

## ДЪЛБОЧИННИ НЕЕДНОРОДНОСТИ В РАЙОНА НА СЕИЗМОАКТИВНАТА КАЛАБРИЙСКА АРКА, УСТАНОВЕНИ ПО МЕТОДА НА МИКРОСЕИЗМИЧНИЯ ШУМ

**Бойко Рангелов, Емил Ойнаков**

*Минно-геоложки университет, София*  
*e-mail: brangelov@gmail.com; emil.ilievmg@gmail.com*

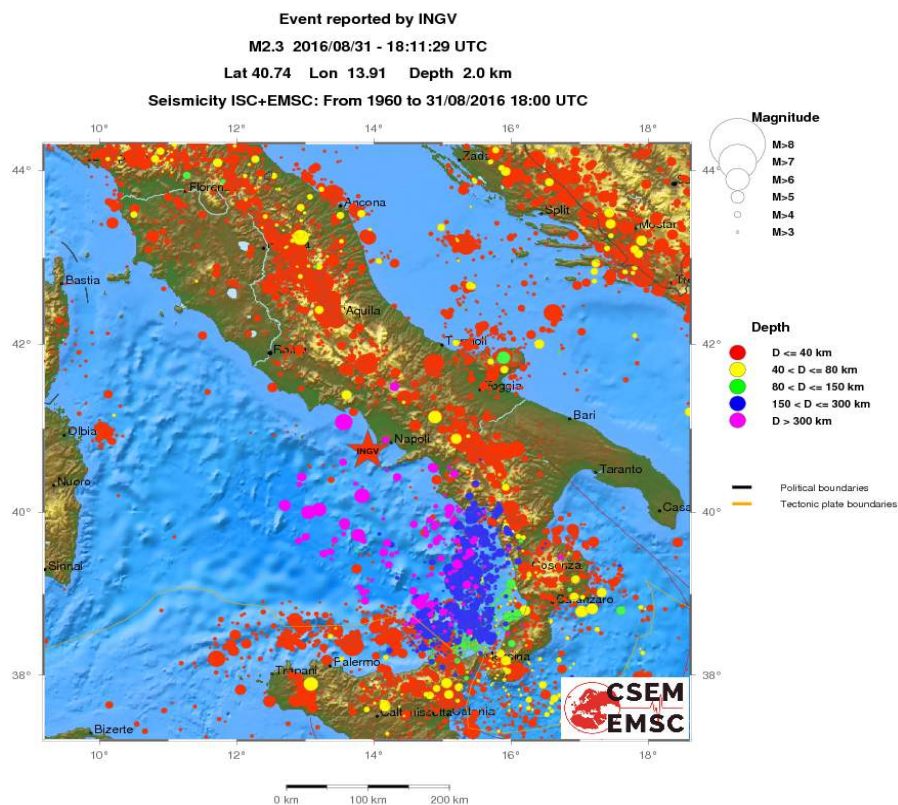
**Ключови думи:** метод на микросеизмичното сондиране, Калабрийска арка, разделителна способност.

**Abstract:** *The microseismic noise and its components of the Raleigh waves are applied for the deep velocity inhomogeneities exploration of the Calabria Arc deep seismogenic structure. The method of the microseismic depth's sounding consists of two main components – use of a broadband seismic network for the noise registration and use the natural microseismic noise for depth differentiation with good resolution for the depth structural reveal of the subducted layers. Advantages of the method are: satisfaction of the modern environmental requirements for non blast study of deep velocity structure and use of natural seismic noise like probe sounding of significant depths. The results of data processing of the 58 broadband seismic stations on the territory of southern Italy covering the Calabrian arc are presented.*

### Въведение

Калабрийската арка е видима дъговидна структура на Средиземноморския орогенен пояс. Дъгата свързва E-W и NW-SE-трендовите клоновете на пояса, които са представени от Магребската и Южно Апенининската вериги, съответно. Цялостната структура на дъгата се състои от серия от постилащи основни и офиолитни носещи тектонски единици, които се смятат за остатък от кредо-палеогенската Алпийската верига, участвала през неогена в структурирането на Апенинският орогенен пояс [2,3,5]. Преместването е свързано с процес на отдалечаване и е придружено от прогресивна югоизточна миграция на калабрийската дъга и с отварянето на Тиренско море [4,6]. Дъгата, чиято история на геодинамична еволюция е тясно свързана с разкриването на южното Тиренско море, е един от районите на западното Средиземноморие, където последиците от интензивната кватернерна тектониката са добре представени. Най-впечатляващата тектонска особеност на дъгата е видимата лента на разломна структура, която преминава, повече или по-малко непрекъснато, по протежението на вътрешната страна на дъгата. Отделни сегменти на разломната структура, разделят основните плиоцен-плейстоцени басейни с приповдигнати планински хребети (Aspromonte, Serre and Catena Costiera). Разломите са силно деформирани в горните плейстоценски отложения и морфологически се определят с откоси от по няколко стотин метра, което предполага неотдавнашна активност. От сеизмична гледна точка, Калабрийската дъгата, както и Южните Апенините и Източна Сицилия, представляват много активна зона характеризираща се с историческите сеизмични събития, най-големите от които са достигали магнитуд  $6 < M < 7$ . Друга характерна особеност е появата на междинни и дълбоко фокусни земетресения, разположени по протежение на вътрешната страна на дъгата, под южното Тиренско море [7]. Възникването на Калабрийската дъга, като активно раседно образуване и активната сеизмичност, предполагат, че тези две явления могат да бъдат свързани едно с друго [12,13]. Нещо повече – всички изследвания досега показват сложната геодинамична обстановка в района на Калабрийската Арка, която е доминирана от зона на субдукция с СИ-ЮЗ посока и съставена от поне два участъка с почти еднакъв геодинамичен режим, но отличаващи се по скорост на субдукционния процес. Долулежащата основа на подпъхнатата земна кора е достигнала мантията и се е врязала практически неразрушена (или частично разрушена), като процесите на деструкция продължават в СИ направление на дълбочини над 300 км. Разтоварването на напреженията става практически в целия диапазон на субдукция, като коровата субстанция е подложена на натиск (от същинската субдукция) и огъване (от СЗ-ЮИ посока в резултат на

колизията на Африканската и Апулийската плочи). Тази сложност в геодинамичната обстановка е видима от пространственото разположение на хипоцентрите на земетресенията по цялото протежение на структурата на Калабрийската арка – фиг.1. Използваният метод и получените резултати са подобни на тези приложени в изучаването на сеизмогенна зона Вранча [14].



Фиг. 1. Регионална сеизмичност в района на Калабрийската арка. Хипоцентрите на трусовете са диференцирани по дълбочина (цветово) и магнитуд (размер на кръгчетата) представящи епицентрите на земетресенията (по emsc-csem - <http://www.emsc-csem.org/> )

### Метод на микросеизмичното сондиране

Метода на микросеизмичното сондиране се базира на анализ на пространственото разпределение на амплитудите на вертикалната компонента на микросеизмичното поле за всички честоти в спектъра. Важно допускане в метода е това, че вертикалната съставлява на микросеизмичното поле преимуществено се определя от приноса на фундаменталната мода на вълните на Релей [1]. Това допускане се основава на голямо количество експериментални изследвания, изпънени в световен мащаб, и в настоящия момент може да се приеме за обосновано [8].

Технологията на реализация на метода се свежда до натрупване на спектър на мощността на амплитудното поле на микросеизмите в честотен диапазон от стотни части на Hz до няколко Hz на определен полигон над изследваните обекти с измервания от точка в точка. На база на получените спектри се построяват карти на амплитудното разпределение за всяка честота  $f$ , тези карти се привързват към определена дълбочина с релацията

$$(1) \quad H(f) = k \cdot \lambda(f),$$

където  $H(f)$  – дълбочина, съответстваща на амплитудното разпределение,  $k$  – числов коефициент, равен на 0.4-0.5,  $\lambda(f)$  – дължина на фундаменталната мода на Релеевата вълна с честота  $f$ . При това спектъра на микросеизмичния сигнал във всяка точка се натрупва до достигане на статистическа устойчивост.

За да се изключат проблемите, свързани с различния период на стационарност на микросеизмите в различните честотни диапазони и крайността на тези периоди, е предложено сондирането да се извършва вземайки една от точките на измерване в изследвания полигон в качество на базова. Измерванията в останалите точки на мрежата се провежда едновременно с

измерването в опорната точка, а резултатите от измерванията се коригират с тези от опорната точка. Този подход позволява да се реши проблема с нормирането на спектъра, доколкото за сондирането е за предпочитане да имаме сигнал с унифицирани спектрални характеристики.

В общия случай, ако скоростта на вълните на Релей е по висока в нееднородността, отколкото в околното пространство, то над нееднородността амплитудата на вертикалната компонента на микросеизмичното поле намалява, ако скоростта в нееднородността е по-ниска, амплитудата нараства.

Продължителността на измерването във всяка точка на мрежата трябва да бъде не по-малка от характерния период на стационарност на микросеизмите дори и при обезпечаване с корекция на базовата точка.

### Апаратурно обезпечение

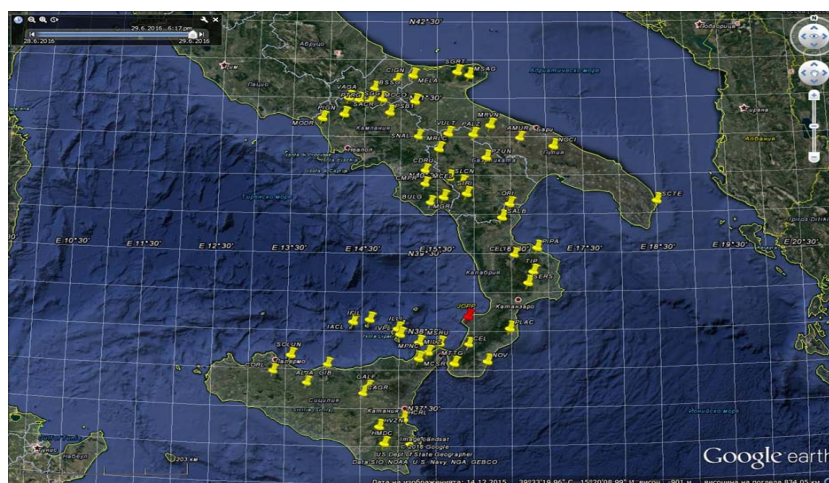
Сеизмичните записи за настоящото изследване на сеизмичната зона Калабрия (южна Италия) са взети от 58 широколентови сеизмични станции разположени на територията на Италия, които са част от широколентовата мрежа за регистрация в реално време на IV (National Seismic Network of Italy). Разположението на сеизмичните станции на картата на изследваната територия е показано на фиг.3. От избраните 58 сеизмични станции петдесет са оборудвани с широколентови датчици Trillium-40s, седем с Trillium-120s и една с Trillium-240s.

Trillium-40;120;240s са здрави трикомпонентни широколентови сеизмометри, специално проектирани за местни и регионални сеизмични проучвания. Много ниската консумация на енергия и стабилната работа в широк температурен диапазон прави Trillium 40(120,240) идеални за широк спектър от приложения. Основни технически характеристики на сеизмометрите са:

- Честотен диапазон – 40 s – 50 (120s-50; 240s-50)Hz
- Чувствителност – 1500 V/m/s стандартна
- Изходен сигнал – диференциален,  $\pm 16$  V (20 V пълна амплитуда)
- Най-малка честота на паразитния резонанс – 200 Hz (вертикална компонента)
- Ниво на собствен шум – по нисък от NLNM от 20s до 5s
- Диапазон на работната температура – от -20 до +50°C
- Температурна чувствителност - <0.6 V на 10°C

### Резултат от микросеизмичното сондиране в областта на Калабрийската арка

Съгласно метода на микросеизмичното сондиране една от 58-те станции, използвани в изследването е избрана за базова (JOPP, Joppoio, географска ширина N  $38^{\circ}36'24.48''$ , географска дължина E  $15^{\circ}53'8''$ ). Изследването е направено на площ приблизително от 255 948  $km^2$  (462x554 km).



Фиг. 2. Разположение върху картата на изследваната територия на сеизмичните станции използвани за изследването с метода на микросеизмичното сондиране. Базовата станция JOPP е означена с червен маркер.

На фиг. 3,4 са показани резултатите от обработката на данните получени с метода на микросейзмичното сондиране. Цветовите тонове на тримерните модели съответстват на относителната интензивност на поето на Релеевите вълни, изразени в децибели, което се интерпретира като относително изменение на скоростта на напречните вълни в изследваната област. Цветовата скала е в динамичен диапазон от -10 до 10 dB за фиг.3 и от -20 до 20 dB за фиг.4.б).

С белите точки в модела (фиг.3), са отбелязани хипоцентровете на земетресенията с магнитуд  $M \geq 4$ , регистрирани за периода от началото на 2005г. до края на 2015г. в Южна Италия (източник [www.emsc.eu](http://www.emsc.eu)). Картата на релефа е построена с отчитане на координатите и надморската височина за точките отстоящи една от друга на  $6'$ . Местоположението на станциите е отбелязано със «\*», като надморската височина на знака е относителна за по-добра прегледност.

За изследването са взети едночасови сейзмични записи от всички сейзмични станции, записани на 01.02.2013 за интервала 00:00:00-01:00:00 часа, от които са изчислени мощностните спектри за всяка станция. Разпределението на вариациите на интензивността е определено по отношение на базовата-опорна станция (JOPP).

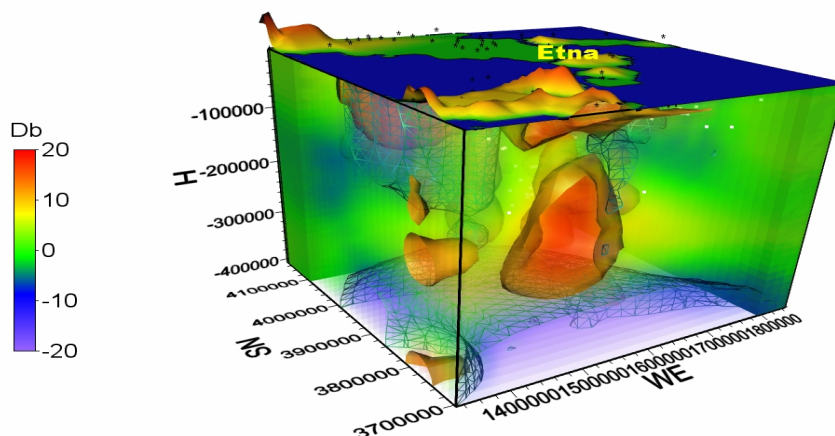
При преизчисляването на спектралните честоти в дължини на вълни, са отчетени дисперсионните свойства на Релеевите вълни, а именно, увеличението на скоростта с увеличаването на дължините на вълните. За тази цел е използван скоростен модел, построен от G.F.Panza и A.Pontevivo (2002г.)[9]. Скоростта се променя в диапазона от 2340 m/s (близо до повърхността) до 4140m/s (за дълбочина над 210000 m). Предвид чувствителността на сейзмометрите и долната граница на скоростта на основната мода на вълната на Релей можем да изчислим дълбочината, за която получаваме достоверни стойности, т.е.

$$(2) \quad H = 0.5 \frac{V_R \sigma}{f}$$

за  $f=0.025 \text{ Hz}$  (Trillium-40s)  $H \sim 83 \text{ km}$ ;  $f=0.00833 \text{ Hz}$  (Trillium-120s)  $H \sim 250 \text{ km}$  и  $f=0.0042 \text{ Hz}$  (Trillium-240s)  $H \sim 490 \text{ km}$ . Можем да приемем за не строга долна граница на достоверност на данните  $H \sim 250 \text{ km}$ .

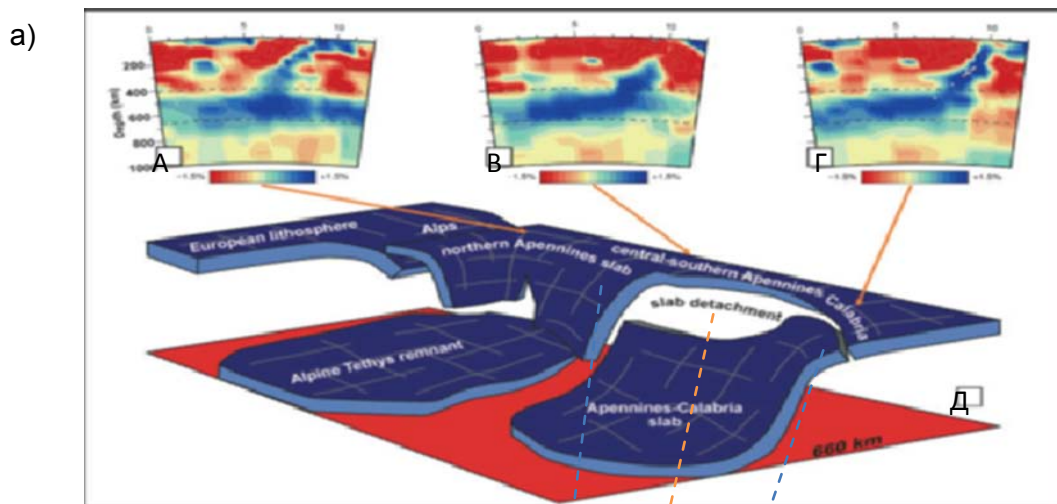
На полученото 3-мерно изображение до дълбочина 200км (фиг.4.б)), могат да се проследят няколко относително високоскоростни области (ограничени от сини изоповърхнини със стойност -5 dB), които се разположени под Йонийско море; Месинския пролив и Апенинския полуостров.

Model CALABRIAN ARC area parameter in contrast to the intensity of microseismic field 01.02.2013(00-01 h)

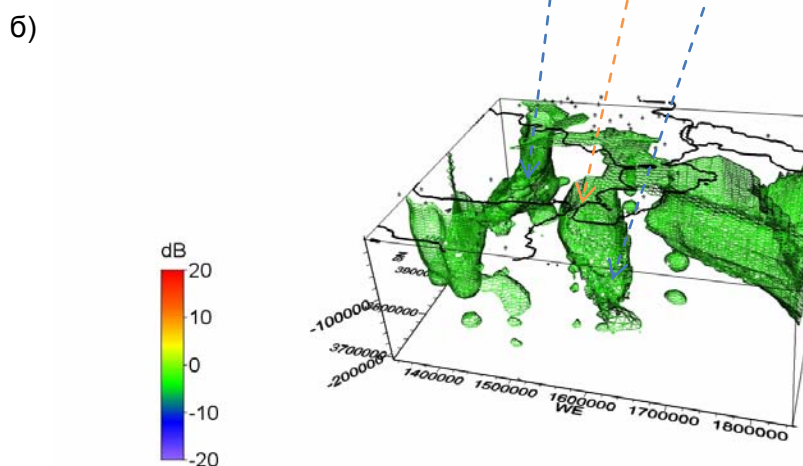


Фиг. 3. Тримерен модел на пространственото разпределение на интензивността на микросейзмичното поле (dB) на зоната на Калабрийската арка





Model CALABRIAN ARC area parameter in contrast to the intensity of microseismic field



Фиг. 4. (а) Томографски изображения на аномалии на скоростите на Р-вълни са показани за северните Апенини-Б, южните Апенини-В, и Калабрийската Арка-Г Трансектите (от Spakman & Wortel, 2004; цветовете показват сеизмични аномалии на скоростта на вълната като процентни отклонения от средната мантия на скоростите, дадени от същите автори). Д - Модел показваща настоящата конфигурация на slab-а в Средиземноморския регион, базирани на сеизмична томография (от Spakman & Wortel, 2004 [11]). (б) Високоскоростни области определени по метода на микросеизмичното сондиране.

На полученото изображение по метода на микросеизмичното сондиране хипоцентровете на земетресенията се разполагат както следва: плитките земетресения в голямата си част са разположени в близост до изоповърхнината със стойност  $-5$  dB ограничаваща високоскоростното тяло под Йонийско море а дълбоките земетресения се разполагат по протежението на ниско скоростното тяло в дълбочина, което е ограничено от изоповърхнината със стойност  $6$  dB.

Сравняването на получения модел с модела получен от Spakman и Wortel (2004) [11] - на основа на направената от тях интерпретация на резултатите от сеизмичната томография в района на Италианската част на Западното Средиземноморие, показва, добра корелация на двата модела. Високоскоростното тяло 1 (фиг.5 б) в модела получен по ММС отговаря на предположеното наличие на Алпино-Калабрийски slab, а свободното пространство северно от тяло 1 на описания от Spakman и Wortel [11] „прозорец“. Тяло 2 може да се интерпретира като част от предполагаемия северно Апенинския slab в модела на Spakman и Wortel.

## Заклучение

В резултат от изследването на интензивността на микросейсмичния шум в зоната на Калабрийската арка са построени тримерни модели на дълбочинните скоростни неоднородности. Високоскоростните зони на моделите до голяма степен съвпадат с предположените местоположения на Алпо-Калабрийския и северно Апенинския slab в модела на Spakman и Wortel. Установено е, че разположението на хипоцентровете на плитките земетресения с  $M > 4$  е по протежението на високоскоростно тяло, а дълбоките земетресения са привързани към нискоскоростна зона, разположена в близост до вулкана Етна.

Показано е, че прилагането на метода в зоната на Калабрийската арка потвърждава възможността за използването му в сложна геолого-тектонска обстановка, като постигнатата разделителна способност и получената детайност в дълбочинните особености на скоростните неоднородности носят полезна информация и могат да бъдат надеждно използвани в структурните интерпретации.

## Литература:

1. Горбатилов, А. В., М. Ю. Степанова, Г. Е. Кораблев. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм. // Физика Земли, 2008, JW, С. 66-84.144
2. Alvarez, W. (1976). A former continuation of the Alps. *Geological Society of America Bulletin*, 87(6), 891-896.
3. Amodio-Morelli, L., et al. L'arco calabro-peloritano nell'orogene appenninico-maghrebidico. *Mem. Soc. Geol. It.*, 1976, 17: 1-60.
4. Dewey, J. F., M. L. Helman, S. D. Knott, E. Turco & D. H. W. Hutton (1989). Kinematics of the western Mediterranean. *Geological Society, London, Special Publications*, 45(1), 265-283.
5. Haccard, D.; Lorenz, Cl; Grandjacquet, Cl. Essai sur l'évolution tectogénétique de la liaison Alpes-Apennins (de la Ligurie à la Calabre). *Mem. Soc. Geol. It.*, 1972, 11.4: 309-341.
6. Malinverno, A., & W. B. Ryan (1986). Extension in the Tyrrhenian Sea and shortening in the Apennines as result of arc migration driven by sinking of the lithosphere. *Tectonics*, 5(2), 227-245.
7. McKenzie, D. (1972). Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophysical Journal International*, 30(2), 109-185.
8. Noguchi, T., R. Nishida. Determination of subsurface structure of Tottori plain using microtremors and gravity anomaly // *Journal of Natural Disaster Science*. 2002. V.24. №1. P.1-13.
9. Panza, Giuliano F., Fabio Romanelli, and Franco Vaccari. "Seismic wave propagation in laterally heterogeneous anelastic media: theory and applications to seismic zonation." *Advances in geophysics* 43 (2001): 1-95.
10. Pierre, F. D., F. Ghisetti, R. Lanza, & L. Vezzani, (1992). Palaeomagnetic and structural evidence of Neogene tectonic rotation of the Gran Sasso range (central Apennines, Italy). *Tectonophysics*, 215(3-4), 335-348.
11. Spakman, W., & Wortel, R. (2004). A tomographic view on western Mediterranean geodynamics. In *The TRANSMED atlas. The Mediterranean region from crust to mantle* (pp. 31-52). Springer Berlin Heidelberg.
12. Tortorici, L., Tapponnier, P., & Winter, T. (1986). Faulting during the 1783 Calabria earthquakes and tectonics of the Messina Strait. *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, 67, 1188.
13. Valensise, G., & Pantosti, D. (1992). A 125 yr-long geological record of seismic source repeatability: the Messina Straits (southern Italy) and the 1908 earthquake (Ms 7.5). *Terra Nova*, 4(4), 472-483.
14. Ойнаков, Е., Б. Рангелов 2016., МИКРОСЕЙСМИЧНО СОНДИРАНЕ - Оценка на чувствителността на метода с реални експерименти на реален дълбочинен обект – сеизмогенна зона Вранча. Сб. Докл. Дни на Физиката – ТУ, 19-23 Април, София. (под печат)