Числени експерименти за установяване на устойчивоста и разделителната способност на Метода на Микросеизмичното Сондиране (ММС)

Emil Oynakov[1], Boyko Ranguelov[2]

[1] Mining and Geology University "St. Ivan Rilski", Sofia, e-mail: emil.ilievmg@gmail.com
[2] Mining and Geology University "St. Ivan Rilski", Sofia, e-mail: branguelov@gmail.com

Ключови думи: метод на микросеизмичното сондиране, Калабрийска арка, сеизмична зона Вранча, разделителна способност.

Abstract

The microseismic noise and its components of the Raleigh waves are applied for the deep velocity inhomogeneity exploration of the Calabria Arc and Vrancea seismic zone 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 deep structure of the subduction zones. 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 to significant depths. The results of data processing of the 58 broadband seismic stations on the territory of southern Italy covering the Calabrian arc and data processing of the 18 broadband seismic stations on the territory of Romania covering the Vrancea seismic zone are presented. The main purpose of the research is to assess the resolution and stability of the obtained results.

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 съставяща на микросеизмичното поле преимуществено се определя от приноса на фундаменталната мода на вълните на Релей [Gorbatikov, A. V, et al.]. Това допускане се основава на голямо количество експериментални изследвания, изпънени в световен мащаб, и в настоящия момент може да да се приеме за обосновано [Gorbatikov, A. V, et al.].
Технологията на реализация на метода се свежда до натрупване на спектър на мощноста 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

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

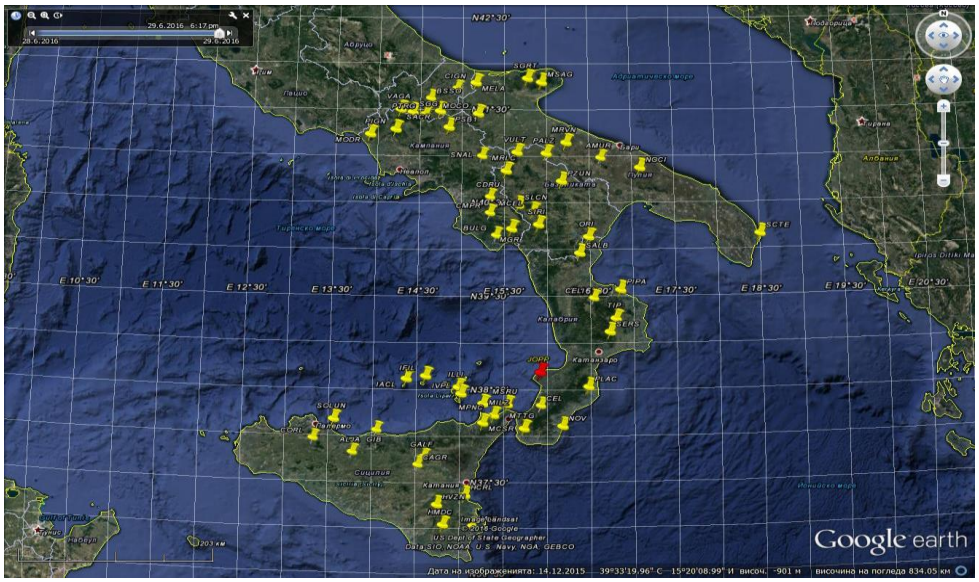
където H(f) – дълбочина, съответстваща на амплитудното разпределение, k – числов коефициент, равен на 0.4-0.5, λ(f) – дължина на фундаменталната мода на Релеевата вълна с честота f. При това спектъра на микросеизмичния сигнал във всяка точка се натрупва до достигане на статистическа устойчивост.
За да 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 взимайки една от точките на измерване в изследвания полигон в качество на базова. Изерванията 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 харектеристики.
В общия случай, ако скоростa 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 скоростa 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.

Данни и апаратурно обезпечение

Сеизмичната зона Калабрия

Сеизмичните записи за настоящото изследване на сеизмичната зона Калабрия (южна Италия) са от регистрациите на 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.1. От избраните 58 сеизмични станции петдесет са оборудвани с широколентови датчици Trillium-40s, седем с Trillium-120s и една с Trillium-240s. Съгласно ММС станция JOOP (Joppolo, географска ширина N 38°36′24.48", географска дължина E 15°53′8.00") е избрана за базова. Изследването е направено на площ приблизително от 255 948 (462x554 km).
За оценка на чувствителността на метода към промяната на времевия интервал, в който се регистрира сигнала са направени четири експеримента. Интервала на натрупване на сигнала и за четирите експеримента е 1 час. Експериментите са направени както следва: 1. на 01.02.2013г. в интервала 00-01 час; 2. на 01.02.2015 в интервала 03-04 часа; 3. на 10.02.2013 в интервал 10-11 часа; 4. На 10.02.2015 в интервала 12-13 часа. Базовата станция и за четирите експеримента е JOPP разположена на около 90 km от условния център на изследваната територия.
За оценка чувствителност на метода при промяна на базовата станция е направен 1 експеримент.
Експеримента е проведен със сеизмичните записи от 01.02.2013г. (00-12 часа) с базова станция JOPP (lng.15°53‘08“;lat.38°36‘ 24“) и SALB ($\mathrm{lng}.16^{\circ}20^{I}45^{II}$ $\mathrm{lat}.39^{\circ}52^{I}37^{II}$).
Разстоянието на което са разположени станциите от условния център на изследваната зона са както следва : JOPP-97 km. и SALB-57 km., разстоянието между двете станции е 145 km.

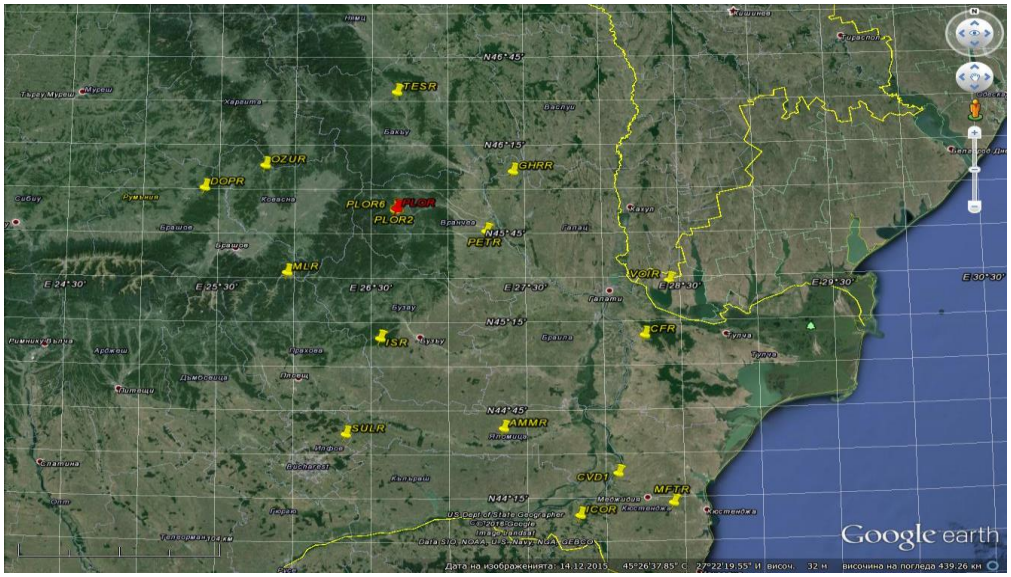


Фиг.1.Разположение на сеизмичните станции спрямо Калабрийската арка.

Сеизмичната зона Вранча

Сеизмичните записи за настоящото изследване на сеизмичната зона Вранча са взети от 19 широко лентови сеизмични станции разположени на територията на Румъния (фиг.2), които са част от широколентовата мрежа за регистрация в реално време на NIEP (National Institute for Earth Physics). От избраните 19 сеизмични станции единадесет са оборудвани с широколентови датчици за скорост-CMG-40T, три с STS2, две с CMG3EPS и две с KS2000. Съгласно ММС една от станциите е избрана за базова

– PLOR (Plostina, географска ширина N 45°50′31.20", географска дължина E 26°38′27.60"). Изследването е направено на площ приблизително от 63840 (240x266 km).
За оценка на чувствителността на метода към промяната на времевата зона, в която се регистрира сигнала са направени четири експеримента. Интервала на натрупване на сигнала и за четирите експеримента е 1 час. Експериментите са направени както следва: 1. на 01.02.2015г. в интервала 00-01 час; 2. на 01.02.2015 в интервала 03-04 часа; 3. на 10.02.2015 в интервала 10-11 часа; 4. На 10.02.2015 в интервала 12-13 часа. Базовата станция и за четирите експеримента е PLOR , разположена на около 30 km от условния център на изследваната територия.
За оценка чувствителността на метода при промяна на базовата станция са направени 8 експеримента. Първият ред експерименти е проведен по сеизмичните записи от 01.02.2015г. (00-12 часа) с базови станции AMMR($\mathrm{lng}.27^{\circ}33^{I}50^{II}$ $\mathrm{lat}.44^{\circ}61^{I}00^{II}$), ISR($\mathrm{lng}.26^{\circ}54^{I}31^{II}$ $\mathrm{lat}.45^{\circ}11^{I}88^{II}$), PLOR1($\mathrm{lng}.26^{\circ}64^{I}60^{II}$ $\mathrm{lat}.45^{\circ}85^{I}20^{II}$), PLOR2($\mathrm{lng}.26^{\circ}64^{I}30^{II}$ $\mathrm{lat}.45^{\circ}85^{I}00^{II}$) . Разстоянието на което са разположени станциите от условния център на изследваната зона (~lng. lat. са както следва : AMMR-125,35 km.; ISR-72,30 km.; PlOR1-27,85 km.; PLOR2-27,92km.
Втората група експерименти са проведени с четири базови станции близко разположени както една от друга така и близко разположени до централната зона, както и имащи сходни релефни особености (PLOR,PLOR1,PLOR2,PLOR3) . Използваните сеизмични записи на станциите са направени на 01.02.2015г. (00-12 часа). Координатите на базовите станции са: PLOR- $\mathrm{lng}.26^{\circ}64^{I}90^{II}$ $\mathrm{lat}.45^{\circ}85^{I}10^{II}$; PLOR1 - $\mathrm{lng}.26^{\circ}64^{I}60^{II}$ $\mathrm{lat}.45^{\circ}85^{I}20^{II}$; PLOR2- $\mathrm{lng}.26^{\circ}64^{I}30^{II}$ $\mathrm{lat}.45^{\circ}85^{I}00^{II}$; PLOR3- $\mathrm{lng}.26^{\circ}64^{I}50^{II}$ $\mathrm{lat}.45^{\circ}85^{I}40^{II}$. Разстоянията между станциите са: PLOR-PLOR1 0,26 km, PLOR PLOR2 0,48 km ; PLOR-PLOR3 0,46 km ; PLOR1-PLOR2 0,31 km; PLOR1-PLOR3 0,23 km ;PLOR 2 - PLOR 3 0,46 km. Разстоянието на отделните базови станции до условния център е около 30 км.

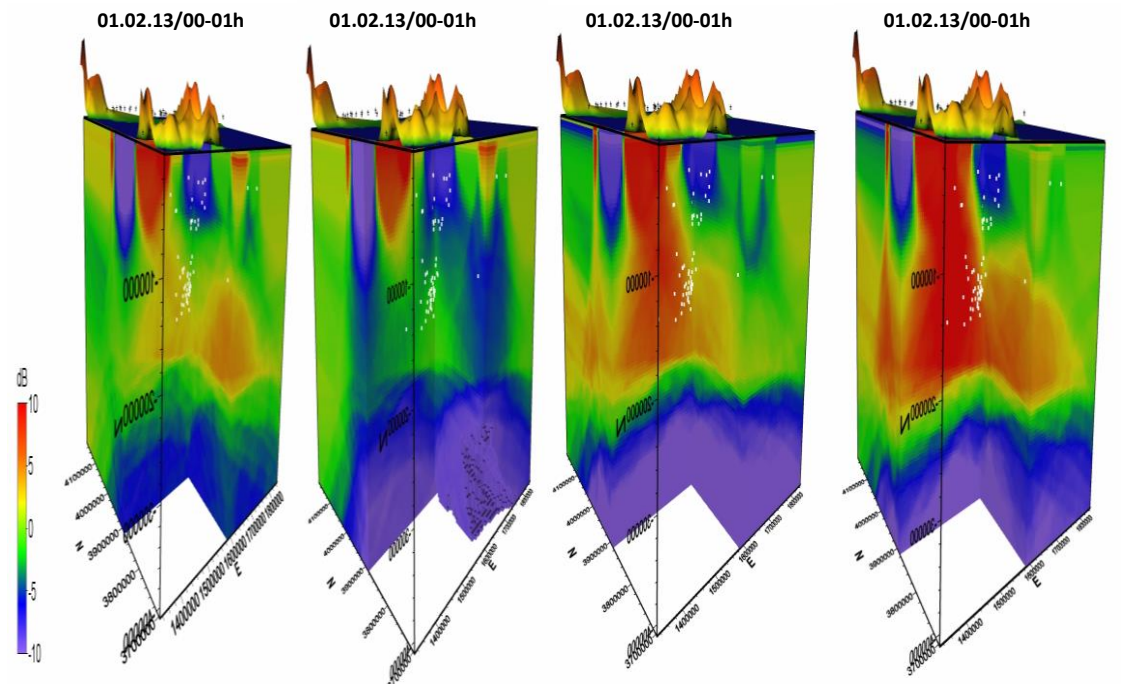


Фиг. 2. Разположение на сеизмичните станции спрямо сеизмична зона Вранча.

Експериментални резултати
Сеизмична зона Калабрия

Получените модели на интензивноста на микросеизмичния сигнал за четирите експеримента са показани на фиг.3. И за четирите експеримента, контраста на интензивността на полето е показана за интервала от -10 – 10 Db (реално -22 до 18 dB). Забелязва се, че моделите на три от експериментите имат добро сходство само в модела за 01.02.2013 -03-04 h централната относително нискоскоростна зона е с по-нисък интензитет.
За оценяване на чувствителността на метода при прилагането му в изследваната зона са изчислени дисперсията и средното квадратично отклонение на резултатите от четирите експеримента за всяка станция и по резултата е построен 3D модел на пространственото разпределение на дисперсията и

средно квадратичното отклонение (фиг.4а,б). На фигура 4а пространственото разпределение на дисперсията в целия обем е в рамките на 0-0.5 $(\frac{Db}{10})^2$. Средно квадратичното отклонение (фиг.4,б) е в рамките на 0-3,2 Db за дълбочина до 150 km и 3,2-6,4 Db за дълбочина от 150-400 km.
Изчислени са коефициентите на корелация между различните експерименти, както и средните коефициенти на корелация. Общият среден коефициент на корелация е 0.64 което показва едно сравнително добро съвпадение на резултатите и е близък с коефициента на кроскорелация за зоната на Калабрийската арка.



Фиг.3. Резултати от четирите експеримента, разположени както следва отгоре надолу и от ляво на дясно:1-01.02. 00-01 часа; 2-01.02. 03-04 часа; 3-10.02. 10-11 часа; 4-10.02. 12-13 часа.

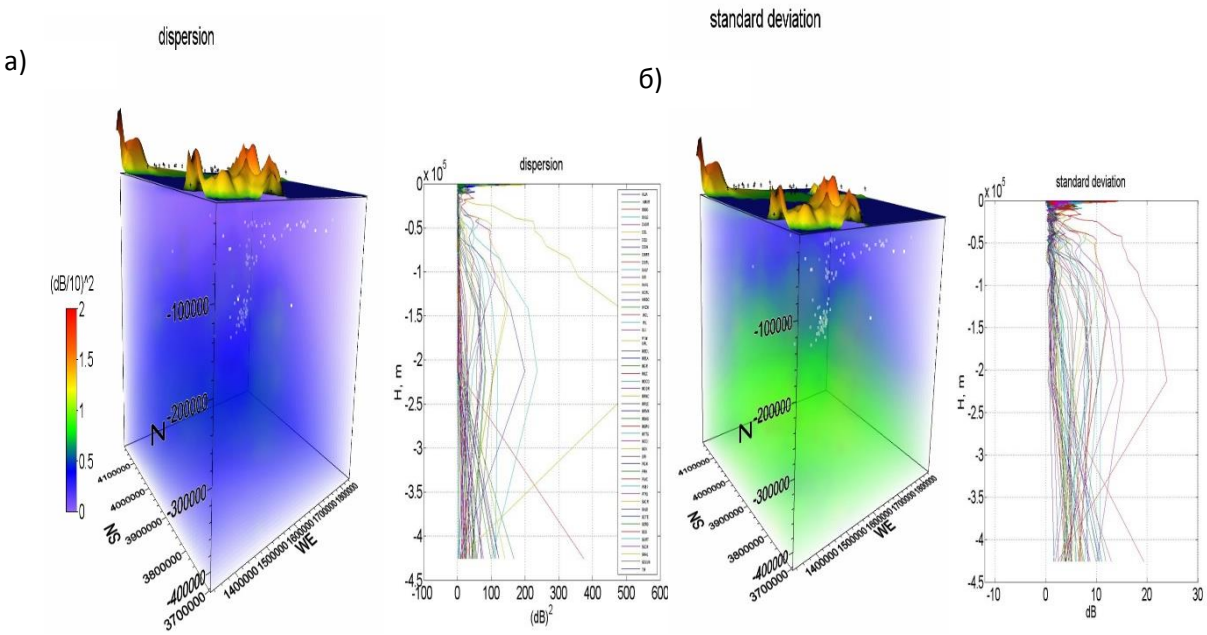
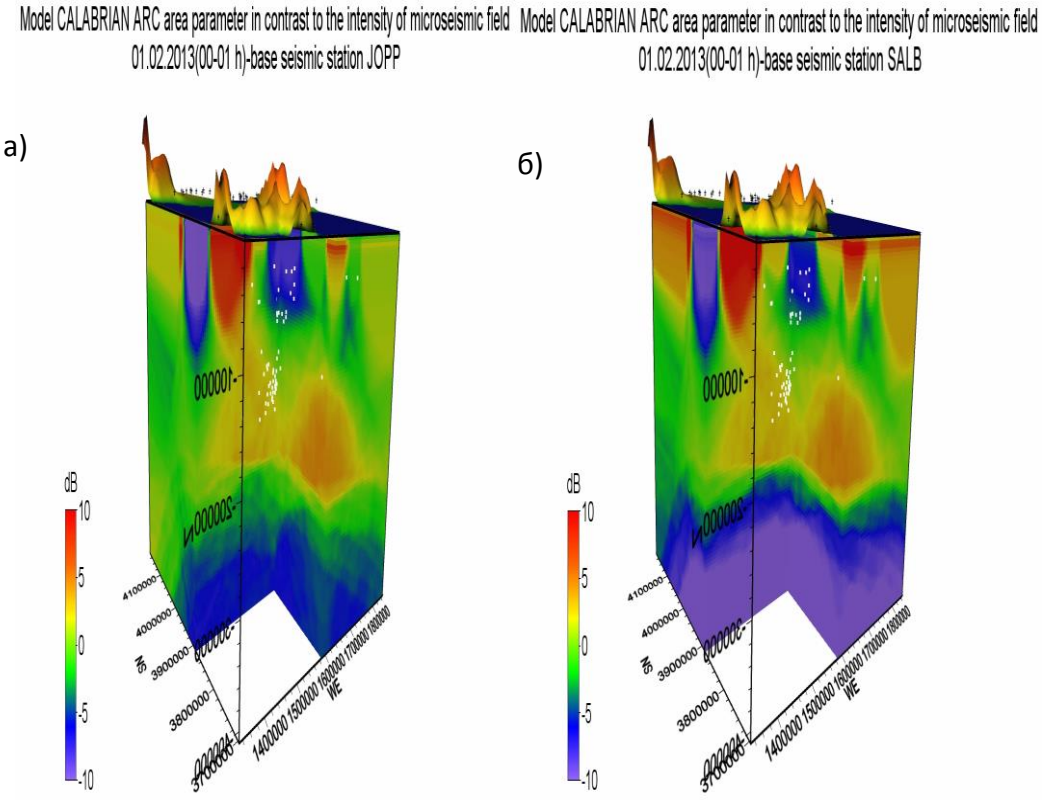


Рис.4. а) Пространсвено и дълбочинно распределение на дисперсията за спектрите на четирите експеримента, проведени на територията на Калабрииската арка. б) пространствено и дълбочинно распределение на стандартното отклонение между спектрите на четерите експеримента.

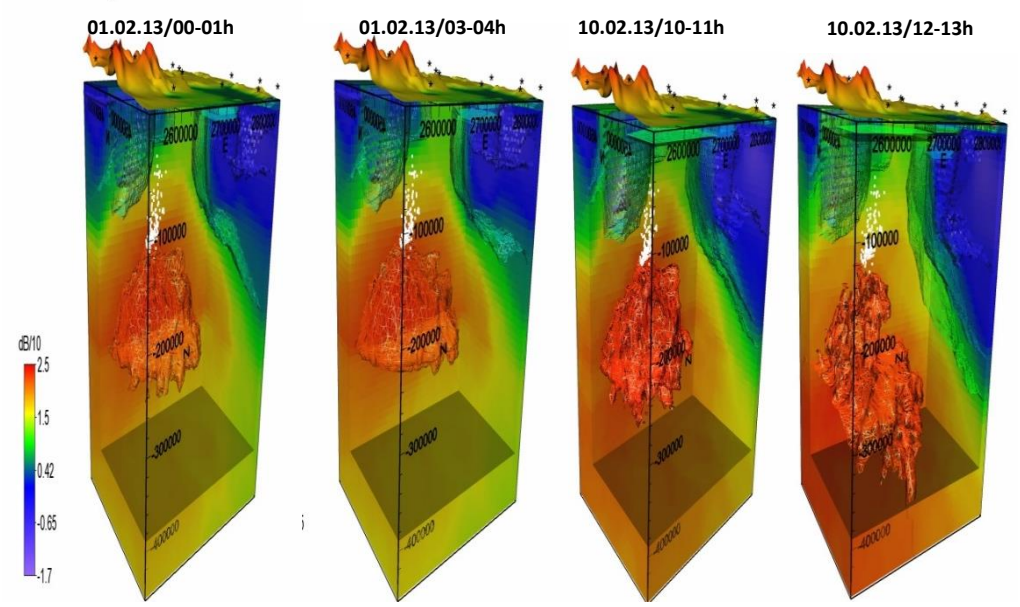
Може да заключим , че като цяло и и четирите експеримента показват относително една и съща картина на контраста на интензивността на полето на релеевите вълни.
Четирите експеримента направени през различни части от денонощието и различни дни, показват относително една и съща картина на контраста на интензивността на полето на релеевите вълни.
Отбелязваме, че почти в целият обем средно квадратичното отклонение се изменя от 0 до 6 dB, което е до 15% от диапазона на изменение на интензитета на микросеизмичното поле. Този факт свидетелства за това, че модела до голяма степен не зависи от избора на момент на регистрация при достатъчен интервал на натрупване на сигнала във времето.
Ако за сравняване на резултатите, използваме за количествена на характеристика средната стойност на коефициента на взаимна корелация, може да направим извод, че четирите модела имат 64% съвпадение
Получените 3D модели на контраста на интензивността на сигнала при промяна на базовите сеизмични станции са представени на фиг.5.
И на двата модела всички контрастни зони съвпадат както в хоризонтален, така и във вертикален план много добре. Средната стойност на коефициента на корелация за от двата експеримента е 0.87, което показва добра корелация между моделите, получени при промяна на базовата станция за района на Калабрийската арка, т.е. изборът на базова станция за изследвания район не влияе силно на изображението на пространственото разпределение на микросеизмичното поле.
При избор на базови станции които се намират в сходни релефни особености и на не голяма отдалеченост от централната зона на изследваната област получените като резултат модели практически не се различават. Което отново потвърждава извода направен при експеримента с базови станции в зоната Вранча, т.е. базовата станция е добре да бъде избрана възможно най-близко до условния център на изследваната територия и по възможност на място с минимум релефни особености.



Фиг.5. Модели на разпределение на интензивността на микросеизмичното поле (dB) за две различни базови станции- (а) базова станция JOPPP; (б) базова станция SLAB.

Сеизмична зона Вранча

Получените модели на интензивноста на микросеизмичния сигнал за четирите експеримента проведени в сеизмината зона Вранча са показани на фиг.6. На фигурата се вижда, че контраста на интензивността на поето се изменя както следва: -1,55 – 2,13(Db/10) за експеримента на 01.02.2015г., с интервал на натрупване на микросеизмичния сигнал от 00 часа до 01 часа; -1,53 – 2,54(Db/10) експеримента на 01.02.2015г., 03-04 часа; -1,14 – 1,92(Db/10) за експеримента на 10.02.2015г., 10-11 часа и -1,11 – 1,56(Db/10) за експеримента на 10.02.2015г., 12-13 часа. Изоповърхнините и на четирите модела минават по точки със стойности 0.33(Db/10)-за висикоскоростните контрасти (синьо-зелен цвят) и 1,14(Db/10) – за нискоскоростните нееднородности (оттенъци в червено жълто).



Фиг.6. Резултати от четирите експеримента, разположени както следва отгоре надолу и от ляво на дясно:1-01.02. 00-01 часа; 2-01.02. 03-04 часа; 3-10.02. 10-11 часа; 4-10.02. 12-13 часа.

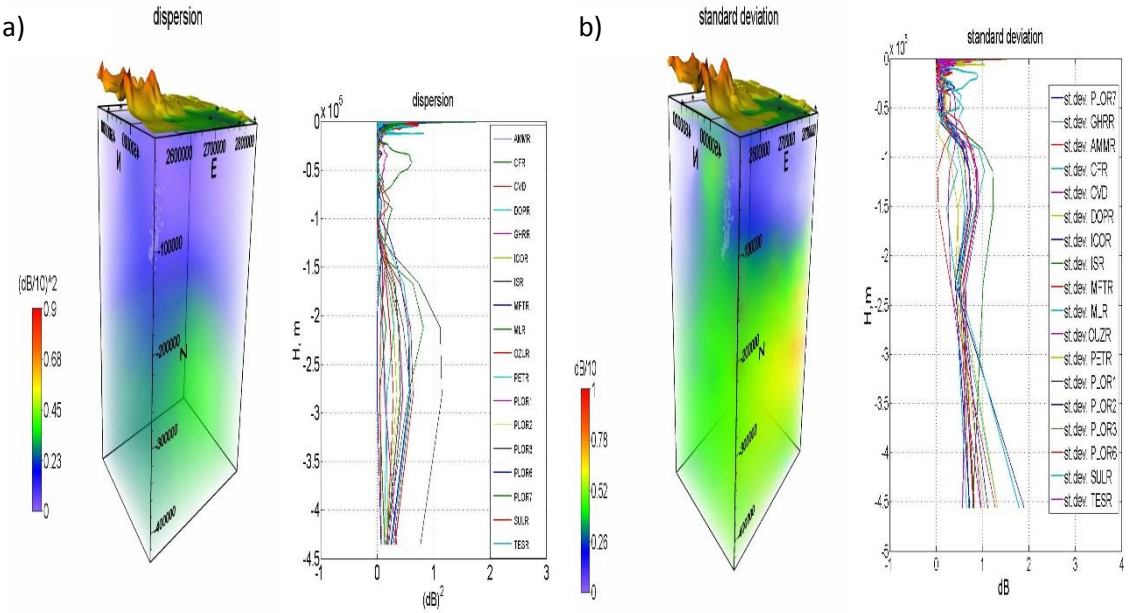


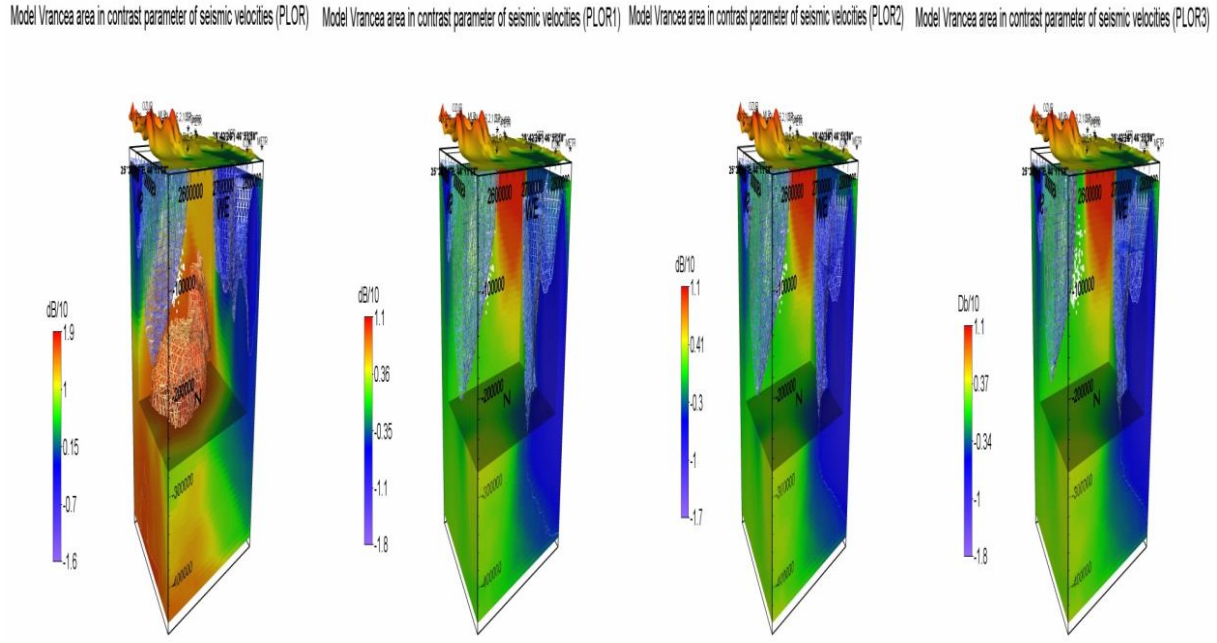
Рис.7. а) Пространсвено и дълбочинно распределение на дисперсията за спектрите на четирите експеримента, проведени на територията на сеизмична зона Вранча. б) пространствено и дълбочинно распределение на стандартното отклонение между спектрите на четерите експеримента.

Забелязва се, че за експериментите провеждани в един и същи ден долните и горни граници на интензивността на полето са близки (01.02.2015- -1,55 - -1,53-долна граница; 2,13 – 2,54 – горна граница; 10.02.2015- -1.14- -1,11 – долна граница; 1,56-1,93 – горна граница) За да се избегнат, грешките при визуално оценка, корелацията между четирите е направена с програмата Image Analysis на Microsoft. На фигура 7.а. пространственото разпределение на дисперсията до дълбочина 200-250 km е в рамките на 0-0.5 ⟦(dB/10)⟧^2. На дълбочина 250 – 400 km тя се изменя от 0.36 ⟦(dB/10)⟧^2 на запад, до 0,5 ⟦(dB/10)⟧^2. на изток. Средно квадратичното отклонение (фиг.7.б) е в рамките на 0-2 dB за всички дълбочини.

Изчислени са коефициентите на корелация между различните експерименти, както и средните коефициенти на корелация. Общият среден коефициент на корелация е 0.67 което показва едно сравнително добро съвпадение на резултатите.

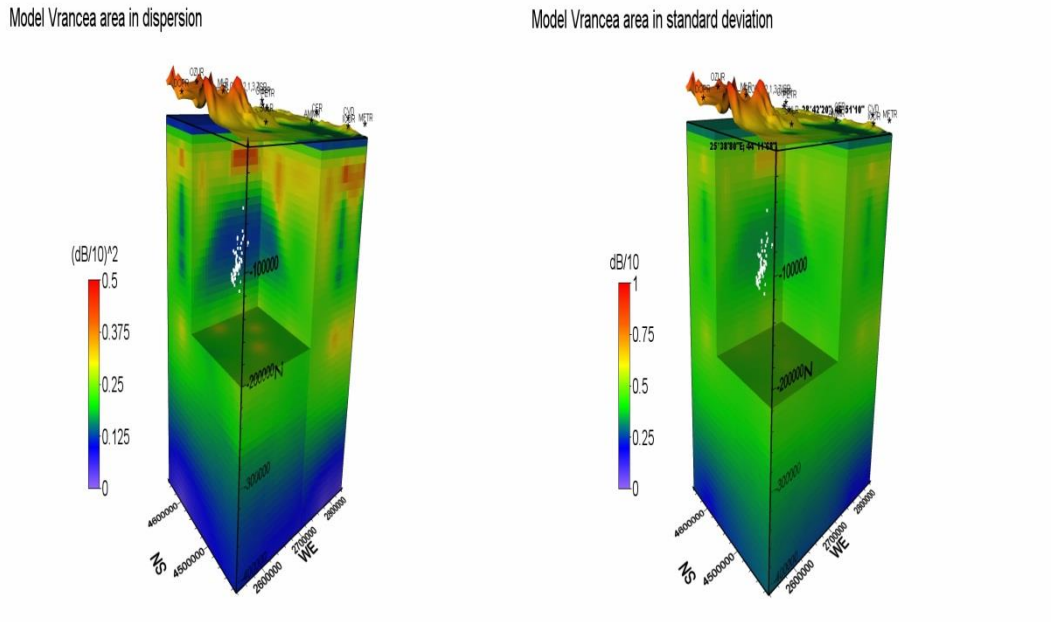
За параметрична оценка на чувствителността на метода при промяна на базовата станция са изчислени коефициентите на корелация между относителните спектри за всяка станция при промяна на базовата станция. Могат да се направят следните изводи: 1.средният корелационнен коефициент между експерименти с базови станции AMMR и PLOR1, AMMR и PLOR2 (първа група експерименти) са много по-малки от 0,5, причината за което е голямата отдаленост на базовата станция AMMR (125,35km) от условния център на зоната ; 2. Корелационните коефициенти са най големи при експериментите с близко разположени базови станции и сходни релефни особености (PLOR1-PLOR2 0,31 km-близко разстояние; AMMR-ISR 83km-сходни условия). Средна стойност на всички коефициенти на корелация – 0.58.

Получените 3D модели на контраста на интензивността на сигнала при промяна на базовите сеизмични станции за втората група експерименти са представени на фиг.8. От оценка за подобие на моделите (Image Analysis на Microsoft) можем да направим извод, че всичките четири модела се корелират относително много добре помежду си. Стойностите на изоповърхнините отразяващи висококоростни граници на интензивността на полето (оттенък на зеления цвят) са много близки: за базова станция PLOR - -0,2 (Db/10); за PLOR1- -0.3(Db/10); за PLOR2 - -0,34(Db/10) и за PLOR3- -0,21(Db/10). Долните и горни граници на промяна на интензивността на полето са съответно: -1.55 – 2.13(Db/10) за базова станция PLOR; -1.76 – 1.26(Db/10) за базова станция PLOR1; -1.71 – 1.18(Db/10) за базова станция PLOR2 и -1.75 – 1.16(Db/10) за базова станция PLOR3. Това са както близки долни граници на интензивността на поето(-1,76 - -1,55), така и близки горни граници на интензивността(1,16-2,13), което е достатъчно да заключим, че отразяват едни и същи геоложки структури.



Фиг.8. Модели на контраста на интензивността на полето при промяна на базовата станция както следва: от ляво на дясно, от горе на долу – базови станции PLOR, PLOR1, PLOR2 и PLOR3.

Дисперсия и средно квадратично отклонение са критериите за оценка на разсейването на данните от четирите експеримента. Построените 3D модели (фиг.9) на дисперсията и средноквадратичното (стандартно) отклонение показват разпределението на разсейването на данните от средната стойност между четирите експеримента в дълбочина, което може да бъде показател за достоверността на получаваните контрастни граници.



фиг.9. Разпределение на а) дисперсията и б) стандартното квадратично отклонение в дълбочина

Заключение

Получените резултати потвърждават коректността на прилагането на технологията на микросеизмичното сондиране сред родствените му повърхностно-вълнови методи. Разликата се заключава в това, че в по- голямата част методи на повърхностно вълновата томография се използва предимно фазова информация. Но, когато размерите на неоднородностите са сравними или по-малки от дължината на вълната , то основната информация можем да получим само от амплитудното поле. Тази ситуация се среща в практиката всеки път, когато наблюдателя се намира близо до скоростната неоднородност, размерът на която не превишава дължината на вълната. И с увеличаване на дълбочината на неоднородността ситуацията не се променя, тъй като на голяма дълбочина за нейната регистрация се налага да се използва голяма дължина на вълната, за която повърхностния наблюдател се намира в също толкова близка вълнова зона. В този смисъл понятието скорост на вълната в близката зона на вторичен източник губи смисъл, доколкото вълната при това още не е разделена на типове, а определянето на скорост от „усреден" тип е некоректно. Амплитудата (или интензивността) остава единствен измерим параметър, по който може да се оценят свойствата на неоднородната среда. Резултатите от числените експерименти дават достоверна информация за устойчивостта, точността и разделителната способност на ММС.

Литература

Alvarez, W. ,1976. A former continuation of the Alps. Geological Society of America Bulletin, 87(6), 891-896.Erickson, L., 1986. User's manual for DIS3D: a 3D dislocation program with applications to faulting in the Earth, Master's thesis, Stanford Univ., 167 pp.

Amodio-Morelli, L., Bonardi, G., Colonna, V., Dietrich, D., Giunta, G., Ippolito, F. & Piccarreta, G., 1976. L'arco calabro-peloritano nell'orogene appenninico-maghrebide. Mem. Soc. Geol. It, 17, 1-60.

King, G.C.P., Stein, R.S. & Lin, J., 1994b. Coulomb static stress technique and the triggering of earthquakes, Geophys. J. Int., 146, 747–759.

Artemieva, I. M., Thybo, H., & Kaban, M. K.,2006. Deep Europe today: geophysical synthesis of the upper mantle structure and lithospheric processes over 3.5 Ga. Geological Society, London, 32(1), 11-41.

De Voogd, B., Truffert, C., Chamot-Rooke, N., Huchon, P., Lallemant, S., & Le Pichon, X.,1992. Two-ship deep seismic soundings in the basins of the Eastern Mediterranean Sea (Pasiphae cruise). Geophysical Journal International, 109(3), 536-552.

Faccenna, C., Funiciello, F., Giardini, D., & Lucente, P.,2001. Episodic back-arc extension during restricted mantle convection in the Central Mediterranean. Earth and Planetary Science Letters, 187(1), 105-116.

Gorbatikov, A. V., Stepanova, M. Y., & Korablev, G. E.,2008. Microseismic field affected by local geological heterogeneities and microseismic sounding of the medium. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 44(7), 577-592.

Gorbatikov, A. V., & Tsukanov, A. A. (2011). Simulation of the Raleigh waves in the proximity of the scattering velocity heterogeneities. Exploring the capabilities of the microseismic sounding method. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 47(4), 354-369.

Oncescu, M. C., & Bonjer, K. P.,1997. A note on the depth recurrence and strain release of large Vrancea earthquakes. Tectonophysics, 272(2), 291-302.

Shapiro, N. M., & Campillo, M.,2004. Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise. Geophysical Research Letters, 31(7).

E.Oynakov & B.Ranguelov. 2016. Sensitivity of the Method of Microseismic Sounding for the Depth's Research in Different Seismic Zones - Vrancea and Calabria. Journal of Physics and Technology, Volume XX, pp. XXX – XXX, 68.