

Статистическо изследване за последователни силни земетресения в част от Източното Средиземноморие и Калифорния

Елисавета Ракова, Бойко Рангелов

Геофизичен институт БАН

Въведение

Идеите за дискретност на сеизмичните явления и процеси и опитите за тяхното количествено описание навлизат все по-широко и постепенно се утвърждават като едно от модерните направления на научно изследване в областта на сеизмологията [1, 2, 3].

Изследването на параметрите на статистическите разпределения за различни по сеизмогенезис райони може да подпомогне разделянето на тези райони чрез въвеждане на статистически характеристични критерии или да потвърди подобие на сеизмичния процес в различните региони, ако подобно разделяне е невъзможно. Това зависи от множество фактори, като: специфика в тектонската обстановка, различна форма на сеизмоактивните зони, различно разпределение в пространството на напреженията, контролиращи сеизмогенерационния процес, и много други фактори, повечето от които са неизмерими *in situ*. Поради това подобен емпиричен подход като предлагания тук считаме за достатъчно обосноваван, още повече, че отсъствуват еднозначни критерии за подобно разделяне. Досегашният ни опит при достатъчно по количество статистически данни показва, че получаваните резултати са достатъчно надеждни [12].

Основната цел на настоящата работа е аналитичното описание на статистическите разпределения на интервалите от време ($\Delta t = t_{i+1} - t_i$) и разстояния (Δx) между всеки две последователни земетресения за три различни района от Земята, притежаващи висока сеизмична активност — ЮИ Турция, Хеленидската дъга (Средиземноморски район) и Калифорния, за които разполагаме с каталози на силните земетресения, станали през последните няколко века. Тези характеристики дават основание да се получат достатъчно представителни резултати за емпирично описание на динамиката на дискретния сеизмичен процес.

Изборът на тези зони е предопределен освен от достъпната информация също и от относително различното геодинамично пространство, в което те се намират.

Методика на изследването

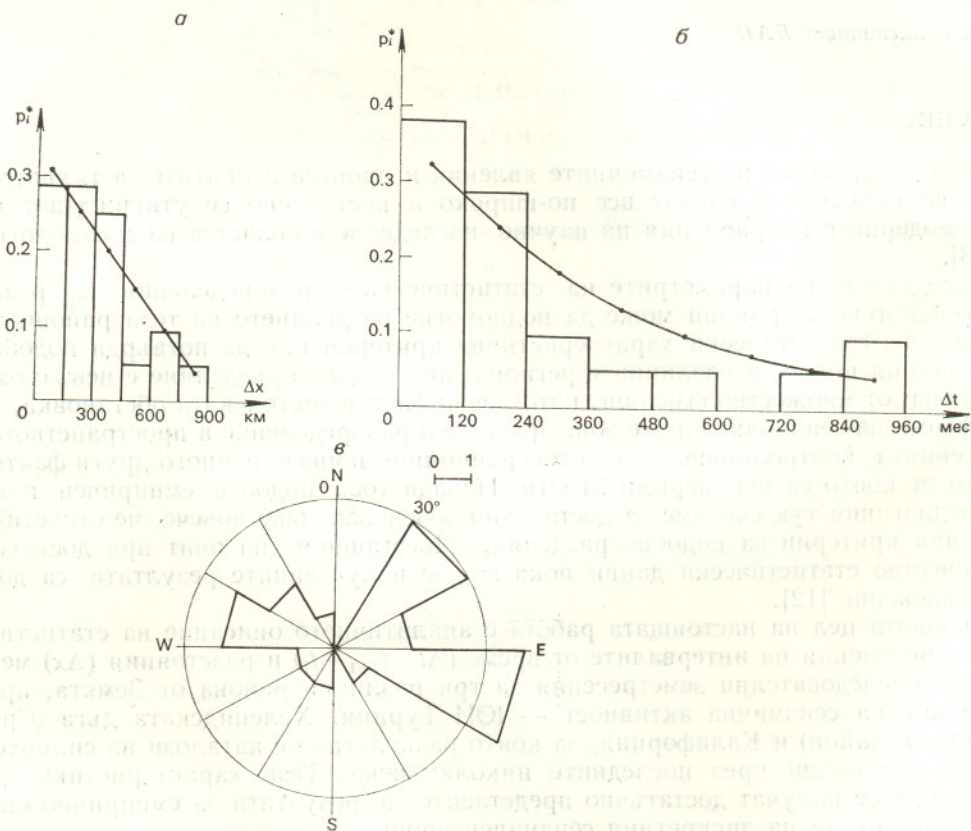
В съответствие с поставената цел е използвана следната методика за обработка на изходните данни. С помощта на програма за персонален компютър са изчислени разстоянията между епицентрите, разликите във времето на ставане и азимутите на лъчите за всяка двойка последователни събития.

С данните, получени от първичната обработка, са построени съответните хистограми на разпределенията по разстояние и по време, съответно в км и в месеци. Стойностите на относителните честоти p_i^* са изчислени от $p_i^* = N_i/N$, където N_i е броят на стойностите в i -тия интервал на групиране, а N е общият брой използвани стойности. Изчислени са и статистическите характеристики: \bar{x} — средна стойност, $\overline{S^2}$ — дисперсия, \overline{S} — средноквадратично отклонение, $V = \overline{S}/\bar{x}$ — коефициент на вариация, \tilde{A} — асиметрия, \tilde{E} — ексцес.

Изборът на хистограмен интервал е направен по правилото на Стържис [8], което има вида

$$\delta x = (\Delta x_{\max} - \Delta x_{\min}) / (1 + 3,321 \lg N).$$

Получените резултати са представени в табл. 1. Приетите хистограмен интервали $\Delta \tilde{x}$ и $\Delta \tilde{t}$ са избрани такива и от съображение за удобство и съпоставимост на резултатите.



Фиг. 1. Хистограми и апроксимиращи криви на разпределенията по разстояния (а) и интервали от време (б) между двойките последователни земетресения, роза-диаграма на азимутите на лъчите (в) за ЮИ Турция

Таблица 1

Данни за максималната стойност, минималната стойност, интервал на групиране по Стържис и избран интервал за хистограмите на разпределенията по разстояние и по време на разглежданите райони

| Район | N | Δx_{\max} [км] | Δx_{\min} [км] | δx [км] | Δt_{\max} [мес] | Δt_{\min} [мес] | δt [мес] | $\Delta \tilde{a}$ [км] | $\Delta \tilde{t}$ [мес] |
|--------------------|-----|---------------------------|---------------------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------------|
| ЮИ Турция | 21 | 766 | 29 | 137 | 900 | 12 | 165 | 150 | 120 |
| Хеленидска дъга | | | | | | | | | |
| общо | 35 | 742 | 22 | 117 | 255 | 2 дни | 41,6 | 150 | 36 |
| (n) | 24 | 609 | 14 | 107 | 310 | 4 | 54,8 | 100 | 72 |
| ($n^+ + i$) | 10 | 410 | 22 | 90 | 290 | 33 | 59,5 | 100 | 72 |
| Калифорния | 41 | 756 | 48 | 111 | 111 | 16 дни | 17,5 | 150 | 24 |

Специално внимание е отделено на апроксимирането на получените емпирични разпределения с аналитични такива. Поради силно асиметричния характер на получените хистограми и очевидно големия им ексцес, базирайки се на факти, установени и от други изследователи [8], и на резултати, получени от подобни наши изследвания върху друг район, е изпробвано β -разпределение по отношение на интервалите от разстояния и експоненциално разпределение по отношение на интервалите от време.

За апроксимация на разпределенията по разстояния са използвани методите на нелинейното програмиране. Приложен е т. нар. симплекс-метод, който подбира параметрите на аналитичната функция по емпиричните данни, минимизирайки подходящо зададена целева функция. Методът е реализиран програмно — програма SIMPLEX на FORTRAN [9].

Общият вид на β -разпределението е

$$f(x) = \frac{\Gamma(p) \cdot \Gamma(q)}{\Gamma(p+q)} \cdot x^{p-1} \cdot (1-x)^{q-1}.$$

След нормировка и въвеждане на коефициент c_x , отразяващ поведението на гама-функцията, плътността на разпределението добива вида

$$f(x) = c_x \cdot x^{p-1} \cdot (1-x)^{q-1}.$$

За най-точното описание на емпиричното разпределение е необходима минимизация, т. е.

$$F = \sum_{i=1}^k [f(\tilde{x}_i) - p_i^*]^2 = \min,$$

\tilde{x}_i е средната точка на i -тия интервал от групирането в хистограмата,

p_i^* — относителната честота, приписана на същата точка,

$f(\tilde{x}_i)$ — стойността на избраната аналитична функция.

Разбира се, необходима е и нормировка по променливата \tilde{x}_i .

Аналогична процедура е използвана и при апроксимирането на хистограмите за временните интервали, като е използвана за аналитична функция експонента от вида

$$f(t) = c_t - \theta \cdot \exp(-\theta \cdot t).$$

И тук смисълът на коефициента c_t е такъв, че площта под аналитичната крива да е

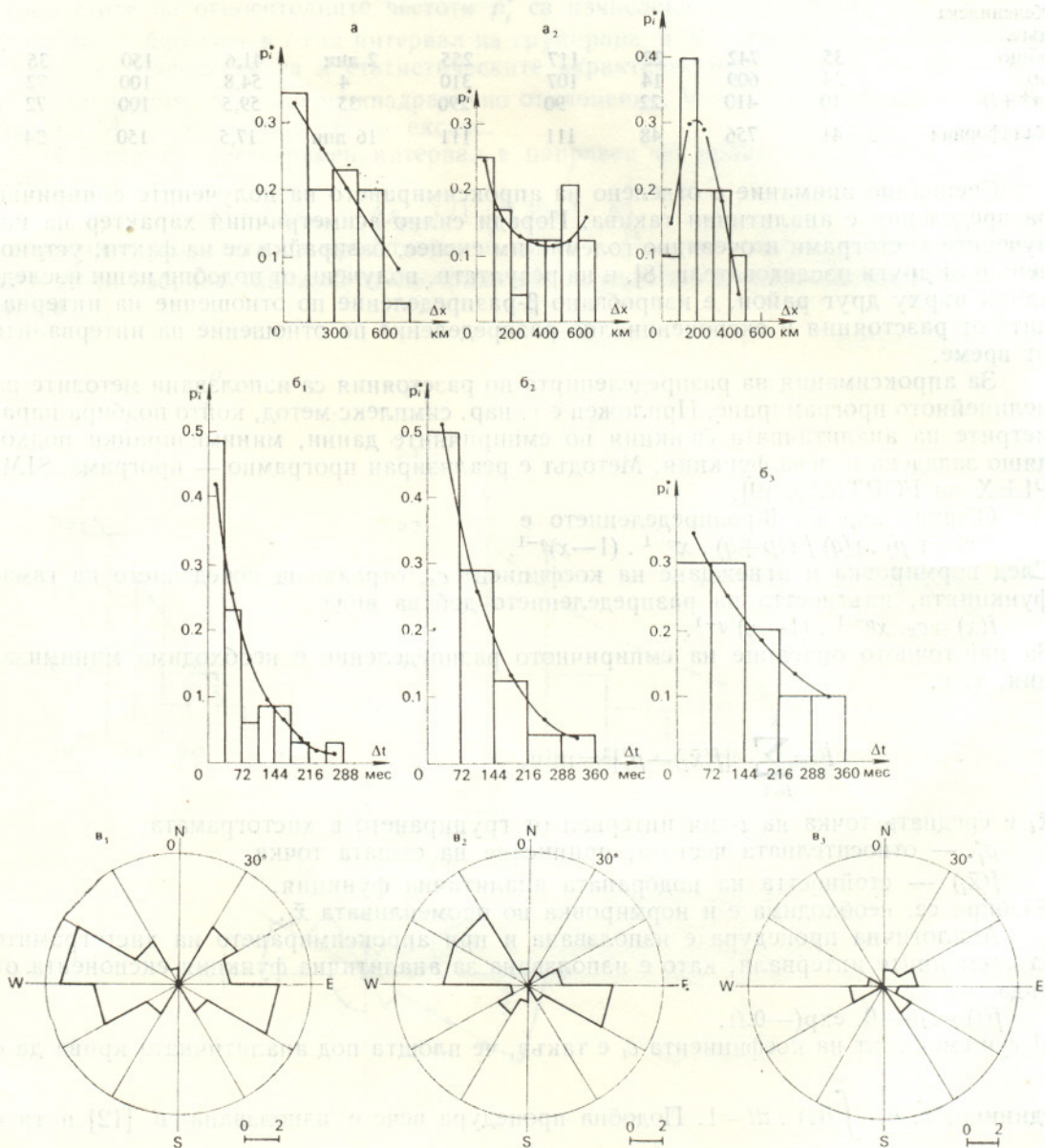
единица, т. е. $\int_0^{\infty} f(t) \cdot dt = 1$. Подобна процедура вече е използвана в [12] и тя е

показала своята ефективност.

След определяне параметрите на съответните аналитични разпределения, описващи най-добре емпиричните хистограми, е направена статистическа проверка на

хипотезата, че емпиричното разпределение се описва с необходимата достоверност от получената теоретична функция. За целта е приложен χ^2 -критерий при ниво на достоверност 95%.

Анализът на емпиричните хистограми и техните аналитични апроксимации показва, че средната грешка от приближенията не превишава 10%, въпреки че в отделни случаи на фиксиран хистограмен интервал по разстояние достига 15—18% (например фиг. 2 а₃, 3 а).



Фиг. 2. Хистограми и апроксимиращи криви на разпределенията по разстояния (а), по време (б), роза-диаграма на лъчите (в) за Хеленидската дъга, както следва: 1 — за събитията общо — а₁, б₁, в₁; 2 — за събитията от тип (n) — а₂, б₂, в₂; 3 — за събитията от тип (n+i) — а₃, б₃, в₃

Особено внимание е отделено на получените от малки обеми статистически извадки. Подобно на описаните в [13] резултати и тук се наблюдават по-високи от очакваните стойности за събития, намиращи се на по-малки разстояния Δx . Въпреки техния малък брой смятаме тези данни за относително надеждни, понеже потвърждават теоретично изведените зависимости в [13].

Проведените числени експерименти за статистически представителни извадки от случайно разпределени точки, имитиращи разпределения на епицентри, дават основание да бъде отчетено влиянието на геометрията на изследваните зони, която също не превишава 10%.

Исходни данни и получени резултати

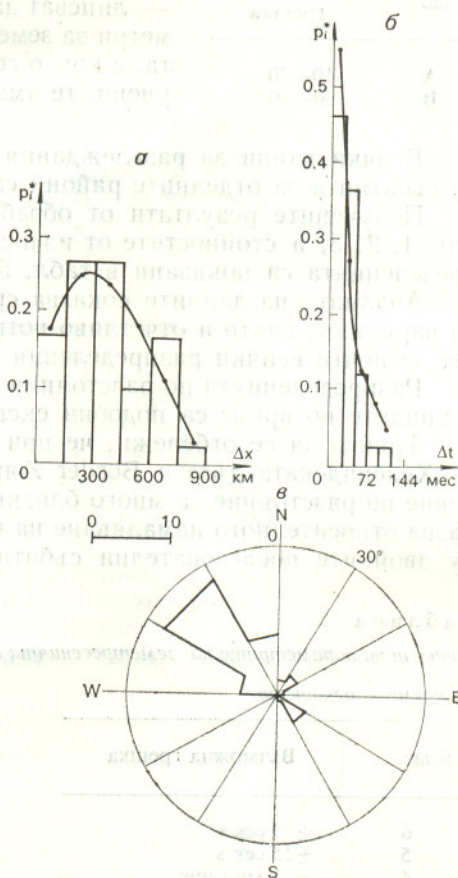
Исходните данни за различните сеизмоактивни области са подбрани така, че да съдържат съизмерим брой събития със съизмерима точност на определените параметри.

Разгледаният район от ЮИ Турция представлява дъговидна област, известна под името Border Zone, дълга около 1000 km и средно широка 150 km. Западната половина на областта обхваща Източноанатолийската разломна зона, а източната половина на the Feld and Thrust zone, които се простират южно от езерото Van. Border Zone променя своя характер от преобладаваща граница на отместване по простирание (strike-slip), на запад, към широка зона на свиване, на изток.

Избраният за изследване период 1500 — 1988 г. е с цел да обхване главно силните земетресения, които са не само най-значителни тектонски, но и са също по-малко вероятно пропуснати от историческите сведения. Използваният каталог включва 23 събития с магнитуд $M_s \geq 6,6$ [4].

Другият разгледан район — това е Хеленидската дъга. Използвана е таблица от всички земетресения ($M \geq 6,5$) за последните две столетия — т. е. за периода 1780—1960 г. — това са 39 събития [5]. Хеленидската дъга се характеризира като зона на активна съвременна субдукция.

И накрая разгледани са историческите земетресения с магнитуд $M \geq 6,0$ в Калифорния за периода 1800 — 1987 г. — това са 71 събития, така както са описани в [6]. Сеизмотектониката на Калифорния се определя от разлома Сан Андреас и по-малко простиратата се система на разлома Сиера Невада. Системата на Сан Андреас, между тройния възел Mendocino и северния край на Източнотихоокеанския хребет в залива Калифорния, е основната част на сложен трансформен разлом, който разделя Тихоокеанската и Северноамериканската плочи, движещи се дясностранно една спрямо друга със средна скорост около 5 cm/г. Земетресенията в Калифорния обикновено се случват на относително малка дълбочина (около 15 km) [6].



Фиг. 3. Хистограми и апроксимиращи криви на разпределенията по разстояния (а), интервали от време (б) и роза-диаграма на лъчите (в) за двойките последователни събития за Калифорния

Таблица 2

Точност на епицентралните координати за земетресенията от ЮИ Турция

| Клас | Възможна грешка |
|------|-----------------|
| A | 10—40 |
| B | 50—90 |

Точностите при определяне параметрите на земетресенията са, както следва [4, 11, 6]:

- за района на ЮИ Турция — епицентрални координати — табл. 2;
- за Хеленидската дъга — време в огнището (табл. 3а) и епицентрални координати (табл. 3б);
- липсват данни за изходната точност на определените параметри за земетресенията в Калифорния, но според сведенията, с които се разполага за изследванията на американските учени, те имат същия порядък.

Всички данни за разглеждания период от време, магнитудния интервал, броя на събитията за отделните райони са поместени в табл. 4.

Получените резултати от обработката на изходните данни са представени на фиг. 1, 2, 3, а стойностите от изчисленията на статистиките и параметрите на разпределенията са показани в табл. 5, 6, 7.

Анализът на данните показва сравнително високи стойности на коефициентите на вариация, както и отчетливо потвърждава високите степени на асиметрия и ексцес за почти всички разпределения (табл. 5).

Разпределенията по разстояния имат различно поведение за различните райони, а кривите по време са подобни експоненти.

Трябва да се отбележи, че при двете дъговидни области, които са разгледани — Хеленидската дъга и Border Zone, параметрите на апроксимиращото разпределение по разстояние са много близки, а самата крива е с обратен наклон, което показва относителното намаляване на честотата на поява на големите разстояния между двойките последователни събития.

Таблица 3

Точност на параметрите на земетресенията от района на Хеленидската дъга

а) време в огнището

| Клас | Възможна грешка |
|------|------------------|
| 6 | ± 5 сек s |
| 5 | ± 15 сек s |
| 4 | ± 1 мин min |
| 3 | ± 4 мин min |
| 2 | ± 15 мин min |
| 1 | ± 1 ч h |
| 0 | ± 1 ден |

б) епицентрални координати

| Клас | Възможна грешка |
|------|-----------------|
| 3 | 0,1 (10 km) |
| 2 | 0,3 (30 km) |
| 1 | 1 (100 km) |

Таблица 4

Данни за разглеждания период от време, магнитудния интервал, броя на събитията за отделните райони

| Район | Период | Магнитуден интервал | Брой събития | След отстраняване на афтершоци |
|-----------------------------------|-----------|---------------------|--------------|--------------------------------|
| ЮИ Турция | 1500—1988 | [6,6, 7,4] | 23 | 22 |
| Хеленидска дъга | 1780—1960 | [6, 3, 7,5] | 39 | 36 |
| общо | | | | 25 |
| n ($n^+ + i$) | | | | 11 |
| Калифорния; миграционни редици | 1800—1987 | [6,0, 7,2] | 71 | 42 |

Таблица 5

Данни за статистическите характеристики на емпиричните извадки от разстояния и интервали от време за последователните двойки земетресения за всеки от разглежданите райони

| Статистики Район | По разстояния | | | | | По време | | | | |
|----------------------|---------------|-------------|-------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------|-------------|-------------|
| | \bar{x} | \bar{S}_x | V_x | \hat{A}_x | \hat{E}_x | \bar{t} | \bar{S}_t | V_t | \hat{A}_t | \hat{E}_t |
| ЮИ Турция | 304 | 221 | 0,7 | 0,86 | -0,1 | 291,6 | 281 | 0,96 | 1,1 | 0,02 |
| Хеленидска дъга | | | | | | | | | | |
| общо | 281 | 185 | 0,7 | 0,30 | -1,2 | 63,7 | 63 | 0,98 | 1,5 | 1,8 |
| (n) | 344 | 229 | 0,7 | -0,18 | -1,6 | 96,2 | 79 | 0,80 | 1,4 | 1,3 |
| (n ⁺ + i) | 230 | 123 | 0,5 | 0,40 | -0,9 | 136,8 | 97 | 0,70 | 0,7 | -0,6 |
| Калифорния | 360 | 212 | 0,6 | 0,38 | -0,9 | 30,7 | 22 | 0,70 | 1,4 | 2,01 |

Таблица 6

Параметри на апроксимиращите функции на разпределенията по разстояние и време

| Параметри Район | По разстояния | | | По време | |
|----------------------|---------------|------|------|----------|-----|
| | p | q | Sx | θ | Ct |
| ЮИ Турция | 0,98 | 1,86 | 0,31 | 0,0025 | 152 |
| Хеленидска дъга | | | | | |
| общо | 0,90 | 1,56 | 0,28 | 0,0139 | 39 |
| (n) | 0,054 | 0,71 | 0,07 | 0,0095 | 77 |
| (n ⁺ + i) | 1,97 | 2,54 | 1,66 | 0,0043 | 93 |
| Калифорния | 1,52 | 2,27 | 0,74 | 0,0300 | 26 |

Таблица 7

Апроксимиращи функции за разпределенията по разстояние и време

| Функция Район | По разстояние | По време |
|----------------------|---|---|
| ЮИ Турция | $f(x) = 0,31 \cdot x^{0,02} \cdot (1-x)^{0,86}$ | $f(t) = 152 \cdot 0,0025 \cdot e^{-0,0025 \cdot t}$ |
| Хеленидска дъга | | |
| общо | $f(x) = 0,28 \cdot x^{0,1} \cdot (1-x)^{0,56}$ | $f(t) = 39 \cdot 0,0139 \cdot e^{-0,0139 \cdot t}$ |
| (n) | $f(x) = 0,07 \cdot x^{-0,946} \cdot (1-x)^{0,29}$ | $f(t) = 77 \cdot 0,0095 \cdot e^{-0,0095 \cdot t}$ |
| (n ⁺ + i) | $f(x) = 1,66 \cdot x^{0,97} \cdot (1-x)^{1,54}$ | $f(t) = 93 \cdot 0,0043 \cdot e^{-0,0043 \cdot t}$ |
| Калифорния | $f(x) = 0,74 \cdot x^{0,52} \cdot (1-x)^{1,27}$ | $f(t) = 26 \cdot 0,0300 \cdot e^{-0,0300 \cdot t}$ |

За района на Хеленидската дъга освен общото разглеждане е направено допълнително сортиране на събитията по дълбочина, както следва:

- а) всички събития, чиито фокуси са до 60 km (маркирани са със символа n);
 б) всички събития, чиито дълбочини на фокуса са в интервала от 60 до 100 km (маркирани като n⁺) заедно с тези, които са станали на дълбочина, по-голяма от 100 km (i) [5].

Тези две разпределения по разстояния между двойките последователни събития се различават съществено. Разпределението за събитията от типа (n) е U-видно, докато това за (n⁺ + i) е унимодално.

За другия изследван район — Калифорния, разпределението на разстоянията между двойките е унимодално. Трябва да се отбележи, че при разглеждането на сил-

ните събития в Калифорния сме използвали само миграционните редици от последователни земетресения, така както те са обособени в [6].

Параметрите на разпределенията на интервалите от време между двойките земетресения се изменят в относително широки граници, тъй като и периодите, които обхващат разглежданите събития са различни.

Изводи

Сравнително ограничените от статистическа гледна точка изходни данни не дават основание за категорични изводи относно различния характер на сеизмичния процес в разглежданите сеизмични зони.

Независимо от това се набелязват тенденции основно в параметрите на апроксимиращите функции на статистическите разпределения, които показват, че различия в поведението на последователните двойки земетресения за различните геодинамични области съществуват. Логично е да се предположи, че тези различия се дължат на различните геотектонски условия, доминиращи в различните зони.

Необходимо е включването и на други сеизмоактивни зони с подобно поведение на сеизмогенерационния процес за потвърждаване или отхвърляне на получените вече емпирични закономерности.

Литература

1. Садовский, М. А., В. Ф. Писаренко. Сейсмический процесс в блоковой среде. М., Наука, 1991.
2. Садовский, М. А., Л. Г. Болховитинов, В. Ф. Писаренко. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М., Наука, 1987.
3. Дискретные свойства геофизической среды. Сборник научных трудов. М., Наука, 1989.
4. Ambroseys, N. N. Temporary seismic quiescences: SE Turkey. — *Geophys. J.*, **96**, 1989, 311-333.
5. Ambroseys, N. N. On the long term seismicity of the Hellenic arc. — *Boll. di Geof. Teor. Appl.*, **XXIII**, 1981, No 92.
6. King, Chi-Yu, Z. Ma. Migration of historical earthquakes in California. — *PAGEOPH.*, vol. **127**, 1988, No 4.
7. Львовский, Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М., Высшая школа, 1982.
8. Енева, М. Оценка на пространствено-временните и енергетични характеристики на земетресенията за целите на прогностичното райониране. Дисертация. 1984.
9. Химмельблау, Н. Прикладное нелинейное программирование. М., Мир, 1975.
10. Мостелер, Ф., Дж. Тьюки. Анализ данных и регрессия. М., Финансы и статистика, 1982.
11. Catalogue of Earthquakes — UNDP/UNESCO survey of the seismicity of the Balkan region, 1974.
12. Rangelov, B., E. Rakova. Statistical investigation of the seismic process along the San Andreas Fault. — *Bulg. Geoph. J.*, **XVIII**, 1992, No 1.
13. Gospodinov, D., L. Christosov. Model investigation of earthquake space distribution. — In: *Proc. XXII Gen. Ass. ESC, Barcelona, 17-22 Sept., 1990.*