



## Моделиране на цунами, генерирани от земетресения в Черно море

Люба Димова<sup>1</sup>, Ренета Райкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Катедра „Метеорология и Геофизика“, Физически Факултет, Софийски Университет „Св. Климент Охридски“,  
lyuba\_dimova@phys.uni-sofia.bg, rraykova@phys.uni-sofia.bg

**Ключови думи:** цунами, сеизмични източници, числено моделиране, Черно море.

### Въведение

Вълните цунами са дълги гравитационни вълни, разпространяващи се във водните басейни. Такъв тип вълни са редки, но не и невъзможни за областта на Черно море, особено в комбинация със силно земетресение, в близост до брега и последвало свлачище. Въпреки, че сеизмичността в района не е толкова висока, има документирани 23 събития на вълни цунами от Ivi век пр. Хр., като 9 от тях са станали през XXв. (Maramai et al. 2014). Повечето аномални вълни в Черно море са със сеизмичен произход, но има и такива, които са с неизяснен източник. По своето географско разположение най-засегнати зони са Българският и Турският Черноморски бряг, полуостров Крим, по-рядко бреговете около Западен Кавказ и Западна Грузия. Едно от интересните събития за Черно море е несеизмичното цунами от 7 Май 2007, което се наблюдава по протежението на Българския Черноморски бряг с височини на вълната до 3м за северното крайбрежие (Rangelov et al., 2008). Основните хипотези за източника са две: подводно свлачище или атмосферни високочестотни смущения, които се подчиняват на резонанс на Праудман. Vilibić et al. (2010), класифицират събитието като метеоцунами. Едно от най-големите земетресения близо до Шабла през 1901, генерира вълни цунами, които наводняват Балчик и по сведения на очевидци, височините на вълната достигат 2.5-3м (Papadopoulos et al., 2011). За по-доброто разбиране на феномена цунами, е необходимо да се правят числени симулации, т.к. помагат за реконструиране на исторически и съвременни събития. Също така, моделирането е в основата на изготвяне на карти на потенциалната опасност от цунами, както и с голямо значение при системите за ранно предупреждение.

В настоящата работа представяме резултатите от симулацията на вълни цунами в Черно море, генерирани от няколко хипотетични сеизмични източници.

### Теория и методи

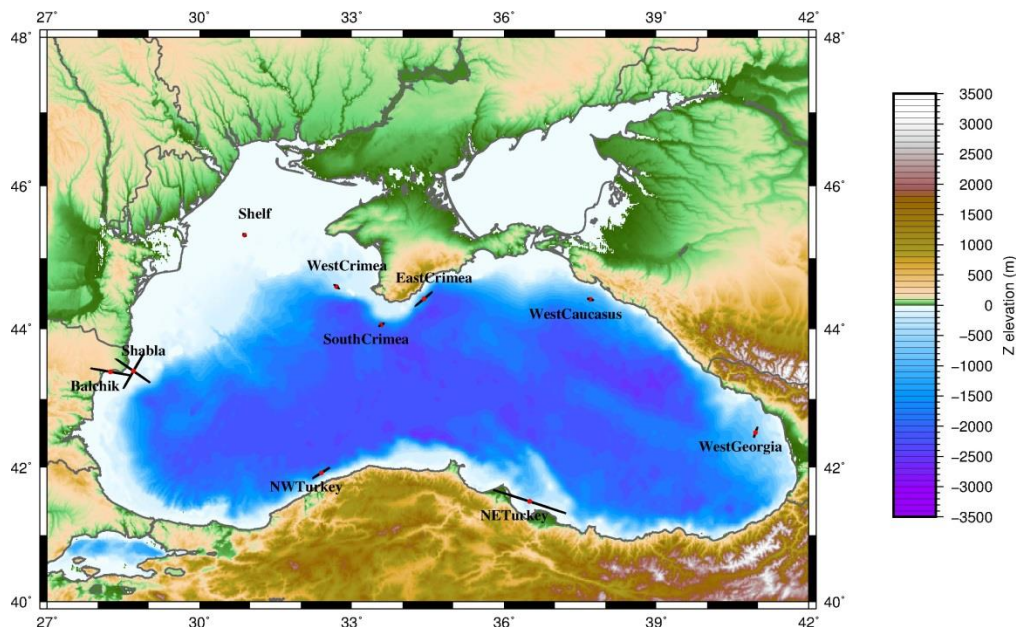
Има редица методи за моделирането на цунами. В основата на повечето от тях стои теорията за плитка вода, т.к. дължината на вълната е значително по-голяма, сравнена с дълбочината на океана. Аналитичните методи ни дават възможността да проследим генериране на цунами от сеизмични източници на сушата. Кодът UBO-TSUFDF, който се използва в това изследване, е разработен в Университета в Болоня и е валидиран за редица събития, с добро съвпадение между моделирани и наблюдавани данни (Tinti and Tonini, 2013). Кодът изчислява нелинейните диференциални уравнения за плитка вода, като в тях се включва триенето на дъното, но се изключва сила на Кориолис, която за малки басейни като Черно море е незначителна.

Отместването на свободната повърхност, поради еластичните деформации на дъното, след генерирано земетресение е получено като аналитично решение на формулите на Окада (Okada, 1985, 1992). Косеизмичната деформация се пресмята като функция от геометричните параметри на разлома и еластичните свойства на средата. Геометрията на моделираните разломи е изчислена, използвайки формулите на Mai and Beroza (2000) за връзката между сеизмичния момент на дадено земетресение и неговите размери.

### Хипотетични източници

В настоящото изследване са представени няколко сценария на цунами, индуцирани от земетресения в Черно море. За всеки от предложените сценарии е взет сеизмичен източник, способен да генерира земетресение с магнитуд равен или по-голям на най-високия, регистриран в съответната област от миналото до днес. След преглед на геоложките и тектонски особености в акваторията на Черно море моделирахме хипотетични сеизмични източници и тяхното разположение е показано на Фигура 1. По-голямата част от източниците са моделирани за разломи, почти паралелни на бреговата линия. В

Таблица 1 са представени параметрите на основните хипотетични сеизмични източници в Черно море. Решенията на фокалните механизми за избраните източници са взети от земетресения, станали в съответните региони. Използвани са данни от International Seismological Centre (<http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/fmechanisms/>). Численото моделиране използва батиметрични данни (<http://www.gebco.net/>) със стъпка 500 м.



Фиг. 1. Моделирани хипотетични разломи в Черно море.

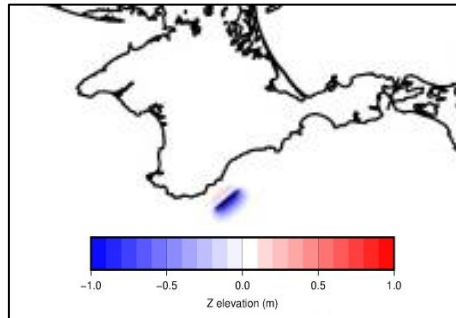
Таблица 1. Разломни параметри на три от хипотетичните сеизмични източници.

Параметър\Зона	Shabla NE-SW	Eastern Crimea	NE Turkey
<b>L (km)</b>	64	32	125
<b>W (km)</b>	29	17	50
<b>Slip (m)</b>	3.5	2.0	6.0
<b>Strike (°)</b>	30	50	108
<b>Dip (°)</b>	80	50	86
<b>Rake (°)</b>	150	270	90
<b>Depth (m)</b>	2000	2000	4000
<b>Mw</b>	7.5	7.0	8.0
<b>Ref. event for focal mechanism</b>	03.12.2012 	11.09.1927 	26.12.1939 
Дълбочината съответства на горната граница на разгледаните правоъгълни разломни сегменти.			

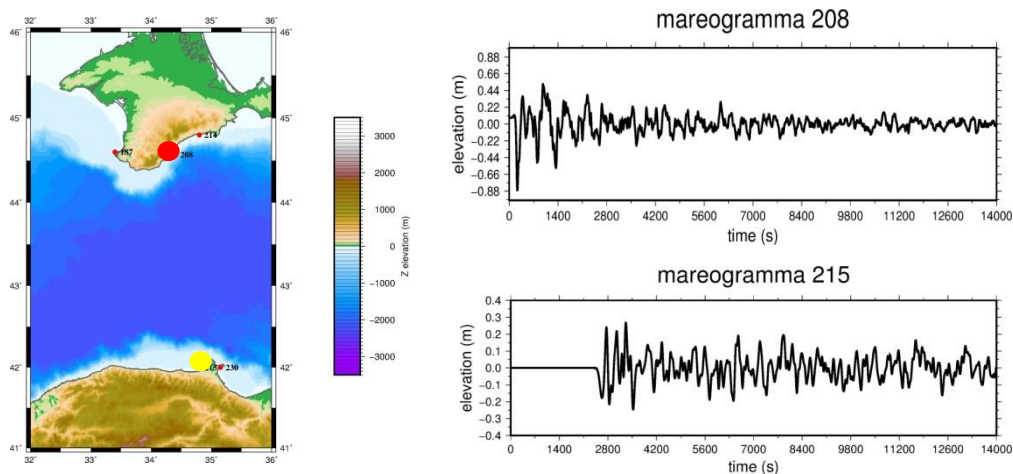
## Резултати

Числените симулации, разгледани по-долу, показват основни характеристики на разпространението на вълните и идентифициране на бреговите зони, където се очакват най-големи ефекти от възникналите вълни цунами. Резултатите от моделирането на земетресението в региона на Шабла са представени в Dimova et al. (2016). Екстремните амплитуди на моделираната цунами вълна са -2.31 м и 3.22 м, като в района на Варна и Балчик, амплитудите варират от -1.8м до 2.5м. На Фигура 2 е представено началното условие за генериране на цунами от хипотетичния източник, разположен в източната част на полуостров Крим. Моделираните екстремни стойности на височината на вълните в първоначалния момент са -1.08 и 0.16 метра. Полето на началните деформации се характеризира с малки положителни амплитуди в близост до брега и с големи отрицателни стойности навътре в морето. Това разпределение се илюстрира и от синтетичните мареограми, които са показани на Фигура 3. Мареограма 208 е изчислена в координати близо до гр. Ялта (югоизточен Крим), където се забелязва пониженото ниво

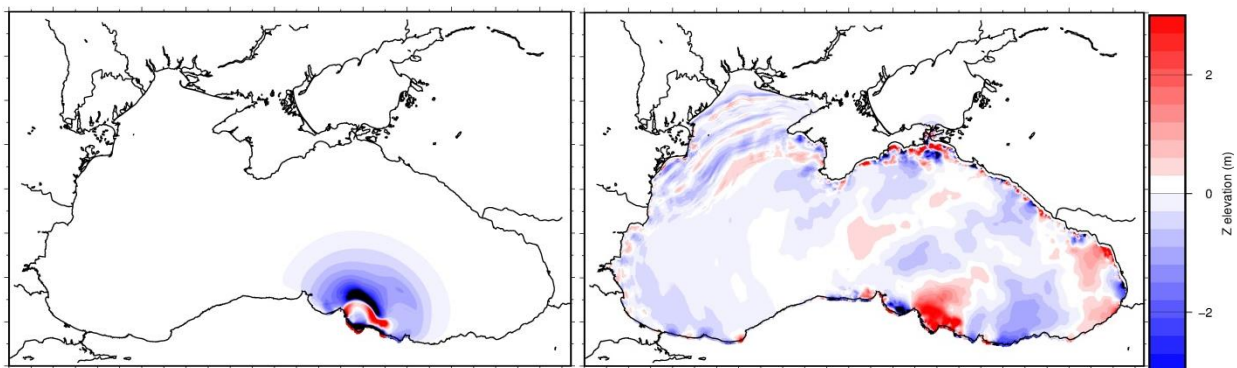
на морето. За по-малко от 45 минути вълната достига Турските брегове (град Аянчик - мареограма 215), като изчислените стойности на височината на вълната са близо 30 см. Полето на разпространение на цунами е насочено главно в посока на югоизточното Черноморие. Моделираните вълни достигат до бреговете на България с почти нулеви стойности. Максималните и минималните получени височини на вълната са съответно -3.23м и 3.8м, като тези амплитуди се достигат в точки близо до Крим. Числените симулации за разпространението на цунами в Черно море са моделирани за 5 астрономически часа, което отговаря на времето необходимо за достигането на дадена вълна по най-голямата дължина на морето, като включва и отразените вълни от бреговете.



Фиг. 2. Начални условия за генериране на цунами от хипотетичен източник Източен Крим (Eastern Crimea).



Фиг. 3. Синтетични мареограми за точка в близост до брега на Крим (червена точка, мареограма 208) и до брега на Турция (жълта точка, мареограма 215).



Фиг. 4. Поле на разпространение на цунами за хипотетичен източник в Източна Черноморие за време 500 и 12000 секунди след началото на земетресението.

Полето на разпространение на вълната за хипотетичен сеизмичен източник в Източната част на Черно море е показано на Фигура 4. Симулацията моделира едно от най-силните земетресения в района и последвало цунами. През 1939 г. близо до Ерзинкан, земетресение с магнитуд  $M_s=8.0$  и епицентър на сушата, на около 60 км от бреговете на Черно море, създава разлом с дължина 350 км и отместване от 4 м (Altinok and Ersoy, 2000). Няма достатъчно информация за реалния източник на цунами, то може



да е било генерирано директно от главното разкъсване по разлома, може да е било породено от вторичен разлом близо до брега, но не се изключва възможността за подводно свлачище, генерирано от земетресението. Сценарият, който е представен се базира на вторичен разлом в морето, в близост до брега и моделирана дължина 120 км. Оценените стойности на вълната за Българското Черноморие и Кримски Полуостров са близо 50 см, за Западен Кавказ и Североизточна Турция амплитудите достигат 3 м.

### **Заклучение**

За територията на Черно море моделирахме различни хипотетични сеизмични източници, които генерират цунами, също така и разпространението на цунами. Началните условия за разпространението на вълните са пресметнати с помощта на аналитични формули, които дават деформациите на дъното на морето. В изследването са представени симулации на генерирани цунами, чиито ефекти са регионални, т.е. при своето разпространение, амплитудите на вълните са достатъчно големи, за да предизвикат наводнения. Симулациите показват няколко района, които биха били засегнати при евентуални земетресения с подобни параметри. Бъдещи изследвания включват моделирането на тези зони с по-детайлни батиметрични данни, както и моделирането на комбинация от земетресение и последвало свлачище в регионите със стръмна батиметрия.

### **Modelling of earthquake generated tsunamis in Black Sea**

*Lyuba Dimova, Reneta Raykova*

Historically there are about 23 events, related to tsunamis in Black Sea. In this study we defined several seismic sources, we modelled the most significant earthquakes-generated tsunamis in the region, their geometry, parameters and the most appropriate focal mechanisms. We executed numerical simulations for the generation and propagation of the tsunami waves carried out by the code UBO-TSUFDF, developed in the University of Bologna. Different grids with varied time steps are used in the simulations. The maximum wave amplitudes in simulations are observed closed to the Bulgarian, Ukrainian and Turkish Black Sea coast up to 3.8 meters.

**Благодарности:** Работата е подкрепена от проект 215/2016, финансиран от ФНИ на Софийски Университет „Св. Климент Охридски“.

### **Литература**

- Altinok, Y., Ersoy, S., 2000, Tsunamis observed on and near the Turkish Coast, *Natural Hazards*, 21, 185-205.
- Dimova, L., Armigliato, A., Pagnoni, G., Tinti, S., Raykova, R., 2016, Tsunami radiation pattern from seismic sources in the Black Sea, *Annual of Sofia University "St. Kliment Ohridski", Faculty of Physics*, vol. 109 (in press).
- Mai, P. M., Beroza, G. C., 2000, Source scaling properties from finite-fault-rupture models, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90, 3, 604-615.
- Maramai, A., Brizuela, B., Graziani, L., 2014, The Euro-Mediterranean Tsunami Catalogue, *Annals of Geophysics*, 57, 4, S0435.
- Okada, Y., 1985, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 4, 1135-1154.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 82, 2, 1018-1040.
- Papadopoulos, G.A., Diakogianni, G., Fokaefs, A., Rangelov, B., 2011, Tsunami hazard in the Black Sea and the Azov Sea: a new tsunami catalogue, *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.*, 11, 945-963.
- Rangelov, B., Tinti, S., Pagnoni, G., Tonini, R., Zaniboni, F., Armigliato, A., 2008, The nonseismic tsunami observed in the Bulgarian Black Sea on 7 May 2007: was it due to a submarine landslide?, *Geophysical Research Letters*, 35, L18613.
- Tinti, S., Tonini, R., 2013, The UBO-TSUFDF tsunami inundation model: validation and application to a tsunami case study focused on the city of Catania, Italy, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 1759-1816.
- Vilibić, I., Šepić, J., Rangelov, B., Mahović, N. S., Tinti, S., 2010, Possible atmospheric origin of the 7 May 2007 western Black Sea shelf tsunami event, *Journal of Geophysical Research*, 115, C07006.