

СТАТИСТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ПРОСТРАНСТВЕНО-ВРЕМЕВОТО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ ОТ НЯКОИ СЕИЗМИЧНИ РЕГИОНИ

Е. Маркова

Пловдивски Университет 'П. Хилендарски', Цар Асен 24 , 4000 Пловдив, e-mail: eligeo@uni-plovdiv.bg

Резюме. Изследвани са два случая – декластеризирани серии земетресения от шест сеизмогенни района и афтершокови редици на няколко силни съвременни земетресения. Главна задача на изследването е да бъдат описани с математически функции разпределенията на разстоянията и интервалите време между последователните двойки събития. След това тези математически модели са сравнени с други моделни разпределения, разработени при определени начални условия. При сравнението на резултатите от наблюдаваните и моделните разпределения, свързани със сериите от декластеризирани събития, може да се направи извод за независимост на земетресенията в тези серии. При аналогично изследване на афтершокови последователности може да се счита, че става групиране на събитията в рамките на някои от така изследваните редици.

Ключови думи: функционални апроксимации, статистическо моделиране, анализ на двойки земетресения.

Въведение

Изследването на пространствено-времето разпределение на земетресенията е от фундаментална важност за разбиране на физиката на сеизмичния процес. Сеизмичният процес може да се разглежда едновременно като не-случаен или случаен в пространството и времето, в зависимост от мащаба, в който се правят изследванията. Някои очевидни не-случайни черти са добре известни. Например, в глобален мащаб, земетресенията са концентрирани по границите на тектонските плочи, а не са равномерно разпределени по цялото земно кълбо. В друг мащаб, земетресенията може да изглежда, че са напълно случайно разпределени. Понататъшна редукция на мащаба може да разкрие явни “кластери” или “липси” в сеизмичната активност.

Предимство в приложението на статистическите методи за изучаване на сеизмичността е възможността за различаване на не-случайността от случайността. Един от начините да се прави това е анализ на времето разпределение на земетресенията. Статистическите модели за описание на времевите разпределения се развиват от прилагане на Поасонов процес до по-усложнени модели, които включват групиране (Utsu, 1969; Schlien and Toksoz, 1970; Kagan and Knopoff, 1976; Godano et al, 2004).

Статистическото изследване на пространственото разпределение на земетресенията се развива по-бавно. Една от причините за това е, че е нужен дву- или тримерен модел, за да се опише пространственото разположение на земетресенията, което се осъществява по-трудно, отколкото при едномерния модел във времето. Затова, наред с визуализацията на сеизмичността под формата на карти и разрези, за изучаване на пространственото разпределение на земетресенията се използват и по-модерни статистически подходи. За тази цел в редица изследвания се прилага методът на статистическите моменти (Kagan, Knopoff 1976, 1980; Vere-Jones, 1978; Reasenberg 1985; Енева, 1984; Христосков и др., 1985). Наред с това са разработени и количествени методи за изучаване на пространственото разпределение на земетресенията (Kagan, 1981, 1990, 1991a, b; Eneva et al, 1988, 1989, 1991; Gospodinov and Christoskov, 1988)

Проведени са изследвания по апроксимация на статистически разпределения на следните параметри - разстояния и интервали време между последователни трусове. Разгледани са два случая – декластеризирани серии земетресения от шест сеизмогенни района и афтершокови редици на няколко силни съвременни земетресения.

Използването на функционална апроксимация позволява да се опишат с математически изрази наблюдаваните емпирични разпределения на изследваните параметри. По този начин могат да се сравняват резултатите за различни зони – както по вида на приближаващата крива, така и по стойностите на параметрите, получени от апроксимацията на разпределенията за отделните зони. Наличието на функционално представяне дава възможност и за сравнение с други моделни разпределения.

Класифицирането на афтершоковите редици на земетресения, реализирани в различна сеизмогенна обстановка, също е важно при изучаването им и определянето на техните основни параметри – продължителност и пространствено разположение на земетресенията в редицата, интервали на реализация, магнитуд на последователните сеизмични събития и др.

Методика

За изследване са избрани шест различни сеизмични зони. Използваните каталози за тези зони са достъпни по Internet. Изборът на сеизмоактивните зони е определен от достъпната информация, както и от относително различното геодинамично пространство, в което те се намират. В повечето случаи са използвани данните след 1900 година до наши дни, което осигурява достатъчна точност при

определянето на епицентралните координати и освен това е относително дълъг период, през който е натрупана информация за описание текущата сеизмичност на разглежданите зони.

Успехът на всички опити за изучаване случайността на поредица от главни събития зависи от уменията, с което се идентифицират афтершоците и отстраняването им от каталога. Развитието на изследванията на пространственото разпределение на земетресенията по т.нар. “методи на моментите” – от втори и по-висок порядък, се оказват удобни и за отделяне на афтершоковите серии, както напр. прави Reasenberg (1985). За разглежданите зони е извършено предварително отделяне на афтершоковите събития с използване на пространствено-времевия прозорец на Reasenberg, реализиран в програмата Zmap (Wiemer, 2001).

С помощта на специално подготвена програма са изчислени разстоянията между епицентрите Δx , а след това и разликите във времето на реализация Δt за всяка двойка последователни земетресения от изходния каталог. С данните, получени от първичната обработка, са построяват съответните хистограми на разпределенията на разстоянията и на времената.

Специално внимание бе отделено на апроксимирането на получените действителни разпределения на посочените параметри Δx и Δt с математически изрази. При апроксимацията на разпределенията на разстоянията между последователните трусове за първия тип – декластеризирани събития – приближаващата функция се задава чрез

$$f(x) = c_x x^{p_x-1} (1-x)^{q_x-1}. \quad (1)$$

Параметрите на разпределението p_x, q_x са $p_x > 1, q_x > 1$ и x е в интервала: $0 \leq x \leq 1$. Коефициентът c_x е ‘нормиращ множител’, т.е. такъв, че

$$\int_0^1 f(x) dx = 1 \quad (\text{Мостеллер, Тъюки, 1982}).$$

Аналогична процедура е използвана и при апроксимирането на хистограмите за времевите интервали между двойките земетресения. Използван е изразът:

$$f(x) = c_t \theta \exp(-\theta t), \quad (2)$$

което представлява експоненциално разпределение с параметър θ (Кокс, Льюис, 1969). Ролята на c_t е също на „нормиращ множител”.

Редиците сеизмични събития, следствие от реализацията на силни земетресения и наречени афтершокови серии, са традиционен обект на изследване в сеизмологията. Афтершоците са събития, които са причинно свързани със събитието “родител”. Анализът на двойките последователни събития е приложен и за няколко добре документирани афтершокови серии на силни съвременни земетресения.

Изследвани са аналогично статистическите разпределения на разстоянията и интервалите време между последователните събития. Емпиричните честотни хистограми на тези параметри са апроксимирани със следните математически функции:

а) за разстоянията между двойките събития от афтершоковите серии:

$$f(x) = a_x x^{b_x} \exp(-c_x x) ; \quad (3)$$

б) за интервалите от време:

$$f(t) = a_t t^{-b_t} + c_t . \quad (4)$$

При изследване на сеизмичността в региони или по-малки зони обикновено каталозите със земетресения обхващат системи от разломи, които съществуват в изследваните области. Афтершоковите серии се реализират по един главен и/или няколко близки до него разломи. Затова може да се предполага различие в пространствената реализация на събитията в тези случаи. Това мотивира избора на посочената функция (3) като апроксимираща разпределенията на разстоянията за сериите от вторични събития.

Значителен брой работи, в които статистически се изследва сеизмичния режим, се характеризират с емпирично статистическо описание на отделни параметри. Ако за всеки параметър не се предложи модел за сравнение, такова описание е трудно за интерпретация, а още повече за сравнение с резултати от други изследвания. Ето защо е предложен и подход, при който се използват моделни разпределения, разработени при определени начални условия.

Стойностите на параметъра, който се изследва първо, са разстоянията Δx между последователни двойки земетресения.

Видът на моделните разпределения на разстоянията между двойките последователни трусове, при предположение, че са независими, се определя от площното разположение на събитията. В случая, под независимост се разбира вероятността, къде и кога ще се реализира следващото земетресение, да не зависи от предходните. Като се има пред вид, че тектонските процеси се извършват при непрекъсната картина на напрежението в земната кора, то хипотезата за независимост при земетръсната реализация не е изцяло приемлива. Фактът, обаче, че не съществува физична теория, която да обяснява напълно сеизмичния процес, естествено насочва към начална хипотеза за независимост. Като се анализират реалните данни на базата на тази първоначална постановка, могат да се установят някои, макар и статистически закономерности при реализацията на сеизмичните събития.

Моделът на разпределението на разстоянията при равномерно разположение на земетресения в правоъгълна зона (за които се приема, че са независими) има математически израз, даден от Господинов (Дисертация, 1999, формули (30a,b,c,d) – стр. 38); аналогични са и тези на Kagan (2007, формули (33-35) – стр. 1182).

Моделно разпределение на разстоянията между последователни трусове може да се получи и чрез генератор на случайни числа, които могат да се разглеждат като координати на „земетресения“ в правоъгълна площ. Използването на генератор на случайни числа съответства на хипотезата за равномерно площно разпределение на точките: вероятността за поява на събитие във всяка точка е еднаква. След като се изчислят разстоянията между последователните събития, се получава видът на моделното разпределение. В настоящото изследване е използвана и тази възможност за построяване на моделни разпределения. За целта е подготвена програма, с

помощта на която са генерирани точки върху правоъгълни площи. Последните са подбрани с размери, които да съвпадат с размерите на изследваните сеизмични зони. Целта е така получените *модели при равномерно разпределение* на независими събития да бъдат сравнени с реалните разпределения на разстоянията между последователните земетресения.

Моделно разпределение на разстоянията Δx между последователни земетресения, за които е приета хипотезата за независимост, може да се получи и по емпиричен начин на базата на следните разсъждения (Господинов, 1999). Ако разглежданата зона е с произволна форма и събитията в нея имат произволно площно разпределение, то при наличието на някаква закономерност в пространствената реализация на последователните земетресения, тя може да се разруши чрез рандомизация на каталога, т.е. при случайното му пренареждане. За всяка такава пермутация се получава нов рандомизиран каталог, в който разстоянията между двойките последователни събития ще бъдат случайна извадка от всички възможни разстояния между епицентрите. Тогава най-целесъобразно е да се използва разпределението на всички възможни разстояния, вместо случайна извадка от него. Построяването на *емпирично моделно разпределение* за независими събития по начина, описан от Господинов (1999), е също подходящо, тъй като то отчита реалната пространствена структура на сеизмичността.

На базата на реалните разпределения на разглеждания параметър Δx могат да се създадат и други подходящи моделни разпределения. В настоящото изследване реални разпределения на разстоянията между двойките последователни земетресения са построени по описаната вече методика. Те представляват емпиричните честотни разпределения, които се използват за апроксимиране с избраните функции. Така процедурата по апроксимиране на емпиричните честотни разпределения може да се разглежда като построяване на *математически модел на реалните разпределения*.

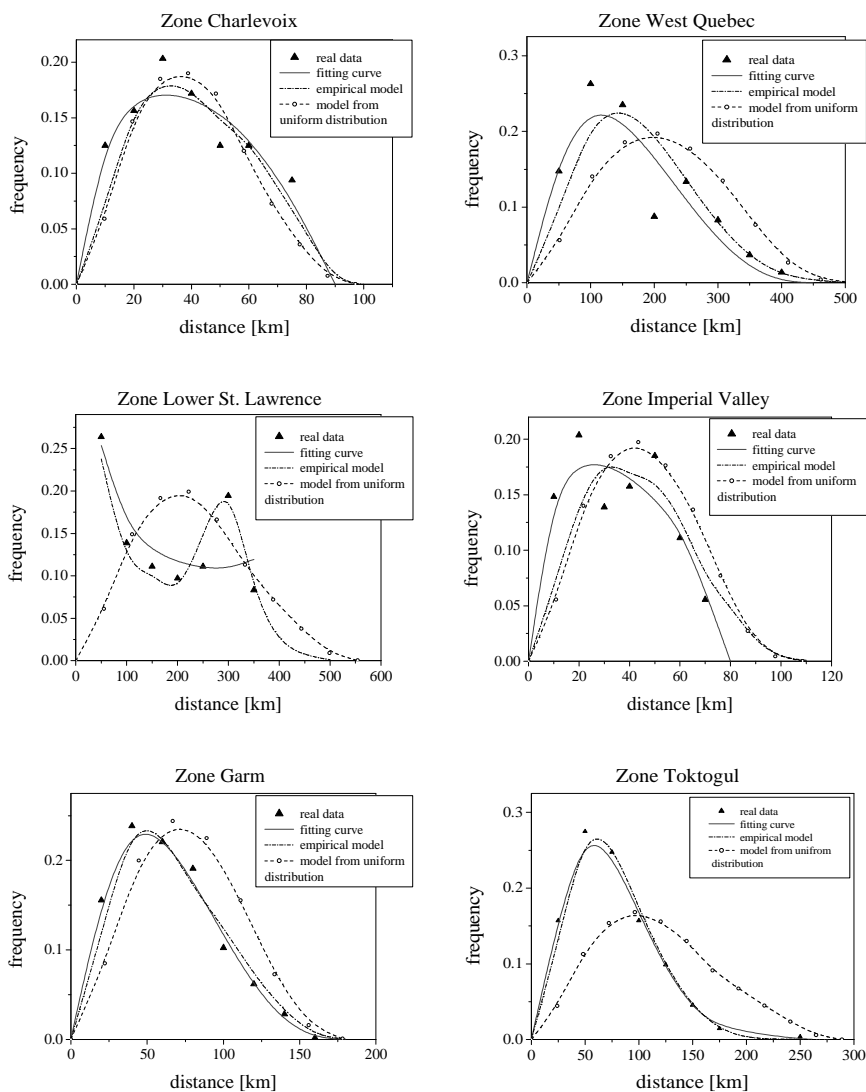
Резултати

В Таблица 1 са описани изследваните зони, периода от време, който обхваща всеки каталог, както и броя на събитията в него. Зоните са в „правоъгълни прозорци“, които са указани в същата таблица. Изборът е направен в съответствие със сеизмичното зонироване, направено от сеизмолози в Северна Америка, Канада и Русия (Adams et al., 1991; Dewey et al., 1995; Rogers et al., 1991; Rautian et al., 2002). В същата таблица са дадени и получените параметри на апроксимиращите функции (1) и (2) заедно със стандартните им отклонения. За всички каталози е определен минималния магнитуд M_c , за който каталогът може да се счита за пълен.

Кривите, апроксимиращи разпределенията на разстоянията между последователните двойки земетресения от декластеризираните серии, са показани на Фигура 1.

Таблица 1. Параметри на апроксимиращите функции (1) и (2) за разпределения на разстоянията и интервали време за последователни двойки земетресения от изследваните зони.

No	Зона	$N_{\text{зем}}$	Период	M_c	c_x	p_x	q_x	$\theta_{\text{гр}}$ [бр./ден]	θ [бр./ден]	c_t
1.	Charlevoix, Canada (47.2-48°N, 69.7-70.5°W)	65	(1924 -1983)	3.0	0.311 (±0.089)	1.299 (±0.141)	1.644 (±0.227)	0.0030	0.0025 (±0.0006)	324 (±47)
2.	West Quebec, Canada (44-47°N, 72-77°W)	218	(1903 -1992)	3.0	1.200 (±0.774)	1.660 (±0.427)	3.515 (±0.962)	0.0069	0.0095 (±0.0009)	127 (±5)
3.	Lower St. Lawrence, Canada (46-50.2°N, 65-69°W)	73	(1981 -1992)	3.0	0.076 (±0.039)	0.549 (±0.221)	0.843 (±0.287)	0.0183	0.0200 (±0.0007)	102 (±1)
4.	Imperial Valley, California (32.5-33.3°N, 115-115.8°W)	109	(1932 -1969)	3.5	0.312 (±0.122)	1.243 (±0.182)	1.747 (±0.336)	0.0081	0.0095 (±0.0005)	156 (±3)
5.	Garm, Asia (38.5-39.5°N, 70-71.6°E)	567	(1961 -1983)	3.3	1.232 (±0.205)	1.690 (±0.071)	3.374 (±0.189)	0.0709	0.0745 (±0.0012)	15 (±1)
6.	Toktogul, Asia (39.2-43.5°N, 69.2-76°E)	1031	(1980-1991)	2.3	4.098 (±0.541)	2.000 (±0.049)	5.986 (±0.203)	0.2391	0.2468 (±0.0044)	12 (±0)



Фиг. 1. Сравнение на апроксимиращото реалните данни разпределение на разстоянията и моделните такива - от равномерно разпределение на събития върху правоъгълни зони и от емпиричния модел на Господинов.

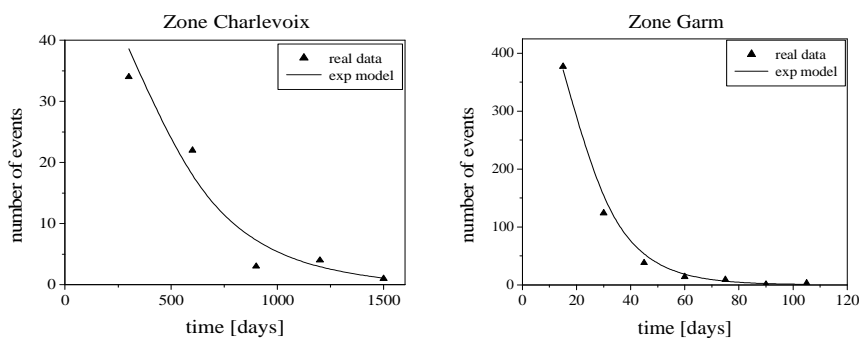
Коэффициентите на детерминация R^2 , свързани с качеството на апроксимациите, се менят от 0.73 до 0.99. Апроксимиращите криви имат еднакъв характер, т.е. те са унимодални, различно е само положението на максимума и стръмността от двете му страни. Различие има само за зона Lower St. Lawrence, Канада, която е без максимум.

Сравняването на апроксимиращата крива и моделните такива за всяка зона

(Фиг.1) показва, че реалните данни се съгласуват с моделите. За зони Charlevoix и Imperial Valley се наблюдава съгласие между двата модела и приближаващото реалните данни разпределение на разстоянията. Това означава, че началната хипотеза за независимост между земетресенията в тази зона може да се приеме, като в същото време разположението на събитията съответства на равномерното.

За зони West Quebec, Garm и Toktogul, се получава добро съгласие между емпиричното моделно разпределение и апроксимиращата крива, което дава основание да се счита, че събитията в тези зони също може да се разглеждат като независими. В случая обаче те не са равномерно разпределени. За това съдим по различната моделна крива, отнасяща се за случая на такъв тип разположение на събитията в тези зони.

Зоната, която има по-особен тип на разпределенията, както вече бе споменато е Lower St. Lawrence. За нея емпиричното моделно разпределение има по-особен вид, което може да се свърже с реалното разположение на земетресенията в тази зона. Те не са разположени равномерно. Кривата, приближаваща реалното разпределение на разстоянията е по-близка до емпиричното моделно разпределение, като в същото време е с по-нисък коефициент на детерминация $R^2=0.60$. Това означава, че нивото на надеждност на апроксимацията в тази зона е по-ниско.



Фиг. 2. Сравнение на реалните разпределения на интервалите време между последователните земетресения (означени с точки) и експоненциално разпределение с показател θ_{cp} (непрекъсната линия) за някои от изследваните сеизмични зони.

Реалните разпределения на времената между последователните събития са апроксимирани с експоненциална функция (2). В повечето случаи има разлики между стойностите на параметъра θ , получен от апроксимиращата процедура, и стойността θ_{cp} , която представлява средния брой събития за единица време (интензивност) за всяка зона (Табл.1). От физична гледна точка е по-добре наблюдаваното разпределение на интервалите време да се сравнява с моделно такова. *Моделното разпределение* може да се построи при предположение, че във времето земетресенията следват стационарен Поасонов процес със същата средна интензивност като реалния процес. В този случай интервалите време между двойките последователни събития се разпределят експоненциално с показател средната интензивност. На Фигура 2 е показан резултатът от сравняването на реалните

честотни разпределения с моделните такива за две зони, тъй като кривите за останалите зони са подобни на дадените. Честотата на реализация на времевите интервали между последователните земетресения е разпределена, в съгласие с моделната експоненциална функция. При предположение за Поасоново разпределение на броя на събитията във времето, интервалите време между тях имат експоненциално такова. Получените резултати показват, че земетресенията в изучаваните зони са независими едно от друго и са случайно разпределени във времето. Това е в сила за избраните периоди от време и разгледаните магнитудни прагове в тези зони.

Проверката за съгласуваност между предлаганите емпирични и моделни разпределения е по χ^2 -критерия – той е приложен за съпоставяне между анализирания данни и експоненциално разпределение с показател θ_{cp} за зоната. При проверката за съгласие нивото на значимост е 5%.

Параметрите на изследваните афтершокови серии са дадени в Таблица 2. Това включва магнитуда на главния трус, продължителността на разглежданата серия, броя на събитията в нея и минималния магнитуд M_c за пълнота на каталога. В същата таблица са дадени и параметрите на апроксимиращите функции (3) и (4) заедно със стандартните им отклонения.

Кривите, които приближават наблюдаваните разпределения на разстоянията между последователните двойки, са унимодални, с изключение на тази за земетресението Landers. Афтершоковите области покриват различни по размер площи, което се вижда от диапазона на изменение на разстоянията между трусовете в сериите (Фиг. 3). Максимумите на апроксимиращите криви се разполагат на около 10-20 км във всички случаи без Landers. Качеството на апроксимациите е добро. Коефициентът на детерминация R^2 се изменя в граници от 0.84 до 0.99.

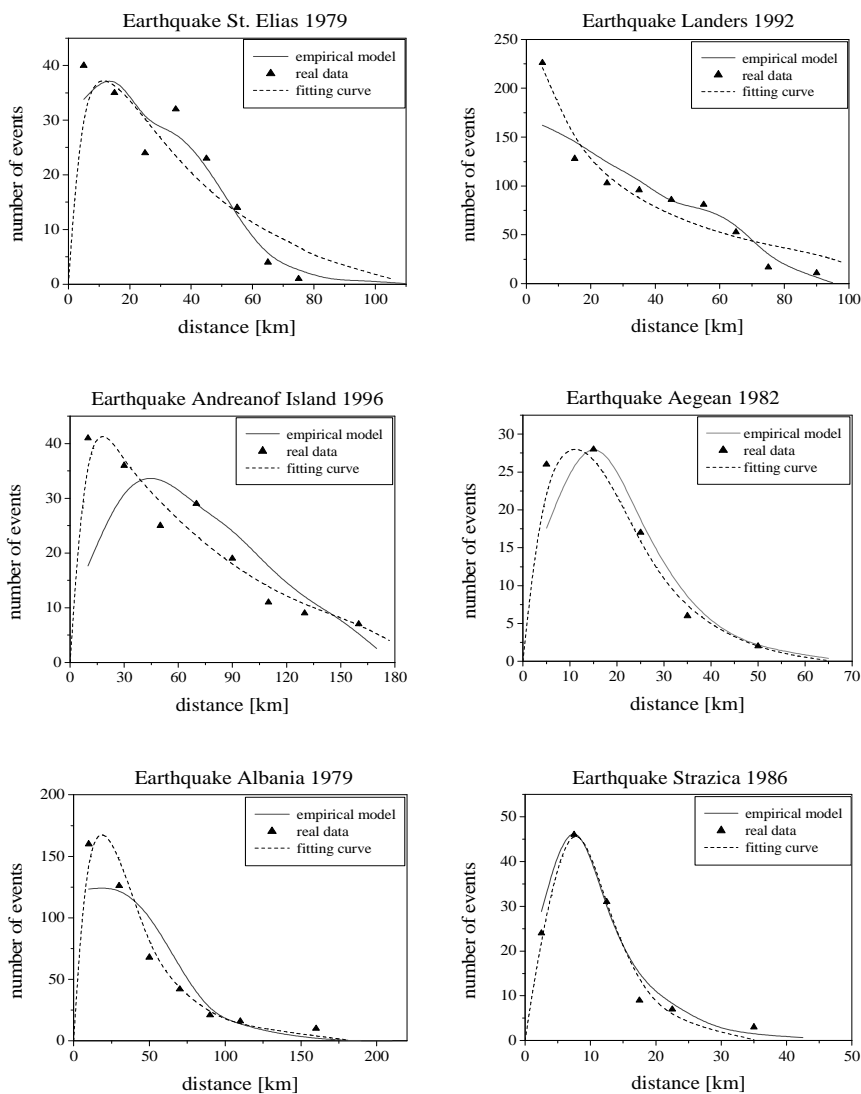
Методиката, разработена от Господинов (1999), е използвана за получаване на емпирични моделни разпределения и за сериите от афтершокови събития - аналогично на декластеризираните последователности от земетресения.

Постряването на емпиричните моделни разпределения става при начална хипотеза за независимост между последователните земетресения в разглежданите афтершокови серии (зависимост има само от главния трус). Това означава, че при различия между реалните и моделни данни, предположението за независимост няма да е изпълнено.

При част от изследваните серии се наблюдават разлики между моделните разпределения и реалните данни в диапазона на малките разстояния между трусовете. Проверката установи, че за останалите серии, без тези на земетресенията St. Elias и Стражица, разликите между реалните стойности и моделните са статистически значими (Фиг. 3). Случаите на поява на тези разлики могат да бъдат обяснени като наличие на групиране в рамките на афтершоковата редица.

Таблица 2. Параметри на апроксимиращите функции (3) и (4) за разпределения на разстоянията и интервалите време на двойките последователни събития от изследваните афтершокови серии.

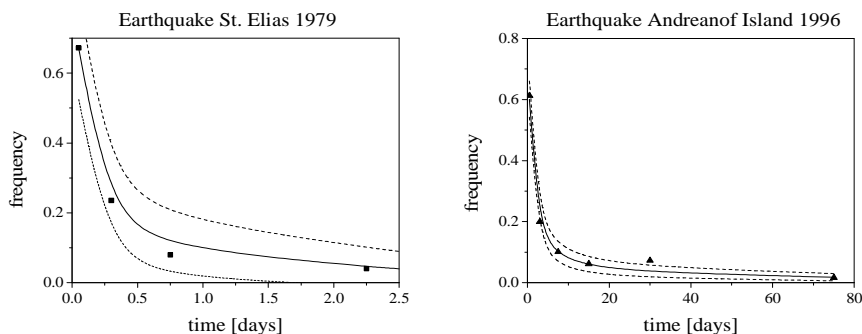
No	Земетресение, период	$M_{гп. \text{трус}}$	M_c	Брой събития	a_x	b_x	c_x	a_t	b_t	c_t
1.	St.Elias, Canada (28.02-30.03.79)	7.1	3.0	174	0.17 (± 0.09)	0.29 (± 0.30)	0.04 (± 0.02)	0.081 (± 0.26)	0.707 (± 0.111)	-
2.	Landers, California (28.06.92-31.12.93)	7.3	3.0	802	0.45 (± 0.13)	-0.25 (± 0.17)	0.01 (± 0.01)	2.40 (± 0.15)	4.21 (± 0.29)	0.007 (± 0.002)
3.	Andreanof Island '96, Alaska (10.06.96-23.12.98)	7.7	4.5	179	0.20 (± 0.07)	0.13 (± 0.16)	0.014 (± 0.004)	0.37 (± 0.02)	0.71 (± 0.06)	-
4.	Aegean '82 (18.01.82-05.04.83)	6.9	3.5	77	0.08 (± 0.03)	1.27 (± 0.30)	0.13 (± 0.02)	0.28 (± 0.02)	1.27 (± 0.08)	0.060 (± 0.006)
5.	Albania (15.04.79-10.10.79)	7.2	3.0	461	0.24 (± 0.08)	0.37 (± 0.14)	0.03 (± 0.01)	0.12 (± 0.01)	2.84 (± 0.12)	0.011 (± 0.003)
6.	Stražica, BG (07.12.86-11.05.87)	5.7	2.0	123	0.06 (± 0.02)	2.06 (± 0.28)	0.31 (± 0.04)	0.14 (± 0.03)	0.40 (± 0.08)	-



Фиг. 3. Сравнение на апроксимиращото реалните данни разпределение на разстоянията и емпиричния модел на Господинов.

Групирането на земетресенията е много важна характеристика на сеизмичния процес. Математическият израз на това представлява повишаване вероятността за ново земетресение в пространствено-времето околност на вече реализирано такова, а вероятно физическо обяснение може да бъде следното: напрежението пада по разлома, по който има приплъзвания, но се повишава в определени места в пространствената област около задвижилия се разлом, като някои от съседните разломи се поставят в условия, близки до разрушаване.

Един важен въпрос е дали появата на афтершок се влияе от реализацията на други трусове в същата редица. Разбира се, всички афтершоци са зависими от един главен трус, като в множество публикации са представени доказателства за случайна реализация на афтершоковите събития в една редица (Utsu, 1969). От друга страна, групирането в някои такива редици се свързва явно с наличието на вторични афтершокови серии.



Фиг. 4. Апроксимации на реалните разпределения на интервалите време между последователните земетресения за някои от изследваните афтершокови серии. С пунктир са дадени 90%-ните доверителни интервали за кривите.

Фактът, че разпределението на интервалите време между последователните вторични земетресения не може да се опише с експоненциално разпределение, не се дължи на липсата на случайност и зависимост между трусовете, такава като кластеризиране, както се счита от някои изследователи. Основна причина за това е, че афтершоковите редици не са стационарни, тяхната интензивност се мени във времето.

Избраната функция (4) описва добре реалните разпределения на времевите интервали между последователните двойки. На Фиг. 4 са показани само кривите за две от сериите, тъй като останалите имат същия вид. Коефициентите на детерминация R^2 се менят от 0.93 до 0.99.

Както е описано в статията на Utsu (1969), японския учен Tomoda е показал, че разпределението на времевата между последователните трусове в такива редици се дава с уравнение от вида:

$$f(\tau) = k\tau^{-q} \quad (5)$$

Тогава връзката между параметъра p от закона на Omori ($n(t) = \frac{K}{t^p}$) и q се получава във вида:

$$q = 2 - 1/p \quad (6)$$

За изучаваните афтершокови серии (Табл. 2) бяха определени параметрите p и q (този параметър в настоящото изследване е означен с b_1). Проверката показва, че

връзка от посочения вид (6) не се наблюдава. Причината за различието между изведената теоретично връзка (6) и наблюдаваните стойности на същите параметри може да бъде обяснено по следния начин.

Най-напред при описание спада на интензивността при последователности от вторични трусове в сила е модифицирания закон на *Omori* (7), т.е. константата c не е нула (както се получава при сериите от настоящото изследване).

$$n(t) = \frac{K}{(t + c)^p} \quad (7)$$

Освен това може да се счита, данните веднага след главния трус са непълни в някаква степен. При определянето на параметрите p и q се получават грешки, свързани с изчислителните процедури или качеството на използваните извадки. В много случаи периода, за който са разгледани данните, не покрива цялата продължителност на афтершоковата серия. Но важно в случая е, че предположението за взаимна независимост на афтершоците (с изключение на обичайната зависимост от главния трус), не е вярно. Вторични афтершокови редици или групиране от друг тип действително става в рамките на такива серии.

Допълнително изследване на афтершоковите серии показва, че единствено земетресението Albania, 1979 се характеризира със силна вторична серия. При останалите такива не се наблюдават. Това показва, че съществува тенденция за подгрупиране на афтершоците. Подобни свойства на земетресенията от няколко афтершокови серии, реализирани на Балканския полуостров, са описани и от Господинов (1999).

Заклучение

Предлаганата методика за изследване на разпределения на разстояния и интервали време между последователни земетресения от различни серии показва, че съществуват математически функции, подходящи за приближаване на емпиричните честотни разпределения на тези параметри. В зависимост от това дали се разглеждат последователности от декластеризирани земетръсни редици или афтершокови серии, тези функции са различни. Получените резултатите показват, че използваните апроксимиращи функции позволяват да се сравняват реалните данни и разработени при определени условия моделни разпределения. В зависимост от близостта между наблюдаваните и моделните разпределения, се правят изводи за характера на взаимовръзките между земетресенията в изследваните серии.

Благодарности. Част от направените изследвания са с финансовата подкрепа на Фонд „Научни изследвания” на ПУ „Паисий Хилендарски” - договор РС 09-Ф-11.

Литература

- Кокс Д., П. Льюис, 1969, “*Статистически анализ последователности събитий*”, 312 стр., М., Мир,
- Господинов Др., 1999, Изследване на последователности от земетресения на Балканския полуостров с цел моделиране на сеизмичния режим, Дисертация, 107 стр.
- Енева М., 1984, Оценка на пространствено-временните и енергетични характеристики на земетресенията за целите на прогностичното райониране, Дисертация, 178 стр.
- Мостеллер Ф., Дж.Тьюки, 1982, “*Анализ данных и регрессия*”, М., Финансы и статистика, вып.1, 2
- Христосков Л., М. Енева, И. Бъчваров, И. Петков, Пространствено разпределение на земетресенията в района на Балканите – разпределение на разстоянията между епицентрите, *Бълг. Геоф. Списание*, том XI, No.3, pp. 74-85
- Adams J., P. Basham, 1991, The seismicity and tectonics of eastern Canada; in Slemmons, D.B., E.R. Engdahl, M.D. Zoback, D.D. Blackwell (eds.), *Neotectonics of North America*; Boulder, Colorado, Geological Society of America, Decade Map Volume 1, pp. 261-276
- Dewey J.W., D.P. Hill, W.L. Ellsworth, E.R. Engdahl, 1989, Earthquakes, faults, and the seismotectonic framework of the contiguous United States; in Pakiser, L. C., and Mooney, W.D. (eds.), *Geophysical framework of the continental United States*; Boulder, Colorado, Geological Society of America Memoir 172, pp. 541-575
- Eneva M., G.L. Pavlis, 1988, Application of pair analysis statistics to aftershocks of Morgan Hill, California, earthquake, *J. Geophys. Res.*, vol.93, No.B8, pp. 9113-9125
- Eneva M., M.W. Hamburger, 1989, Spatial and temporal patterns of earthquake distribution in Soviet Central Asia: application of pair analysis statistics, *BSSA*, vol.79, No.4, pp. 1457-1476
- Eneva M., G.L. Pavlis, 1991, Spatial distribution of aftershocks and background seismicity in Central California, *PAGEOPH*, vol. 137, No. 1/2, pp. 35-61.
- Godano C., L. de Arcangelis, Earthquakes temporal occurrence: a statistical study, 2004, <http://arxiv.org/abs/physics/0404068>
- Gospodinov D., L. Christoskov, 1988, Model investigation of earthquake space distribution, Proceeding of the XXI General Assembly of ESC, 23-27 August, 1988, Sofia, Bulgaria, pp. 50-57
- Kagan Y., 1981, Spatial distribution of earthquakes: the three-point moment function, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 67, pp. 697-717
- Kagan Y., 1991a, Seismic moment distribution, *Geophys. J. Int.*, 106, pp. 123-134
- Kagan Y., 1991b, Likelihood analysis of earthquake catalogues, *Geophys. J. Int.*, 106, pp.135-148
- Kagan Y., 2007, Earthquake spatial distribution: correlation dimension, *Geophys. J. Int.*, 168, pp. 1175-1194
- Kagan Y., L. Knopoff, 1976, Statistical search for non-random features of the seismicity of strong earthquakes, *Phys. Earth Planet. Inter. (PEPI)*, 12, pp. 291-318
- Kagan Y., L. Knopoff, 1980, Spatial distribution of earthquakes: the two-point correlation function, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, vol.62, No.2, pp. 303-320
- Rautian T., W. Leith, 2002, Composite Regional Catalogs of Earthquakes in the Former Soviet Union, *Open File Report 02-500*, Dept. of Interior, USGS, pp.53
- Reasenberг P., 1985, “Second-order moment of Central California seismicity, 1969-1982”, *J. Geophys. Res.*, 90, pp. 5479-5495
- Rogers G.C., R.B. Horner, 1991, An overview of western Canadian seismicity; in Slemmons, D.B., E.R. Engdahl, M.D. Zoback, D.D. Blackwell (eds.), *Neotectonics of North America*; Boulder, Colorado, Geological Society of America, Decade Map Volume 1, pp. 69-244

- Shlien S., N. Tokoz, 1970, A clustering model for earthquake occurrences, *BSSA*, vol.60, No.6, pp. 1765-1787
- Utsu, T., 1969, Aftershocks and Earthquake Statistics, *J. of the Faculty of Science*, Hokkaido University, Japan, Ser. VII, Vol. III, No.3, pp. 129-193.
- Vere-Jones D., 1978, Earthquake prediction - a statistician's view, *J. Phys. Earth.*, 26, pp. 129-146
- Wiemer, S., 2001, A software package to analyze seismicity: Zmap, *Seism. Res. Let.*, 72(2), pp. 373-382, http://seismo.ethz.ch/staff/stefan/IntrotoZMAP6_online.htm

Statistical modeling of space-time distribution for earthquakes in various seismic regions

E. Marekova

Abstract. Two different cases of declustered series of earthquakes from six different seismic regions and aftershock series of several strong contemporary earthquakes were investigated. The main aim of the research was to describe by means of mathematical functions the distances and time intervals distributions between the subsequent pairs of events. The mathematical models were compared with other model distributions, derived at defined initial conditions. Based on the comparison between the observed and model distributions of the series of declustered events, a conclusion may be made that the examined earthquakes series are independent. Analogous investigation of the aftershock series show the events clustering in the frames of certain investigated sequences