



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО ГЕОФИЗИКА, ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОГРАФИЯ

гл. ас. Ирена Аспарухова Александрова

„МОДЕЛИРАНЕ НА МАКРОСЕИЗМИЧНОТО ПОЛЕ
ЗА ТЕРИТОРИЯТА НА БЪЛГАРИЯ“

Научна специалност

01.04.06 СЕИЗМОЛОГИЯ И ВЪТРЕШЕН СТРОЕЖ НА ЗЕМЯТА

АВТОРЕФЕРАТ

На дисертация за получаване на образователна и научна степен

„Доктор“

Научни консултанти:

чл. кор. дфн Димчо Солаков и

доц. д-р Стела Симеонова

СОФИЯ

2014

Данни за дисертационния труд:

Брой страници	110
Брой фигури	42
Брой таблици	7

Защитата на дисертацията ще се състои на 20.03.2015 г.
от 10^h 30^{min}. в заседателната зала на НИГГГ – БАН.

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

СЪДЪРЖАНИЕ

Стр.

ВЪВЕДЕНИЕ	4
Цел и задачи на дисертационния труд	5
Структура на дисертацията.	5
I. МАКРОСЕИЗМИЧНА ИНТЕНЗИВНОСТ, ПОЛЕ И СКАЛИ	6
МАКРОСЕИЗМИЧНА ИНТЕНЗИВНОСТ	6
МАКРОСЕИЗМИЧНО ПОЛЕ	6
МАКРОСЕИЗМИЧНА И СКАЛИ	7
II. МОДЕЛИРАНЕ НА СЕИЗМИЧНИТЕ ВЪЗДЕЙСТВИЯ ОТ ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ, РЕАЛИЗИРАНИ В/ИЗВЪН БЪЛГАРИЯ	13
ОБЩИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА СЕИЗМИЧНОСТТА, ГЕНЕРИРА НА ТЕРИТОРИЯТА НА БЪЛГАРИЯ	13
МОДЕЛИРАНЕ НА ВЪЗДЕЙСТВИЯТА ОТ ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ, РЕАЛИЗИРАНИ НА ТЕРИТОРИЯТА НА БЪЛГАРИЯ	15
МОДЕЛИРАНЕ НА ВЪЗДЕЙСТВИЯТА ОТ ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ, РЕАЛИЗИРАНИ ИЗВЪН ТЕРИТОРИЯТА НА БЪЛГАРИЯ	19
III. ЗЕМЕТРЪСНИ СЦЕНАРИИ, БАЗИРАНИ НА МАКРОСЕИЗМИЧНА ИНФОРМАЦИЯ	22
ЗЕМЕТРЪСЕН СЦЕНАРИЙ ЗА ГРАД РУСЕ	22
ЗЕМЕТРЪСЕН СЦЕНАРИЙ ЗА ГРАД ПЛОВДИВ	23
ЗЕМЕТРЪСЕН СЦЕНАРИЙ ЗА ГРАД СОФИЯ	25
ВЕРИФИКАЦИЯ НА ПРОГНОЗНИ СЦЕНАРИИ С ИЗПОЛЗУВАНЕ НА МАКРОСЕИЗМИЧНА ИНФОРМАЦИЯ	28
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	34
ПРИНОСИ	37
АВТОРСКИ ПУБЛИКАЦИИ, ВКЛЮЧЕНИ В ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	38
УЧАСТИЯ В НАУЧНИ ФОРУМИ	39
УЧАСТИЯ В ПРОЕКТИ	39
БИБЛИОГРАФИЯ	39

Въведение

Основна задача на съвременната приложната сеизмология е на базата на теоретичните резултати и сеизмичните наблюдения да се оценят сеизмичните въздействия за дадена територия и прогнозираят последствията от тях.

Изучаването на влиянието и ефектите от въздействието на земетръсните вълни върху земната повърхност започва от древността. Въздействията и ефектите от земетресения, които са осезаеми за хората и влияят на сградите, съоръженията и околната среда (наречени макросеизмични ефекти) се градира по степени на интензивност I и съставят така нареченото макросеизмично поле. Макросеизмичната интензивност е интегрална не инструментална мярка за силата на земетръсните въздействия върху земната повърхност (хора, сгради, съоръжения и околна среда). Първите опити за обективна систематизация на наблюдаваните земетръсни ефекти са от 16^{ти} век, а към края на 19^{ти} век са създадени над 30 скали за класификация на земетръсните въздействия, които са в основата на съвременните макросеизмични скали за определяне на степените на въздействие.

За балансирано решаване на социално-икономическите проблеми, свързани със земетресенията, най-важният от които е антисеизмичното строителство, е необходима обективна оценка на очакваните въздействия. Известни са редица трагични примери в следствие на подценяване необходимостта от съответно сеизмично осигуряване. От друга страна преосигуряването води до значителни икономически разходи. Първата стъпка в подготовката за ефективно посрещане и намаляване на сеизмичния риск е определянето на сеизмичната опасност (хазарт) на регионално и локално ниво.

Противоземетръсната защита в градските райони, характеризиращи се със значителен ръст на населението и строителството, наличие на важни административни, търговски, индустриални и жилищни сгради, обширни и взаимно свързани инфраструктурни мрежи и разнообразни ежедневни дейности, налага провеждане на надеждна стратегия за намаляване на рисковете. Един от подходите е чрез оценка на сеизмичния риск, основаваща се на земетръсни сценарии, включващи оценка за физическото и икономическото въздействие на различни по сила земетресения върху всички елементи на социално-икономическата система (сгради, население, икономика, подземна и надземна инфраструктура, вероятност от вторични ефекти и др.). На базата на такива оценки е необходимо да се предприемат адекватни мерки за намаляването на риска до разумни граници.

Настоящото изследване е в обсега на приложната сеизмология и основните му задачи са в съответствие със сеизмологичната обстановка в България и настоящия етап от развитието на науката. При решаване на задачите е потърсен подход за обединяване на богатата макросеизмична информация, покриваща вековен времеви

период (началото на българската сеизмология е от 1891 г.), със съвременните методи за оценка на сеизмичната опасност.

Цел и задачи на дисертационния труд

- История и съвременност в развитието на макросеизмичните скали. Представяне и сравнение на понастоящем прилаганите (основно в Европа) макросеизмични скали ;
- Сбор, преоценка и систематизация на наличната макросеизмична информация за ефектите от земетресения върху територията на България;
- Формиране на база от макросеизмични данни в ГИС среда;
- Моделиране на макросеизмичното поле;
- Генериране на земетръсни сценарии на базата на макросеизмична информация в ГИС среда;
- Прилагане на макросеизмични наблюдения за верификация на прогностични (теоретични) сеизмични сценарии.

Структура на дисертацията

Работата се състои от въведение, 3 глави, заключение, приноси, литература, фондови материали, използвани съкращения, публикации, включени в дисертационния труд, участия в международни форуми, участие в проекти, обединени в 110 страници. В приложение са представени, съставените 20 макросеизми карти.

Във въведението е направен кратък анализ на актуалността на съвременната приложна сеизмология, и целта на настоящото изследване, а именно - намаляване на последиците от земетресенията в икономически и социален аспект.

В **първа глава** са разгледани подробно широко прилаганите в Европа макросеизмични скали – MSK-64 и EMS-98 и разликите между тях, представена е и най-новата макросеизмична скала ESI 2007, изцяло базираща на сеизмични ефекти върху околната среда.

Във **втора глава** е представена, създадената макросеизмична база данни (в ГИС среда), изведени са релации, описващи затихването на сеизмичните въздействия от земетресения, реализирани на територията на България и генерирани в огнище Вранча, Румъния. Построени са 20 макросеизмични карти на земетресения от 19^{ти}, 20^{ти} и 21^{ви} век, чрез прилагане на програма My Maps Pro, приложени към дисертацията.

В **трета глава** на базата на детайлна макросеизмична информация за ефектите от минали силни земетресения върху градовете Русе и Пловдив са създадени земетръсни сценарии в макросеизмична интензивност. Генерирани са прогнозни земетръсни сценарии в макросеизмична интензивност за три от най-големите ни градове – Русе, Пловдив и София. Сценариите са верифицирани, използвайки реални наблюдения.

I. МАКРОСЕИЗМИЧНА ИНТЕНЗИВНОСТ, ПОЛЕ И СКАЛИ

МАКРОСЕИЗМИЧНА ИНТЕНЗИВНОСТ

Макросеизмичната интензивност (степен) е интегрален не инструментален показател за силата на земетръсните въздействия върху земната повърхност (хора, сгради, съоръжения и околна среда). Определя се в съответствие с описанията (дефинициите) за различните степени на въздействие според използваната макросеизмична скала.

Интензивността на макросеизмичното въздействие зависи основно от силата (магнитуда M) и дълбочината (h) на сеизмичния източник, както и от епицентралното разстояние (Δ) – разстоянието между източника и уязвената територия.

МАКРОСЕИЗМИЧНО ПОЛЕ

За описване на макросеизмичното поле се използват главно два модела – модел на Кьовешлигети (Kovesligethy, 1907) и модел на Блейк (Blake, 1941), като обикновено се прилагат по-новите трактовки и модификации на Шебалин (представени в Shebalin et al., 1974, Христосков, 2007)

В модела на Кьовешлигети (Kovesligethy, 1907) се приема, че изменението на амплитудите $A(r)$ на сеизмичните вълни с разстоянието $r=(\Delta^2+h^2)^{1/2}$ (хипоцентрално разстояние) се представя чрез равенството:

$$A(r) = A_0 \frac{e^{-\alpha r}}{r^n}, \quad (1.1)$$

където A_0 е началната амплитуда за $r=0$, а α и n са съответно коефициентите на затихване и разширение на вълновия фронт.

За две разстояния r_1 и r_2 (където $r_1 < r_2$) се определя амплитудната разлика:

$$\delta \log A = \log A(r_1) - \log A(r_2) = -\alpha (r_1 - r_2) - n \log \frac{r_1}{r_2} > 0 > 0. \quad (1.2)$$

Прилага се експериментално получената зависимост (Медведев, 1962, 1968):

$$m^{(l_1-l_2)} = \frac{A(r_1)}{A(r_2)}, \quad (1.3)$$

която означава, че на нарастването на макросеизмичната интензивност от I_2 на I_1 ($\delta I = I_1 - I_2 > 0$, например за $\delta I = 1$), съответства определено число пъти увеличение на $A(r_1)$ спрямо $A(r_2)$.

В модела на Блейк се приема, че изменението на амплитудите $A(r)$ на сеизмичните вълни с разстоянието $r=(\Delta^2+h^2)^{1/2}$ се представя чрез равенството:

$$A(r) = \frac{A_0}{r^{n^*}}, \quad (1.4)$$

където n^* е показател на ефективно затихване, обединяващ ефектите от затихването на вълните и разширението на вълновия фронт. Тогава за две разстояния r_1 и r_2 ($r_1 < r_2$) се получава:

$$\delta \log A = \log A(r_1) - \log A(r_2) = -n^* \log > 0, \quad (1.5)$$

и след заместване се получава равенството:

$$\delta I = \frac{1}{\log m} \delta \log A = -\frac{n^*}{\log m} \log \frac{r_1}{r_2} = -s \log \frac{r_1}{r_2}, \quad (1.6)$$

Въвежда се връзката между магнитуда M и интензивността I на разстояние $r = (\Delta^2 + h^2)^{1/2}$ от епицентъра:

$$I = bM - s \log \sqrt{\Delta^2 + h^2} + c, \quad (1.7)$$

където: $s = n^*/\log m$ е коефициент, отразяващ ефективното затихване с отдалечаване от източника, c - емпирична константа, I - степен на въздействие на епицентрално разстояние Δ , h - хипоцентрална дълбочина.

За $\Delta = 0$ следва оценката за епицентралната интензивност I_0 :

$$I_0 = bM - s \log h + c, \quad (1.8)$$

чрез която, по данни за M , I и h от плитки земетресения в различни сеизмични зони по света, за коефициентите b , s и c са получени следните средни стойности $b=1,5$, $s=3.5$ и $c=3.0$.

След изваждане на (1.7) от (1.8) се получава известната макросеизмична формула на Блейк:

$$I_0 - I = s \log \frac{\sqrt{\Delta^2 + h^2}}{h}, \quad (1.9)$$

която най-често се използва в практиката за описване на елементите на макросеизмичното поле. За интензивности $I_K = I_0 - K + 1$ и $I_{K+1} = I_0 - K$ ($K=2, \dots, I_0-2$) на разстояния Δ_K и Δ_{K+1} следва съотношението:

$$I_K - I_{K+1} = s \log \sqrt{\frac{\Delta_{K+1}^2 + h^2}{\Delta_K^2 + h^2}}, \quad (1.10)$$

За $\Delta > 3h$ от се получава и приближението:

$$I = bM - s \log \Delta + c. \quad (1.11)$$

Емпирични коефициенти се определят надеждно от наличната макросеизмична информация за съответната сеизмична територия.

МАКРОСЕИЗМИЧНИ СКАЛИ

Първите опити за обективна систематизация на наблюдаваните земетръсни ефекти са от 16 век, а към края на 19 век са създадени над 30 скали за класификация на земетръсните въздействия, които са в основата на съвременните макросеизмични скали за определяне на степените на въздействие на сеизмичните вълни върху земната повърхност (Христосков, 2007).

Скалите прилагани в България са: RF (Роси-Форел)- в периода 1892-1912 г., FM (Форел-Меркали) - между 1913 и 1945 г. и MCS от 1946 до 1964 г. От 1965 г. за

оценка на макросеизмичната интензивност се прилага MSK-64, широко прилагана и в страните от Източна Европа, и в някои страни от Западна Европа и останалия свят.

Rossi- Forel 1873	Mercalli Cancani Sieberg 1917	JMA 1950	Geofian USSR 1952 (Medvedev)	Mercalli Modified 1956 (Richter)	M.S.K. 1964 Medvedev Sponheuer Karnik
I	I	O	I	I	I
II	II	I	II	II	II
III	III	II	III	III	III
IV	IV	III	IV	IV	IV
V	V	IV	V	V	V
VI	VI	V	VI	VI	VI
VII	VII	VI	VII	VII	VII
VIII	VIII	VII	VIII	VIII	VIII
IX	IX	VIII	IX	IX	IX
X	X	IX	X	X	X
	XI	X	XI	XI	XI
	XII	XI	XII	XII	XII

Фиг.1. Сравнение на най-често прилаганите макросеизмичните скали

Най-общо, степените на скалите MSK-64, ИФЗ-52 и ММ не се различават съществено, както се вижда от фигурата. Те се различават по степента на сложност във въведените формулировки и детайлността на описателната им част. Основното различие между MSK-64 и ММ е в прилагането на качествен и количествен подход при оразмеряване на щетите в MSK-64 скалата.

МАКРОСЕИЗМИЧНА СКАЛА НА МЕДВЕДЕВ, ШПОНХОЙЕР, КАРНИК - MSK-64
(Тук представеното описание на MSK-64 е съгласно Христосков, 2007)

Класификации приети в скалата

Типове сгради и съоръжения (изградени без проведени антисеизмични мероприятия), обобщени в **Тип А**, **Тип Б** и **Тип С**, подредени в низходящ ред, в зависимост от типовете конструкции.

Количествени характеристики-единични (отделни случаи)- около 5%; много - около 50%; повечето - около 75%

Класификация на повредите – систематизирани в 5 категории: (1к)-*леки повреди*; (2к)-*средни повреди*; (3к)-*тежки повреди*; (4к)-*разрушения*; (5к)-*срутване*

Групиране на въздействуваните обекти (признаци, по които се оценява интензивността на земетръсните въздействия): (а) Хората и заобикалящата ги среда; (б) Сгради и съоръжения; (в) Околна среда и явления.

В скалата MSK-64 на всяка интензивност от 5^{ма} до 10^{та} степен са приписани числени характеристики като интервали от ускорение, скорост и преместване (Табл.1).

Табл. 1. Числени характеристики на земните движения за различните интензивностни степени (съгласно Medvedev et al., 1965)

I	ускорение в cm/s^2 за периоди 0.1-0.5 s	скорост в cm/s за периоди 0.5-2.0 s	преместване в mm на ц.т. на махало ⁽¹⁾
V	12-25	1.0-2.0	0.5-1.0
VI	25-50	2.1-4.9	1.1-2.0
VII	50-100	4.1-8.0	2.1-4.0
VIII	100-200	8.1-16.0	4.1-8.0
IX	200-400	16.1-32	8.1-16.0
X	400-800	32.1-64	16.1-32.0

⁽¹⁾ собствен период 0.25 s и логаритмичен декремент на затихване 0.5 (8% критично затихване)

Тези характеристики дават възможност от степените на въздействие да се преминава към числени параметри, необходими за целите на противоземетръсното строителство.

Едни от основните критики към MSK-64 са: в скалата не са отчетени сеизмично осигурените сгради; скалата не удовлетворява изискванията и е трудна за използване от инженерните кадри; не е подходяща за оценяване на исторически земетресения; количествените оценки са дискретни.

Европейска макросеизмична скала EMS-98

Най-общо EMS-98 = MSK-64. Едно предимство на скалата EMS-98 е, че тя позволява по-точно определяне на интензивността и не се допускат неопределености, като например 4-5^{та} MSK или 6-7^{ма} MSK (Grüntal, 1998).

Типове сгради и съоръжения

Терминът “уязвимост” се използва в скалата за характеризиране различията в реакцията на типовете сгради при сеизмично въздействие (натоварване). Понятието “уязвимост” дава възможност да се диференцират типовете сгради и силата на въздействията, причиняващи разрушението им.

В EMS-98 (Grüntal, 1998) различните типове сгради са групирани в шест класа на уязвимост означени с буквите от А до F, подредени в низходящ ред по уязвимостта им.

Връзка между класовете на уязвимост и типовете сгради– за всеки тип конструкция е даден най-вероятният клас на уязвимост и най-вероятен интервал на отместване. В допълнение е посочен и интервал на отместване с малка вероятност за да бъдат отчетени възможните изключения.

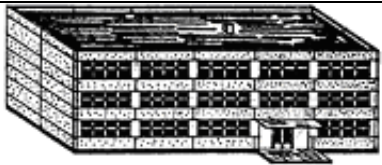
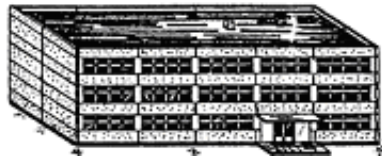
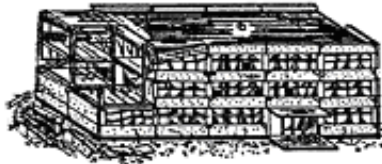
На всеки клас е приписана релация, свързваща интензивността с възможните повреди при съответното сеизмично въздействие (криви на уязвимост).

Класификация на повредите

Основна концепция – начина, по който реагират сградите при сеизмично въздействие зависи от типа на сградата. Изхождайки от тази концепция всички типове сгради са обединени в две групи- сгради със зидария и стоманобетонни сгради.

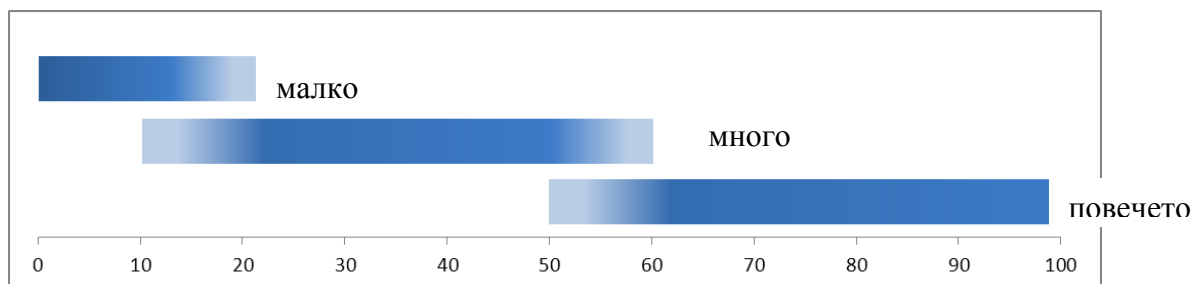
Дефинирани са 5 категории повреди общи за двете групи. Сградите от двете групи реагират и се разрушават по различен начин при сеизмично натоварване (Фиг.2), което е представено в описателната част на EMS-98. (съгласно Grüntal, 1998).

Фиг.2. Класификация на повредите в сгради със зидария и в стоманобетонни сгради

Класификация на повредите в сгради със зидария		Класификация на повредите в стоманобетонни сгради
	Категория 1. Незначителни до леки повреди (няма конструктивни повреди, леки не конструктивни повреди)	
	Категория 2. Умерени повреди (леки конструктивни, умерени не конструктивни повреди)	
	Категория 3. Значителни до тежки повреди (умерени конструктивни, тежки не конструктивни повреди)	
	Категория 4. Много тежки повреди (тежки конструктивни, много тежки не конструктивни повреди)	
	Категория 5. Разрушение (много тежки конструктивни повреди)	

Количествени характеристики

В EMS-98 количествените характеристики са въведени като тесни, застъпващи се процентни интервали (представени на Фиг.3). Този подход е избран за да се запази компактността и лесната практическа приложимост на скалата и същевременно да не се допусне нееднозначност в интерпретацията на наблюденията.



Фиг.3 Количествени характеристики (съгласно Grüntal, 1998)

На практика ако определеното количество попадне в застъпващите се части се приема количествената характеристика, която е в най-добро съответствие с другата налична макросейсмична информация.

Разлики между MSK-64 и EMS-98:

6^{та} ст. Леки увреждания.

Съгласно EMS-98: Повреди от 1-ва категория претърпяват много сгради от клас на уязвимост А и В; някои от клас А и В претърпяват повреди от 2-ра категория; малко от клас С претърпяват повреди от 1-ва категория.

Съгласно MSK-64: Много сгради тип А с повреди от 1к, а отделни сгради с повреди от 2к; единични сгради от тип Б с повреди от 1к.

7^{ма} ст. Повреди

Съгласно EMS-98: Много сгради от клас на уязвимост А претърпяват щети от 3-та категория, малко от 4-та. Много сгради от клас на уязвимост В претърпяват щети от 2-ра категория, малко от 3-та. Някои сгради от клас на уязвимост С претърпяват щети от 2-ра категория. Някои сгради с клас на уязвимост D претърпяват щети от 1-ва категория.

Съгласно MSK-64: Много сгради от тип А с повреди от 3к, единични с повреди от 4к; много сгради от тип Б с повреди от 2к; много сгради от тип В с повреди от 1к.

Основно предимство на скалата EMS-98 е, че при нея е запазена вътрешната съгласуваност и степените на грацията на интензивността в дванадесет степенните скали, използвани до създаването ѝ. Това осигурява съвместимостта на новата скала със съществуващите.

В скалата са отчетени сеизмично осигурените сгради, тя до значителна степен удовлетворява изискванията на инженерните кадри и е улеснено приложението ѝ от широк кръг специалисти.

Основен недостатък скалата EMS-98 е, че диагностичните признаци за земетръсните въздействия върху околната среда са изключени от описателната част на скала и са разгледани самостоятелно в отделна допълнителна част.

Макросеизмична скала ESI 2007

Новата интензивностна скала ESI 2007 (Environmental Seismic Intensity scale – ESI-07) се базира изцяло на ефектите в околната среда, породени при реализация на земетресение. Скалата се базира на концепцията (Michetti et al., 2011), че само ефектите в околната среда позволяват коректно сравнение на земетръсните въздействия от палео и архео, исторически и съвременни земетресения.

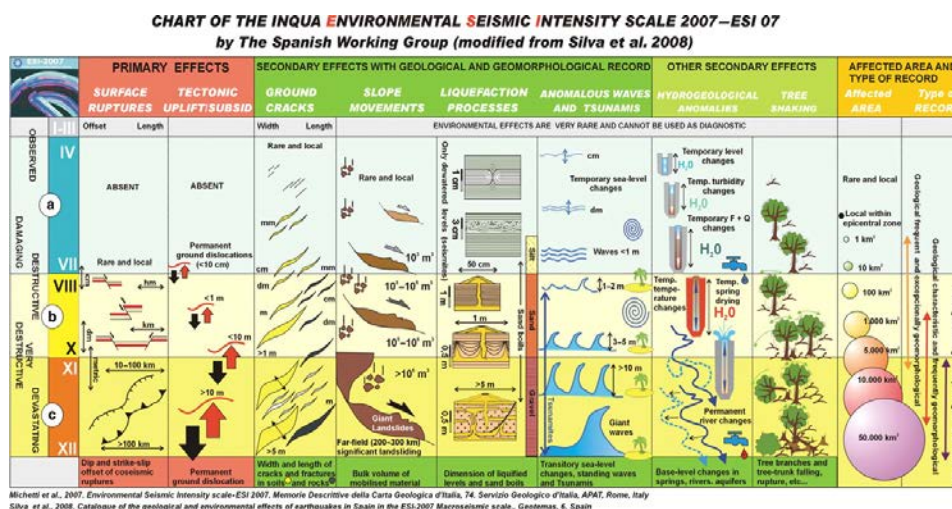
Скалата може да се прилага самостоятелно или успоредно с конвенционалните скали, когато $I \geq X$ степен, при която оценките на повредите и разрушенията са затруднени, а ефектите върху околната среда са с висока степен на индикативност. Прилага се също и в слабо населени райони, където ефектите върху създаденото от човека са много малко или липсват. Косеизмичните ефекти, които се приемат за диагностични са разделени на два типа-първични и вторични (Michetti et al., 2011).

Първични ефекти

Първичните ефекти (повърхностно разкъсване и тектонско издигане/подпъхване) се свързват с енергията освободена при реализацията на земетресенията и се приемат за повърхностна изява на сеизмичния източник.

Вторични ефекти

Това са явления индуцирани от реализацията на земетресенията, разделят се на 8 категории и се характеризират с обща площ



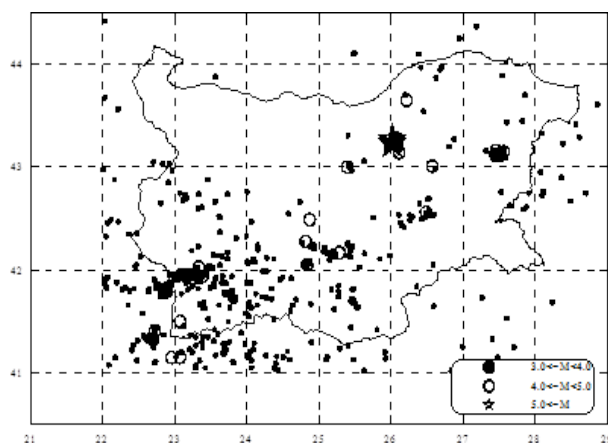
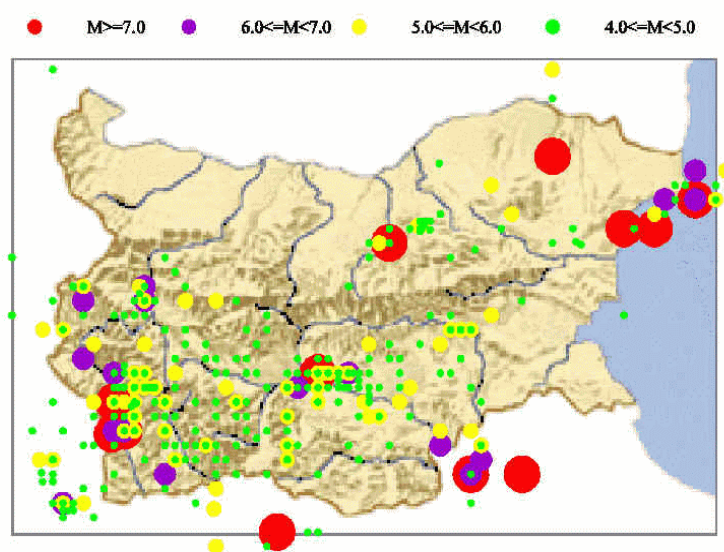
Фиг.4 Макросеизмичната скала ESI-07

II. МОДЕЛИРАНЕ НА СЕИЗМИЧНИТЕ ВЪЗДЕЙСТВИЯ ОТ ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ, РЕАЛИЗИРАНИ В/ИЗВЪН БЪЛГАРИЯ

ОБЩИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА СЕИЗМИЧНОСТТА, ГЕНЕРИРАНА НА ТЕРИТОРИЯТА НА БЪЛГАРИЯ

Сеизмичността, реализирана на територията на България, може да се привързва към основните сеизмични зони, които са 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: Кресна, София, Марица, Горна Оряховица и Шабла.

Фиг.5 Сеизмичност на България (историческа и инструментална) с $M_S \geq 4.0$



Фиг. 6 Сеизмичност на България, генерирана след 1980 г. с $M_S \geq 3.0$

Сеизмична зона Кресна

Високата сеизмична активност в зона Кресна се свързва със Струмската разломна система. Две от най-силните земетресения, станали в Европа през 20^{ти} век, са

генерирани в сеизмична зона Кресна - земетресенията от 4 април 1904 г. ($M_W=M_S=7.1$ и $M_W=M_S=7.8$). Второто земетресение е усетено в Будапеща.

Сеизмична зона София

Наличните исторически документи свидетелстват за разрушителни земетресения в зоната през 15^{ти}-18^{ти} век (Вацов 1902). Първото добре документирано силно земетресение е реализирано през 1818 г в близост до град София. Най-силното земетресение ($M_W=6.1$), станало около град София е през 1858 г. Най-силното земетресение, реализирано в околностите на гр. София, през 20^{ти} век е събитието от 1917 г. с магнитуд $M_S=5.3$ ($I_0=7-8$ MSK) (Фиг.7). Почти век по-късно (след земетресението през 1917 г.) на 22 май 2012 г. земетресение ($M_S=5.4$), с епицентър отстоящ на 25 km в ЮЗ посока от центъра на София, между градовете Перник и Радомир, разлюля Софийска зона.



Фиг.7 Последствия от земетресението през 1917 г.

Сеизмична зона Марица

Най-силните земетресения станали в зоната са събитията от 1928 г. (Чирпанското земетресение от 14 април 1928 г. с $M_W=M_S=6.8$ и Пловдивското от 18 април 1928 г. с $M_W=M_S=7.0$). Събитията предизвикват значителни разрушения в градовете Пловдив, Чирпан и Първомай, илюстрирани на Фиг.8.

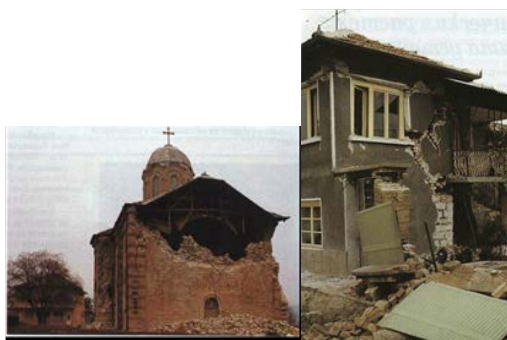


Фиг.8 Последствия от земетресенията през 1928 г.

Сеизмична зона Горна Оряховица

Най-силното известно земетресение в зоната е събитието от 1913 г., реализирано в близост до град Горна Оряховица с $M_W=M_S=7.0$ и $I_0=9-10$ MSK.

Земетресението е последвано от сеизмично затишие, което продължава до 1986 г., когато стават двете умерено силни земетресения ($M_W=5.7$ на 21 февруари и $M_W=5.9$ на 7 декември) в близост до гр. Стражица. Земетресенията предизвикват разрушения в град Стражица и околните села (Фиг.9).



Фиг.9 Последствия от земетресенията през 1986 г.

Сеизмична зона Шабла

Най-силните земетресения се превързват към Калиакренския разлом, който е идентифициран по данни от сондажи и сеизмичното профилиране в Черно море. Земетресенията в зоната са корови и се реализират на дълбочини $h=10-20$ km. На 31 март 1901 г. в района на Шабла е реализирано земетресение с $M_W=7.2$ и епицентър в морето на юг от нос Калиакра. Максималната макросеизмична интензивност е $I_{max}=10$ MSK. В Калиакра, Камен бряг, Тюленово, Българево и други селища е усетено с интензивност $I=10$ MSK, а в Балчик, Каварна и Шабла с $I=9$ MSK.

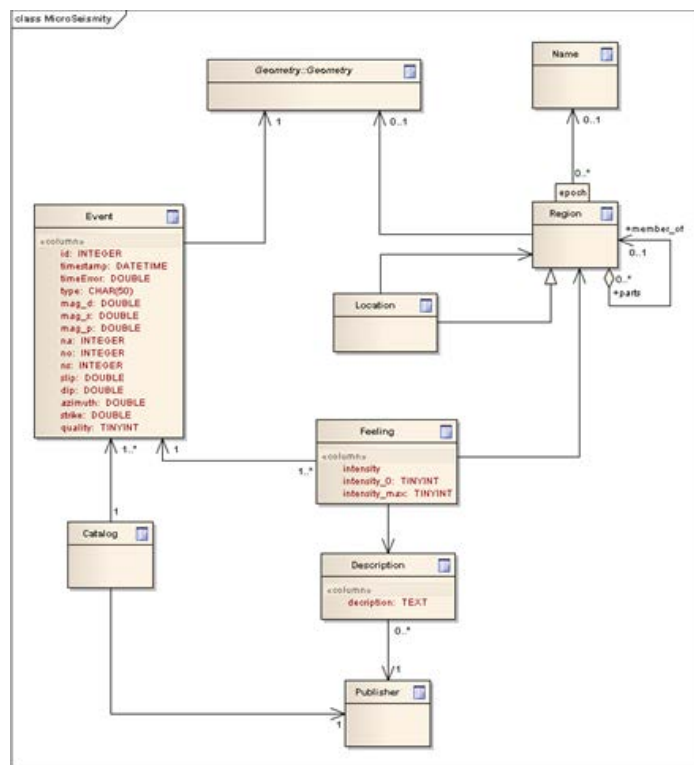
МОДЕЛИРАНЕ НА ВЪЗДЕЙСТВИЯТА ОТ ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ, РЕАЛИЗИРАНИ НА ТЕРИТОРИЯТА НА БЪЛГАРИЯ

ОЦЕНКА НА НАБЛЮДАВАНИ МАКРОСЕИЗМИЧНИ ВЪЗДЕЙСТВИЯ ОТ ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ, ГЕНЕРИРАНИ НА ТЕРИТОРИЯТА НА БЪЛГАРИЯ

Създадена е макросеизмична база данни в ГИС среда. Началото и е поставено в рамките на трансграничен проект DACEA.

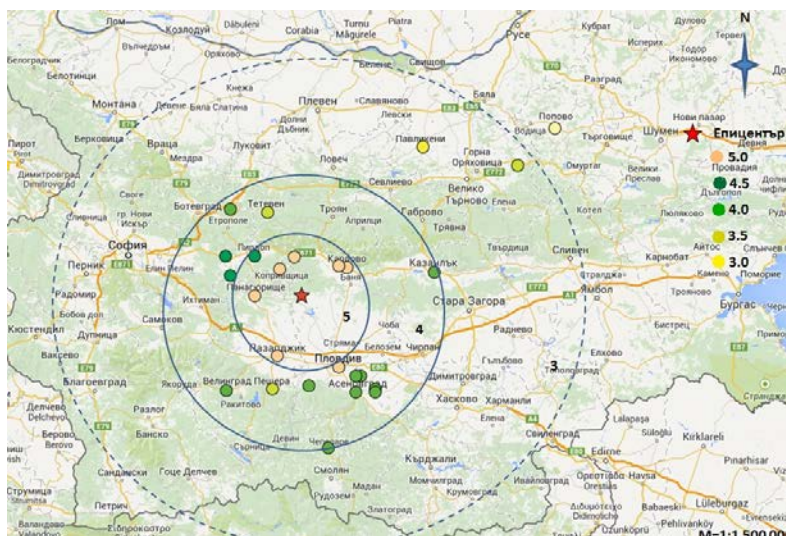
Идеята, заложена в структурата на базата данни е от една страна за всяко документирано земетресение да се получи информация за уязвената от него територия и от друга страна за всяко селище да се намерят данни за наблюдаваните сеизмични въздействия. Концептуалният модел на създадената база данни е представен на Фиг.10. Богатата наличната макросеизмична информация за земетресенията, усетени на територията на България през 19^{ти} и първата половина на 20^{ти} век, представена в работите на Вацов, 1901-1923; Иванов, 1931; Киров, 1931, 1941, 1945; Илиев., 1952; Киров, Григорова, 1957; Киров, Палиева, 1959; Киров, Палиева, 1961, е цифрована и

включена в база данни. В нея са включени и всички селища (с географски координати) от територията на България със съвременните и старите им имена (ако имат такива). Допълнително е преоценена, анализирана и включена в базата данни наличната макросеизмична информация за събитията, реализирани от 1962 г. до настоящият момент (2014 г.). Макросеизмичните данни са оценени по скалата на MSK -64.



Фиг.10 Концептуален модел на Банка макросеизмични данни

Построени са 20 макросеизмични карти, чрез използване на програма “My Maps Pro”, за събития от 19^{ти}, 20^{ти} и 21^{ви} век, реализирани в различни сеизмични зони на територията на страната.



Фиг. 11 Най-старото земетресение от 20.04.1898, M=5.0

Картираните земетресения отговарят на следните условия: $M \geq 4.0$ на главното събитие, с изключение на някои от вторичните турсове на земетресението от 22 май 2012 г.; наличие на допълнителни източници на данни за усещане на съответното събитие (изключена е противоречива информация). При построяването на макросейсмичните карти бяха включени данни от извън политическите граници на страната. Картите са събрани в отделно приложение към дисертацията.

Моделиране на макросейсмичното поле за земетресения, реализирани на територията на България

Въз основа на създадената база данни са оценени релации, описващи затихването на сеизмичните въздействия като функция на епицентралното разстояние, дълбочината и силата на източника, т.е. $I = I(M, h, \Delta)$. Общият вид на тези релации се дава с уравнението:

$$I = bM - s \lg(\Delta^2 + h^2)^{1/2} + c, \quad (1.12)$$

където: s е коефициент, отразяващ ефективното затихване с отдалечаване от източника, b и c - емпирична константа, I - степен на въздействие на епицентрално разстояние Δ , h - хипоцентрална дълбочина, M - магнитуд на земетресението.

В настоящото изследване за оценка на коефициентите b , s и c са използвани наблюденията от 5 земетресения (3 от сеизмична зона Горна Оряховица и 2 от сеизмична зона София), за които има достатъчно брой данни за прилагане на регресионния анализ. Силата на земетресенията е оценена чрез магнитуд по повърхностни вълни - M_s . Събитията са представени в Таблица 2 в хронологичен ред. Регресионните коефициенти b , s и c са оценени по метода на най-малките квадрати. Релациите са изведени за магнитуд по повърхностни вълни – M_s .

Таблица 2. Входна информация

Година	Магнитуд M_s	Брой наблюдения
14.06.1913	7.0	452
18.10.1917	5.1	67
21.02.1986	5.5	120
07.12.1986	5.7	182
22.05.2012	5.4	125
Общ брой наблюдения		946

За оценяване на коефициенти b , s и c са разгледани следните няколко извадки от наличните наблюдения:

- Всички входни данни (от земетресенията в двете сеизмични зони, с интензивност до 3.0 MSK), определени с точност до 0.5 от интензивностната единица, т.е. $\Delta I = 0.5$ MSK. Извадката е условно означена All, 0.5;

- Всички входни данни (от земетресенията в двете сеизмични зони, с интензивност до 3.0 MSK), определени с точност до една интензивностна единица, т.е. $\Delta I = 1.0$ MSK. Извадката е условно означена All, 1.0;
- Данни (с интензивност до 3.0 MSK) от земетресенията, генерирани в сеизмична зона Горна Орявица, определени с точност до 0.5 от интензивностната единица, т.е. $\Delta I = 0.5$ MSK – означена ГО, 0.5;
- Данни от земетресенията (с интензивност до 3.0 MSK), генерирани в сеизмична зона Горна Орявица, определени с точност до една интензивностна единица, т.е. $\Delta I = 1.0$ MSK – означена ГО, 1.0.

След което са включени само наблюденията с интензивност по-висока или равна на 5.0, т.е. $I \geq 5.0$:

- Всички (от двете сеизмични зони) данни с $I \geq 5.0$ MSK, определени с точност до 0.5 от интензивностната единица, т.е. $\Delta I = 0.5$ MSK – All₅, 0.5;
- Всички (от двете сеизмични зони) данни с $I \geq 5.0$ MSK, определени с точност до една интензивностна единица, т.е. $\Delta I = 1.0$ MSK – All₅, 1.0;
- Данни от земетресенията, генерирани в сеизмична зона Горна Орявица с $I \geq 5.0$ MSK, определени с точност до 0.5 от интензивностната единица, т.е. $\Delta I = 0.5$ MSK – ГО₅, 0.5;
- Данни от земетресенията, генерирани в сеизмична зона Горна Орявица с $I \geq 5.0$ MSK, определени с точност до една интензивностна единица, т.е. $\Delta I = 1.0$ MSK – ГО₅, 1.0.

За сеизмична зона София не са оценени отделни релации, защото двете събития покриват магнитуден интервал от 0.3 от магнитудната единица (Таблица 2.1).

Получените регресионни коефициенти и съответните стандартни девиации - σ , за разгледаните извадки са представени в Таблица 3. От таблицата се вижда, че по-ниска стойност на стандартната девиация (около 0.5) имат релациите, получени въз основа на въздействия с интензивност по-висока или равна на 5.0, т.е. $I \geq 5.0$ MSK. В тези релации ефективното затихване е по-ниско (около 2.3 -2.4).

Таблица 3 Оценки на коефициентите

Извадка	b	s	c	σ
All, 0.5	0.857	-3.275	6.08	0.72
All, 1.0	0.870	-3.15	5.612	0.71
ГО, 0.5	0.843	-3.412	6.287	0.71
ГО, 1.0	0.812	-3.53	6.86	0.73
All ₅ , 0.5	0.845	-2.378	4.927	0.49
All ₅ , 1.0	0.847	-2.312	4.621	0.52
ГО ₅ , 0.5	0.758	-2.303	5.410	0.50
ГО ₅ , 1.0	0.775	-2.262	5.043	0.52

С най-малка стандартна девиация (от 0.49) са All₅, 0.5, извадката включваща всички наблюдения (от 5-те земетресения) с интензивност $I \geq 5.0$ MSK, като оценките на интензивността са с точност до 0.5 от интензивностната единица.

Със стандартна девиация от 0.5 е извадка $GO_5, 0.5$, в която са използвани данни от земетресенията, генерирани в сеизмична зона Горна Оряховица с $I \geq 5.0$ MSK. Оценките на интензивността са определени с точност до 0.5 от интензивностната единица.

Получените релации могат да се прилагат за моделиране затихването на сеизмичните въздействия с интензивност не по-малка от 5.0 MSK от земетресения, генерирани съответно в сеизмични зони София и Горна Оряховица.

МОДЕЛИРАНЕ ВЪЗДЕЙСТВИЯТА ОТ ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ, РЕАЛИЗИРАНИ ИЗВЪН ТЕРИТОРИЯТА НА БЪЛГАРИЯ

Най-силните и добре документирани въздействия върху територията на България от външни източници са последиците от междиннофокусни земетресенията, генерирани в огнище Вранча, Румъния. В тази зона, известна като зона Вранча, се генерират силни междиннофокусни земетресения с дълбочини от 90 до 200-220 km. (Dachev et al., 1995). Най-силните документирани земетресения са събитията от 1802 г., 1940 г. (за две събития $I_0=9$ MSK) и 1977 г. ($I_0=8$ MSK). В каталога, създаден през последните години от румънски сеизмолози (ROMPLUS, 2007), магнитудните оценки на тези събития по сеизмичен момент (M_W): са съответно, 7.9, 7.7 и 7.4.

Територията на страната е силно засегната от земетресението, реализирано на 04.03.1977 г. с $M_S=7.2$, $M_W=7.7$. $I_0=8$ MSK и $h=90-110$ km. Силно засегнати са градовете Свищов, Никопол, Русе и др. (виж Фиг.12).



Фиг.12 Последствия от земетресенията през 1977 г

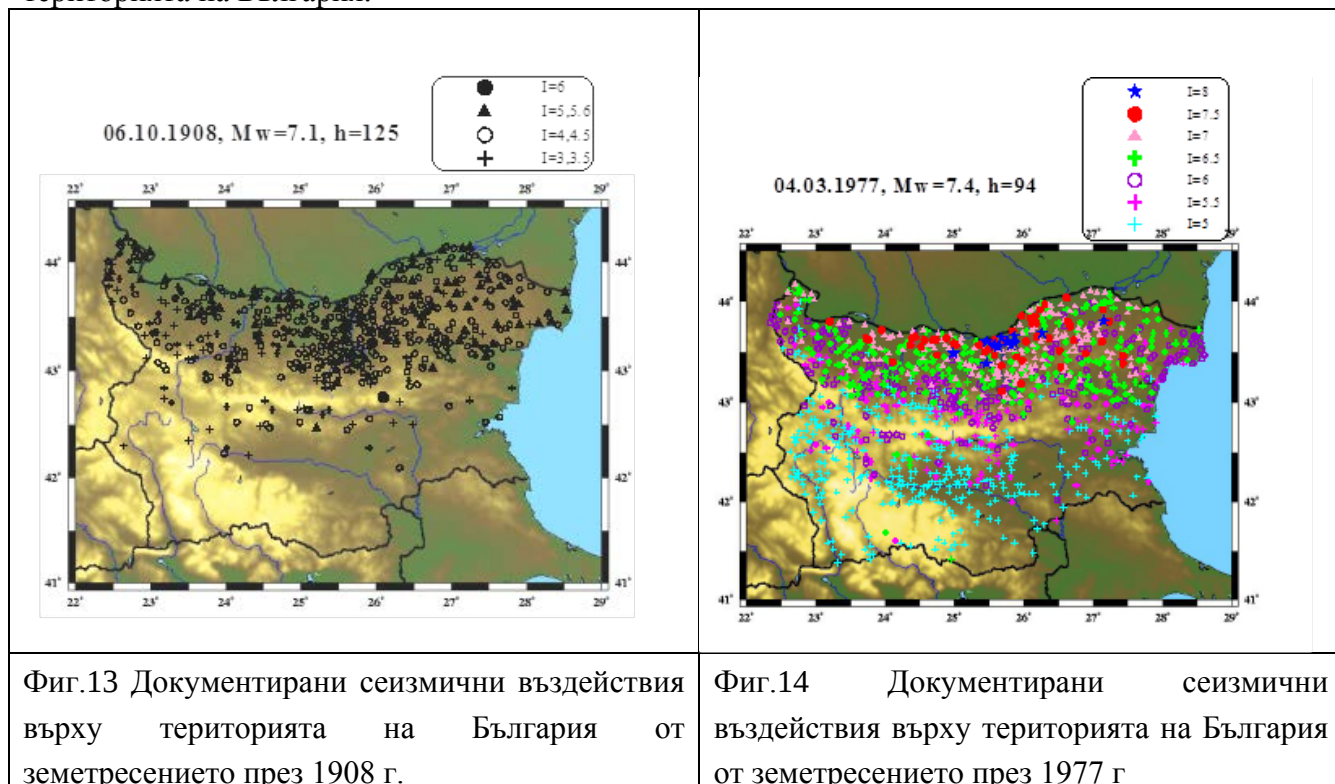
Оценка на наблюдавани макросеизмични въздействия върху територията на България от земетресения, генерирани в огнище Вранча

За междиннофокусните земетресения, генерирани в огнище Вранча, е направена ревизия и преоценка на наличната макросеизмична информация за 20 събития, станали в периода 1983-1960 г. Преразгледаните събития са с магнитуди (M_W) в интервала $[5.0-7.7]$ т.е $5.0 \leq M_W \leq 7.7$. Магнитудните оценки са съгласно най-новия румънски каталог (ROMPLUS, 2007). Приложената в изследването методология се състои в събиране, ревизиране, анализ и оценка на макросеизмичните данни с цел включване на тази информация в макросеизмични карта за територията на България, които могат да се

използвана при верификацията на оценките на сеизмичния hazard. За целите на изследването е прегледана и анализирана наличната, макросеизмична информация, представена в: поредицата “Земетресенията в България” от С. Вацов (Вацов, 1902, 1903...1923;); работите на Киров (1931, 1941, 1945); Илиев (1952); Киров, Григорова (1957) и Киров, Палиева (1959, 1961) за усетените земетресения на територията на България от 19^{ти} век до 60-те години на 20^{ти} век.

Допълнително е преразгледана, цифрована и визуализирана (на основата на физическата карта) макросеизмичната информация от последните три силни земетресения, реализирани в зона Вранча през втората половина на 20^{ти} век (1977 г., 1986 г. и 1990 г.).

На фигури от Фиг.13 и Фиг.14 са представени наблюдавани въздействия (на територията на България), за две земетресения с най-голям брой наблюдения на територията на България.



Моделиране на макросеизмичното поле за земетресения, реализирани в огнище Вранча

За описване затихването на сеизмичните въздействия от огнище Вранча към релация от вида $I = I(M, h, \Delta)$ е приложена азимутална корекция Az_{corr} , зависеща от азимута в градуси на наблюдението спрямо епицентъра (Az). Корекциите са в сила за азимути в интервала 100°-260°.

Избрана релация е:

$$I = a + bM + s \log(R+100) + Az_{corr}(Az), \quad (1.13)$$

където a , b , и s са коефициенти, M е магнитуд по сеизмичен момент (M_w), D е епицентрално разстояние (в km), R е хипоцентрално разстояние (в km). За оценка на коефициентите a , b , s Az_{corr} и са използвани наблюденията от 4 силни междиннофокусни земетресения от огнище Вранча (от 1940, 1977, 1986 и 1990 г.), представени в Таблица 4 и илюстрирани на Фиг. 14. Използвана е съвместна база макросеизмични данни за румънската и българската територия.

Регресионни коефициенти, получени по метода на най-малките квадрати са:

$$a=6.636 \quad b=1.861 \quad s=-5.4157 \quad \sigma=0.59$$

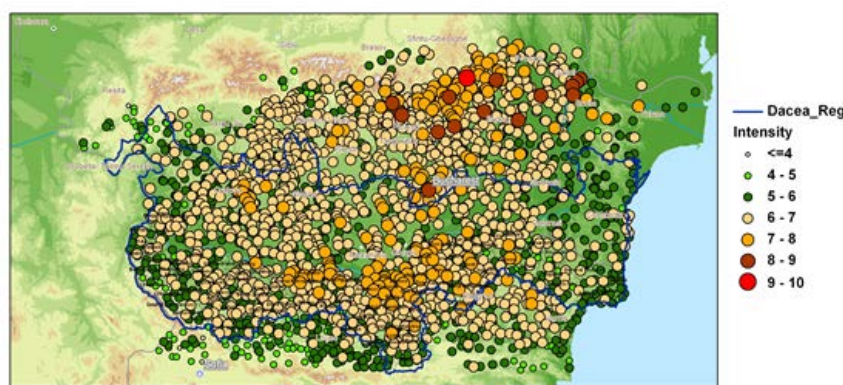
Прилагайки азимутална корекция стандартната девиация σ намалява с около 7%.

Азимуталната корелация Az_{corr} се дава от релацията (полином от 3-та степен):

$$Az_{\text{corr}} = 9.557 - 0.182Az + 0.0010644Az^2 - 1.952 \cdot 10^{-6}Az^3 \quad 1.14)$$

Табл. 4 Входна информация

Година	Магнитуд (M_w)	Брой наблюдения в азимутален обхват 100°-260°
1940	7.7	160
1977	7.4	1607
1986	7.1	680
1990	6.9	439
общ брой наблюдения		2886



Фиг. 15 Наблюдавани макросеизмични ефекти (в MSK интензивност) използвани в изследването

Сравнението на наблюденията с очакваните, оценени по релации 1.15 показват следното: азимутална зависимост се наблюдава и за 4-те земетресения; по-високо затихване за по-дълбоките земетресения; очакваните въздействия са по-ниски от наблюдаваните за земетресението от 1990г. с $M_w=6.9$; очакваните въздействия са по-високи от наблюдаваните за земетресението от 1986 г. с $M_w=7.1$; очакваните въздействия са в добро съответствие с наблюдаваните за двете по-силни (от 1977г. с $M_w=7.1$ и 1940г. с $M_w=7.7$) от четирите разглеждани земетресения.

III. ЗЕМЕТРЪСНИ СЦЕНАРИИ, БАЗИРАНИ НА МАКРОСЕИЗМИЧНА ИНФОРМАЦИЯ

ЗЕМЕТРЪСЕН СЦЕНАРИЙ ЗА ГРАД РУСЕ

Наблюдавани сеизмични въздействия в град Русе от междиннофокусни земетресения

Настоящото изследване се основава на богат документален материал, събран от Главно Управление на архивите при МС, Териториална дирекция “Държавен Архив”, Русе и Регионална библиотека “Л.Каравелов”, град Русе.



Фиг.16 Ефекти от земетресението на 10.11.1940 в 03^h 40^{min} (LT) $I_0=9$ MSK, $M_S=7.3$ и $M_W=7.7$

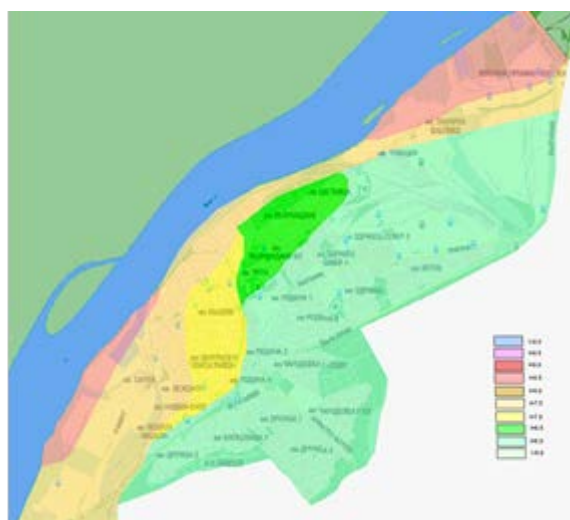


Фиг.17 Ефекти от земетресението на 04.03.1977 в 21^h 24^{min} (LT) $I_0= 8$ MSK, $M_S=7.2$ и $M_W=7.4$

Фигурите показват идентично разпределение на интензивностната функция по територията на града и при двете земетресения. Най-високите стойности са по крайбрежните райони.

Сеизмичен сценарий за град Русе (в макросеизмична интензивност)

За създаване на земетръсен сценарий са използвани оценките на въздействията от двете междиннофокусни земетресения (генерирани в огнище Вранча), описани по-горе. Установена е добра корелация на ефектите от двете земетресения със заливните тераси на р. Дунав и р. Русенски Лом. Карта на тези заливни тераси е използвана като основа за микрорайонирането на града. Сеизмичният сценарий за град Русе (представен на Фиг.18) е генериран чрез съпоставяне на наблюдаваното разпределение на интензивностната функция по територията на града с конфигурацията на речните тераси.



Фиг.18 Сеизмичен сценарий за град Русе (в интензивност MSK), базиран на наблюдавани въздействия от междиннофокусни земетресения ($I_0 = 8-9^{\text{та}}$ MSK, $M_S = 7.2-7.3$), генериран в огнище Вранча, Румъния

ЗЕМЕТРЪСЕН СЦЕНАРИЙ ЗА ГРАД ПЛОВДИВ

Наблюдавани сеизмични въздействия в гр. Пловдив от земетресенията през 1928 г. Изследването се базира на наблюденията и документираните щети, представени в отчета “ДИПОЗЕ”(1931), и в архивни материали от Държавния архив и Градската библиотека на град Пловдив.

В рамките на града макросеизмичната интензивност варира от $7^{\text{ма}}$ до $10^{\text{та}}$ степен по MSK. На Фиг.19 са показани някои от щетите в град Пловдив.



Фиг.19 Щети, причинени от земетресението на 18.04.1928 г. ($M_S=7.0$), в град Пловдив

В рамките на града макросеизмичната интензивност варира от $7^{\text{ма}}$ до $10^{\text{та}}$ степен по MSK. Като цяло центърът на града и къщите около тепетата са претърпели незначителни повреди, но всички останали квартали са разрушени до различна степен.

Очевидно е, че наблюдаваните разрушения могат да се разглеждат като комбиниран ефект от силата на сеизмичните въздействия, инженерногеоложките условия и типа и качеството на строителството.

Оцененото разпределение на макросеизмичните въздействия (в интензивност) по протежението на града, генерирани основно от земетресението през 1928 г. с $M_S=7.0$ и $I_0=10^{\text{та}}$ MSK, е представено на Фиг. 20.

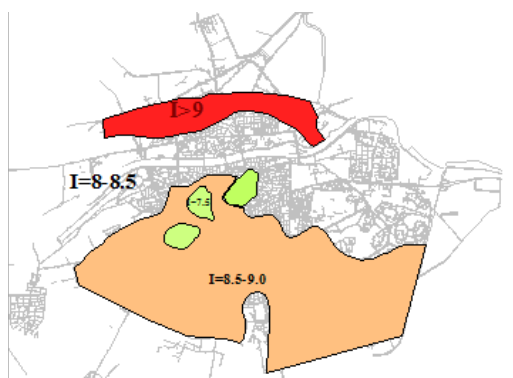


Фиг. 20. Наблюдавани макросеизмични ефекти, причинени от земетресението през 1928 г. ($M_S=7.0$, $I_0=10^{\text{та}}$ MSK) в гр. Пловдив.

Сеизмичен сценарий за град Пловдив (в макросеизмична интензивност)

За създаване на земетръсен сценарий са използвани оценките на въздействията от земетресението на 18.04.1928 г. ($M_S=7.0$, $I_0 = 10^{\text{та}}$ MSK), генерирано на 20 km ИЮИ от града, описани в предния абзац.

Генерираният сеизмичен сценарий (в MSK интензивност) е представен на Фиг.21. За дефиниране на областите с различна интензивност са включени инженерно-геоложките условия в района на града, чрез използване на схематична инженерно-геоложка карта.



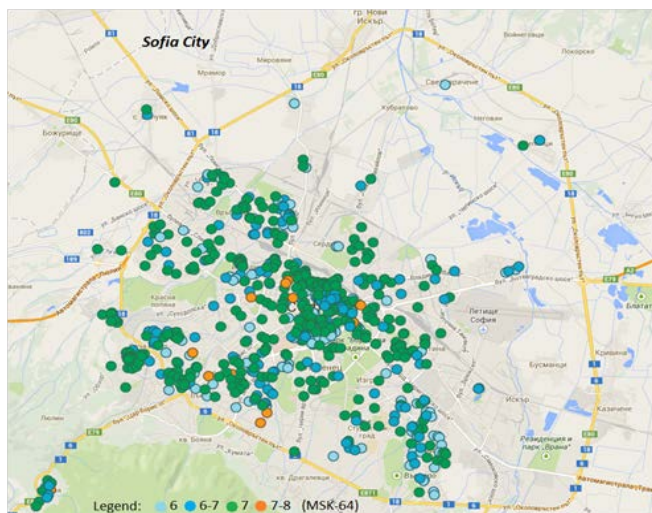
Фиг.21 Сеизмичен сценарий за град Пловдив (в интензивност по MSK), базиран на наблюдавани въздействия от земетресението през 1928 г. ($I_0= 10^{\text{та}}$ MSK, $M_S=7.0$), генерирано на 20 km от града

ЗЕМЕТРЪСЕН СЦЕНАРИЙ ЗА ГРАД СОФИЯ

Наблюдавани сеизмични въздействия в град София от земетресението, реализирано на 22 май 2012г.

Почти век след земетресението през 1917 г., на 22 май 2012 г. земетресение с $M_w=5.6$ разлюля Софийска зона, с епицентър отстоящ на 25 km в ЮЗ посока от центъра на София, между градовете Перник и Радомир. В град София и околностите са наблюдавани умерени до тежки щети.

Разпределението на макросеизмичните ефекти, генерирани от земетресението, по протежение на град София, е оценено на базата на документи и надеждна информация от отдел „Архиви“ при Столична Община. Трябва да се отбележи, че на сградите е преписана интензивността, при която дадената степен на увреждане е с най-голяма вероятност да се случи. Интензивностната карта, илюстрираща разпределението на макросеизмичните интензивности в MSK-64 на територията на града е представена на Фиг.22.



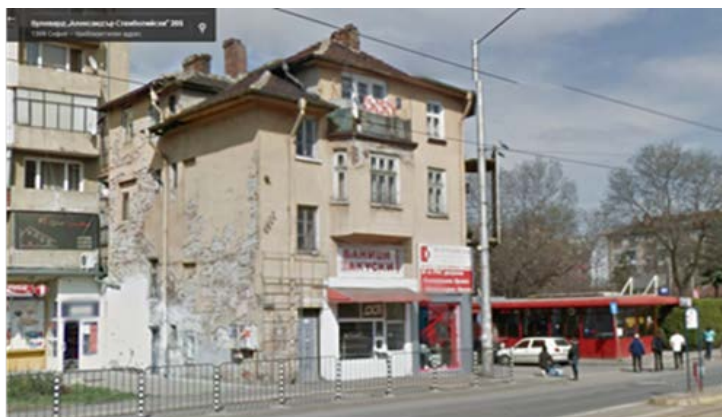
Фиг. 22 Наблюдавани макросеизмични ефекти (в MSK-64) за град София, причинени от земетресението, реализирано през 2012 г. ($M_w=5.6$)

От фигурата е видно, че интензивностните стойности варират между 6^{та} и над 7^{ма} степен по MSK-64. Най-високите стойности на интензивността (над 7^{ма} степен) са свързани със старите не поддържани сгради (маркирани с оранжеви точки) (Фиг.22). Дванадесет са документираните случаи на повреди от 7- 8^{ма} степен на територията на град София. Някои от най-уязвените сгради са показани на Фиг.23 и Фиг.24. Една част от тези сгради са необитаеми с неизвестни собственици и саморазрушаващи се. Друга са общинска собственост и се използват за жилища на социално слаби семейства. Всички те са сгради, които не са били реновирани. Трети вид сгради с такива увреждания са обявени за паметници на културата, но и тук поради липса на яснота в собствеността им, също са необитаеми и силно увредени от атмосферните условия.

Преобладаващите въздействия са оценени на 7^{ма} степен (MSK-64), като сградите с тези увреждания са съсредоточени в централната градска част. Това са къщи и кооперации, построени в началото на 20^{ти} век (такава къща е илюстрирана на Фиг. 24).



Фиг. 23 . Сгради с щети от 7-8^{ма} степен



Фиг. 24 Един пример за увреждане от 7^{ма} степен

Повечето от тези сгради не са поддържани - без да е извършван основен ремонт.. Наличието на щети от 7^{ма} степен в жилищни сгради - панел, ЕПК, сгради, монолитно строителство, в зона с по-ниска прогнозна интензивност, се дължат вследствие на реконструкции върху носещи стени и колони. Основните изводи могат да бъдат:

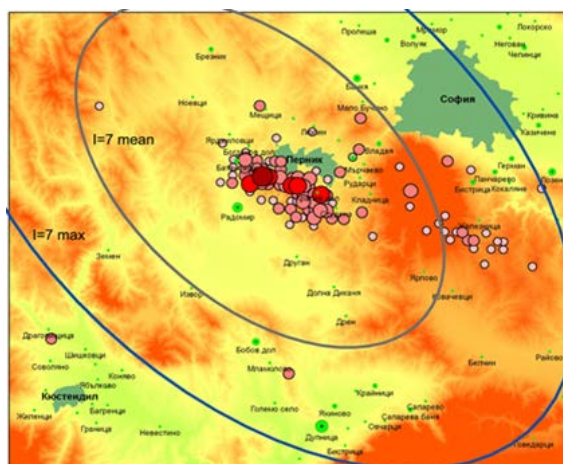
- въз основа на около 780 точки са определени стойностите на сеизмичните въздействия, при които са възникнали увреждания в сградите на София;
- всред най-уязвимите типове сгради са тези, построени в началото на 20^{ти} век и не са поддържани;
- други по-сериозно повредени сгради са тези, в които има конструктивно променени носещи стени и колони. Такива сгради са разпръснати из целия град.

Сеизмичен сценарий за град София (в макросеизмична интензивност)

За генериране на прогнозен („моделен“) земетръсен сценарий в макросеизмична интензивност за град София, е приложен детерминистичен подход. Сценарият се базира на допускане за реализиране на „референтно“ увреждащо земетресение с магнитуд

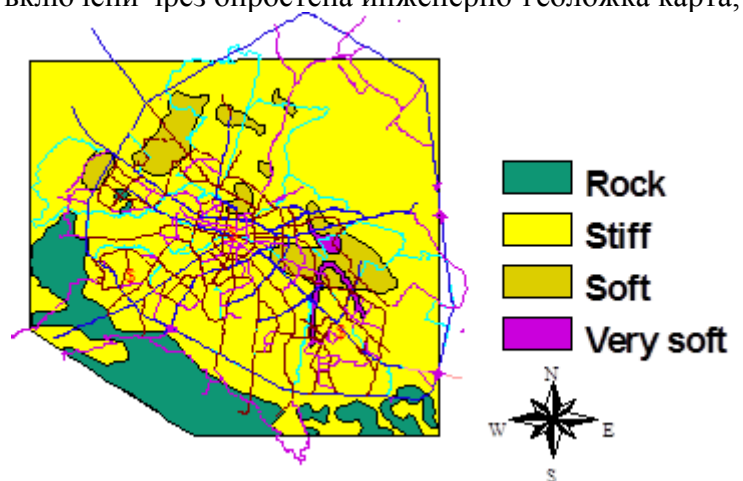
$M_s=5.4$ с по-голяма вероятност за възникване, което би могло да засегне територията на града с интензивност по-малка или равна на 8^{ма} степен по MSK-64, каквото е земетресението от 22 май 2012 г. Приема се, че източникът е разлом с направление ЗСЗ-ИЮИ, отстоящ на разстояние 25 km от центъра на града.

Земетръсният сценарий е оценен чрез прилагане на генерализиран макросеизмичен модел за земетресения на територията на България, представен в Glavcheva et al. (1982, 1983). Моделът предполага елиптично затихване на интензивността с разстоянието.



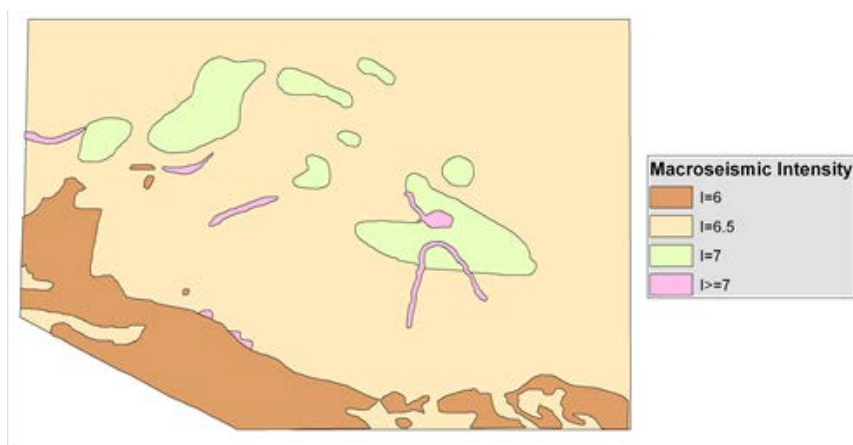
Фиг. 25 Полученото интензивностно поле

При генериране на сценария, почвените условия за територията на град София са включени чрез опростена инженерно-геоложка карта, представена на Фиг.26.



Фиг. 26 . Схематична инженерно-геоложка карта на градСофия

Земетръсният сценарий за град София (в макросеизмична интензивност), за „референтно земетресение“ с магнитуд $M_s=5.4$ (с по-голяма вероятност за случване), реализирано на 25 km югозападно от центъра на града е представен на Фиг.27.



Фиг.27 Прогностичния сеизмичен сценарий за град София (в MSK-64).

ВЕРИФИКАЦИЯ НА ПРОГНОЗНИ СЦЕНАРИИ С ИЗПОЛЗВАНЕ НА МАКРОСЕИЗМИЧНА ИНФОРМАЦИЯ

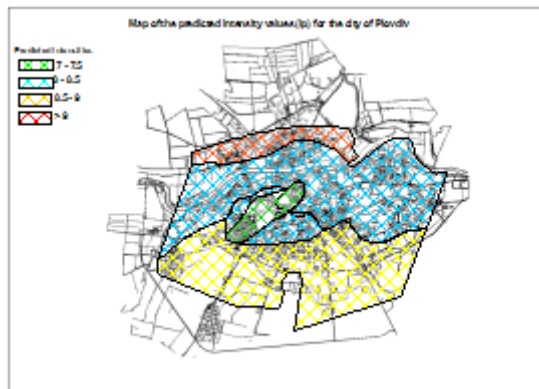
Верификация на прогнозен сценарий за град Пловдив

За генериране на прогнозен (“моделен”) земетръсен сценарий за град Пловдив е приложен детерминистичен подход. Сценарият се основа на сеизмичната история на града. Използвано е “референтно” земетресение с магнитуд 7.0 и максимална макросеизмична интензивност 10^{та} MSK, генерирано по разломна структура в ЗСЗ-ИЮИ направление, на минимално разстояние от 20 km от центъра на града. Предполага се разседен тип движение по структурата.

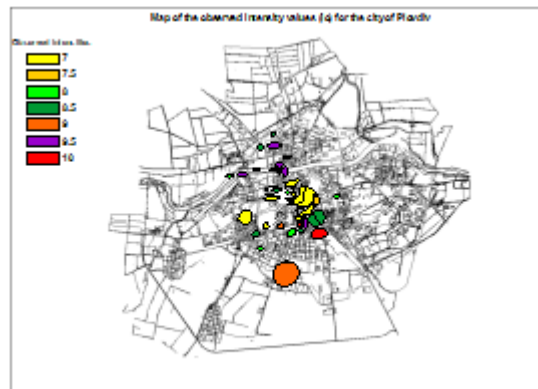
Земетръсният сценарий е оценен чрез прилагане на генерализиран макросеизмичен модел за земетресения на територията на България, представен в Glavcheva *et al.* (1982, 1983). В сценария са отразени обобщени инженерногеоложки условия за града.

Прогностичният сеизмичен сценарий за град Пловдив (в макросеизмична интензивност) за “референтно” земетресение с $M_S = 7.0$ (реализирано на 20 km от града) е представен на Фиг.28 а). Разпределението на наблюдаваните макросеизмични ефекти, причинени от земетресението през 1928 г. ($M_S = 7.0$) по територията на град. Пловдив (в MSK интензивност) е представено на Фиг.28 б). На Фиг. 28 в) са съпоставени прогнозираните сеизмични въздействия с наблюдаваното разпределение на интензивностната функция по територията на града. Най-общо, фигурата илюстрира сравнително добро съвпадение между наблюдаваните и прогнозираните въздействия. Разликите между наблюдаваната и прогнозираната стойности на интензивността $I_\Delta = I_n - I_{пр}$ варират предимно в интервала $[-0.5; 0.5]$. Може да се предположи, че $I_\Delta > 0.5$ е ефект, отразяващ качеството на строителството и степента на сеизмичното осигуряване. Стойности на разликата под -0.5 (т.е. $I_\Delta < -0.5$), най-вероятно, са индикация за не достатъчно коректно отчитане на локалните геоложки условия.

a)



б)



в)

Фиг.28 Верификация на прогнозен сценарий за град Пловдив, използвайки наблюдаваните макросеизмични въздействия от земетресенията през 1928 г. ($M_W=M_S=7.0$, $I_0=10^{Ta}$ MSK)

Верификация на прогнозен сценарий за град Русе

За генериране на прогнозен (“моделен”) земетръсен сценарий за град Русе е приложен детерминистичен подход. Сценарият се основа на сеизмичната история на града. Като базисно събитие се приемат две земетресения от 1940 г. ($I_0=9$ MSK, $M_S=7.4$ и $M_W=7.7$) и от 1977 г. ($I_0=8$ MSK, $M_S=7.2$ и $M_W=7.4$).

Използвано е “референтно” земетресение с магнитуд $M_S=7.2-7.3$ и епицентрална макросеизмична интензивност $I_0=8-9$ MSK, генерирано в огнище Вранча на дълбочина от 125 km (средна дълбочина на междиннофокусните земетресения).

Затихването на сеизмичните движения (интензивността) с разстоянието се определя с релацията, предложена в работата на Leydecker et al. (2008):

$$I = I_0 - 3\log(\Delta/h) - 1.3 \alpha * \Omega (\Delta-h), \quad (1.15)$$

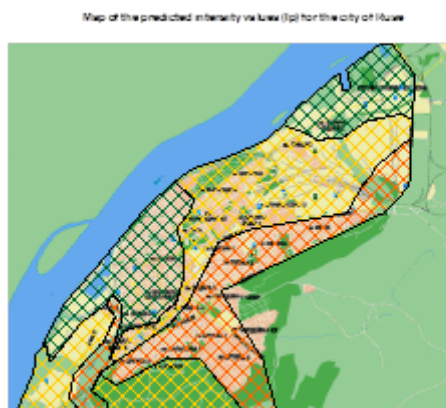
където, I_0 - епицентрална интензивност по; Δ - епицентрално разстояние в km; h – фокална дълбочина в km; α константа = 0.001 km^{-1} ; Ω се изчислява за всяка точка, използвайки макросеизмичните карти на три силни междиннофокусни земетресения (1940 г., 1977 г. и 1986 г.) В сценария са отразени обобщени инженерногеоложки условия за града.

Прогностичният сеизмичен сценарий за град Русе (в макросеизмична интензивност) за “референтно” земетресение с $I_0=8-9$ MSK (реализирано в огнище Вранча на дълбочина от 125) е представен на Фиг.29 а).

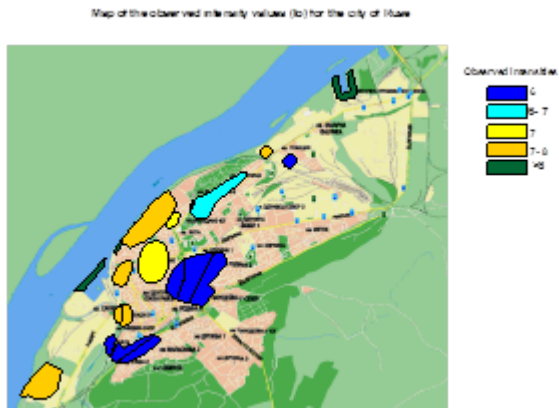
Разпределението на наблюдаваните макросеизмични ефекти, причинени от земетресенията от 1940 г. ($M_S=7.3$) и 1977 г. ($M_S=7.2$) по територията на град Русе (в MSK интензивност) е представено на Фиг.29 б) .

На Фиг.29 в) са съпоставени прогнозираните сеизмични въздействия с наблюдаваното разпределение на интензивността функция по територията на града. Най-общо, фигурата илюстрира сравнително добро съвпадение между наблюдаваните и прогнозираните въздействия. Разликите между наблюдаваната и прогнозираната стойности на интензивността $I_\Delta = I_{пр} - I_n$ основно варират в интервала $[-0.5;0.5]$. Може да се предположи, че $I_\Delta > 0.5$ най-вероятно, са индикация за не достатъчно коректно отчитане на локалните геоложки условия. Стойности на разликата под -0.5 (т.е. $I_\Delta < -0.5$), е ефект, отразяващ качеството на строителството и степента на сеизмичното осигуряване на сградите в град Русе.

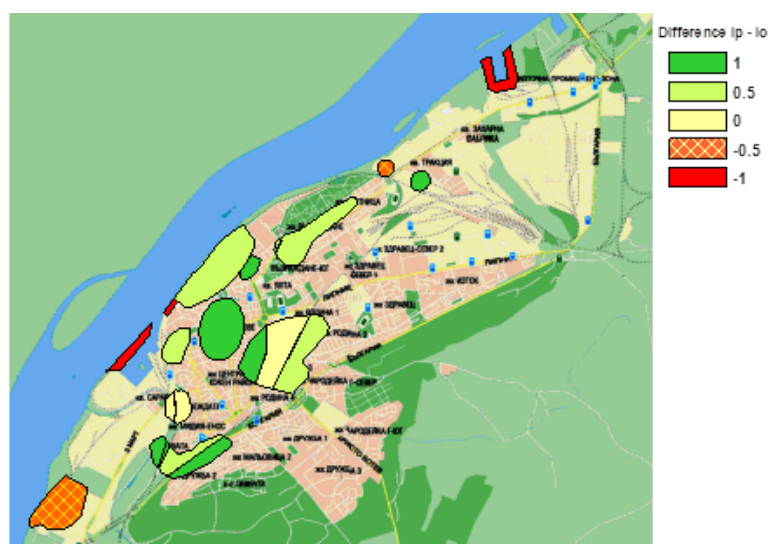
a)



б)



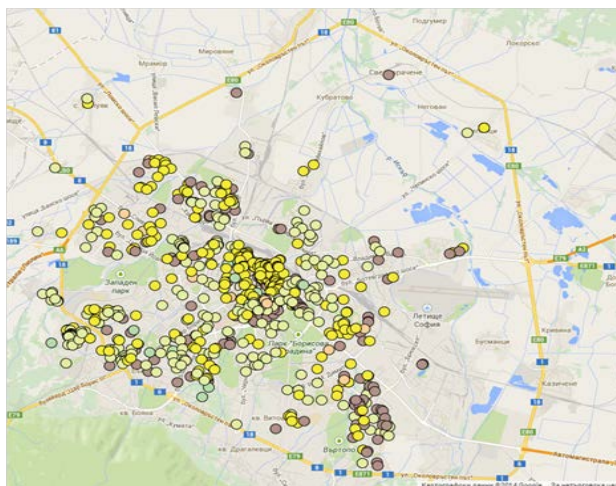
в)



Фиг.29 Верификация на прогнозен сценарий за град Русе, използвайки наблюдаваните макросейзмични въздействия от две силни, междиннофокусни земетресения ($I_0=8-9$ MSK), генерирани в огнище Вранча

Верификация на прогнозен сценарий за град София.

Детерминистичен прогнозен земетръсен сценарий в макросеизмична интензивност (в MSK-64) за град София, е генериран при допускане за реализиране на „референтно“ увреждащо земетресение с магнитуд $M_w=5.6$ с по-голяма вероятност за възникване, реализирано на разстояние 25 km от центъра на града. Сценарият, е сравнен с наблюдаваните макросеизмични ефекти (в MSK-64) в град София, причинени от земетресението с $M_w=5.6$, реализирано през 2012 г. Най-общо се наблюдава сравнително добро съвпадение между наблюдаваните и прогнозираните въздействия.



Фиг.30 Разлики между наблюдавана и прогнозирана стойност на сеизмичните въздействия върху град София

Легенда: Св. Зелено $I_n > I_{пр}$ с 1.0; св.жълто- зелено $I_n > I_{пр}$ с 0.5; жълто $I_n = I_{пр}$; св. кафяво $I_n < I_{пр}$ с 0.5 и кремаво $I_n < I_{пр}$ с 1.0

Преобладаващата разлика е около ± 0.5 от интензивностната единица (MSK-64).

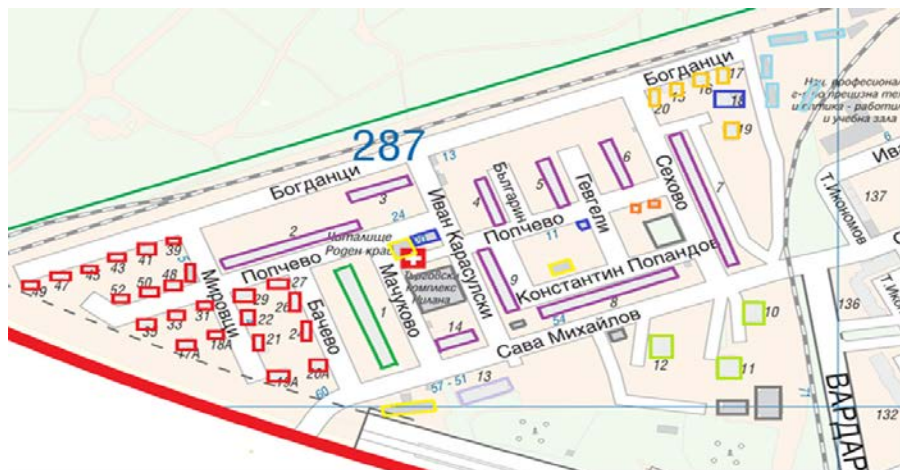
Най-високата разлика е от една интензивностна единица и е свързана със строителни проблеми при сгради, строени в началото на миналия век, неподдържани и занемарени. Наличието на 13 точки със степен на интензитет 7-8^{ма} на територията на град София в зона с прогнозна интензивност 6-7^{ма}, даде основание да бъде приложена EMS- 98 скалата, след което интензивността намаля с единица.

За да се установи връзката категория на повредата - макросеизмична интензивност трябва добре да се познават типът строителство, етажност, конструкции на сградите, годината на тяхното строителство, наличие на конструктивни промени, укрепване и др. Набавянето на тези данни за град като София е твърде сложен процес, поради което в настоящото изследване е направено обследване на избран квартал на града, за който има достъпна информация за сградния фонд.

Изследваният квартал – Гевгелийски, се намира в северозападната част на София и попада в зона с прогнозна интензивност от 6-7^{ма} степен по MSK. На фиг. 31 е представен сградния фонд, а на Фиг. 32 – повредите.

Повредените сгради са 7.4 % от всички сгради в квартала (от които с повреди от 6-7^{ма} – 5.55% и 1.85% с повреди от 6^{та}). Приложеното обследване показва, че интензивността на прогнозните въздействия (6-7^{ма} степен) съвпада с максималните наблюдавани ефекти в квартала. Всичко това дава основание да се направи заключението, че прогнозният сценарий е надежден и може да се приложи както в градоустройствените и аварийните планове, така и за оценка на сеизмичния риск.

Фиг. 31 Разпределение на сградния фонд в квартал Гевгелийски, София



Фиг. 32 Наблюдавани щети в кв. Гевгелийски, София; Легенда: син цвят -сградите с повреди от 6-7^{ма} степен, жълт цвят– сградите с повреди от 6^{та}.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

България се числи към земетръсно опасните зони на Земята. През изминалите векове територията на страната е била подложена на силни сеизмични въздействия, генерирани от локални и регионални източници.

Цел на настоящото изследване е на базата на теоретични резултати и сеизмични наблюдения да се оценят сеизмичните въздействия върху територията на България и да се прогнозираат последствията от тях. В проведеното изследване е потърсен подход за обединяване на богата макросеизмична информация, покриваща вековен времеви период (началото на българската сеизмология е от 1891 г.), със съвременните методи за оценка на сеизмичната опасност.

1. Макросеизмичните (интензивностни) скали представляват серии от градиращи описания на ефекти, породени от различни по сила сеизмични въздействия, които са осезаеми за хората, увреждат сградите, съоръженията и околната среда. Първите опити за обективна систематизация на наблюдаваните земетръсни ефекти са от 16 век, а към края на 19 век са създадени над 30 скали за класификация на земетръсните въздействия, които са в основата на съвременните макросеизмични скали.

В настоящата работа схематично, в хронологичен ред, са представени основните макросеизмични скали, прилагани в българската сеизмология. Подробно са описани скалите: MSK-64 (използувана в България от 1965 г.) и относително по-новата, сега прилагана в повечето европейски страни, EMS-98. Посочени са основните разлики, предимства и недостатъци на двете скали. В допълнение, на кратко, е представена и най-новата интензивностна скала ESI 2007 (Environmental Seismic Intensity scale – ESI-07), която се базира на концепцията, че само ефектите в околната среда позволяват коректно сравнение на въздействията от исторически и съвременни земетресения.

2. Създадена е макросеизмична база данни в ГИС среда. В базата данни са включени всички документирани сеизмични въздействия за исторически и съвременни земетресения, реализирани на територията на България и околности ѝ. Макросеизмичните данни, които покриват времеви диапазон от 19^{ти} век до настоящият момент, са систематизация, преоцени и цифровани. В базата данни всяко селище е определено с географски координати, съвременно име и предходни имена, ако има такива. Идеята, заложена в структурата на базата данни е от една страна за всяко документирано земетресение да се получи информация за уязвената от него територия и от друга страна за всяко селище да се намерят данни за наблюдаваните сеизмични въздействия.

3. Използвайки информацията, включена в базата данни са построени 20 макросеизмични карти (представени в отделно приложение към дисертационния труд) на земетресения, реализирани през 19^{ти}, 20^{ти} и 21^{ви} век в сеизмични зони на територията на страната. Макросеизмичните карти са построени чрез прилагане на програма My Maps Pro.

4. Въз основа на създадената база данни са оценени релации, описващи затихването на сеизмичните въздействия като функция на епицентралното разстояние, дълбочината и силата на източника. Общият вид на тези релации се дава с уравнението:

$$I=bM-s\log(\Delta^2+h^2)^{1/2}+c,$$

където: s е коефициент, отразяващ ефективното затихване с отдалечаване от източника, b и c - емпирична константа. Приложеният подход дава възможност да се прогнозира интензивността за всяка точка от засегнатата територия.

Въз основа на близо 1000 макросеизмични въздействия от 5 земетресения (3 от сеизмична зона Горна Оряховица и 2 от Софийска зона), чрез прилагане на регресионен анализ, е моделирано затихването на сеизмичните въздействия от двете зони. Най-ниски (много близки) стойности на стандартната девиация се получават за наблюдения с интензивност по-голяма или равна на пет в два случая: 1) когато се разглеждат съвместно, установените въздействия от 5-те земетресенията в двете зони ($\sigma=0.49$); 2) за наблюдения ($I\geq 5.0$) от земетресенията, генерирани само в сеизмична зона Г.Оряховица ($\sigma=0.50$). За сеизмична зона София не са получени отделни релации, защото магнитудните оценки на двете събития са много близки (покриват магнитуден интервал от 0.3 от магнитудната единица). Получените релации могат да се прилагат за моделиране затихването на сеизмичните въздействия с $I\geq 5.0$ степен (MSK-64) при земетресения, реализирани в сеизмични зони Г.Оряховица и София.

За описване затихването на сеизмичните въздействия от земетресения, генерирани в огнище Вранча, към използваната релация е приложена азимутална корекция Az_{corr} , зависеща от азимута в градуси на наблюдението спрямо епицентъра, при което релацията добива вида: $I = a + bM + s \log(R+100) + Az_{\text{corr}}(Az)$.

За оценка на коефициентите a , b , c Az_{corr} и са използвани 2900 наблюденията от 4 силни междиннофокусни земетресения от огнище Вранча (от 1940 г., 1977 г., 1986 г. и 1990 г.), Корекциите са в сила за азимути в интервал от 100-260°. Прилагайки азимуталната корекция стандартната девиация на релацията намалява със 7%.

5. За градовете Русе и Пловдив са създадени земетръсни сценарии в макросеизмична интензивност, използвайки детайлна макросеизмична информация (налична в публикации и фондови материали) за ефектите от минали силни земетресения върху тези градове.

За създаване на земетръсен сценарий за град Русе са използвани оценките на въздействията от две от най-силните междиннофокусни земетресения (генерирани в огнище Вранча), реализирани на 10 ноември 1940 г. с $M_W=7.7$ ($M_S=7.4$) и 4 март 1977 г. с $M_W=7.4$ ($M_S=7.2$). Сеизмичният сценарий за град Русе е генериран чрез съпоставяне на наблюдаваното разпределение на интензивностната функция по територията на града с конфигурацията на речните тераси на р. Дунав и р. Русенски Лом, за които е установена добра корелация на ефектите от двете земетресения.

Земетръсният сценарий за град Пловдив се основава на наблюдаваните въздействията от земетресението на 18.04.1928 г. ($M_W=M_S=7.0$), генерирано на 20 km ИЮИ от града.

Инженерно-геоложките условия в град Пловдив са отчетени, чрез използване на схематична инженерно-геоложка карта.

6. Създадени са прогностични (теоретични) земетръсни сценарии (в макросеизмична интензивност) в ГИС среда за градовете: Русе, Пловдив и София. За градовете Русе и Пловдив са генерирани теоретични сценарии за максимални очаквани сеизмични въздействия. За създаването на прогнозен земетръсен сценарий за град София се допуска реализиране на увреждащо земетресение с $M_W=5.6$ ($M_S=5.4$) с по-голяма вероятност за случване. Сценариите за градовете София и Пловдив са оценени чрез прилагане на генерализиран макросеизмичен модел за земетресения на територията на България. За генериране на прогнозен (теоретичен) земетръсен сценарий за град Русе е приложен детерминистичен подход. Затихването на сеизмичните въздействия с разстоянието се определя чрез релация, предложена в работата на Leydecker et al. (2008). В сценариите са приложени обобщени инженерногеоложки карти за градовете.

7. Прогностичните сценарии (в макросеизмична интензивност) са сравнени с наблюдавани сеизмични въздействия за съответните градове. Установено е, че генерираните прогнозни сценарии за трите града, са в добро съответствие с наблюдаваните въздействия. Разликите в оценките между прогнозираните $I_{пр}$ и наблюдавани I_n стойности варират между ± 0.5 от интензивностната единица и могат да бъдат занижени при наличие на информация за сградния фонд. Получените резултати показват, че прогнозните сценарии са надеждни и могат да се прилагат както в градоустройствените и аварийните планове, така и за оценка на сеизмичния риск.

ПРИНОСИ

Основни резултати на настоящата дисертация, определящи нейната научна и научно-приложна значимост са:

1. Създадена е първата у нас макросеизмична база данни в ГИС среда. Идеята, заложена в структурата на базата данни е - за всяко документирано земетресение да се получи информация за уязвената от него територия и за всяко селище (от територията на страната) да се намерят данни за наблюдаваните сеизмични въздействия. В базата данни всяко селище е определено с географски координати, съвременно име и предходни имена, ако има такива. Информация за наблюдаваните сеизмични въздействия, включена в базата данни, покриваща времеви интервал от 19^{ти} век до настоящият момент, е систематизирана и приведена към макросеизмичната скала MSK-64.

2. Въз основа на създадената макросеизмична база данни са построени, чрез прилагане на програма My Maps Pro, 20 макросеизмични карти за земетресения с $M \geq 4.0$ от 19^{ти}, 20^{ти} и 21^{ти} век.

Макросеизмичната информация е използвана за оценяване на релации (модели), описващи затихването на сеизмичните въздействия като функция на епицентралното разстояние, дълбочината и силата на източника. Приложеният подход дава възможност да се оцени интензивността във всяка точка от уязвената територия.

Въз основа на близо 1000 макросеизмични наблюдения от 5 земетресения (3 от сеизмична зона Горна Оряховица и 2 от Софийска зона) е моделирано затихването на сеизмичните въздействия от сеизмичните зони София и Горна Оряховица. Получените релации могат да се прилагат за моделиране затихването на сеизмичните въздействия с $I \geq 5.0$ степен (MSK-64) при земетресения, реализирани в сеизмични зони Г.Оряховица и София.

За описване затихването на сеизмичните въздействия от междиннофокусни земетресения, генерирани в огнище Вранча, към използвания модел е приложена азимутална корекция, зависеща от азимута в градуси на наблюдението спрямо епицентъра. За оценка параметрите на зависимостта са използвани 2900 наблюденията от 4 силни междиннофокусни земетресения от огнище Вранча (1940 г., 1977 г., 1986 г. и 1990 г.), Азимуталната корекция намалява стандартното отклонение на релацията със 7%. Оцененият модел може да се прилага за прогнозиране въздействията от междиннофокусни земетресения, генерирани в огнище Вранча, Румъния за азимути в интервал от 100-260°.

3. На базата на детайлна макросеизмична информация за ефектите от минали силни земетресения върху градовете Русе и Пловдив са създадени земетръсни сценарии в макросеизмична интензивност. Земетръсният сценарии за град Русе се базира на оценените въздействия от две силни междиннофокусни земетресения (генерирани в огнище Вранча), реализирани на 10 ноември 1940 г. с $M_W = 7.7$ ($M_S = 7.4$) и 4 март 1977 г. с $M_W = 7.4$ ($M_S = 7.2$). За генериране на земетръсен сценарии за град Пловдив са

използувани оценки на въздействията от силното земетресение на 18.04.1928 г. ($M_w = M_s = 7.0$).

4. Генерирани са прогнозни (теоретични) земетръсни сценарии в макросейсмична интензивност за три от най-големите градове в България – Русе, Пловдив и София. Сценариите са съобразени със сейсмичната история на градовете. В сценариите са приложени обобщени инженерногеоложки карти за градовете. За градовете Русе и Пловдив са генерирани земетръсни сценарии за максимални очаквани сейсмични въздействия, които могат да бъдат предизвикани от разрушителни земетресения. За град София земетръсният сценарий е за по-слабо (увреждащо) земетресение с по-голяма вероятност за случване.

5. Установено е, че генерираните прогнозни земетръсни сценарии са в добро съответствие с наблюдаваните въздействия за всеки от трите града. Разликите в оценките между наблюдаваните и прогнозираните въздействия варират предимно между +0.5 ; -0.5 от интензивностната единица. Разликите могат да бъдат занижени при наличие на информация за сградния фонд. Получените резултати показват, че прогнозните сценарии са надеждни и могат да се прилагат както в градоустройствените и аварийните планове, така и за оценка на сейсмичния риск. Използването на такива сценарии в комбинация със съвременните методи на сейсмичното инженерство могат да намалят в голяма степен щетите и жертвите от бъдещи земетресения.

Публикации, включени в дисертационния труд:

1. Главчева Р., И. Александрова. Земетресенията от 1928 г. – предшествваща сейсмичност. Сборник доклади от симпозиум „Геодинамични изследвания, свързани със земетресенията от 1928 ф. В Чирпан-Пловдив“, София октомври, 1998, 31-40.
2. Solakov D., S. Simeonova, L. Christoskov, I. Aleksandrova, I. Popova, and G. Georgieva, 2009. Earthquake scenarios for the cities of Sofia, Rousse and Vratsa. INFORMATION & SECURITY. An International Journal, Vol.24, 51-64.
3. Solakov D., S. Simeonova, I. Aleksandrova, P. Trifonova, M. Metodiev, 2011. Verification of seismic scenario using historical data-case study for the city of Plovdiv. In Proceedings V.2 (Edts. Grützner C., R. Perez-Lopez, T. Steeger, I. Papanikolaou, K. Reicherter, P. Silva and A. Vött) of 2nd INQUA-IGCP-567 International Workshop on Active Tectonics, Earthquake Geology, Archaeology and Engineering, Corinth, Greece, 239-241.
4. Solakov D., S. Simeonova, L. Ardeleanu, I. Aleksandrova, P. Trifonova, C. Cioflan, 2014. HAZARD ASSESSMENT FOR ROMANIA–BULGARIA CROSS-BORDER REGION Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences, 67, 6, 835-842.
5. Aleksandrova I. Assessment of the 2012 $M_w=5.6$ earthquake impacts in the city of Sofia. Bulgarin Geophysycal Journal, 2013, Vol. 39 – под печат.

Участие в международни научни форуми:

1. European Geosciences Union General Assembly 2010 Vienna, Austria, 02 – 07 May 2010.
2. European Seismological Commission 2010, 32nd, September 6-10, Montpellier, France.
3. European Geosciences Union General Assembly 2011, Vienna, Austria, 03 – 08 April 2011.
4. 2nd INQUA-IGCP-567 International Workshop on Active Tectonics, Earthquake Geology, Archaeology and Engineering, Corinth, Greece (2011).
5. European Geosciences Union General Assembly 2012 Vienna, Austria, 22 – 27 April 2012.
6. European Geosciences Union General Assembly 2013 Vienna, Austria, 07 – 12 April 2013.
7. ESNET, September 27, 2013, Kisinev, Moldova.
8. European Geosciences Union General Assembly 2014 Vienna | Austria | 27 April – 02 May 2014.
9. НАЦИОНАЛНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКА - ПЛОВДИВ 2014 г. 10 - 12 октомври 2014 г.

Участие в проекти:

1. Регистрация, обработка и интерпретация на сеизмологичната информация от Локална Сеизмична Мрежа (ЛСМ) в района на АЕЦ "Козлодуй" договори между "АЕЦ Козлодуй" ЕАД и НИГГГ (до 2010 г. ГФИ), БАН.
2. 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 hazard върху територията на страната.. Сключен с МРРБ 2007 г.
3. Регистрация, анализ, обработка и интерпретация на сеизмологичната информация от Локална сеизмологична мрежа (ЛСМ) в района на гр. Провадия. Договор с Провадсол ЕАД N 5/01.03.2011 г.
4. Project DACEA (2010 -2013 г) Ref. № 2(1i) – 2.2 -1 MIS ETC 636 "Danube Cross-border System for Earthquakes Alert" – Cross Border Cooperation Program – Romania-Bulgaria, co-financed by the European Union through the European Regional Development Fund, the Bulgarian and Romanian Governments and the 5 project partners.
5. Анализ на сеизмичния hazard за площадката на "Ада Тепе", 2012 г.
6. Изследване и определяне на местоположението на предпочетена площадка за изграждане на нова ядрена мощност на площадката на "АЕЦ Козлодуй" ЕАД и прилежащи територии. РАЗДЕЛ: "Сеизмичен hazard за изследваните площадки", 2013 г.
- 7.. Проект N BG051PO001-3.3.06-0063/22.7.2013 по оперативна програма "Развитие на човешки ресурси".

Библиография

- Вацов С., 1902. ЗЕМЕТРЕСЕНИЯТА В БЪЛГАРИЯ ПРЕЗ XIX ВЕК, Д. П., С., 94 с.
- Вацов С., 1902. ЗЕМЕТРЕСЕНИЯТА В БЪЛГАРИЯ ПРЕЗ 1901, Д. П., С., 39 с.
- Вацов С., 1903. ЗЕМЕТРЕСЕНИЯТА В БЪЛГАРИЯ ПРЕЗ 1902, Д. П., С., 100 с.
- Вацов С., 1904. ЗЕМЕТРЕСЕНИЯТА В БЪЛГАРИЯ ПРЕЗ 1903, Д. П., С., 100 с.
- Вацов С., 1905. ЗЕМЕТРЕСЕНИЯТА В БЪЛГАРИЯ ПРЕЗ 1904., Д. П., С., 283 с.
- Вацов С., 1906. ЗЕМЕТРЕСЕНИЯТА В БЪЛГАРИЯ ПРЕЗ 1905, Д. П., С., 143 с.
- Вацов С., 1907. ЗЕМЕТРЕСЕНИЯТА В БЪЛГАРИЯ ПРЕЗ 1906, Д. П., С., 56 с.
- Вацов С., 1908. ЗЕМЕТРЕСЕНИЯТА В БЪЛГАРИЯ ПРЕЗ 1907, Д. П., С., 79
- Вацов С., 1909. ЗЕМЕТРЕСЕНИЯТА В БЪЛГАРИЯ ПРЕЗ 1908, Д. П., С., 96 с.
- Вацов С., 1910. ЗЕМЕТРЕСЕНИЯТА В БЪЛГАРИЯ ПРЕЗ 1909, Д. П., С., 100 с.
- Вацов С., 1912. ЗЕМЕТРЕСЕНИЯТА В БЪЛГАРИЯ ПРЕЗ 1910, Д. П., С., 80 с.
- Вацов С., 1913. ЗЕМЕТРЕСЕНИЯТА В БЪЛГАРИЯ ПРЕЗ 1911, Д. П., С., 61 с.
- Вацов С., 1914. ЗЕМЕТРЕСЕНИЯТА В БЪЛГАРИЯ ПРЕЗ 1912, Д. П., С., 80 с.
- Вацов С., 1923. ЗЕМЕТРЕСЕНИЯТА В БЪЛГАРИЯ ПРЕЗ 1913-1916, Д. П., С., 195 с.
- Дипозе, 1931 . Отчет за извършеното от 25 април 1928 г. до 1 ноември 1931 г. на Дирекцията за подпомагане и възстановяване земетръсната област 1928 г., София, 421 с.
- Иванов, Р., 1931. Принос към изучаването на земетресението в София на 18 окт. 1917г. МЗДИ, Д.М., София, 1-33.

- Илиев, Н., 1952. Земетресенията в България през 1946-1950. Гл.Дир.Геол.и Мин Пр., С., 25 с.
- Киров, К., 1931. Земетресенията в България. Отчет на усетените земетресения през годините 1917-1927. Дир.Мет., С., 18-28, 163 с.
- Киров, К., 1941. Земетресенията в България. Отчет на усетените земетресения през годините 1931-1940. Центр.Мет.Инст., С., 32-41, 112 с.
- Киров, К., 1945. Земетресенията в България. Отчет на усетените земетресения през годините 1928-1930. С., 29-31, 149 с.
- Киров, К., Е. Григорова, 1957. Земетресенията в България през 1951-1954. Дъж.Изд.С., 132 с.
- Киров, К., К. Палиева, 1959. Земетресенията в България през 1955-1957. Дъж.Изд. С., 60 с.
- Киров, К., К. Палиева, 1961. Земетресенията в България през 1958-1960, С., 70 с.
- Медведев С.В., 1962. Инженерная сейсмология. Госстройиздат, Москва, 284 с.
- Медведев С.В., 1968. Международная школа сеизмической интенсивности. В Сеизмическое районирование СССР, Наука, Москва, 476 с.
- Христосков Л., 2007. Сеизмология – част II Земетръсни източници и вълново поле в Земята. Университетско издателство “Св. Климент Охридски”, София, 455 с.
- Blake A., 1941. On estimation of focal depth from macroseismic data. BSSA, 1 31, 3, 787-791.
- Bonchev E., I.Bune, L.Christoskov, J.Karagjuleva,V.Kostadinov, G.Reisner, S.Rizhikova, N.Shebalin, V.Sholpo,D.Sokerova, 1982. A method for compilation of seismic zoning prognostic maps for the territory of Bulgaria.Geologica Balcanica, 12(2), 2-48.
- Dachev H., I. Vaptzarov, L. Filipov, D. Solakov, S. Simeonova, S. Nikolova, P. Sokolova, E. Botev, Tz. Georgiev, 1995. Seismology, geology, neotectonics, seismotectonics and seismic hazard assessment for the PNPP Belene site, Report of Project: Investigations and activities for increasing of the seismic safety of the PNPP Belene site, Geoph. Inst., BAS, S, I, pp 250.
- Glacheva, R., S. Simeonova, D. Solakov (1982). A Generalized Macroseismic Model of the High Intensities Fields for Bulgaria. BGJ, 8, 3, 77-83.
- Glacheva, R., S. Simeonova, Tz. Hristova, D. Solakov (1983). Generalized Iseoseismals of the High Intensities for Earthquakes in Bulgaria, BG J, 9, 3, 69-77.
- Grünthal, G., 1998. European Macroseismic Scale 1998 – EMS 98, ESC, 15, Luxembourg, 99 pp.
- Kovesligethy von, R., 1907. Seismischer Starkegrad und Intensitat der Beben, Gerlands Beitrage zur Geophysik, Band VIII, Leipzig.
- Leydecker G., H. Busche, K.-P. Bonjer, T. Schmitt, D. Kaiser, S. Simeonova, D. Solakov, and L. Ardeleanu, 2008. Probabilistic seismic hazard in terms of intensities for Bulgaria and Romania – updated hazard maps. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 8, 1431–1439.
- Michetti, A. M., E. Esposito, L. Guerrieri, S. Porfido, L. Serva, R. Tatevossian, E. Vittori, F. Audemard, T. Azuma, J. Clague, V. Commerci, A. Gurbinar, J. McCalpin, B. Mohammadioun, N. A. Morner, Y. Ota, and E. Roghazin, 2011. Environmental Intensity Scale - ESI 2007 (English). In Memorie Descrittive Carta Geologica d'Italia, Vol.xyz, Draft14.09.2011, 7-10.
- Medvedev, S., W.Sponheuer and V. Kärnik, 1965. Seismic Intensity Scale Verson MSK64 by, UNESCO/NS/SEISM/28, Paris, 7 May 1965, 7 pp.
- ROMPLUS, 2007 - Romanian Earthquake Catalogue (computer file), first published as: Oncescu, M.C., Marza, V.I, Rizescu, M., Popa, M. (1999), The Romanian Earthquake Catalogue between 984-1997, in Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation, F. Wenzel, D. Lungu (eds.) & O. Novak (co-ed), pp. 43-47, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Shebalin N.V., V. Kärnik and D.Hadzievski (Editors), 1974. Catalogue of Earthquakes. Part I and Part II. UNDP/UNESCO Survey of the seismicity of the Balkan region, UNESCO, Skopje, 600 pp.
- Shebalin N.V. V. Kärnik and D.Hadzievski (Editors), 1974. Catalogue of earthquakes of the Balkan Region. Atlas of isoseismal maps, UNDP-UNESCO Survey of the Seismicity of the Balkan Region, Part III, Skopje, 275 pp.
- Simeonova S., D.Solakov, 1998. Transition from aftershock to normal activity: aftershock sequences of the 1986 Strazhitza earthquakes. Comptes rendus de l'Acad. bulgare des Sci, 51,1-2, 49-52.
- Sokerova, D., S. Simeonova, S. Nikolova, D. Solakov, E. Botev, R. Glavcheva, S. Dineva, B. Babachkova, S. Velichkova, S. Maslinkova, K. Donkova, S. Rizikova, M. Arsovski, M. Matova, I. Vaptzarov, L. Filipov, 1992. Geomorphology, neotectonic, seismicity and seismotectonic of NPP Kozloduy, Final Report (Summary) on IAEA Mission: Design basis earthquake for seismic upgrading of NPP Kozloduy, Sofia, pp 200.