

СЕИЗМИЧЕН АНАЛИЗ НА ЗЕМЕТРЕСЕНИЕТО ОТ 26 НОЕМВРИ 2017 Г. В РАЙОНА НА ГРАД КЛИСУРА

Ирена Александрова¹, Пламена Райкова¹, Емил Ойнаков¹

Представен е сеизмичният анализ на земетресението от 26 ноември 2017 г. с магнитуд $M_p 4.1$, реализирано в района на гр. Клисура. Разгледани са спектралните характеристики на земетресението чрез използване модела на Брун. С прилагането на този модел са определени характеристики, свързани с източника на земетресението, като снето напрежение ($\Delta\sigma$), радиус на източника и магнитуд по сеизмичен момент (M_w). За земетресението е представено подробно изследване на макросеизмичното поле на въздействията. Приложен е и Методът на микросеизмичното сондиране за наблюдаваното събитие.

Ключови думи: интензивност, магнитуд, спектрални характеристики, микросеизми

SEISMIC ANALYSIS OF THE 26TH NOVEMBER 2017 EARTHQUAKE IN THE TOWN OF KLISURA, BULGARIA

Irena Aleksandrova, Plamena Raykova, Emil Oynakov

Abstract: The seismic analysis of the earthquake of 26 November 2017 with magnitude $M_p 4.1$, realized in the area of Klissura, is presented. The spectral characteristics of the earthquake are explored using the Brune model. Applying this model, features associated with the earthquake source, such as the stress drop ($\Delta\sigma$), the source radius and the seismic moment (M_w) magnitude, are determined. A detailed study of the macro-seismic field of impacts is presented for the earthquake. The Micro Seismic Drilling Method for the observed event is also applied.

Keywords: intensity, magnitude, spectral characteristics, microseisms

¹ Департамент Сеизмология – НИГГТ, БАН; i.alex@abv.bg; emil.ilievmg@gmail.com

УВОД

В съвременен плейт-тектонски аспект територията на България принадлежи към южната крайнина на Евроазиатската плоча. Геодинамиката на региона се определя основно от субдукцията на Африканската плоча в зоната на Егейската арка и колизията на Арабската плоча с Евроазиатската. Територията на Южна България попада в най-северната, гранична област на региона и е с преобладаващ екстензионен характер на коровите движения, дефиниран като Южнобалканска екстензионна зона (напр. Burchfiel et al., 2000). Скоростите на хоризонталните движения на земната кора за Южна България по GPS данни не надминават 3-5 mm/год., като обикновено са от порядъка на 1-2 mm/год. Посоката на движение спрямо Евразия е юг-югоизток, което предизвиква екстензия в посока север-юг и образуването на структури с посока изток-запад, например Софийския грабен и др. (напр. Nakov et al., 2005).

От сеизмологична гледна точка българските земи са част от Алпо-Хималайския сеизмичен пояс, характеризиращ се с високо ниво на сеизмичната активност. През изминалите векове България е била подложена на силни земетресения. Първите писмени сведения за земетресение на територията на страната се отнасят към I век пр.н.е. В началото на XX век по територията на България се реализира поредица от разрушителни сеизмични събития (5 земетресения с магнитуд ≥ 7). С висока и интензивна сеизмична активност се характеризира Югозападна България през периода 1904–1906 г. Тази сеизмична поредица започва на 4 април 1904 г. с реализацията на две катастрофални земетресения (с магнитуд > 7.0) в интервал от 23 минути. През 1928 г. по долината на р. Марица (в централната част на Южна България) се реализира поредица от три силни земетресения. След тях на територията на България не са генерирани други катастрофални земетресения. Най-силното събитие през XX век, след 1928 г., е земетресението от 1986 г., с магнитуд $M_s 5.7$, реализирано в Централна Северна България (близо до гр. Стражица).

В настоящото изследване е анализирано земетресението от 26.11.2017 г., което е с магнитуд $M_p 4.1$ и епицентър на около 4 km в посока север-северозапад от гр. Клисура, община Карлово, област Пловдив. Земетресението е реализирано в област, която не се характеризира със силна сеизмичност. Историческата и съвременната сеизмичност, характерна за района в близост до града, е от слаба до умерена. Максималните интензивности, наблюдавани за района в исторически и съвременен план, достигат до $I_{max} = 5.0$.

МАКРОСЕИЗМИЧНО ПОЛЕ НА ВЪЗДЕЙСТВИЯТА

Макросеизмичните въздействия върху хората, сградите и околната среда са ефект от обемните (надлъжни и напречни) и повърхностни сеизмични вълни, генерирани при реализация на земетресение. Интензивностите, проявени в уязвената територия, са в пряка зависимост от силата на земетресението – M , дълбочината на огнището – h (km), и епицентралното разстояние – Δ (km) (разстоянието от епицентъра до наблюдаваната точка). Силата на въздействието на повърхността е във взаимовръзка с механизма на източника, строежа на среда-

та, в която се разпространяват сеизмичните вълни, локалния геоложки строеж, ниво на подпочвените води и др. В епицентралната зона на силните плиткки земетресения се добавят и ефекти от вълни на напрежения и деформации, пряко свързани с разрушението на средата в огнищната зона. Следователно макросеизмичното въздействие, наблюдавано върху земната повърхност, е многофакторен сумарен ефект, а наблюдаваната интензивност (макросеизмична степен) е интегрална мярка за това въздействие.

Макросеизмичната интензивност (степен) е интегрален неинструментален показател за силата на земетръсните въздействия върху земната повърхност (хора, сгради, съоръжения и естествена среда). С помощта на прилаганите макросеизмични скали описателната информация се конвертира в цифрова оценка на интензивността, която може да се съпоставя с числени характеристики на параметрите на земното движение: ускорение, скорост и преместване на частиците. В еднородна среда излъчените от земетръсното огнище сеизмични вълни ще оказват най-силно въздействие върху земната повърхност в околността на епицентъра Е (епицентрална зона). В този случай те изминават най-кратък път, равен на фокалната дълбочина (h) на източника, и затихват незначително. Затихването на сеизмичните вълни е пропорционално на честотата на колебанията $f=1/T$ и на разширението на вълновия фронт, съответно пробега на вълната, в общия случай хипоцентралното разстояние $r=(\Delta^2+h^2)^{1/2}$. С отдалечаване от епицентъра на земетресението плътността на потока излъчена енергия намалява, а вълновото поле обеднява на високочестотни компоненти поради по-бързото им затихване, т.е. затихването на интензивността може да се изрази като функция от магнитуда, хипоцентралното и епицентралното разстояние.

Оценките на интензивността в епицентралната зона зависят от огнищните параметри – магнитуд, механизъм, дълбочина на източника, честотен състав на излъчените вълни, както и от чувствителността на застроената среда и наблюдателите, а на по-големи разстояния съществено влияние оказват няколко фактора – азимутални вариации в излъчената енергия и различия в разсейването на сеизмичните вълни, преминали през структурите на кората и горната мантия. Интензивността в епицентралната зона се отбелязва с I_0 . С изолинии се ограждат области с равни интензивности (I_i) и съставляват графичното изображение на макросеизмичното поле, оформяйки макросеизмичната карта. Поради възможността от субективизъм при изграждане на изосейстното оконтуряване съществува съвременно схващане за представяне на макросеизмичното поле без изолинии. Друг важен параметър е най-високата наблюдавана стойност на интензивността в макросеизмичното поле – I_{max} . За земетресения с епицентри на сушата I_0 и I_{max} могат да бъдат равни. За описване затихването на макросеизмичното поле се използват главно два модела – на Kovesligethy (1907) (1) и на Blake (1941) (2), като обикновено се прилагат по-новите трактовки и модификации на Shebalin et al. (1974) и Христосков (2007).

$$I = I_0 - 3 \log(r/h) - 1.3\alpha * (r - h), \quad (1)$$

където r е епицентрално разстояние (km); h – дълбочина на източника (km); α – абсорбиционен коефициент.

$$I_0 - I_i = s \log [1 + (\Delta_i / h)^2]^{1/2}, \quad (2)$$

където h – хипоцентрална дълбочина; Δ_i – епицентрално разстояние до мястото с интензивност I_i ; s – коефициент на затихване.

Земетресението, предмет на изследване в настоящата работа, реализирано на 26.11.2017 г., в 21h 01min местно време, е с епицентър на около 4 km в ССЗ посока от гр. Клисуря, в планински район между Средна гора и Стара планина. Инструменталният магнитуд (M_p , дефиниран в Christoskov et al., 2012), оценен в максималното отклонение на Р-вълната, е 4.1, а хипоцентралната дълбочина е на 14 km. Това е най-силното земетресение, наблюдавано в областта през ХХI век до момента. Първоначалните данни сочат, че земетресението е усетено в по-голямата част от страната ни. Макросеизмичното проучване има за цел да предостави еднозначно разпределението на интензивностното поле на въздействията. Оценените интензивности може да се слоят с историческите земетресения и свързаната с тях макросеизмична база данни.

На страницата на НИГГГ–БАН са попълнени 118 макросеизмични онлайн въпросника от около 60 населени места. Това позволи да бъде определена интензивността на земетресението по скалата на Медведев-Шпонхойер-Карник (МШК–64) в различните селища (фиг. 1 – приложение). Максималните интензивности от 5^{та} степен са концентрирани в близост до епицентъра в районите на градовете Клисуря и Копривщица и селата Антон и Розино. Разпространението на 4^{та} степен достигна районите на Правец, Гложене, Карлово, Троян, оформяйки област от около 3.760 km², а интензивностите от 3^{та} степен покриха площ от 16.300 km². Най-отдалечената точка на усещане с интензивност, по-ниска от 3^{та} степен, е на 177 km от епицентъра, в района на гр. Русе.

Над 19 % от сведенията показват, че хората определят земетресението като „силно“, с уплаха, предизвикана у много хора, част от тях описват: „отместване, падане или преобръщане на малки предмети“ и „тракане на врати и прозорци до отваряне“. Повече от половината анкетирани го описват основно с треперещи ефекти.

Въздействията от умереното земетресение с магнитуд M_p 4.1 не са свързани с влияние върху сградния фонд и инфраструктурата в епицентралната зона.

За да се проследи сеизмичността във и в близост до епицентъра на земетресението, е разгледана историческата и съвременната активност на района в пространствен прозорец 42.4°–42.7° N и 24.0°–25.0° E. Сеизмични изяви в изследваната област са потърсени в наличните исторически документи, публикувани в сеизмологични данни (Watzof, 1902, 1903–1923; Staikof, 1930; Киров, 1931–1961; Grigorova et al., 1964) и каталожната информация на Националната оперативна телеметрична система за сеизмологична информация (НОТССИ) (НИГГГ). Не са намерени данни за земетресения с интензивностни въздействия в района, надвишаващи $I_{max} = 5^{та}$ степен.

СПЕКТРАЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Спектралният анализ на обемните сеизмични вълни съдържа информация за параметрите на сеизмичния източник, физичните свойства на средата и сеизмогенните процеси, протичащи в нея. В много изследвания за определянето на тези спектрални характеристики се прилага моделът на Brune (1970, чрез който се изчисляват характеристики, свързани с източника на земетресението, като снето напрежение ($\Delta\sigma$), радиус на източника и магнитуд по сеизмичен момент

(M_w). Моделът е широко прилаган в спектралния анализ и е в добро съответствие с наблюденията от различни тектонски региони.

Сеизмичният момент (M_0) е величина, която обединява площта на разкъсване и остатъчното преместване по разлома с якостните свойства на средата. В повечето случаи той се измерва директно от сеизмограмите – размерът на дългопериодните вълни, генерирани от едно земетресение, е пропорционален на сеизмичния момент.

Магнитудът по сеизмичен момент (M_w), свързан със сеизмичния момент $M_w = 2/3 \log M_0 - 6.07$, се счита за най-надеждната величина, която точно описва размера на земетресенията.

Чрез спректрите на сеизмичните вълни освен сеизмичният момент може да се определи и още един важен параметър: свалено напрежение (*stress drop*). Това напрежение е разлика между първоначалната и крайната стойност на напрежението в средата. Това е критичен параметър, пряко свързан с даден сеизмичен момент (Frankel, 2009). Напрежението е различно при различните земетресения, като могат да се наблюдават отклонения в неговата стойност поради различните физични свойства на средата и различната дълбочина на земетресенията. Наблюдаваните стойности на този параметър са между 10 и 100 бара, или от 1 до 10 МПа.

За изследване спектралните характеристики на земетресението е приложена методика, която следва модела на Brune (1970). Създадена е програма, базирана на този модел, за изчисляване някои параметри, които са оценени по спектрите на Р- и S-вълна. Определени са параметрите на огнището като: сеизмичен момент (M_0), свалено напрежение ($\Delta\sigma$), радиус на източника и магнитуд по сеизмичен момент (M_w). Като основни източници на информация за разгледаните земетресения са използвани данни от НОТССИ.

В изследването са разгледани спектрите както по Р-вълни, така и по S-вълни. За събитието от 26.11.2017 г. в района на гр. Клисуря са използвани входни данни от десет станции, като за всяка станция са направени спектри по Z, N, E компоненти. Сигналите, които са разгледани в изследването, са калибрирани според съответния прибор във всяка станция. Стойностите на параметрите, характеризиращи огнището, са получени чрез методиката, представена по-долу.

За определянето на сеизмичния момент по спектъра на Р-вълната е използвана следната методика:

$$M_{0P} = \frac{\rho \cdot 4\pi \cdot \Omega_p \cdot R \cdot v_p^3}{0.52} \quad (3)$$

където M_{0p} е сеизмичният момент за Р-вълната, ρ – плътността на средата, Ω_p – платото, определено чрез спектъра на вълната, v_p – скоростта на вълната, R – радиусът, който зависи от епицентралното и хипоцентралното разстояние ($R = \sqrt{\Delta^2 + h^2}$), направлението на излъчване е 0.52 за Р-вълната.

Сеизмичният момент по S-вълна се дава със следното уравнение:

$$M_{0S} = \frac{\rho \cdot 4\pi \cdot \Omega_s \cdot R_s \cdot v_s^3}{0.63} \quad (4)$$

където M_{0s} е сеизмичният момент за S-вълната, ρ – плътността на средата, Ω_s – платото, определено чрез спектъра на вълната, като стойностите му се определят по Z, N, E – компонента ($\Omega_s = \sqrt{\Omega_Z^2 + \Omega_N^2 + \Omega_E^2}$), направлението на излъчване за S-вълната е 0.63, а v_s е скоростта на вълната.

За определянето на радиуса на източника и сваленото напрежение (*stress drop*) са приложени следните формули:

$$S_p = \frac{M_{0p}}{R_p^2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot v_p^2} \quad (5)$$

където M_{0p} е сеизмичният момент за P-вълната, ρ – плътността на средата, v_p – скоростта на вълната, а под R се има предвид средният радиус, който се определя чрез: $R_p = \frac{v_p \cdot 3.36}{2\pi \cdot f_0}$, като f_0 е ъгловата честота в Hz.

За S-вълната радиусът на източника се определя по идентичен начин:

$$S_s = \frac{M_{0s}}{R_s^2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot v_s^2} \quad (6)$$

където M_{0s} е сеизмичният момент за P-вълната, ρ – плътността на средата, v_s – скоростта на вълната, а под R се има предвид средният радиус, който се определя чрез: $R_s = \frac{v_s \cdot 2.34}{2\pi \cdot f_0}$.

За свалено напрежение за P- и S-вълните са в сила следните формули:

$$\Delta\sigma_p = \frac{7}{16} \frac{M_{0p}}{R_p^3} \quad (7)$$

$$\Delta\sigma_s = \frac{7}{16} \frac{M_{0s}}{R_s^3} \quad (8)$$

където R_p и R_s са средният радиус за P- и S-вълните.

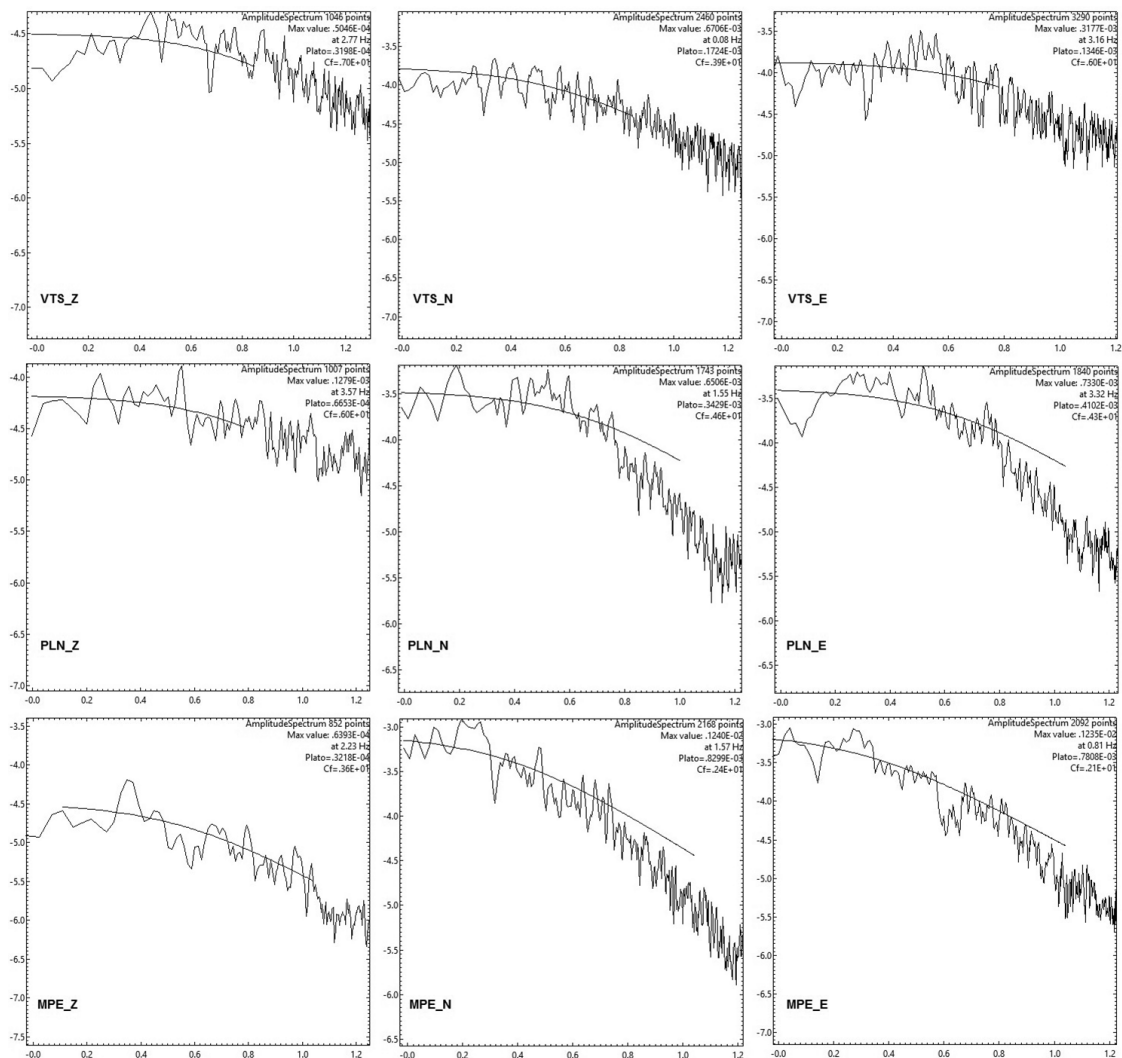
За събитието от 26.11.2017 г. $T_0=19:11:31$ с магнитуд $M_p 4.1$ са генерирани 40 спектъра по преместване за P- и S-вълни, като са използвани записи от трите компонента на 10 станции. На фиг. 2 са представени спектрите по записите на три от най-близките до епицентъра станции, регистрирали земетресението.

Параметрите на сеизмичния източник и броят на станциите, по които са оценени, са дадени в табл. 1.

Таблица 1

Оценки на параметрите на сеизмичния източник за земетресение от 26.11.2017 г., генерирано в района на гр. Клисуроа

| Дата Ден месец година | Координати $\varphi(^{\circ}) / \lambda(^{\circ})$ | h (km) | M_p | Бр. станции | M_{wp} | $\Delta\sigma_p$ | Радиус на източник (km) | M_{ws} | $\Delta\sigma_s$ | Радиус на източник (km) |
|-----------------------------|---|--------|-------|-------------|----------|------------------|-------------------------------|----------|------------------|-------------------------------|
| 26.11.2017 г. | 42.70/ 24.40 | 14 | 4.1 | 10 | 4.0 | 79.97 | 0.46 | 4.05 | 79.81 | 0.49 |



Фиг. 2. Спектри (за P- и S-вълна) на земетресението от 26.11.2017 г., $T_0=19:11:31$, генерирани по записи от 3 станции

Получените резултати показват, че стойностите на сваленото напрежение са приблизително 80 бара, за P- и S-вълна (очакваните стойности са в диапазона $10 \div 100$ бара), а радиусът на източника е около 0.5 km за P- и S-вълна. Определението за магнитуд по сеизмичен момент за P-вълна е $M_w 4.0$, а за S-вълна е $M_w 4.1$. Магнитудните оценки са приблизително еднакви с оценката $M_p 4.1$, прилагана в рутинната практика на НОТССИ. За умереното земетресение в района на гр. Клисурска стойностите за параметри, получени чрез прилагане на модела на Brune, са в очаквания диапазон.

МЕТОД НА МИКРОСЕИЗМИЧНО СОНДИРАНЕ (ММС)

За да се потърси връзка между хипоцентрите на земетресенията от разглежданата област с геоложкия строеж на средата, в която са генерирани, е приложен Методът на микросеизмичното сондиране (ММС). Този метод е разработен в Институтта по физика на Земята (О.Ю. Шмид) към РАН (Горбатиков, 2006а,б; Горбатиков и др., 2007; Горбатиков и др., 2008д), основан е на способността на вълните на Рейли да увеличават интензивността си при преминаване през области от литосферата с относително по-ниски скорости и да я намаляват при преминаване през такива с по-високи скоростни характеристики. В този случай, когато тази нехомогенност се намира на определена дълбочина, на повърхността се усеща съответна промяна в интензитета. В литосферата вълната най-силно „реагира“ на дълбочина, близка до половината от дължината на вълната. По този начин може да се съди за дълбочината на залягане на тази област. Всички изброени особености са потвърдени експериментално и чрез числови модели (Горбатиков и др., 2007; Горбатиков и др., 2008а,в; Собисевич и др., 2008; Горбатиков и др., 2009; Ойнаков, 2016). Следователно в резултат от последователните измервания на микросеизмичните колебания може да се получи информация за строежа на геоложката среда.

За реализация на метода е необходимо да се определи спектърът на вълните на Рейли във всяка точка на измерване. За тази цел се провежда натрупване на статистически устойчив микросеизмичен сигнал. Имайки предвид, че голяма част от енергията се пренася от повърхностни вълни, а тяхното затихване е на порядък по-малко от това на обемните, може да се очаква, че спектърът на натрупания сигнал на вертикалния канал (Z компонента) ще се определя предимно от вълните на Рейли. Последното предположение е потвърдено от много изследователи (Рыкунов, 1967; Винник, 1968; Бат, 1980). С цел постигане преобладаване на вълните на Рейли в изходния сигнал е необходимо да се избират „най-благоприятните“ условия за регистрация на сигнала, а по време на обработката на измерванията е нужно да се филтрират техногенните смущения. За отстраняване влиянието на времевите вариации на микросеизмите се използва опорна станция. Съгласно данните от експерименти, микросеизмичните спектри в честотния диапазон от 0.12 до 1.1 Hz започват да се стабилизират при натрупване на сигнала след около 1 час. По този начин изследването на микросеизмичното поле се свежда до измерване на статистически устойчивите спектри във всички точки по профила (мрежата) в продължение на 1-2 часа едновременно с регистрацията на микросеизмите в опорния пункт.

В процеса на обработка първо се построяват усреднените спектри на мощността на най-слабо зашумените отрязъци от записа. След това се изчислява относителната интензивност на микросеизмите между опорната и подвижната станция за всяка честота. Следващата стъпка е преизчисляването на честотата в дълбочина по формулата:

$$h = 0.4 * \lambda, \lambda = 9/v, \quad (9)$$

където: λ – дължина на вълната; h – дълбочина; v – скорост; ν – честота.

В резултат от обработката се получава сеизмично изображение на средата, на което зоните с по-голяма стойност на относителната интензивност съответстват на зони с по-високи скоростни свойства, и обратно.

Дълбочинното геофизично изследване на зоната около гр. Клисура е направено въз основа на записите от 8 широколентови сеизмични станции, които са част от сеизмичната мрежа на България. Полученото с микросеизмичния метод тримерно изображение отразява разположението и формата на геоложките структури с различни плътностни свойства от вместицата среда по параметъра контраст на сеизмичните скорости или контраст на интензивността на полето.

С черните точки в модела (фиг. 3 – приложение) са отбелязани хипоцентрите на земетресенията с магнитуд $M \geq 2.0$, наблюдавани в изследваната област за периодите XIX, XX и XXI век (до края на 2017 г.). Дълбочината на изследването е 40 km. От всички сеизмични станции са взети едновременни сеизмични записи, направени на 19.07.2017 г. за интервала 00:00:00-01:00:00 часа, от които са изчислени мощностни спектри за всяка станция. Разпределението на вариациите на интензивността е определено поотделно по отношение на три базови опорни станции – Мусомища, Вълчедръм и Рояк (MMB, VLD и ROIA). Трите модела са обобщени и показани на фиг. 3.

При преизчисляването на спектралните честоти в дължини на вълните са отчетени дисперсионните свойства на вълните на Рейли, а именно увеличението на скоростта с увеличаването на дължините на вълните. За тази цел е използван скоростен модел, създаден от F. Hauser (2002, VRANCEA2001).

На полученото 3D изображение (фиг. 3) по параметъра контраст на интензивност на микросеизмичното поле ясно се откроява относително високоскоростна зона (-8 dB, маркирана в тъмнозелен цвят) с разпространение в хоризонтален план – ясно ограничена от юг и продължаваща зад изследвания район на северозапад, простираща се вертикално под зоната на изследване. Една относително нискоскоростна зона (2 dB, маркирана в светлозелен цвят), разположена югозападно от хипоцентраната зона, достигаща до 6000 m дълбочина и разпростираща се до 40 000 m дълбочина в направление изток–североизток. Фигурата илюстрира някои особености в разглежданата хипоцентрална зона. Зоната е в област, ограничена от северозапад от високоскоростна зона (-8 dB), а от североизток – от нискоскоростна (2 dB), като не се наблюдават открояващи се следи от разломна структура.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От анализа на получените резултати за земетресението, генерирано в близост до гр. Клисура, могат да се направят следните заключения:

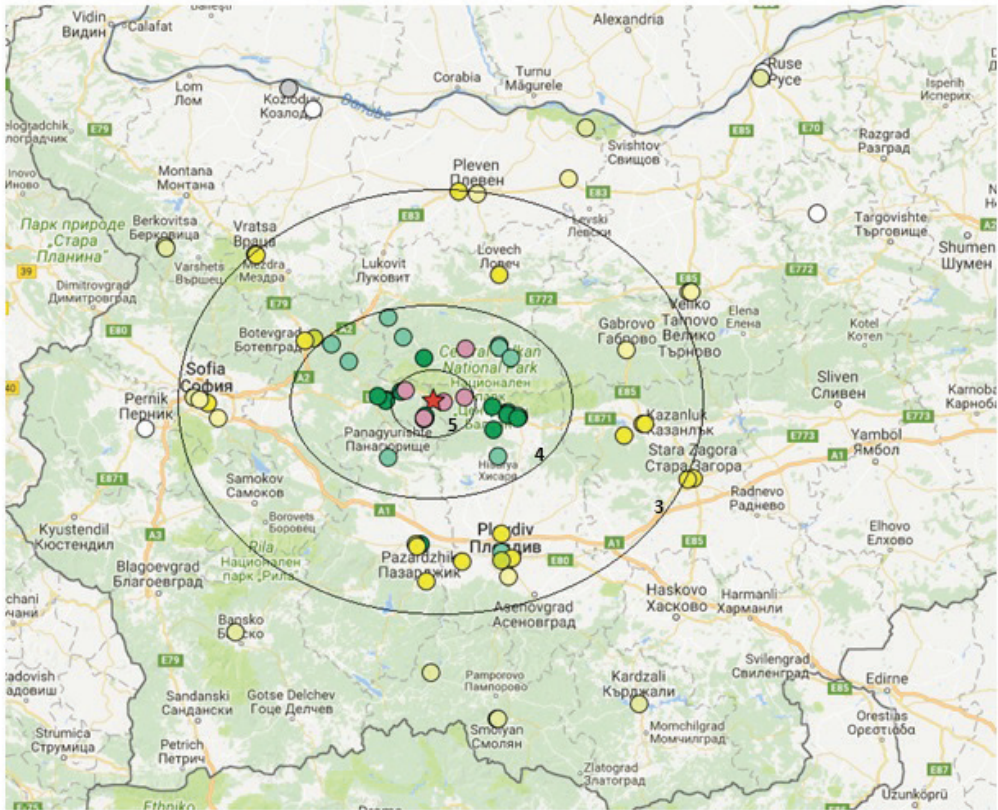
- Стойностите за параметри, получени чрез прилагане на модела на Brune за разглежданото умерено земетресение, са в очаквания диапазон. Получените магнитудни оценки са приблизително еднакви с оценката, прилагана в рутинната практика на НОТССИ.
- Анализиранията област е характерна предимно с нискомагнитудни събития.
- Въздействията от умереното земетресение не са свързани с влияние върху сградния фонд и инфраструктура в епицентралната зона.

• Хипоцентралната зона принадлежи към еднородно пространство, без индикация за разломни структури, обоснована от контраста на интензивността на полето на вълните на Рейли. За по-детайлно изследване с цел дефиниране на тектонска структура по ММС е необходимо наличие на по-гъсто разположена наблюдателна мрежа.

ЛИТЕРАТУРА

- Горбатилов, А.В.** Патент на изобретение № RU2271554. „Способ сейсморазведки“. Дата приоритета 25.03.2005, Бюл. №, 10.03.2006./ Gorbaticov A.V. Patent for invention number RU2271554. “Method of seismic exploration”. Date priority 25.03.2005 // Bul. №, 10.03.2006. (Ru)
- Горбатилов, А.В., М.Ю. Степанова, Х. Арнозо, Ф. Монтесиньос.** Развитие модели острова ЭльИерро Канарского архипелага на основе комплексной интерпретации результата в низкочастотного микросейсмического зондирования и гравиметрических исследований //Материалы конференции, 2008, с. 60-70. * Gorbaticov A.V., M.Yu. Stepanova, H.Arnoso, F.Montesinos. The development of the ElIerro island model of the Canary archipelago based on the integrated interpretation of the results of low-frequency microseismic sounding and gravimetric studies // Proceedings of the conference, 2008, p. 60-70. (Ru)
- Горбатилов, А.В., М.Ю. Степанова.** Результаты исследований статистических характеристик и свойств стационарности низкочастотных микросейсмических сигналов. // Физика Земли, 2008, Л»21, с. 57-67./ Gorbaticov A.V., M.Yu. Stepanova. The results of studies of statistical characteristics and properties of stationarity of low-frequency microseismic signals. // Physics of the Earth, 2008, L “21, p. 57-67. (Ru)
- Киров, К.** 1931. Земетресенията в България. Отчет на усетените земетресения през годините 1917-1927. Цент.Мет.Инст С., 18-28, 163 с./ Kirov, K. 1931. The earthquake in Bulgaria during 1917-1927. Centr. Meteorol. Inst., (Sofia), p.18-28. (Bg)
- Киров, К.** 1941. Земетресенията в България. Отчет на усетените земетресения през годините 1931-1940. Цент.Мет.Инст., С., 32-41, 112 с./ Kirov, K. 1941. The earthquake in Bulgaria during 1931-1940. Centr. Meteorol. Inst., (Sofia), p. 32-41. (Bg)
- Киров, К.** 1945. Земетресенията в България. Отчет на усетените земетресения през годините 1928-1930. С., 29-31, 149 с./ Kirov, K. 1945. The earthquake in Bulgaria during 1928-1930. State Publishing House “Forms and Registers”, pp.29-31. (Bg)
- Киров, К., Е. Григорова.** 1957. Земетресенията в България през 1951-1954. Държ.Изд. „Форм. и Рег.“, С., 132 с./ Kirov, K., E. Grigorova. 1957. The earthquake in Bulgaria during 1951-1954. State Publishing House “Forms and Registers”, p.132. (Bg)
- Киров, К., К. Палиева.** 1959. Земетресенията в България през 1955-1957. Държ.Изд. „Форм. и Рег.“, С., 60 с./ Kirov, K., K. Palieva, 1959. The earthquake in Bulgaria during 1955-1957. State Publishing House “Forms and Registers”, p.60. (Bg)
- Киров, К., К. Палиева.** 1961. Земетресенията в България през 1958-1960, С., стр.70./ Kirov, K., K., Palieva. The earthquake in Bulgaria during 1958-1960. State Publishing House “Forms and Registers”, p. 70. (Bg)
- Христосков, Л.** 2007. Сеизмология – част II Земетръсни източници и вълново поле в Земята. Университетско издателство „Св. Климент Охридски“, София, 455 с./ Christoskov, L. 2007. Seismology - part II Earthquake sources and wave field in the Earth. University Publishing House “St. Kliment Ohridski “, Sofia, 455 p. (Bg)
- Blake, A.** 1941. On estimation of focal depth from macroseismic data. BSSA, 1 31, 3, 787-791.

- Burchfiel, B.C., R. Nakov, Tz. Tzankov, L. Royden.** 2000. Cenozoic extension in Bulgaria and northern Greece: the northern part of the Aegean extensional regime. – In: Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area, Geological Society London, Special Publication 173, eds. Bozkurt et al., 325-352.
- Nakov, R., V. Kotzev, C. Burchfiel, R. King.** 2005. Ten years of GPS Studies on the Active Tectonics of Bulgaria: an Overview and basic results. In: Proc.of B.G.S. Int.Conf., eds., Y. Yanev, R. Nedialkov, 46-49.
- Brune, J.** 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 75, 4997–5009.
- Brune, J. N.** 1971. Correction (to Brune (1970)). *J. Geophys. Res.* 76, 5002.
- Christoskov, L., L. Dimitrova, D. Solakov.** 2012. Magnitude determinations of P wave by digital broadband seismometers of NOTSSI network for local and regional events. *Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences*, 65 (5).
- Hauser, F., C. Prodehl, M. Landes.** VRANCHEA WORKING GROUP, 2002. Seismic experiments target earthquake – pron region in Romania. *EOS Trans. AGU* 83, 457-463.
- Frankel, A.** 2009. A constant stress-drop model for producing broadband synthetic seismograms: Comparison with the Next Generation Attenuation relations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99(2A), 664-680, doi: 10.1785/0120080079.
- Oynakov, E.** 2016. Deep seismic sauding by microseismic tremor (SSMT) broadband signals for Calabria seismic zone. *International Academi Jarnal. Web of Scholar*, ISSN 2518-167X, 6 (6). October 2016, 35.
- Kovesligethy von, R.** 1907. Seismischer Starkegrad und Intensitat der Beben, *Gerlands Beitrage zur Geophysik*, Band VIII, Leipzig.
- Grigorova, E., B. Grigorov.** 1964. Epicenters and seismic lines in P.R. of Bulgaria. *Publ. Hous of Bulg.Acad. Sien., S.*, pp 83 (in Bulgarian, Res. In French).
- Staikof, S.** 1930. Materiel sur la seismographie de la Bulgarie, la Thrace et la Macedoine. *J. Bulg. Acad. Sci.*, XLII, S., pp15-45.
- Shebalin, N.V., V. Karnik, D. Hadzievski** (Editors). 1974. Catalogue of Earthquakes. Part I and Part II. UNDP/UNESCO Survey of the seismicity of the Balkan region, UNESCO, Skopje, 600 pp.
- Watzov, S.** (1902, 1903, 1904...1923). Earthquakes in Bulgaria. Report on earthquakes felt in XIXc., and during 1901, 1902,..., 1913-1916. *CMI, S.*, pp. 1-17 (Bg, Fr)



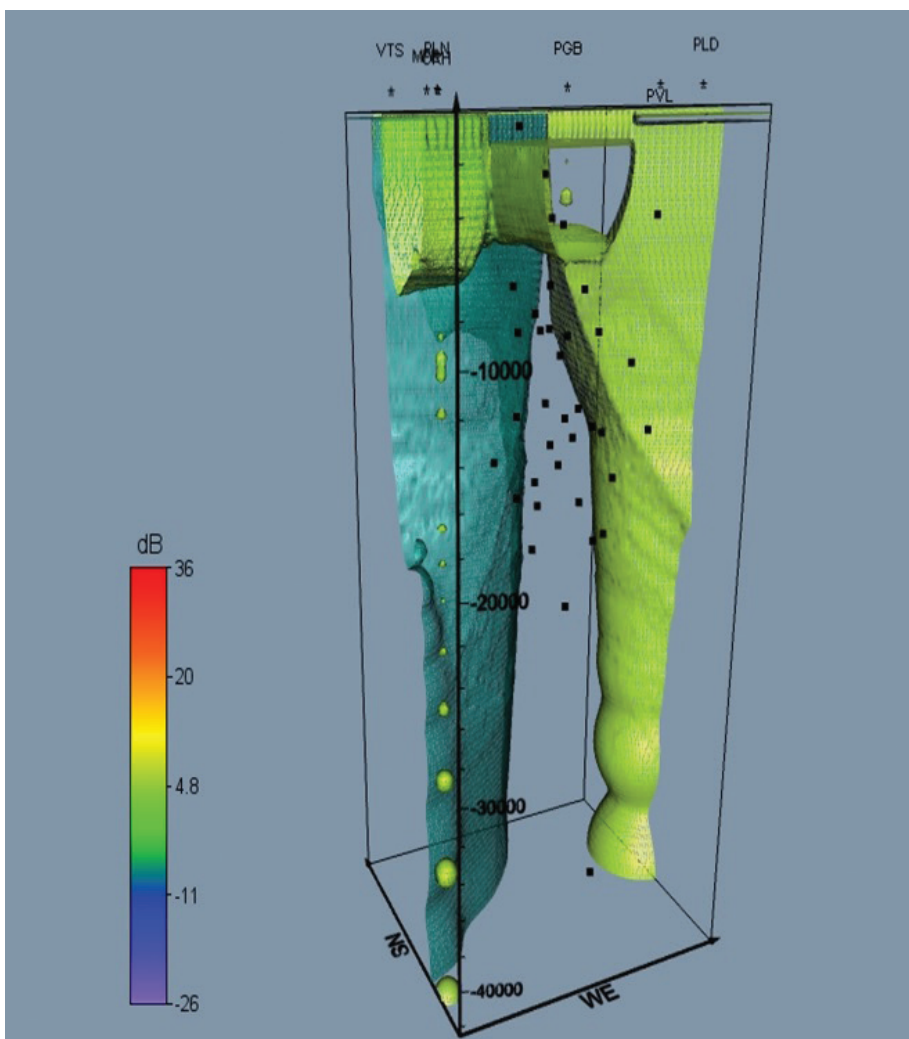
50 km



Legend: ★ Epicenter
Intensity (MSK-64)



Фиг. 1. Макросейзмична карта на земетресението от 26.11.2017 г., $I_{\max} = 5$



Фиг. 3. Обобщен модел (съобразно трите базови станции – ММВ, VLD и ROIA) на контраст на скорости на вълните на Рейли в дълбочина спрямо вместващата среда; * – местоположение на станциите (надм. в. е относителна)