

## Използване на сеизмичната кода за изучаване свойствата на средата в Централните Балкани

*Николай Т. Доцев*

*Геофизически институт, БАН, София*

*Виталий И. Халтурин*

*Институт физики Земли АН СССР*

### Въведение

Изучаването на кода-вълните в сеизмологията възниква във връзка с три проблема: магнитудна класификация на земетресенията, детайлно изучаване на средата и интерпретация на лунни сеизмограми. Основната методика за обработка на кода-вълните и интерпретацията на получените резултати са описани в монографията на Т. Г. Раутиан, В. И. Халтурин и др. [1981]. На базата на тази методика са проведени редица изследвания в различни региони на земното кълбо — Куба, Камчатка, Северен Тянь Шан, Средна Азия, Крим, Карпати, Кавказ и др. Тази методика е приложена и за изучаване на кода-вълните за централната част на Балканския регион [2, 8, 9].

Дадената работа се явява продължение на цикъла изследвания на кода-вълните за земетресенията от централната част на Балканския регион [2, 8, 9]. Целта на изследването е да се получат обобщените обвивки на кода-вълните и стойности за  $Q$ -фактора на средата под Централните Балкани; изучаване затихването на амплитудите на обемните  $P_{\max}$ ,  $S_{\max}$  и повърхностната Релеевска  $R_{\max}$  вълни чрез сравнението им с кода-вълните за Централните Балкани като цяло; качествена оценка на сеизмичната мътност по превишението на максималните амплитуди на обемните  $S_{\max}$  и повърхностната Релеевска вълни над кода-вълните.

### Методика на изследване

Методиката на изследване на кода-вълните е взаимствувана от работите [3, 4]. Ще се спрем на основните постановки в нея.

1. Средата се разглежда като преобразовател, характеристиките на който не са известни и подлежат на изучаване посредством наблюденията. Сигналът, излъ-

чен в огнището  $\Phi(t)$ , се разглежда като входен, а сеизмограмата  $F(t)$  — като изходен сигнал от този преобразовател.

2. Сеизмограмата се разделя на три участъка:

- а) преки вълни ( $P$  или  $S$ );
- б) опашка на записа или кода;
- в) промеждутъчен участък (между пряката вълна  $P$  и  $S$ -встъпването на  $S$ -вълната и между пряката вълна  $S$  и кода-вълната)

3. Както е показано в [3], спектралната амплитуда на кодата се описва с израза:

$$A(f_k/t) = \Phi_0(f_k) C(f_k) G(f_k/t),$$

където  $\Phi_0(f_k)$  е интегрална величина, описваща интензивността на кодата;  $C(f_k)$  — честотна характеристика, описваща станционните условия;  $G(f_k/t)$  — функция, описваща честотно-временното поле, реагиращо на средата в пределите на кодата. Тази функция е практически еднаква за всички земетресения, реализирани в голям район, свързана е с физическия механизъм на формиране на кодите и в рамките на този механизъм се определят числените значения на такива параметри на средата като качествено  $Q$  и разсейване  $\alpha$ . И двата параметъра зависят от честотата.

4. Разглеждат се следните модели за формиране на кода-вълните:

А. Еднократно разсейване — разглеждат се три възможни варианта:

а) разсейват се повърхностните вълни, разсейвателите са разположени на повърхността на земята:

$$G_a(f, t) \sim \sqrt{2\pi\alpha(f)} t^{-0.5} \exp(-\pi ft/Q);$$

б) разсейват се обемни вълни, нееднородностите са разпределени в обема на средата:

$$G_b(f, t) \sim \sqrt{(8\pi/v)\alpha(f)} t^{-1.0} \exp(-\pi ft/Q);$$

в) разсейват се обемни вълни, източниците на разсейване лежат на повърхността на земята:

$$G_c(f, t) \sim \sqrt{(8\pi/v^2)\alpha(f)}.$$

Б. Дифузионният модел разглежда процеса на образуване на кодите като дифузия на сеизмичната енергия  $E$  от мигновен точков източник с единична енергия на излъчване при условие, че разстоянието между огнището и станцията може да се пренебрегне в сравнение с пробегата на разсеяните вълни:

$$G(f, t) \simeq \sqrt{\frac{2}{v}} a t^{-v/4} \exp(-\pi ft/Q).$$

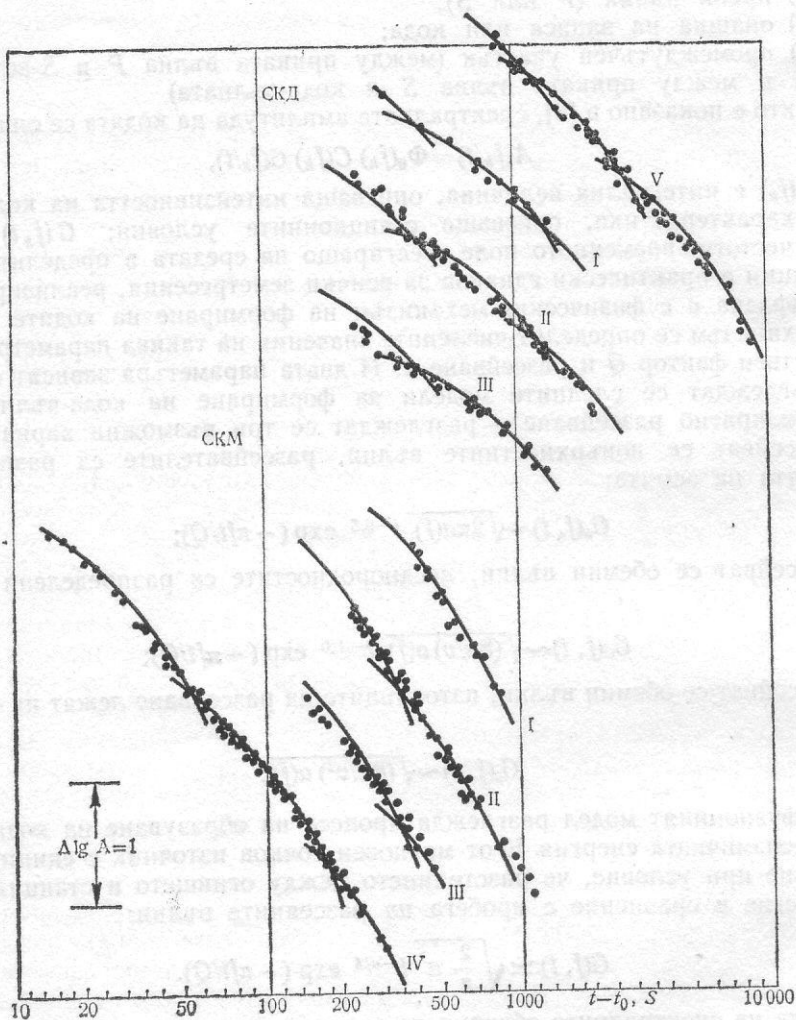
Формата на спектралните обвивки на реакцията на средата на участъка на кодата може малко да се различава в зависимост от това, кой от моделите на разсейване се осъществява. Възможно е разсейването в различните райони или при различни времена да става съгласно различните модели. Например при сравнително малки значения на времената, разсейването е близко до еднократното, а при големи  $t$ , когато  $tv \gg 1$ , се осъществява дифузионно разсейване. Ето защо решението на въпроса, кой модел има място при определянето на параметрите  $a(f)$  и  $Q(f)$  в рамките на тези модели, изисква достатъчно тънък анализ на наблюдаваните  $G(f, t)$ .

Определянето на  $Q$ -фактора се извършва с помощта на палетка, предложена от Т. Г. Раутиан в 1976 г. Тази номограма представлява фамилия криви от вида

$$A(t) = t^{-v} \exp(-\pi t/TQ),$$

където  $t$  е текущо време [s];  $T$  — период [s];  $v$  — показател на разхождане, имащ стойности, равни на 0,5; 0,75; 1,0 съответно за приет модел на разсейване на повърхностни вълни, смесен модел и обемни вълни.

На номограмата с вертикална линия със стрелка е отбелязана тази обриса, при която значението на разчетната крива  $A(t)$  е равно на  $t^{-\nu} \exp(-\pi)$ . Това значение съответствува на момента на времето  $t=QT$ .



Фиг. 1. Съпоставяне на графиките за обвивките на кода-вълните за земетресения от четирите зони (I — Турция, II — Гърция и Егейско море, III — Югославия и Албания, IV — България), записани на сеизмограф СКМ и сеизмограф СКД (V — далечни земетресения). С плътна линия са показани обединените обвивки на кода-вълните за земетресения от Централната част на Балканите за сеизмограф СКМ и обединените обвивки на кода-вълните за земетресения от централната част на Балканите и далечни земетресения за сеизмограф СКД

Техниката за определяне на  $Q$ -фактора [4] е следната: Наблюдаваната крива се съпоставя до възможно най-пълно съвпадение с теоретичната крива при избрано от най-общи съображения значение  $\nu$ . При това е необходимо да се спази успоредност на координатните оси на двете графики. След достигане на най-добро съвпаде-

ние, по оста на времето на експерименталната обвивка се определя това значение на времето  $t^{\downarrow}$ , указано с вертикална линия със стрелка, проведена на палетката. Тъй като в тази точка аргументът на експонентата е равен на  $(-\pi)$ , то значението  $t^{\downarrow}$  ще бъде равно на  $TQ$ . При известно значение на  $TQ$ , знаейки средния период, за който е получена наблюдаваната крива, можем да определим  $Q$ . При това съществува известна нееднозначност при избора на една от разчетните криви, т. е. при избора на едно от значенията  $v$ .

Следвайки монографията [4], практически не трябва да се определят двата параметъра на кривата  $v$  и  $Q$ , основавайки се само на съпоставянето на теоретичната и наблюдаваната крива. Нужни са някои допълнителни съображения, позволяващи избирането на модел, т. е. кои от обемните и повърхностните вълни за формирането на коя част от кода-вълните съответствуват. Важно е да се отбележи, че на големи времена малко се изменя  $Q$  при варирането на  $v$  в разумни граници.

Методиката на изучаване затихването на максималните амплитуди на сеизмичните вълни  $P_{\max}$ ,  $S_{\max}$  и  $R_{\max}$ , опирайки се на кода-вълните, е описана в монографията [4]. На практика се измерват максималните амплитуди на обемните  $P_{\max}$  и  $S_{\max}$  и повърхностната  $R_{\max}$  вълни и максималните амплитуди в отделните вълнови пакети, формиращи кода-вълните. Едновременно се измерват и моментите на встъпване на тези амплитуди относно времето в огнището. Получените амплитуди на обвивките на кода-вълните се осредняват от обобщената обвивка на кода-вълните за даден район. След това се определя нивото на тези обвивки при фиксирано време. Провежда се нормировка към това ниво. След това в двоен логаритмичен мащаб се строи график на зависимостта на нормираните амплитуди от епицентралното разстояние. Нормираните амплитуди не зависят от магнитудата, а от разстоянието. Разсейването на точките от графика  $a(\Delta)$  се определя само от влиянието на направиленето на излъчване в огнището. В резултат се получава затихване на максималните амплитуди на обемните  $P_{\max}$ ,  $S_{\max}$  и повърхностната  $R_{\max}$  вълни за даден регион като цяло или по профили.

Методиката за оценка на мътността на средата по превишението на амплитудите на сеизмичните  $S_{\max}$  и  $R_{\max}$  вълни над кода-вълните [4] се състои в следното:

Построяват се обвивките на кода-вълните за всяко събитие в двоен логаритмичен мащаб, като същевременно на графика се нанасят точките, съответстващи на  $S_{\max}$  и  $R_{\max}$  (в зависимост от това на какъв сеизмограф са записът СКМ или СКД) и шлейфът. Получените по такъв начин графики се съпоставят с получената обединена обвивка (съответно за СКМ и СКД) на кода-вълните при фиксирано време (съответно 100 s и 1000 s за СКМ и СКД). На графика с обединените обвивки на кода-вълните се отбелязват  $S_{\max}$  и шлейфът за сеизмограф СКМ или  $R_{\max}$  и шлейфът за сеизмограф СКД. По превишението на  $S_{\max}$  и  $R_{\max}$  над кода-вълните се прави оценка за мътността на средата. При среда с понижена мътност се наблюдават високи стойности на отношението  $A_s/A_c$  и бързо спадащ шлейф, а при среда с повишена мътност се наблюдават ниски стойности на отношението  $A_s/A_c$  и бавно спадащ шлейф.

## Исходни данни

За получаване на окончателните обвивки на кода-вълните за Централните Балкани и определяне на  $Q$ -фактора са използвани 60 земетресения, реализирани в следните региони: Централни Балкани (България, Румъния, Югославия, Албания, Гърция, Турция), Италия, Африка, Иран, Хиндукуш, Туркменска ССР, Узбекска ССР, Таджикска ССР, Афганистан, Арабско и Средиземно море, Северен Атлантически океан с магнитуден интервал 1,8—7,1, епицентрални разстояния 15—6000 km [2, 8, 9].

За изучаване на затихването на максималните амплитуди на обемните сеизмични вълни посредством кода-вълните са използвани 40—45 земетресения от Централните Балкани с магнитуден диапазон 1,8—5,7 и епицентрално разстояние 22—500 km [9]. За изучаване на затихването на максималните амплитуди на повърхностната вълна на Релей са използвани 31 земетресения с магнитуден интервал 4,0—7,1 и епицентрални разстояния 170—8000 km [8, 9].

За оценка на мътността на средата по превишенията на сеизмичните вълни  $S_{\max}$  и  $R_{\max}$  над кода-вълните са използвани 18 сеизмични събития с магнитуден интервал от 3 до 6,8 и епицентрално разстояние от 50 до 10 000 km.

Системата на наблюдение включва пет сеизмични станции (VTS, KDZ, PLD, MMB, PVL), намиращи се в България, оборудвани с късопериодни сеизмографи СКМ (лента на пропускане 0,2—1,2 s) и дългопериоден сеизмограф СКД на станция VTS (лента на пропускане 0,2—18 s) [9].

## Обсъждане на получените резултати

В работата на Л. Христосков и Н. Доцев (1985) е направен изводът, че индивидуални различия в обвивките на кода-вълните за различни огнищни зони за Централната част на Балканския регион не се наблюдават. Същото се потвърди и в настоящата работа чрез обединяване на близките зони както следва: I — Турция, II — Гърция и Егейско море, III — Югославия и Албания, IV — България за СКМ и I — Турция, II — Гърция и Егейско море, III — Югославия и Албания, V — далечни земетресения за сеизмограф СКД (фиг. 2). Това позволи да бъдат построени обединените обвивки на кода-вълните за Централната част на Балканския регион по записи от сеизмографи СКМ и СКД (фиг. 3).

Получените обвивки по сеизмограф СКМ, четири на брой, са означени съответно със I, II, II', III, а за СКД със II, II—III, III, IV. Обозначението е направено така за удобство при сравняване на получените клонки с клонки, получени в други изследвани региони [4]. За разделянето по този начин е използван критерий за средното време на формиране на клонките в други изследвани региони [4]. Получените клонки се пресичат на времена  $t-t_0=46, 180, 310$  s за обвивките, получени по записи на сеизмограф СКМ, и при  $t-t_0=380, 1300, 2900$  s за обвивки, получени на сеизмограф СКД.

Таблица 1

Стойности на  $Q$ -фактора на средата на Централните Балкани

Записи върху прибори СКМ

№ клонка	временен интервал [s]	период [s]	$T_{\text{cp}}$ [s]	$\nu$	$QT$	$Q$
I	14—46	0,4—0,8	0,6	0,5	$46 \pm 2$ $58 \pm 2$	73—80 93—100
II	46—180	0,5—1,2	0,9	1	$220 \pm 20$	222—267
II'	180—310	0,9—2,0	1,5	1	$320 \pm 12$	205—221
III	310—940	1,0—4,0	2,5	1	$700 \pm 15$	274—286

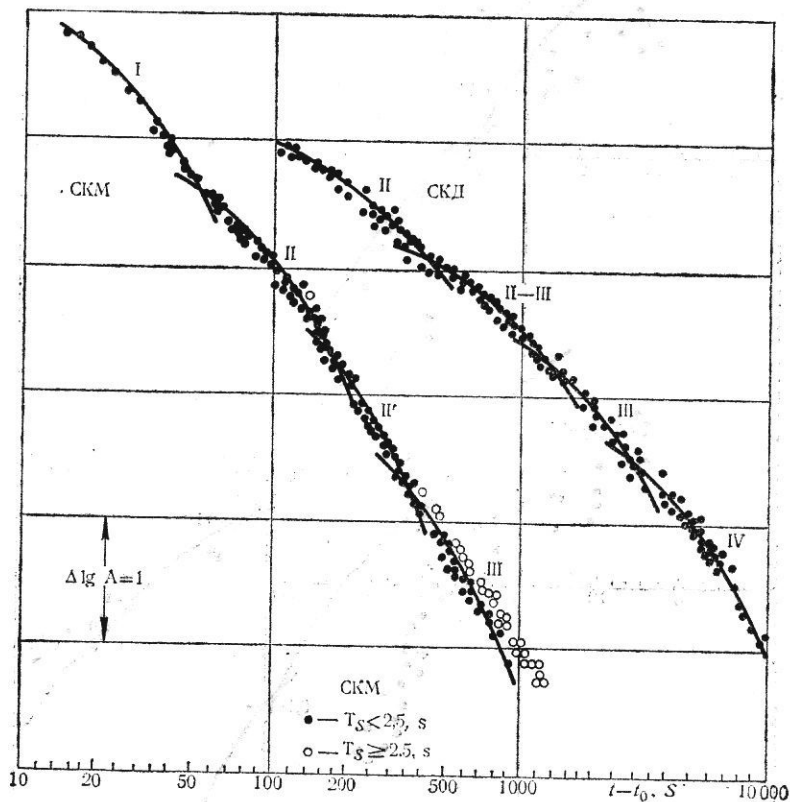
Записи върху прибори СКД

II	100—380	3—6	4,5	1	$1100 \pm 100$	$222 \pm 267$
				0,5	$670 \pm 30$	$142 \pm 155$
II—III	380—1300	5—12	8,5	0,5	$2050 \pm 50$	$235 \pm 247$
III	130—2900	10—16	13	0,5	$3600 \pm 200$	$261 \pm 292$
IV	2900—10000	10—18	14	0,5	$8000 \pm 200$	$557 \pm 585$

Забележка. Средният период на всяка клонка е определен по [2].

Следвайки описаната по-горе методика за обвивките, получени по записи от сеизмограф СКМ, са определени значенията за  $Q$ -фактора както следва:

— първа клонка: за интерпретацията ѝ се използват две стойности за  $v/v=1$ ,  $v=0,5$  (т. е. предполага се, че тази клонка се формира или от обемни, или от повърхностни вълни);

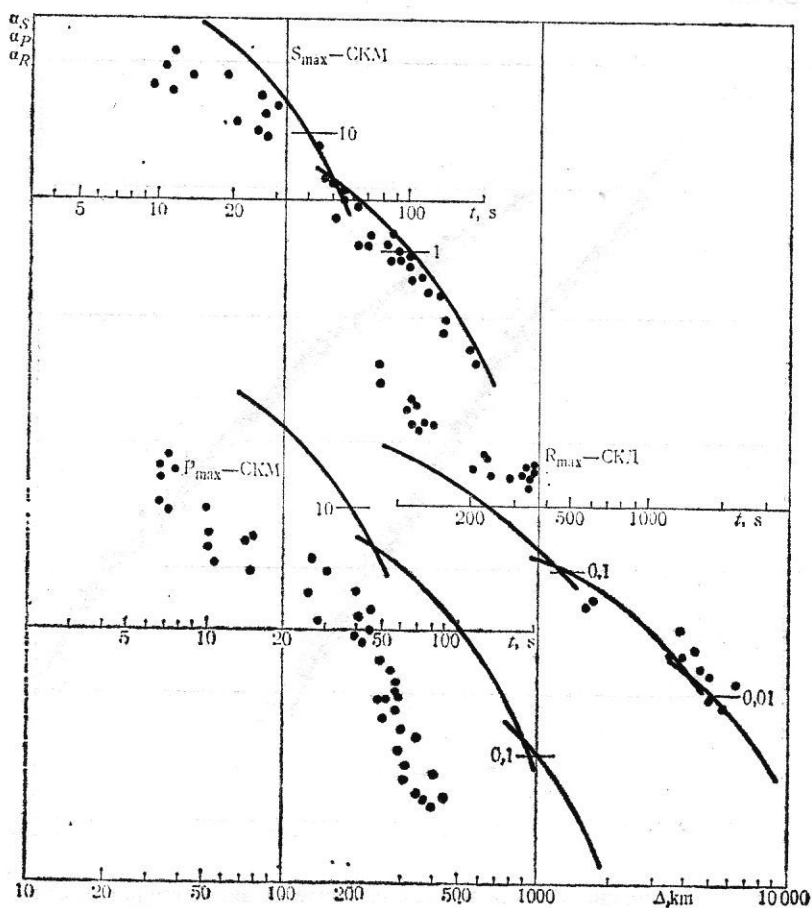


Фиг. 2. Обединени обвивки на кода-вълните за земетресения от централната част на Балканите по записи от сеизмограф СКМ и обединени обвивки на кода-вълните за земетресения от централните Балкани и далечни земетресения, записани на сеизмограф СКД. Кривата, изглаждаща експерименталните точки, е показана с пълтна линия. Те се апроксимират към теоретични криви, обозначени с римски цифри I—IV

— за останалите клонки е избрано  $v=1$  (т. е. предполага се, че тези клонки са сформирани от обемни вълни).

За обвивки, получени по записи от сеизмограф СКД, значенията на  $Q$  са определени при  $v=0,5$  и  $v=1,0$  за втората клонка (т. е. предполага се, че тя е образувана от повърхностни или от обемни вълни). За останалите клонки  $Q$  е определяно при  $v=0,5$  (т. е. предполага се, че те са образувани от повърхностни вълни). Получените значения за  $Q$ -фактора са показани в табл. 1. В таблицата са приведени и интервалите, в които могат да варира значенията на параметрите  $QT$  и  $Q$  при различни вариации на графическа апроксимация, допустими при реално наблюдавано разсейване на точките.

Ако сравним значенията на  $Q$ -фактора, получени по обвивките на кода-вълните от различни прибори за клонки, които се наблюдават примерно в един и същ временен интервал, то може да се види, че  $Q$  расте с нарастване на честотата. Това е очакван резултат, който е бил наблюдаван от авторите [3, 4, 7] и е свързан както с



Фиг. 3. Затихване на максималните амплитуди на  $P_{\max}$ ,  $S_{\max}$ ,  $R_{\max}$  на сеизмичните вълни с епицентралното разстояние като цяло за централните Балкани. С хоризонтална линия е означено времето за пробег на съответната максимална амплитуда на сеизмичните вълни ( $P_{\max}$ ,  $S_{\max}$ ,  $R_{\max}$ ) с разстоянието, съгласно ходографа на Джефрис—Булен. С плътни линии са отбелязани обединените обвивки на кода-вълните за централната част на Балканите, съответно сензмографи СКМ и СКД.

физическия механизъм на поглъщане на сеизмичните вълни в реални среди, така и с филтриращите свойства на използваната апаратура. Не се изключват и други обяснения, свързани с природата на кода-вълните.

Наблюдава се увеличение на  $Q$  при всяка следваща клонка (изключение прави клонката II' за сензмограф СКМ, при който  $Q$ -факторът е по-нисък, отколкото при втората клонка), което вероятно е в резултат на строежа на средата. Значенията на  $Q$ -фактора се явяват ефективни, а не истински значения в съответните слоеве. Това означава, че на ефективната стойност на  $Q$ -фактора на отдолулежащия слой може

да окаже влияние по-ниската стойност на  $Q$ -фактора на отгорележация слой или слоеве.

Л. Христосков [7] на базата на спектрите на обемни сеизмични вълни от земетресения с епицентрални разстояния 130—450 km е получил съответно  $Q=150$  по  $PH$ -вълни и  $Q=200$  по  $SH$ -вълни за Централните Балкани, което е сравнимо с резултата, получен в настоящата работа.

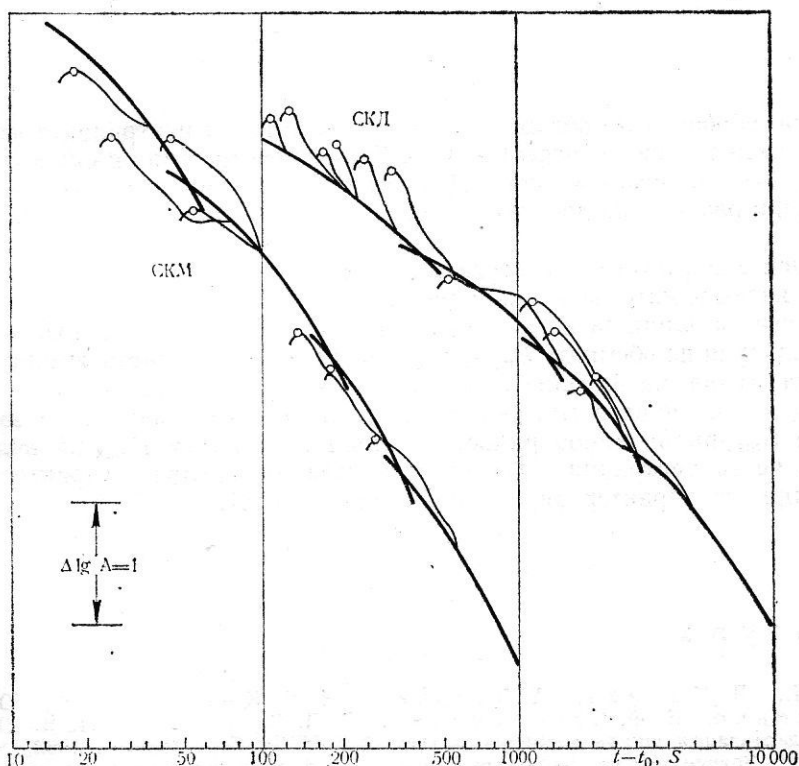
За целите на магнитудната класификация на земетресенията Л. Христосков и Е. Самарджиева [5, 6] са определили детайлно затихването на надлъжните и напречните сеизмични вълни по профили за Централните Балкани.

Тук е определено средното затихване на максималните амплитуди на обемните  $P_{\max}$ - и  $S_{\max}$ -вълни и повърхностната вълна на Релей за Централните Балкани, като не се поставя задачата за детайлно изучаване на затихването по профили. Получените резултати са показани на фиг. 3. Трябва да отбележим, че преходът от времето на пробегата към разстоянието е изпълнен въз основа на оценка на скоростта на разпро-

Таблица 1

Затихване на максималните амплитуди на  $P_{\max}$ ,  $S_{\max}$ ,  $R_{\max}$  сеизмични вълни за Централните Балкани

Тип вълна	Епицентрално разстояние, km	Степен на затихване на амплитудите на сеизмичните вълни с разстоянието
$P_{\max}$	30—250	1,6
	250—500	5,5
$S_{\max}$	30—200	1,5—1,6
	200—500	2,5
$R_{\max}$	200—1000	1,6—1,7
	1000—7000	2,0



Фиг. 4. Сравнение на максималните амплитуди на обемните  $S_{\max}$ -вълни с обединената обвивка на coda-вълните за земетресения от централните Балкани и далечни земетресения, записани на сеизмограф СКД



странение на максималните амплитуди на съответствания тип вълна, съгласно ходографа на Джефрис—Булен (5,1—5,2 km/s за  $P_{\max}$ ; 3,1—3,2 km/s за  $S_{\max}$ ; 2,7—2,8 km/s за  $R_{\max}$ ) [10]. Резултатите от експеримента са показани в табл. 2. От табл. 2 се вижда, че полученото затихване на максималните амплитуди на вълните на Релей за епицентрални разстояния от 200 до 1000 km е в степен 1,6—1,7, което практически съвпада със стандартно заложеното затихване в калибровъчната крива, използвана за определянето на магнитуда на земетресенията по повърхностни вълни, имаща вида  $\sigma(\Delta) = 1,66 \log \Delta^\circ + 3,3$  [1, 11].

Интерес представляват съвместното разглеждане на максималните амплитуди на сеизмичните  $S_{\max}$ - и  $R_{\max}$ -вълни, шлейфът и обединените обвивки на кода-вълните за Централните Балкани. Следвайки [4] по превишението на  $R_{\max}$  и  $S_{\max}$  над обединените обвивки на кода-вълните, може да се съди за мътноста на средата (фиг. 4). Колкото обемните вълни са по интензивни, шлейфът по-стръмен, а кода-вълната по-малко интензивна, т. е. амплитудите на обемните  $S_{\max}$ -вълни са относително по-високи от обвивките на кода-вълните, толкова повече средата на изследвания регион се характеризира с повишена мътност. Обратно, колкото обемните вълни са с понижена интензивност, толкова повече се наблюдава бавно спадащ шлейф, кода-вълните са относително по-интензивни, т. е. амплитудите на обемните  $S_{\max}$ -вълни се установяват около или под обединените обвивки за даден район, и районът се характеризира с повишена мътност. На фиг. 4 се вижда, че амплитудите на обемните  $S_{\max}$ -вълни се установяват около или под обединените обвивки на кода-вълните за централните Балкани, наблюдава се бавно спадащ шлейф, откъдето съдим, че централната част на Балканския регион се характеризира със среда с повишена мътност.

## Изводи

Получени са обобщените обвивки на кода-вълните за централната част на Балканите по записи на сеизмографи СКМ и СКД на земетресения с епицентрални разстояния до 500 km, реализирани в Централните Балкани и далечни земетресения с епицентрални разстояния до 6000 km, реализирани в различни региони на земното кълбо.

Определен е  $Q$ -факторът на средата в отделните слоеве при определени средни периоди на кода-вълните за всяка клонка.

Въз основа на данни за кода-вълните са намерени средното затихване на максималните амплитуди на обемните  $P_{\max}$ -,  $S_{\max}$ -вълни и максималната амплитуда на повърхностната вълна на Релей, за централната част на Балканите.

Оценена е сеизмичната мътност на средата по превишението на амплитудите на обемните  $S_{\max}$ -вълни и повърхностните вълни на Релей  $R_{\max}$  на кода-вълните. Показано е, че за централните Балкани средата, определяща характера на сеизмичните вълни, се характеризира с повишена мътност.

## Литература

1. Ванек, И., В. Карник, А. Затопек, Н. В. Кондорская, Ю. В. Ризниченко, Е. Ф. Саваренский, С. Л. Соловьев, Н. В. Шебалин. Стандартизация шкалы магнитуд. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1962, № 2, с. 153.
2. Доцев, Н. Зависимост на периодите в кодите от продължителността на записа и магнитуда на земетресенията от централната част на Балканите и далечни земетресения (под печат).
3. Раутиан, Т. Г. Роль очага и среды в формировании сейсмических колебаний при местных землетрясениях. М., Наука, 1976, 27—55.

4. Раутман, Т. Г., В. И. Халтурин и др. 1981. Экспериментальные исследования сейсмической коды. М., Наука, 1981 г.
5. Самарджиева, Е., Л. Христовков. Върху създаването на единна система за магнитудна класификация на земетресенията по късопериодни сеизмографи на разстояния до  $10^\circ$ . — Сб. докл. Младежки научен принос, кн. 1, С., 1985.
6. Христовков, Л. Калибровъчни функции за вълните  $P_N$  и  $N$  за епицентрални разстояния до  $21^\circ$ . — Изв. ГФИ БАН, т. X, 1967.
7. Христовков, Л. Някои проблеми в изследванията на динамичните характеристики на сеизмичните вълни. Дисертация. С., 1971, фонд ГФИ.
8. Христовков, Л., Н. Доцев. Начални експериментални данни за обхващащите на кодата на земетресенията в централната част на Балканите. — Бълг. геол. сп., т. XI, № 4, 1985 г. С., 85—97.
9. Христовков, Л., Н. Доцев. Стационарни особености на обвивките на кодите на сеизмичните вълни. — Бълг. геол. сп., т. XII, № 1, 1986, С., 20—28.
10. Jeffreys, H., K. E. Bullen. Seismological tables-L. Brit. Ass., 1967.
11. Karmik, V. et al. Standardization of the earthquake magnitude scale. — Studia geoph. et geod., 6, 1962, p. 41.

Постъпила на 19 февруари 1986 г.

## Использование сейсмической коды для изучения свойств среды в Центральных Балканах

*Н. Доцев, В. Халтурин*

(Резюме)

Используя объединенные огибающие коды волн Центральных Балкан определено эффективное значение  $Q$ -фактора среды. Изучено затухание максимальных амплитуд объемных  $P_{\max}$ ,  $S_{\max}$ -волн и поверхностной волны Релея для Центральных Балкан. По превышению максимальных амплитуд  $S_{\max}$  и  $P_{\max}$  сейсмических волн над кодой волн оценена мутность среды.

## Use of the Seismic Code for Studying the Properties of the Medium in the Central Balkans

*N. Dotzev, V. Halturin*

(Summary)

By means of the obtained general envelopes of the code of the waves for the Central Balkans, the effective value of the  $Q$ -factor of the medium has been determined. The attenuation of the maximal amplitudes of the body  $P_{\max}$ ,  $S_{\max}$  waves and the Rayleigh surface wave  $R_{\max}$  has been studied as a whole for the Central Balkans. The heterogeneity of the medium is estimated according to the ratio of surpassing of the maximal amplitudes of  $S_{\max}$  and  $R_{\max}$  seismic waves over the code of the waves.