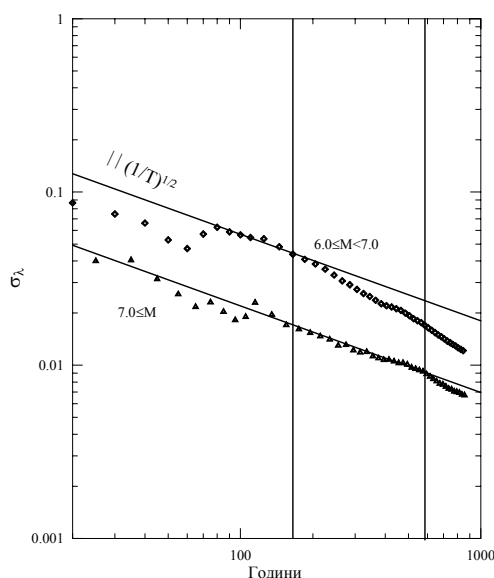


Фиг.2.2 Пълнота на каталожните данни

Допълнително, в проведеното изследване е използван и нов каталог на междиннофокусните земетресения, генерирани в огнище Вранча, Румъния, който е създаден през последните години от румънски сеизмолози (ROMPLUS, 2007). Този каталог съдържа 37 земетресения с магнитуд по-голям или равен на 7.0, като е използван магнитуд по сеизмичен момент M_W .

Пълнотата на каталожната информация за междиннофокусните земетресения (Вранча, Румъния) е изследвана чрез прилагане теста на Stepp (1971). Резултатите показват (Фиг.2.3), че за $M_W \geq 7.0$ каталогът може да се счита пълен за период от 500 години, а за $M_W \geq 6.0$ малко повече от 100 години.

Резултатите от приложения тест показват, че е възможно създаване на хомогенни извадки от данни, определяйки времеви интервали, в които земетресенията от даден магнитуден клас са с необходимата за статистически изследвания пълнота.



Фиг.2.3 Пълнота на каталожните данни (ROMPLUS, 2007)

II. 2. МОДЕЛ НА СЕИЗМИЧНИТЕ ИЗТОЧНИЦИ

Моделът на сеизмичните източници е схематично представяне на сеизмотектонския модел за целите на анализа на сеизмичния хазарт, позволяващо директното му прилагане в изчисленията (Thenhaus and Campbell, 2003). Всеки сеизмичен източник се характеризира с: геометрия, разпределение на земетресенията в източника, магнитудно-честотно разпределение и максимален очакван магнитуд. При анализа на сеизмичния хазарт е необходимо да се отчитат неточностите и интервалите на вариране за всеки елемент от модела на сеизмичните източници. Моделирането на сеизмичните източници е извършено на два етапа.

Първи етап - създаване на сеизмотектонски модел

Под сеизмотектонски модел (съгласно Thenhaus and Campbell, 2003) се разбира дефиниране географското разпределение на сеизмичността (епицентрални зони) и специфициране (чрез определяне на характеристиките, необходими за оценка на сеизмичния хазарт) на всяка от определените зони.

Сеизмотектонски модел се създава въз основа на обща база данни, получена от изследванията за региона, при съгласувано обединяване на сеизмологичната и геолого-геофизичната и геодезичната информация. Създаването му трябва да е съобразено и със съществуващите сеизмотектонски изследвания за разглеждания регион. Стандартната процедура е интегриране елементите на геоложката и сеизмологичната бази данни, като се включи и допълнителна информация (напр. за действащите напрежения) с цел създаване на модел, състоящ се от дискретен набор сеизмогенни структури.

В Отчет ГФИ (2008) е представен сеизмотектонски модел за територията на България - синтез на геофизичната, геодезичната геолого-тектонската и сеизмологичната информация. Моделът демонстрира сложната сеизмотектонска обстановка в региона и дава възможност, комбинирайки геолого-геофизични, геодезични и сеизмологичните данни, да се получи обща представа за генезиса на земетресенията.

Сеизмотектонският модел за територията на България е съставен въз основа на кохерентни, съвместими и хомогенни геофизични, геоложки, неотектонски и сеизмологични данни за разглеждания регион като са взети предвид резултатите от геодезичните измервания и всички съществуващи сеизмотектонски интерпретации и известните научни публикации (по темата) за региона.

Сеизмотектонският модел се състои от два основни типа структурни елементи:

- сеизмогенни структури, идентифицирани въз основа на наличните (сеизмологични, геоложки, геофизични, геоморфоложки и неотектонски) данни;
- зони с дифузна сеизмичност, които представляват сеизмотектонски провинции, обхващащи области с еднакъв сеизмотектонски потенциал.

В изследването като сеизмогенни структури се приемат разломни структури (определени по геолого-геофизични данни) с потенциал за генериране на силни земетресения с магнитуд над 6.0. Това допускане е в съответствие с изискванията залегнали в изработката на hazard карти за САЩ (виж www.United States National Seismic Hazard Maps.mht).

Разпознаването на сеизмогенните структури се основава на съпоставяне на геоложки, геофизични и геоморфоложки данни със сеизмологичната информация (историческа и инструментална сеизмичност). Съставена е комплексна карта (представена на Фиг.2.4), обхващаща съвременен активните разломи (Глава I, раздел 6 на Отчет ГФИ, 2008), разломи по гравиметрични данни (Глава I, раздел 3 на Отчет ГФИ, 2008) и реализирана сеизмичност с $M > 3.0$ (Глава I, раздел 7 на Отчет ГФИ, 2008). За дефиниране на сеизмогенните структури са отчетени особеностите в повърхността на Мохоровичич (Глава I, раздел 1, Отчет ГФИ, 2008) и топлинния поток (Глава I, раздел 2, Отчет ГФИ, 2008) на територията на България. В анализа са включени аномалии установени в картата на магнитното поле (Глава I, раздел 4 на Отчет ГФИ, 2008). При дефиниране на сеизмогенните структури е взето предвид пространственото разпределение на осите на напрежения от решенията на фокалните механизми на земетресенията и зонирването на територията на страната, (представени в раздел 1 на Отчет ГФИ, 2008). Както и направеният извод за силна хетерогенност на полето на напреженията в българските

сеизмични зони, характерна за области с дълговременна активна тектоника (наличие на многообразни отслабени структури).

За всяка дефинирана сеизмогенна структура са определени основните ѝ характеристики (геометрия, географско местоположение, сеизмична активност, повтораемост и максимално очакван магнитуд), връзката ѝ с регионалната тектонска мрежа и са отчетени неточностите в използваната комплексна банка данни.

Всяка идентифицирана сеизмогенна структура е заобиколена със зона с дифузна сеизмичност (област с еднакъв сеизмотектонски потенциал). Предполага се равномерно разпределение на сеизмичността с максимален магнитуд до 6 - 6.5 за всяка от тези зони.

Втори етап в моделирането- модел на сеизмичните източници

Регионалният сеизмотектонски модел добре дефинира конфигурацията на сеизмичните източници, но геометрията им, която е от съществено значение при съставяне на хазартни карти, обикновено се нуждае от доуточняване. За по-прецизно дефиниране геометрията на сеизмичните източници са използвани плътностни карти на сеизмичността, реализирана на територията на България (Отчет ГФИ, 2008). Съпоставяне на плътностните карти със сеизмотектонския модел позволява надеждно определяне геометрията и границите на сеизмичните източници.

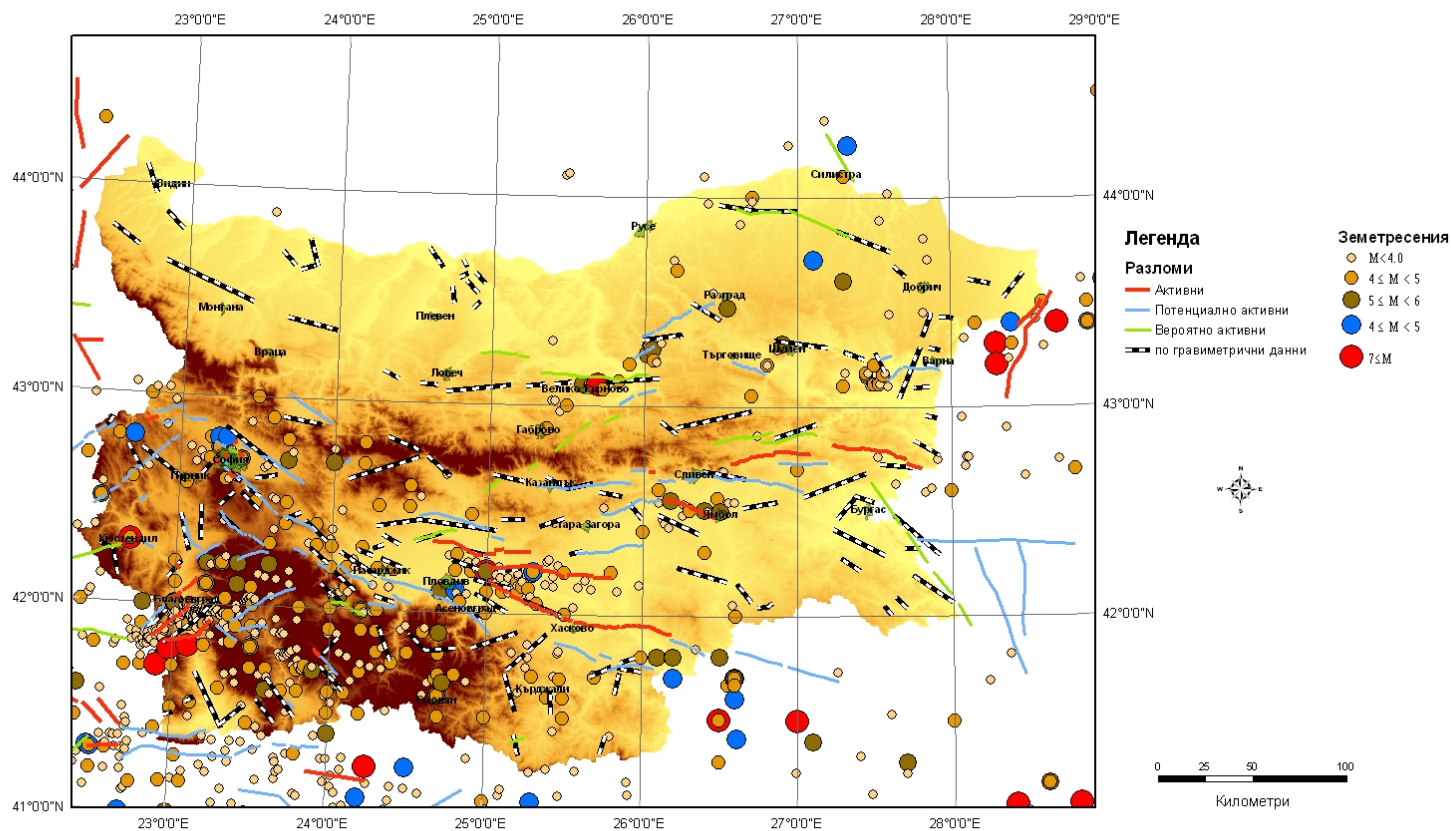
На базата на сеизмотектонския модел и плътностните карти на сеизмичността е компилиран модел на сеизмичните източници за територията на България, състоящ се от площни и смесен тип източници, който се прилага в анализа на сеизмичния хазарт (Отчет ГФИ, 2008). Моделът на сеизмичните източници е представен на Фиг. 2.5.

Съгласно определението в Thenhaus and Campbell (2003) като площен източник се моделира област в която не влизат дефинираните активни разломи и се предполага равномерно разпределение на сеизмичността (която е с характеристики силно различаващи се от тези на заобикалящите я зони) в нея.

Thenhaus and Campbell (2003) въвеждат и понятието смесен тип сеизмични източници, това са площни източници, в границите на които влизат една или повече разломни структури. Тогава площният източник се разделя на два или повече подизточника. Подизточникът, който не включва разломни структури се определя като област с фонова сеизмичност, в която земетресенията с максимален магнитуд до 6.0-6.5 се моделират като равномерно разпределени случайни събития с честота на поява статистически определена от каталога на земетресенията, реализирани само в тази област. Подизточникът, съдържащ разломна структура (или структури) е с максимален (M_{max}) оценен, най-често, по размера на структурата.

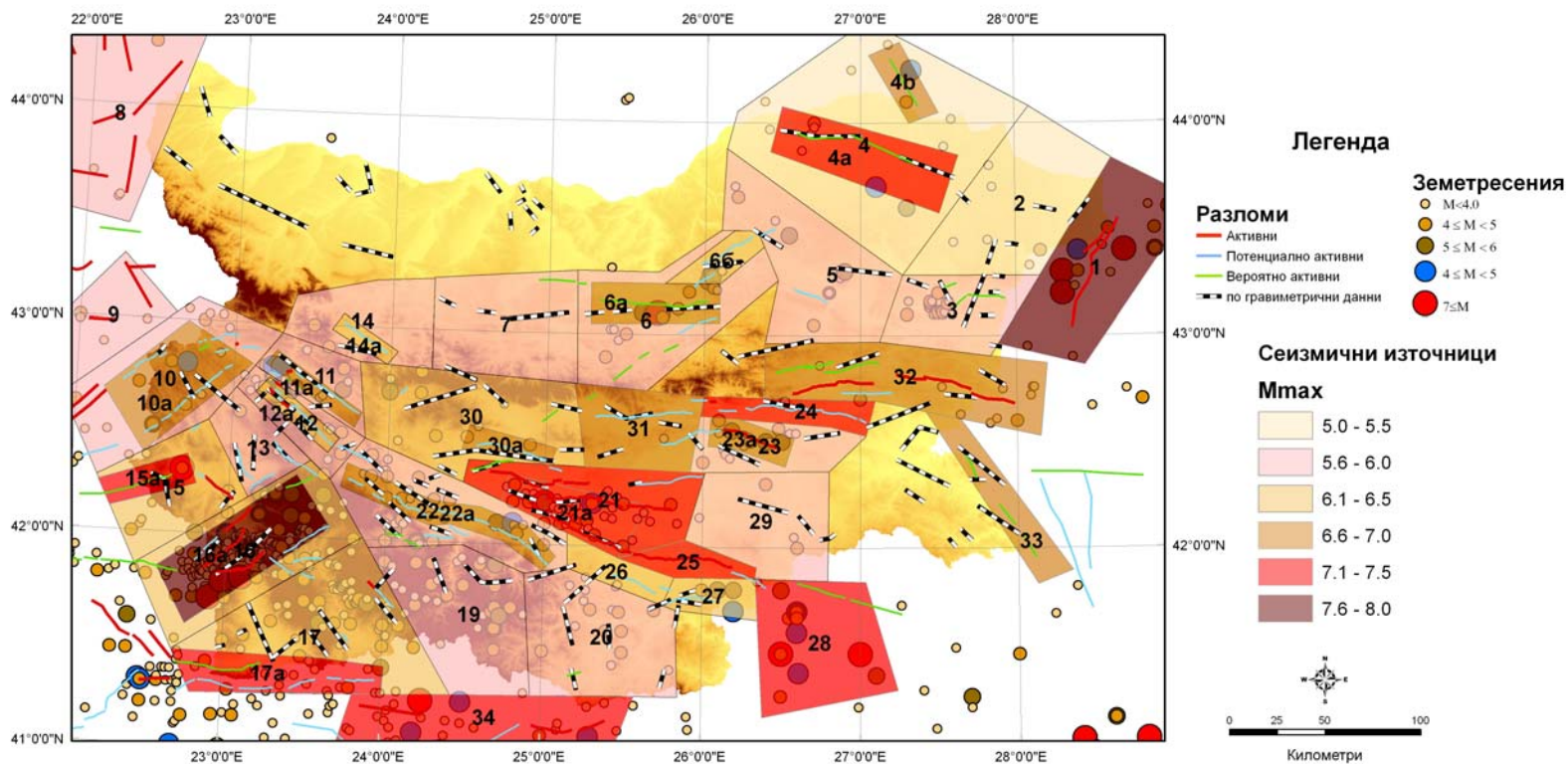
Земетресенията се моделират като равномерно разпределени случайни събития с честота на поява статистически определена от каталога на земетресенията, реализирани само по структурата. Възможно е (в случай, че наличната информация е не достатъчна) параметърът b да е един и същ за подизточниците, а параметърът a (активност) да се оценява по отделно за всеки един от подизточниците.

Комплексна карта (геолого-геофизични и сеизмологични данни)



Фиг.2.4 Комплексна карта-основа на регионалния сеизмотектонски модел

Карта на сеизмичните източници



Фиг.2.5 Модел на сеизмичните източници за територията на България

На базата на сеизмотектонския модел за територията на България и допълнителна информация за сегментите на съвременно активните разломи, които могат да се активират едновременно, в настоящото изследване е съставен алтернативен модел на сеизмичните източници за територията на България. Алтернативният модел (представен на Фиг.2.6) се състои от площни и линейни източници.

Линейните източници (с магнитуд над 6.0-6.5) се представят чрез система от свързани отсечки (краят на предходната е начало на следващата). Земетресенията по линеен източник се моделират като разкъсване с дължина и ширина, зависеща от магнитуда на сеизмичното събитие. За оценка на дължината и ширината на разкъсването за даден магнитуд са използвани релациите, $L=L(M)$ и $W=W(M)$, представени в Wells and Coppersmith (1994). За метрика се разглежда най-близкото разстояние до разкъсването. В алтернативния модел площните източници се моделират както в първия модел.

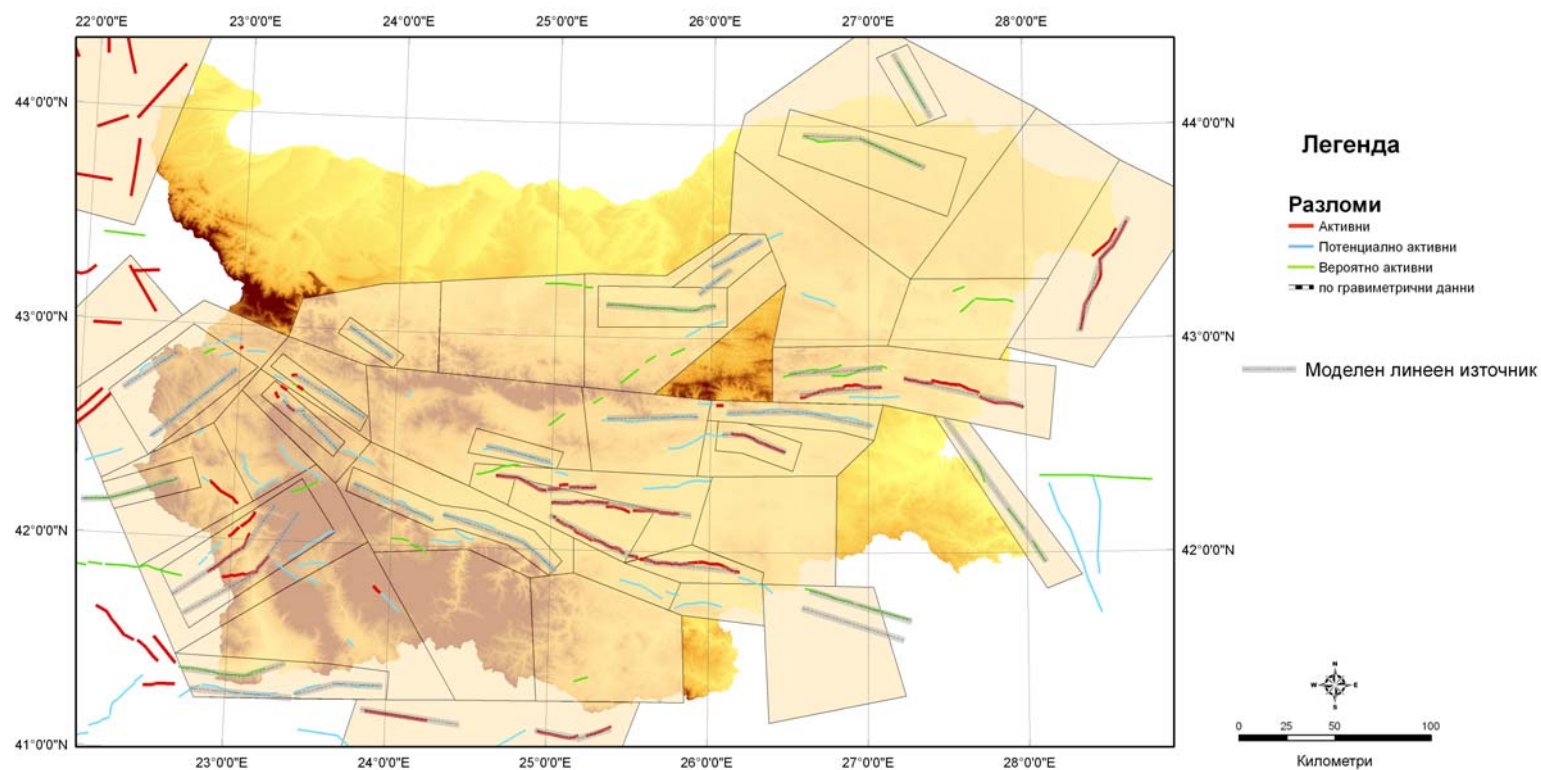
За моделиране на сеизмичността извън територията на България (представено в Глава IV на Отчет ГФИ, 2007)) са приложени следните основни принципи:

- да бъдат включени източниците с наблюдавано значимо сеизмично въздействие върху територията на България, съответно с влияние върху оценката на сеизмичния хазарт;
- очерганите източници да са в добро съответствие с пространственото разпределение на земетресенията;
- дефинираните източници да не са в противоречие със сеизмичното райониране на съответните страни

Конфигурацията на дефинираните източници е определена въз основа на: пространственото разпределение на сеизмичността в разглеждания регион с граници: 39.5-47.5 N; 19.0-30.0 E; сеизмотектонските характеристики на териториите покрити от наложения пространствен прозорец; опитът натрупан в многогодишните сеизмологични наблюдения (повече от 100 години) в България; източниците, извън територията на България, дефинирани в разработките на български специалисти, представени в Boncev et al.(1982); Sokerova et al. (1992); Dachev et al.(1995) и Simeonova et al. (2006); източниците дефинирани на територията на Румъния, представени в работите Radu (1976) и Ardeleanu et al. (2005); източниците дефинирани на територията на Сърбия и Македония, представени в работата на Skoko et al. (1976); източниците дефинирани на територията на Гърция, Papaioannou and Papazachos (2000) (съгласно Tsapanos et al., 2003).

В изследването специално внимание е отделено на зона Вранча, Румъния, където се генерират силни междиннофокусни земетресения, оказващи неблагоприятни въздействия върху голяма част от територията на България и разрушителни последствия в Северна България. За определяне геометрията на сеизмичен източник Вранча междиннофокусни са проследени пространствените вариации на плътностната функция $N(\varphi, \lambda)$ на земетресения, генерирани в източника. Като изходна база са използвани данните от каталога ROMPLUS (2007). Плътностната функция дава нагледна представа, за размерите на зона Вранча и добре дефинира областта, в която се

Карта на сеизмичните източници (алтернативен модел)



Фиг.2.5 Алтернативен модел на сеизмичните източници за територията на България

генерират най-силните земетресения. Моделирането на дълбочината за сеизмичен източник Вранча е съобразено с резултати, представени в редица изследвания върху сеизмичността, генерирана в този източник (напр. Lungu et al., 1997 и Report, 2006) където е доказано, че дълбочината на земетресенията намалява с тяхната сила и са определени връзки между минималната дълбочина и магнитуда на земетресенията.

II.3. МОДЕЛИРАНЕ НА СЕИЗМИЧНАТА АКТИВНОСТ В ИЗТОЧНИЦИ

За всеки сеизмичен източник са определени параметрите, характеризиращи сеизмичната активност в него.

Максимален очакван магнитуд

Максималният магнитуд (M_{max}) на очакваните земетресения е важен параметър в анализа на сеизмичния хазарт (особено за малки вероятности на надвишаване). Всеки сеизмичен източник се свързва с максимално очакван магнитуд, който е оценката на максималния магнитуд за съответната сеизмогенна структура или сеизмотектонска провинция.

Източници на територията на България

За определяне максималния магнитуд (в Отчет ГФИ, 2008, Глава III) на потенциалните земетресения M_{max} , които могат да бъдат генерирани в съответния сеизмичен източник, са приложени два подхода:

- магнитудът на максималното потенциално земетресение е оценен чрез прилагане на емпирични релации, свързващи магнитуда на земетресението и параметрите на разлома (напр. общата дължина или дължината на активните сегменти от разлома, които могат да се активизират едновременно, средната скорост на преместване, т.н. slip rate), по който е реализирано сеизмичното събитие. Използвани са емпиричните релации $M=M(L)$, представени в работата на Wells and Coppersmith (1994), получени въз основа на богата база световни данни;
- Приети са експертните оценки на M_{max} , заложили в съществуващото сеизмично райониране на България (представени в Voncev et al., 1982).

Максималният магнитуд (M_{max}) на очакваните земетресения за всички площни източници е до 6.0-6.5.

За смесен тип сеизмични източници: 1) подизточник, съдържащ разломна структура (или структури) е с максимален (M_{max}) или оценен по размера на структурата или е приложен подходът на “експертно решение” (ако не съществуват точни оценки за размерите на активните разломи); 2) подизточникът, който не включва разломни структури се определя като област с фонова сеизмичност, в която $M_{max} \leq 6.0-6.5$.

За линейните източници е използвана релацията $M=M(L)$, представена в Wells and Coppersmith (1994).

За всички сеизмични източници е избран минимален магнитуд от инженерна значимост $M_{min}=4.4 (M_S)$, който е съобразен с използвания за сеизмично райониране на САЩ $M_W=5.0$ (Petersen et al. 2008).

Сеизмична активност

За всеки сеизмичен източник се определя повторяемостта на земетресенията с различни магнитуди (магнитудно-честотна зависимост). Повторяемостта на земетресенията се представя чрез нивото на сеизмичната активност и относителната честота на събития с различна сила (магнитуд).

Източници на територията на България

За линейните източници повторяемостта на земетресенията се определя от наличните сеизмологични и геоложки данни. За площните източници повторяемостта на земетресенията обикновено се оценява само по сеизмологични данни.

Магнитудно-честотната зависимост се определя въз основа на историческата и съвременната сеизмичност. Съществено е използването на каталог с хомогенна в пространството и времето информация, обхващащ голям магнитуден диапазон и значителен период от време.

Обикновено магнитудно-честотната зависимост се представя чрез отсечено експоненциално разпределение (характеризиращо се със стойността на параметъра b) и скорост на поява за единица време (a -активност). Магнитудно-честотните зависимости се определят, използвайки закона на Гутенберг-Рихтер (график на повторяемост), дефиниран чрез релация от вида: $\text{Log } N(M)dM = a - b M$, или за кумулативната форма $\text{Log } n(M)=a-bM$, където $N(M)$ – брой земетресения в интервала $M \pm dM/2$, $n(M)$ – брой на земетресенията с магнитуд по-голям или равен на M , a и b – параметри на графика. Параметрите a (активност) и b (наклон на графика) са константи, които най-често се оценяват по метода на най-малките квадрати (МНК) или по метода на максималното правдоподобие, Аки (1965).

Необходимо е да се отчита точността на определяне на всеки от параметрите, характеризиращи сеизмичния режим. Влиянието на тези неточности (грешки) върху оценката на сеизмичния хазарт се отчита при анализа на неточностите в сеизмичния вход.

В Глава I на Отчет, ГФИ (2007) България е разделена на 6 сеизмогенни области и са оценени параметрите на магнитудно-честотното им разпределение. Резултатите показват, че наклонът на магнитудно-честотната зависимост (параметър b) за отделните сеизмогенни области са близки (статистически разликите са незначими) до този, получен за цялата територия на България, с изключение на Североизточна България. По тази причина, в настоящото изследване, за оценка на сеизмичния хазарт е приета концепцията, че наклонът на графика на повторяемост е един и същ за цялата страна без СИ България. Проведено е детайлно изследване за оценка на b за територията на страната. Оценена е стойността на b по различни методи и с различен долен магнитуден праг, като е отчетена, различната пълнота на входната информация (каталога на земетресенията), в зависимост от магнитудния праг. Средногодишният брой земетресения с даден магнитуд се получава като броят земетресения за периода на пълнота се разделя на периода на пълнота. По този начин се увеличава броят разглеждани земетресения, разширява се магнитудният интервал на разглежданите

земетресения, а от там се повишава точността на оценките. Разглеждано е отсечено експоненциално разпределение с плътностна функция:

$$f(m) = \beta \frac{e^{-\beta(m-m_0)}}{\left(1 - e^{-\beta(m_1-m_0)}\right)}, \quad (2.1)$$

където $\beta = b \cdot \ln(10)$, m_0 – долен магнитуден праг, m_1 – максимален магнитуд. Тогава вероятността едно земетресение да е с магнитуд по-голям от M (кумулятивна форма на графика на повтораемост) се дава от

$$P(m > M) = \int_M^{m_1} f(m) dm = \frac{e^{-\beta(M-m_0)} - e^{-\beta(m_1-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_1-m_0)}} \quad (2.2)$$

и съответно броят на земетресенията с магнитуд над M се дава от

$$n(m > M) = a \int_M^{m_1} f(m) dm = \frac{e^{-\beta(M-m_0)} - e^{-\beta(m_1-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_1-m_0)}} \quad (2.3)$$

където $a = n(m > m_0)$.

За оценка на b са използвани:

- метод на максимално правдоподобие при различна пълнота на каталога в зависимост от долния магнитуден праг (Weichert, 1980) (означен с P1 (MLH));
- нелинеен метод на най-малките квадрати, приложен към (2.2) (означен с D);
- нелинеен метод на най-малките квадрати, приложен към (2.3) (означен с D1);
- нелинеен метод на най-малките квадрати, приложен към логаритъма на (2.2) (означен с LogD);
- нелинеен метод на най-малките квадрати, приложен към логаритъма на (2.3) (означен с LogD1);
- стандартен метод на най-малките квадрати, приложен към уравнението $\text{Logn}(m > M) = a - bM$ за целия наблюдаван магнитуден интервал (означен с МНК);

На Фиг. 3.7 са дадени получените резултати за оценката на b по различните методи за различен долен магнитуден праг. Оценките са най-стабилни за долния магнитуден праг в интервала 3.5-4.0. Отместването на оценките по всички методи за по-ниските магнитуди се дължи на грешката в магнитудните определения. Проведените изследвания дават основание да се приеме стойността 0.75 за параметъра b .

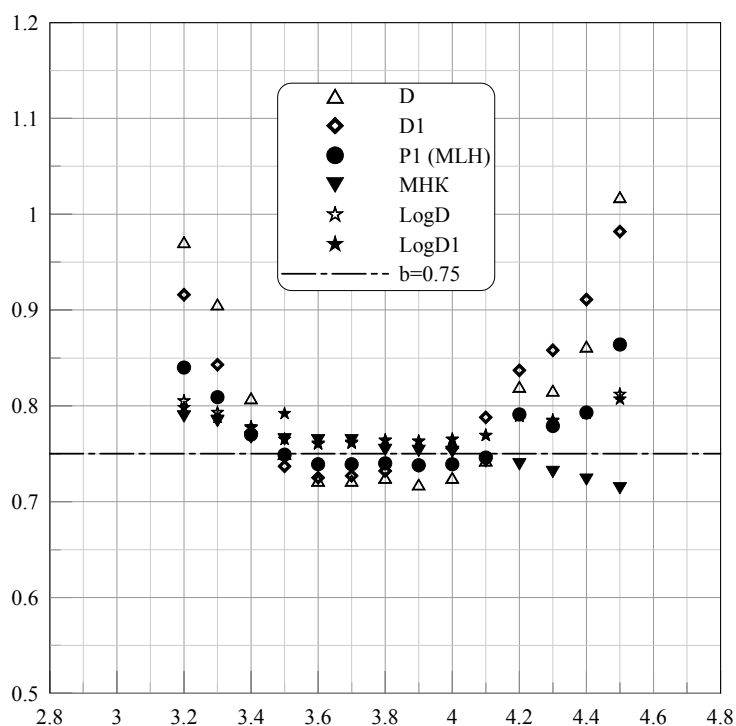
За оценка на вариациите на параметъра a е използвана формулата, която отчита ограниченията – минимален и максимален магнитуд:

$$N(\geq M) = 10^{(a-bM)} \left(1 - 10^{(-b(M_{\max}-M))} / (1 - 10^{(-b(M_{\max}-M_{\min}))})\right) \quad (2.4)$$

където M_{\min} е минималният разглеждан магнитуд, M_{\max} – максималният магнитуд за съответния източник. Предполага се че каталогът е пълен за магнитуди над M_{\min} (документирани са всички събития с магнитуд над минималния). За определените стойности на b по формула (2.4) се изчисляват различни стойности за a при M_{\min} от 3.5, 4.0

и 4.5. Получените оценки на основните параметри на сеизмичните източници са представени в Табл.2.1

За оценка точността на определяне на b е използван метода Монте Карло. Генерирани бяха 10000 каталога (долен магнитуден праг $m_0=3.0$, $m_1=8$), отговарящи на условията за пълнота на българския каталог с $b=0.75$. Магнитудът на всяко земетресение беше “зашумен” с нормално разпределена грешка със средно 0 и стандартно отклонение 0.3 за последните 100 години и 0.5 за останалия период. За всеки генериран каталог бе оценен параметърът b с долен магнитуден праг 3.5 по споменатите методи. Стандартното отклонение на оценките се движи между 0.05 за P1 (MLH) до 0.06 за МНК.



Фиг.2.7 Оценки на наклона на графика на повторяемост, b

Сеизмични източници извън територията на България

M_{max} и параметри на сеизмичната активност

Оценката на параметрите за дефинираните външни сеизмични източници, със значимо въздействие върху територията на страната, е описано в Глава IV на Отчет ГФИ (2007) параметри са представени в Табл. 4.1 в същия отчет. Параметри на сеизмичните източници са оценени на основата на каталога след 1900 г. с магнитуд $M \geq 4.0$ (Отчет ГФИ, 2007).

Максимално очакваните магнитуди са взети от публикации на български специалисти и специалисти от съответните страни (напр. Greece earthquake, 2001; Boncevic et al., 1982; Sokerova et al, 1992; Dachev et al., 1995).