

МИКРОСЕИЗМИЧНО СОНДИРАНЕ, СТАТИСТИЧЕСКИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПОЛЕТО В РАЙОНА НА ИНТЕРМИЗИЙСКИЯ РАЗЛОМ

Емил Ойнаков

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, emil.ilievmg@gmail.com

РЕЗЮМЕ. Представен е метод за построяване на дълбочинни разрези по относителната вариация на амплитудите и относителния контраст на сеизмичните скорости. Характерно за дълбочинното сеизмично сондиране е, че не се използват активни източници. Преимущества на метода са: съответствие на съвременните екологични изисквания за невзривно изучаване на дълбочинния разрез; много по-ниски разходи за осъществяване на измерванията, особено ако се имат предвид изследвания на значителни дълбочини. Показани са резултатите от определянето на статистическите характеристики на микросеизмичното поле и обработката на данните от полевите измервания в северо-източната част на България (зоната на т.н. Интермизийски разлом) по Метода на микросеизмичното сондиране. Те са съпоставени с предишни известни резултати.

Ключови думи: сеизмика, метод на микросеизмичното сондиране, Интермизийски разлом

MICROSEISMIC SOUNDING, STATISTICAL CHARACTERISTICS AND APPLICATION FOR THE REGION OF INTERMIZIYSKI FAULTS

Emil Oynakov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, emil.ilievmg@gmail.com

ABSTRACT. The micro seismic sounding (MMS) is a method for investigation of the deep structure using relative variation of the amplitudes and relative contrast of the seismic velocities. Usually the deep seismic prospecting is using active sources. Advantages of the method of (MSS) are: on one hand it corresponds to the modern environmental requirements for unexploded study of deep interior. On the other has a much lower cost of carrying out the measurements, especially if consider studies of larger Earth's depths. Below are the results of the determination of the statistical characteristics of microseismic field and processing of data from field measurements in north-eastern Bulgaria (area related usually to the Intra-Moesian fault). The method used all peculiarities of the micro seismic sounding (MSS). The results are compared with the previous known studies.

Key words: seismic, method microseismic boring, Intermiziyski fault

Въведение

Резултатите от изследването на микросеизмичното поле показват, че микросеизмичните колебания се проявяват в широк честотен и динамичен диапазон. Честотите варират от стотни части от Hz до няколко kHz, а амплитудата на колебание на точките на средата от части от нанометъра до няколко микрона. Основната енергия на микросеизмичния шум е концентрирана в диапазона честоти 0,05-0,25 Hz (периоди 12-20 s). Енергетичният спектър на микросеизмите, характерен за наблюденията на сушата, има два максимума: първият в честотния диапазон 0,05-0,08 Hz (периоди 12-20 s), вторият 0,01-0,25 Hz (периоди 4-10 s). По своята природа микросеизмите се явяват повърхностни еластични вълни.

Понастоящем съществува добре установена класификация на фоновото поле по характерния честотен диапазон. Разграничават се дългопериодни сигнали с $T > 1s$ и късопериодни - с период $T \leq 1s$. Това в първо приближение съответства на разделянето на микросеизмите на такива с естествен и изкуствен произход (Bard, 1999).

Микросеизмичното сондиране е метод, при който за оценка на геоложките параметри, се използват пространствените свойства на спектралните характеристики на микросеизмичния сигнал, измервани с отделни преносими прибори. Затова трябва да бъдем уверени, че получаваните стойности се явяват достатъчно стационарни, т.е., че те не зависят от времето. Освен това, трябва да се разполага с определени сведения за състава на сигнала за последващия избор на модел за интерпретация.

Метод на микросеизмичното сондиране

Методът се базира на експериментално предположение за това, че вертикалната компонента на преместването в микросеизмичния шум е представена основно от вертикалната компонента на преместване на фундаменталната мода на вълните на Релей.

Доказано е експериментално и е изследвано върху числени модели, че нееднородностите в Земната кора по определен начин изкривяват спектъра на ниско-честотното микросеизмично поле (Горбатиков и др.,

2008). Това означава, че на повърхността на Земята над високоскоростните нееднородности спектралните амплитуди на определена честота f намаляват, а над нискоскоростните нееднородности нарастват. Честотата f е свързана с дълбочината на залягане на нееднородността H и скоростта на фундаменталната мода на вълните на Релей $V_R(f)$ със съотношението (Горбатиков и др., 2008):

$$H=0.5(V_R(f))/f [m] \quad (1)$$

където: $V_R(f)$ и f са съответно - фазова скорост на фундаменталната мода на вълната на Релей с честота f и честотата в спектъра на микросейзmicния сигнал, за който се правят изчисленията.

При това, микросейзmicното поле се разглежда като суперпозиция от пакети на фундаменталните моди на вълните на Релей с различно честотно запълване.

Използва се следният алгоритъм от процедури включващи:

1. Последователно измерване на статистически устойчивите спектри на микросейзмите във всички точки на мрежата или профила. Достигане на статистически устойчив микросейзmicен сигнал, натрупан в течение на експериментално определения период на стационарност на сигнала. Това става в рамките на няколко часа.
2. Построяване на карта, или на профил на разпределение, на амплитудата, за всяка честота в спектъра.
3. Привързване на получените карти или профили към съответната дълбочина, изхождайки от отношението:

$$H(f)=k_G \lambda_R(f)=K_G(V(f))/f [m] \quad (2)$$

,където $H(f)$ -дълбочина на слоя, за който се строи изображението, m ; $\lambda_R(f)$ - дължината на вълната на фундаменталната мода на Релей, m ; f - честота в спектъра на микросейзmicния сигнал, за който се правят изчисленията, Hz ; $V_R(f)$ - фазова скорост на фундаменталната мода на вълната на Релей с честота f , m/s ; k_G - коефициент на дълбочинно привързване, оценен емпирично в диапазона 0,4 – 0,5 (Горбатиков, 2005).

Реализацията на този подход води до необходимостта да се контролират два фактора: 1) определяне на преобладаващия тип вълни в анализирания микросейзmicно поле за правилната интерпретация на резултатите и 2) стационарността на измерваните статистически параметри, за установяване на еднозначна връзка между пространствените особености на геоложкия строеж и пространствените характеристики на микросейзмите. Второто условие се налага, ако измерванията в точките на измервателната мрежа не се изпълняват едновременно (напр. последователно).

За да се изключат проблемите, свързани с различните периоди на стационарност на микросейзмите в различните честотни диапазони и ограничеността на тези периоди (Gorbatikov et al., 2004) е предложено микросейз-

micното сондиране да се изпълнява, като се приема, че една от точките в изследвания полигон е опорна. Измерванията в останалите точки от мрежата се правят едновременно с измерванията в опорната точка.

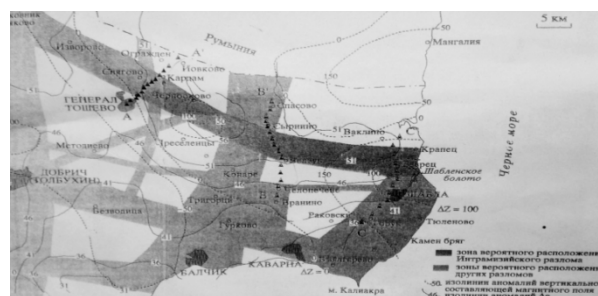
Изследване структурата на Интермизийския разлом (ИМР) с Метода на Микросейзmicното сондиране (ММС).

Тектонична позиция и сеизмична активност

Зоната на ИМР пресича Мизийската плоча в северозападно направление (фиг. 1). Тя повече или по-малко уверено се проследява на разстояние 250 km от Предкарпатското понижение на северозапад до Черноморското крайбрежие в района на г.Шабла и с.Ваклино на югоизток (Дачева, 1989; Чешитев, 1991; Шанов, 1996 и др.).

Мизийската платформа е сравнително млада платформа. Тя е разположена в централната част на сеизмично активния Карпато-Балкански регион между планинските масиви Карпати и Балкани. На югозапад граничи със старата Източно-Европейска платформа, североизточно е отделена от Скитската плоча с орогена Северна Добруджа, а на изток достига Черно море.

Мизийската плоча е изразена в релефа във вид на невисоко издигане (с височина 100-200 m над морското равнище) с равна, слабо хълмиста повърхност.



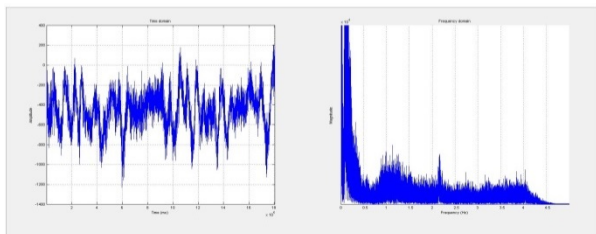
Фиг. 1. Схема на североизточна България с показани обобщени разломни зони по данни от различни автори и изолинии на гравитационното и магнитно поле. С триъгълници са означени точките на измерване по профилите на микросейзmicното сондиране.

Някои статистически характеристики на полето в района на Интермизийския разлом

Структурата на микросейзmicното вълново поле, което се наблюдава непрекъснато, в който и да е пункт на измерване, е тясно свързана със структурата и геоложкия строеж на земната кора. Всички регистриращи се колебания имат индивидуални амплитудно-честотни характеристики, времеви режим на съществуване и вариации (постояни, периодични, спонтанни) и, което е особено важно, избирателно пространствено разпространение в геосредата.

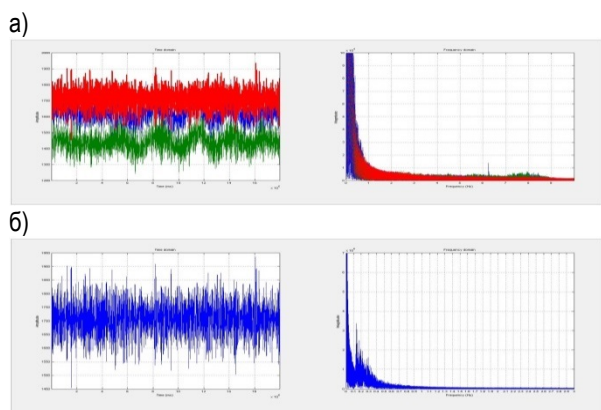
Амплитудно-честотният спектър е една от важните информативни характеристики на микросейзmicния

процес, която е особено чувствителна към структурните и геодинамичните условия на геоложката среда в района на измерване. Влиянието на геоложките параметри на формирането на микросейзичното поле и неговия спектър са отбелязали много изследователи. На фигура 2 е показан фрагмент от запис и амплитудно-честотният спектър на микросейзично поле, типично за геоложките условия на южната част на Мизийската платформа.



Фиг. 2. Фрагмент от запис на вертикалната компонента на полето и неговия амплитудно-честотен спектър - сейзостанция Плеселенци (BS.PSN..BHZ.D., 2008)

На фигура 3,а е показан трикомпонентен запис на микросейзичното поле от станция CFR.RO в северната част на Мизийската платформа. На записа добре се вижда, че това е сложен вълнови процес, обусловен както от едновременното действие на няколко източника, а също, че той се състои от вълни от различен тип и честоти.

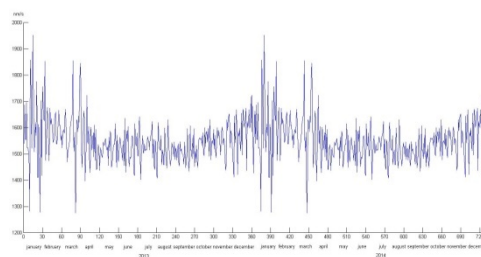


Фиг. 3. а) Трикомпонентен сейзичен запис, б) Вертикална компонента и нейния спектър от станция CFR.RO (Румъния)

Типичният за Мизийската платформа спектър на вертикалната компонента на микросейзичните колебания условно може да се раздели по честота на няколко области (диапазона): 1) област на дългопериодични микросейзми с честота по малка от 0,1 Hz (област на колебание на грунта, предизвикано от телесеизмически земетресения); колебанията в диапазона честоти от 0,1 до 0,3 Hz се наричат «щормови» микросейзми (източниците на тези колебания са разположени на акваторията на океаните и моретата); 2) област на минимума на амплитудата на вертикалната компонента (Z) на честоти 0,5 – 1,4 Hz – областта от спектъра, намираща се на границата на нискочестотните и високочестотните сейзически шумове. Тя е най-стабилна по отношение на времевите вариации; 3) високочестотна област на спектъра (1,5 – 10 Hz), в която значителен дял в амплитудата на колебанието на грунта

и горния земен слой, наред с естествените източници на шум, внасят и техногенните източници.

На фигура 4 е показано вариацията на микросейзичния шум (Z-съставяща) за периода 2013-2014 година (средно дневно изменение на интензивността на микросейзичното поле) на станция CFR.RO (Carcalin).



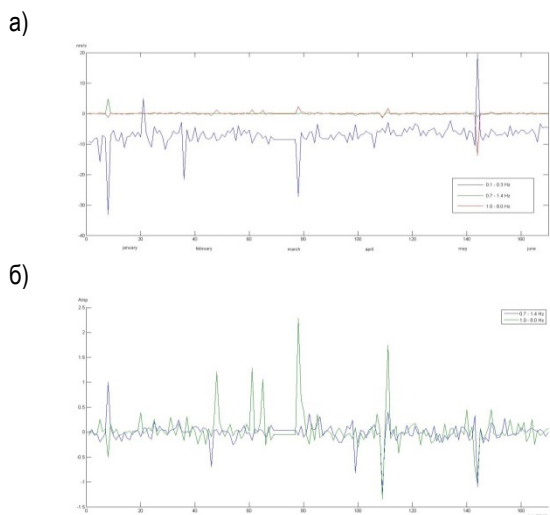
Фиг. 4. Вариация на нивото на микросейзичния шум (Z – съставяща) за период 2013-2014г. (интервал на осредняване 24 часа) на сейзостанция CFR.RO (long.-45.178; lat. -28.13619; elev.-73)

На фигура 4 се вижда, че микросейзичното поле има годишна периодичност и сезонни изменения (зима, пролет, лято, есен) на нивото на микросейзичния шум. През лятото микросейзичният шум се намира на нива 1450-1550 и само при микросейзични „бури“ се вдига до нива 1500-1600. През зимните месеци средното ниво на шума се вдига до 1500-1700, а локалните смущения достигат нива 1300-1900 nm/s.

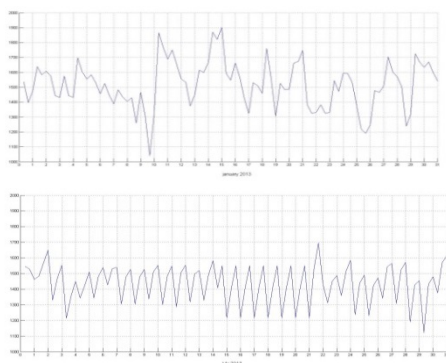
Анализирайки приноса във вариациите на интегралния шум (целият спектър на колебанието) на отделни честотни диапазони, може да се направят някои предположения за природата на източниците на колебания и причината за тяхната вариация.

На фигура 5, а, б се вижда, че в диапазона честоти 0,1 – 0,3 Hz нивото на шума е подложено на най-големи промени в продължение на половин година. Дори в летните месеци на тренда на половин годишния цикъл са регистрирани „сейзически бури“. На честоти 1 – 8 Hz, където е особено голям приносът в сейзичните колебания на антропогенните фактори, се забелязва спад в нивото на микросейзичния шум. Очевидно е, че особено внимание заслужават колебанията в честотния диапазон 0,7 – 1,4 Hz - най-устойчиви към времевите вариации и информативни по отношение на нееднородностите.

На фигура 6 са представени типичните графики на вариациите на микросейзичния шум с интервал на осредняване 5 часа през летния (фиг. 6,б) и зимния период (фиг. 6,а) на сейзостанция CFR.RO Вижда се, че през лятото определящо във времевите изменения на нивото на микросейзичния шум се явява делът на денонощните вариации, свързани основно с антропогенни източници. През зимния период основен принос за изменението на нивото на микросейзичния шум е колебанието на честоти 0,1 – 0,3 Hz, а денонощните високочестотни вариации практически не се виждат.



Фиг.5. а) Вариации на средното дневно ниво на микросейзмичния шум, измерен на сеизмостанция CFR.RO (Carcalin) през 2013г. и филтриран в три честотни диапазона: 1. 0,1 – 0,3 Hz; 2. 0,7 – 1,4 Hz; 3. 1,0 – 8,0 Hz б) Вариации на средното дневно ниво на микросейзмичния шум, измерен на сеизмостанция CFR.RO (Carcalin) през 2013г. и филтриран в два честотни диапазона: 1. 0,7 – 1,4 Hz; 2. 1,0 – 8,0 Hz

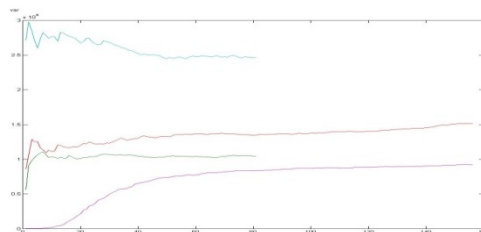


Фиг. 6. Изменение на микросейзмичния шум на сеизмостанция CFR.RO през юли (б) и януари (а) 2013г.

Резултатите от анализа на поведението на дисперсията на микросейзмичния сигнал в честотния диапазон 0,03 – 15 Hz в увеличаващ се времеви прозорец са показани на фигура 7. За анализа е взет двудневен непрекъснат микросейзмичен запис, направен на станция PSN.BS (с. Преселенци; 04.04 -05.04.2008г.) Могат да се отделят следните участъци на особено поведение за всички дисперсионни криви. (1) Началният участък практически на всяка крива има характерен рязък подем или спад. Продължителността на участъка е около 30 min. (2) Всяка крива има характерен участък на стабилизация с продължителност 20 – 40 min. (3) Всяка крива завършва с участък на гладко издигане или спад. Добре се вижда ,че опашните участъци на всички криви не клонят към някаква определена стойност, а тяхната граница зависи от началното време на анализа на дисперсията. По такъв начин, се вижда, че случайният микросейзмичен сигнал не се явява стационарен за голям интервал от време, от порядъка на няколко часа. Въпреки това, наличието на определен участък на стабилизация (участък 2) позволява да се постави

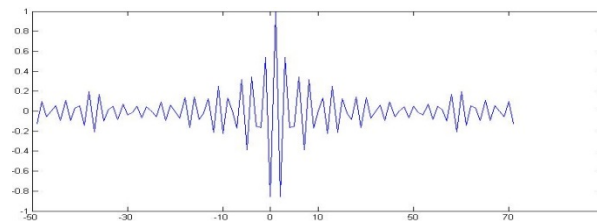
въпросът за експерименталното изследване на неговата продължителност и оценка на интервала на стационарност на сеизмичния сигнал в различни честотни диапазони.

Както е известно, автокорелационната функция на случаен процес се стреми към нулева стойност при големи стойности на колебанието. В случай на присъствие на хармонично колебание автокорелационната функция повтаря своята форма във времето. По такъв начин, тя представлява средство за идентифициране на детерминирани процеси, които може да са маскирани в случаен фонен шум.



Фиг. 7. Зависимост на дисперсията на микросейзмичния сигнал в диапазона честоти 0,03 – 15 Hz от продължителността на интервала за оценка. Записът е направен на станция PSN.BS (с. Преселенци).

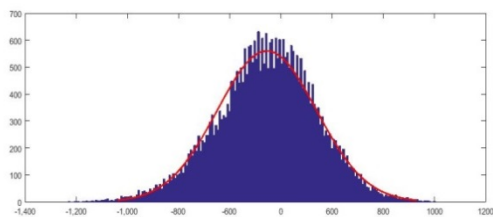
На графиката на фигура 8 се вижда характерният за широколентов случаен шум голям пик, който рязко затихва при промяна. Може да се заключи, че микросейзмите в района на с. Преселец по своя състав се приближават към широко лентов случаен шум.



Фиг. 8. Автокорелационна функция на сигнала в диапазона 0,03-15 Hz на - сеизмостанция Преселенци (BS.PSN..BHZ.D.2008). Дължина на записа 4 min.

За изследване на нормалността на микросейзмичния сигнал по времето на реализациите е изчислена хистограма на плътността на разпределение на скоростите на колебание (фиг. 9).

Анализът на нормалността е направен по един от най-удобните непараметрически критерии. Същността на този метод на проверка се състои в това, че в качеството на мярка на разликата на наблюдаваната и теоретичната плътност на разпределението се използва определена статистика, описана с приближено разпределение χ^2 . В резултат на анализа се получава ,че разпределението не е нормално в строгия смисъл, макар формата да е много близка към Гаусовото разпределение.



Фиг. 9. Хистограма на микросейзмицния сигнал в диапазона 0,03-15 Hz на Интермизийския разлом

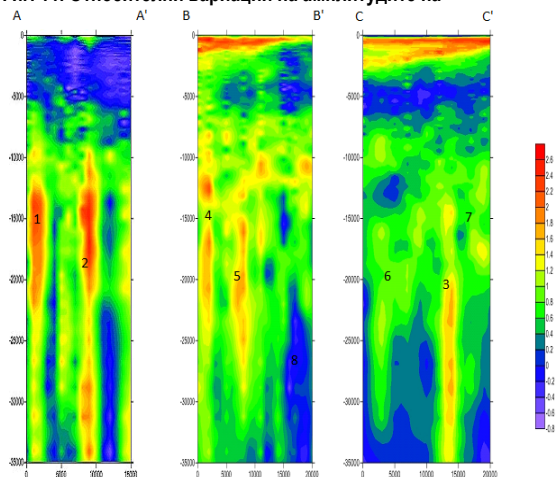
За доказване на стационарността на случайния процес е необходимо всичките му статистически характеристики да не се променят с течение на времето. На практика такава проверка е неосъществима. Може да се направят няколко важни допускания, които обичайно се изпълняват за повечето наблюдавани в природата случайни процеси: (1) Първото допускане се състои в това, че доказателство за вътрешната стационарност на отделните реализации може да послужи като доказателството за стационарността на случайния процес, на който принадлежи дадената реализация. (2) Второто допускане предполага, че за доказване на стационарността е достатъчно да се провери слабата стационарност на процеса, т.е., че средната стойност и автокорелационната функция не зависят от времето. При това моментите от по-висок порядък се игнорират. (3) Третото допускане предполага, че дължината на изследваната реализация е достатъчно голяма, в сравнение със случайните колебания, съдържащи се в тази реализация. Това е важно, за да може в резултат на осредняването по малки интервали от време, да се получат стойности, правилно отразяващи осреднените характеристики на целия процес. (4) Четвъртото допускане се състои в това, че ако дисперсията на изследвания процес е стационарна, то и автокорелационната функция на процеса е също стационарна.

Микросейзмично сондиране и резултати

Дълбочинните геофизични изследвания по трите профила, показани на фигура 1 са направени по Метода на микросейзмичното сондиране (ММС) с разстояние между сеизмоприемниците средно 1000 m. Трите вертикални разреза на фигура 11 са построени по параметъра на вариации на амплитудите.

В съответствие с физическите основи на метода, областите от средата, имащи сравнително високи сейзмични скорости, се проявяват в измереното на повърхността микросейзмическо поле във вид на понижаване на интензивността на сигнала за еквивалентния хоризонт. И обратно, нискоскоростните области се проявяват във вид на повишена относителна интензивност. Относителна интензивност означава, че измерванията са направени по отношение на опорна станция (сеизмостанция Преселенци). На профилите В-В' и С-С' отчетливо се отделя седиментната покривка, във вид на светли хоризонти в горната част на разреза на земната кора, изклиняващи от юг на север. Това съвпада с наличните геоложки и геофизични данни и отразява известния дълбочинен строеж на Варненската падина.

Фиг. 11. Относителни вариации на амплитудите на



микросейзмицния сигнал в db.

На разрезите А-А' и С-С' (фиг. 11) се проследяват светли вертикални зони с ширина около 2 km. На разреза А-А' има две такива зони (1 и 2), проследяващи се от дълбочини, около 10 до 35 km. На профила С-С' се отделя една зона (3) с дълбочина 12-15 до 35 km. Забелязва се, че светлата зона 2 на разреза А-А' трасира не много отчетливо, една светла ивица до повърхността (фиг. 6), докато за зоните 1 и 3, такова проникване в най-горния слой няма. Може да се отбележи също наличието на други, не много силно изразени, вертикални структури на разрезите В-В' и С-С', а именно зоните 4, 5, 6, и 7.

Формата и сравнително ниските стойности за зоните 1, 2, и 3, дават основание да се интерпретират, като погребани корени на разлома. При това може да се предположи, че яркостта и наличието на трасировка до повърхността на зона 2, говорят за относителна съвременна активност на дадения фрагмент от разлома.

Съпоставяйки материалите, получени с различни методи, може да се отбележи, че зоните, интерпретирани на микросейзмичните профили като разломи (фиг. 11), в план съответстват на известните зони на разлома (фиг. 1). Те са потвърдени в процеса на геолого-геоморфоложки изследвания. Зона 1 от профил А-А' лежи на линия със северозападна посока, проследена с фрагменти от повърхностни приразломни депресии. В същото време, тя гравитира към северната граница на затъмнената зона на Интермизийския разлом (фиг. 1). Наблюдава се ясна привързаност на зона 5 от профила В-В' към южния клон на зоната на ИМР, а зона 4 към друга, по-южна разломна система (фиг. 1). Отбелязва се, че за зона 5 също има съответствие на геоморфоложките форми на повърхностните разломи. Още една ярка и дълбока разломна зона (зона 3 от профил С-С'), също така съвпада в план със зоната на ИМР и намира потвърждение в резултатите от геоморфоложкото проучване на района. Вземайки под внимание характера на всички отделени по метода на микросейзмичното сондиране разломни зони, може обосновано да се предположи, че ИМР не се явява активен в настояще време. Напротив, съдейки по ярката изразеност в разреза и на повърхността, той пресича системата от по-

активни в настояще време разломи със субмеридиална посока (фиг. 1)

Заклучение

Изследването показва, че под влияние на локалните повърхностни и дълбоки геоложки структури, микросейсмичното поле в честотния диапазон 0,03-1,0 Hz, изпитва аномално изкривяване. То показва, че амплитудите на микросейсмичните намаляват над високоскоростните и се увеличават над нискоскоростните нееднородности. Като е предпоставено, че съставът на микросейсмичното поле, е суперпозиция от пакети на фундаменталните моди на вълните на Релей с различно честотно запълване, е намерена връзка между дълбочината на залягане на нееднородностите и спектралната честота f на микросейсмичния сигнал. При това се получават аномалии, които се определят с релацията

$$H=0,5\lambda_R, [m] \quad (3)$$

където: H -дълбочина на залягане на нееднородността, λ_R -дължина на фундаменталната мода на вълната на Релей:

$$\lambda_R=(V(f))/f, [m] \quad (4)$$

където: $V(f)$ е фазовата скорост на вълната на Релей на честота f , m/s.

Получените резултати, потвърждават възможността за използване на микросейсмичните за изучаване на дълбочинния строеж на геоложкия разрез и прилагането

им при някои основни структурни изследвания в определени райони на България.

Литература

- Боков, П., Х. Чемберски. *Геоложки условия за находища на нефт и газ в Североизточна България*. София: Техника. 1987. - 332 с.
- Горбатиков, А.В. Патент на изобретение № RU2271554. „Способ сейсморазведки“. Дата приоритета 25.03.2005
- Горбатиков, 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. - 66-82.
- Дачева, Хр., В. Станев, П. Боков. Резултати изследований сектора Черного моря и сопредельных районов суши. В: *Строение и эволюция земной коры и верхней мантии Черного моря/ Под ред. Белоусова В.В., Вольвовского Б.С.М.* 1989. - 163-165.
- Чешитев, Г., Ц. Чонтова, Н. Попов,, Е. Кюмджиева. Геоложка карта на България. Мащаб 1:100000. 1991.
- Шанов, С., Ю. Карагюлева. Следсарматски структури и поле на тектонските напрежения в Североизточна България. *Спис. на БГД*, 57, 1. 1996. - 53-60.
- Bard, P. *Microtremor measurements: A Tool for the Effect Estimation. The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*. Balkeman. Rotterdam. 1999. – 1251-1279.
- Gorbatikov, A.V., A.V. Kalinina, V.A. Volokov, J. Arnoso, R. Vieira, E. Velez. Results of Analysis of Data of Microseismic Survey at Lanzarote Island, Canary, Spain// *Pure appl. Geophys.* 161, 2004. - 1561-1578.

Статията е рецензирана от проф. д-р Стефан Димовски и препоръчана за публикуване от кат. „Приложна геофизика“.