

## АФТЪРШОКОВА АКТИВНОСТ СЛЕД КАТАСТРОФАЛНОТО ЗЕМЕТРЕСЕНИЕ (Mw7.8) ОТ 6 ФЕВРУАРИ 2023 Г

**Димчо Солаков, Стела Симеонова, Пламена Райкова, Мила Атанасова**

*Национален институт по геофизика, геодезия и география – Българска академия на Науките  
e-mail: dimos@geophys.bas.bg; ssimeonova@geophys.bas.bg; plamena.raikova@gmail.com;  
mila\_at\_zl@abv.bg*

**Ключови думи:** земетресения, афтершокова активност, югоизточна Турция, SAR данни

**Резюме:** Земетресението е уникално природно явление, определящо се от голям брой фактори, които не могат непосредствено да бъдат наблюдавани и трудно се контролират. В сеизмично активните райони на планетата, включително и територията на Турция, земетресенията и техните последици са едни от най-катастрофалните природни явления. В началото на февруари 2023 г. югоизточна Турция и северна Сирия бяха засегнати от серия разрушителни земетресения, като главният трус е с магнитуд Mw=7.8. Основното земетресение е последвано от изявена афтершокова активност - в рамките на 10 минути е реализиран вторичен трус с Mw=6.7, а около 10 часа по-късно по същата разломната система на разстояние 100 km е генерирано най-силното афтершоково събитие с магнитуд Mw=7.5. Сеизмичният клъстер (главно земетресение-афтершокови събития) е реализиран по основни трансформни разломи и свързаните с тях системи, формиращи границите между арабската, африканската и анадолската тектонични плочи.

В настоящото изследване, е представена информация за процесите по време и след главното земетресение (Mw7.8), резултати от пространственото разпределение на афтершоковата поредица, наблюдавани ускорения в засегнатата зона и обработени SAR данни от мисията Sentinel-1 на Европейската космическа агенция.

## AFTERSHOCK ACTIVITY AFTER CATASTROPHIC EARTHQUAKE (Mw7.8) OF THE FEBRUARY 6<sup>TH</sup> 2023

**Dimcho Solakov, Stela Simeonova, Plamena Raykova, Mila Atanasova**

*National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography – Bulgarian Academy of Sciences  
e-mail: dimos@geophys.bas.bg; ssimeonova@geophys.bas.bg; plamena.raikova@gmail.com;  
mila\_at\_zl@abv.bg*

**Keywords:** earthquakes, aftershocks, SE Turkey, SAR data

**Abstract:** An earthquake is a unique natural phenomenon, determined by a large number of factors that cannot be directly observed and are difficult to control. In the seismically active regions of the planet, including the territory of Turkey, earthquakes and their consequences are one of the most catastrophic natural phenomena. In early February 2023, southeastern Turkey and northern Syria were hit by a series of devastating earthquakes, the main one is with magnitude Mw=7.8. The main earthquake was followed by pronounced aftershock activity - within 10 minutes, an aftershock with Mw=6.7 was realized, and about 10 hours later, along the same fault system at a distance of 100 km, the strongest aftershock event with a magnitude of Mw=7.5 was generated. The seismic cluster (mainly earthquake-aftershock events) is realized along major transform faults and their associated systems forming the boundaries between the Arabian, African and Anatolian tectonic plates.

In the present study, information on the processes during and after the main earthquake (Mw7.8), results of the spatial distribution of the aftershock series, observed accelerations in the affected area and processed SAR data from the Sentinel-1 mission of the European Space Agency are presented.

### **Въведение**

Сред природните бедствия, земетресенията доминират по своето въздействие върху околната среда. По обстойното разглеждане на земетресенията показва, че афтершоците на главното събитие, въпреки че са смятани за малки събития, могат допълнително да нанесат

големи поражения. Афършоковата активност е израз на вискозоеластична релаксация на напреженията в средата, натрупани като резултат от процесите на разрушение в огнищната зона на главното земетресение. Изследване на пространственото разпределение на събитията е от съществено значение за разбиране физиката на сеизмогенезиса.

Типичен пример за зона с висок сеизмичен риск е територията на Турция. Страната е разположена между три тектонични плочи и наблюдаваните земетресения са резултат на сблъсъка на Арабската и Африканската плоча с Евразия. Основно значение за пространственото разпределение на сеизмичността има взаимодействието между тези плочи. Анадолската плоча, върху която е разположена Турция, е оградена на юг от Африканската и Арабската плочи, а на север от Евразийската. Анадолската плоча включва Северноанadolската, Източноанadolската и Югоизточната анadolска разломни зони, които формират границите на плочата и маркират основните активни разломни сегменти за цялата Западна Анадола [1].

За Източноанadolската разломна зона има данни, че е формирана между късния миоцен и ранния плиоцен [2]. Продължаващата миграция на Арабската плоча на север към стабилна Евразия от миоцена насам е довела до изтласкване на Анадолската плоча на запад по протежение на Северната и Източната анadolска разломни зони [3]. За първи път тази структура е дефинирана през 1969 [4]. Източноанadolската разломна система, разширяваща се над 500 km, представлява южната граница на Анадолската плоча и е разлом, простиращ се между Карлиова на север, където се свързва с Северната анadolска разломна зона, и Антакия, където се среща с разлом идващ от Мъртво море ([5]; [6]). Наблюдаваното движение на плочата със скорости на приплъзване, вариращи от 6 до 10 mm/годишно, е довело до генериране на разрушителни земетресения в източна Турция, както е документирано от исторически записи.

Историческите и инструменталните записи показват големи различия между историческата и настоящата сеизмичност в зоната. През миналия век по структурата е регистрирано само едно силно земетресение - на 4 декември 1905 г.;  $M = 6.8$  [7]. Най-силните известни земетресения в района са генерирани, съответно на 29 ноември 1114 г. ( $M > 7.8$ ), 28 март 1513 г. ( $M > 7.4$ ) и 2 март 1893 г. ( $M > 7.1$ ) [8]. Разглеждайки сеизмичното затишие в цялата зона някои автори изказват предположение, че Източно анadolският разлом е заключен до момента на реализиране на разрушителните земетресения от 6 февруари 2023 г. [9].

Двете разрушителни земетресения, реализирани в Югоизточна Турция на 6 февруари 2023 г., локализирани по протежение на Източноанadolската разломна зона, са усетени на територията на Турция и съседните страни ([10], [11]). Главното събитие с  $M_w=7.8$  е последвано от изявена афършокова активност - в рамките на 10 минути е реализиран вторичен трус с  $M_w=6.7$ , а 10 часа по-късно по същата разломната система на разстояние 100 km е генерирано следващо силно земетресение с магнитуд  $M_w=7.5$ . Земетресенията причиняват обширни първични и вторични ефекти върху околната среда, включително повърхностни разкъсвания, пукнатини на земята, явления на втечняване и хидрологични аномалии, предизвиквайки големи въздействия върху мрежите и инфраструктурата [12].

В настоящата работа е анализирано пространственото разпределение на събитията от афършоковата поредица 6 месеца след земетресението от 6 февруари 2023 г, с  $M_w7.8$ , генерирано в Турция. Създадените карти са комбинирани данни от няколко източника с цел получаване на информация за процесите по време и след главното земетресение.

### Теория на метода

За получаване на по-добра количествена представа за разпределението на афършоковите събития е приложен подход, подобен на метода "изгладена" сеизмичност [13]. Всяко земетресение е разгледано като реализация на двумерна случайна величина със средно определените координати, стандартни отклонения по двете координати съответно  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  и корелация между координатите  $\sigma_{xy}$ . Тогава вероятността  $E$  дадено събитие да попадне в област  $Q$  се дава от релацията:

$$(1) \quad P(E \in Q) = \iint_Q f(x, y) dx dy$$

където  $f(x, y)$  е плътностната функция със съответните средни - дисперсия и корелация. В настоящото изследване е избрано двумерно нормално разпределение със стандартни отклонения  $\sigma_x=\sigma_y=10$  km и  $\sigma_{xy}=0$ . Дефинира се функцията:

$$(2) \quad \Phi(x, y) = \sum_i P(E_i \in Q(x, y))$$

където  $E_i$  е  $i$ -тото събитие, а  $Q(x,y)$  е квадрат с център  $(x,y)$  и площ  $400 \text{ km}^2$ . Нормирана по време, тази функция дава брой събития за единица време на  $400 \text{ km}^2$  и по същество представлява плътностна функция.

Друг метод приложен в изследването е метод DInSAR, чрез който са отразени промени на земната повърхност. При този метод чрез повторно преминаване на сателита се откриват и количествено се определят земните премествания настъпили между различни периоди от време. Данните са под формата на предварително обработени и калибрирани продукти и включват изображения със сложни стойности, включително амплитудни и фазови сигнали, които заедно с метаданните съставят изображение наречено диференциална интерферограма (растерно интерферометрично изображение), от което а след допълнителни изчисления е възможно да бъдат определени земните премествания по посока запад-изток и вертикална равнини, които са настъпили между регистрирането на данните със сантиметрова точност [14].

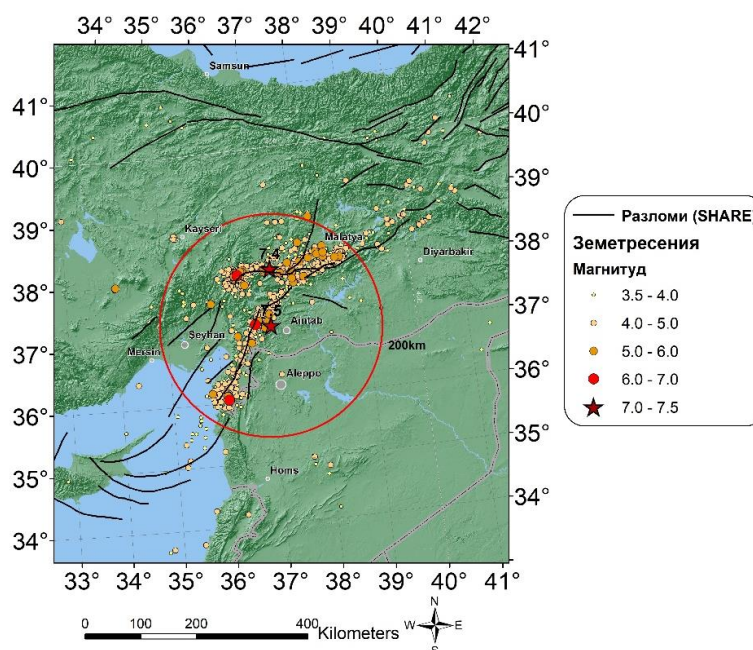
## Данни

Данните за земетресенията, използвани в изследването са от B.U. KOERI-RETMC (Boğaziçi University Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute - Regional Earthquake-Tsunami Monitoring Center, налични в [11]). Съставена е извадка от 3386 вторични труса с магнитуд  $M_L \geq 3,0$ , за период от 176 дни. Използваните данни за активните разломи в разглеждания регион са дефинирани от европейския проект SHARE [15]).

Информацията за стойностите на деформацията се основава на SAR свободни данни от сателита Sentinel-1, поддържан от Европейската космическа агенция [16] и [17]. Периодът на повтаряемост от сателите при регистрирането на деформациите след земетресението на 6 февруари е 12 дни. Основният режим за регистриране на SAR данни е наблюдението на терена чрез прогресивно сканиране. В това изследване интерферограмата получена чрез обработка на DInSAR данните от орбита 21 обхваща периода от 29 януари 2023 г. - 10 февруари 2023 г.

## Резултати

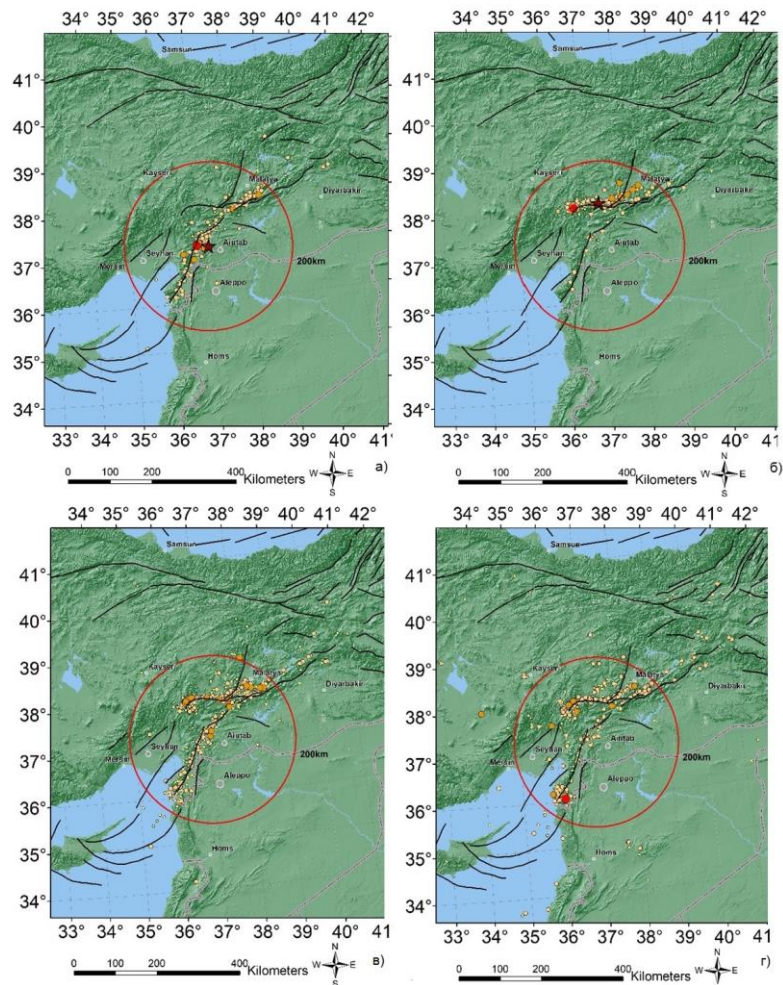
На Фиг. 1 е дадено пространственото разпределение на земетресенията по Източноанадолската разломна система от 6.02.2023 г. до 01.08.2023 г. На фигурата са дадени разломните структури с максимално очакван магнитуд над 7.1, дефинирани в Европейската база данни на активните разломи [14]. От фигурата се вижда, че събитията са разположени по разломи в две направления изток-запад и североизток-югозапад-запад. Размерът на афтершоковата област е с радиус около 200 km.



Фиг. 1. Епицентрална карта

Пространственото разпределение на афтершоковите събития на Фиг. 2 е в последователни не покриващи се интервали от време. Между двете най-силни земетресения

(времеви интервал от 9.12 часа, Фиг. 2а) афършоците са разположени по разлом с направление североизток-югозапад. В следващите 9.12 часа (Фиг. 2б) в това направление почти липсват събития. Афършоковите събития са разположени в направление изток-запад. И в следващите два интервала (Фиг. 2в и Фиг. 2г) преобладават събитията в същото направление.



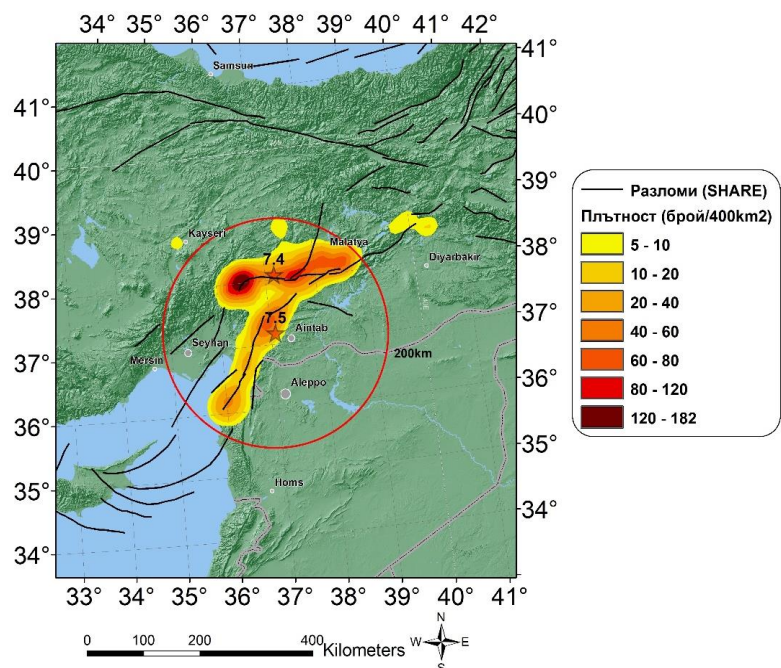
Фиг. 2. Разпределение на събитията във времето: а) между двете най силни земетресения (9.12 часа), б) 9.12 часа след второто по сила, в) между 18.42 часа и 10 дни след главното земетресение, г) след 10-ти ден до края (легендата е в съответствие с легендата на Фиг. 1)

На Фиг. 3 е представена плътността (брой/година за  $400 \text{ km}^2$ ), получена на базата на мрежа  $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ . Голяма плътност на епицентрите има около краищата на разломите и около разломните възли. Функцията е с най-голяма стойност в западния край на разлома, генерирал най-силното афършоково събитие. Там стойността на функцията е двойно по-голяма от тази в останалата част от разглежданата област и е 3–4 пъти по-висока от стойностите на функцията около епицентрите на двете най-силни земетресения.

Фиг. 2 и 3 дават основание да се предположи, че вторичната афършокова серия след земетресението с магнитуд 7.4 е по-интензивна от основната.

На Фиг. 4 е представено разпределението на наблюдаваните ускорения от главното събитие ( $M_w=7.8$ ). Там където са регистрирани най-високите ускорения плътността на епицентрите (Фиг. 3) е сравнително ниска (около 8–10 пъти по ниска от максималната и 1.5–2 пъти по ниска от средната), което предполага, че в тази област са най-интензивните разрушения по разлома.

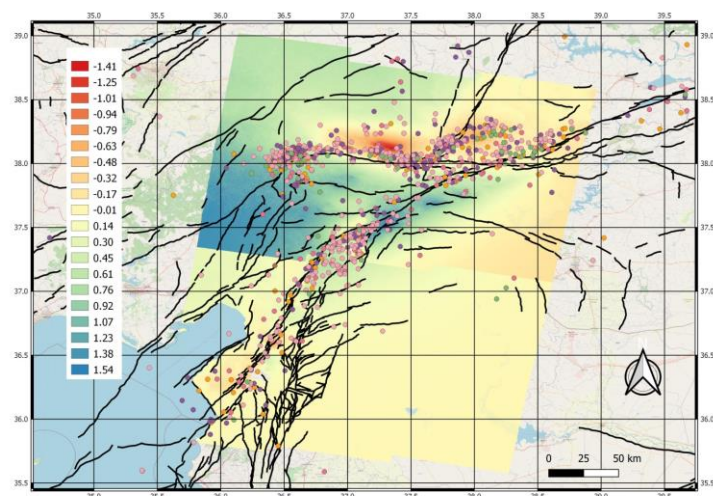
Фигура 5 показва вертикалните премествания (цветната скала е в метри), които очаквано са в зоните около основните разломи в района. Установено е, че дължината на разкъсването на повърхността е повече от 350 km.



Фиг. 3. Плътностна функция на събитията до 01.08.2023 г.



Фиг. 4. Разпределение на ускоренията, регистрираните след главното събитие (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jllz/shakemap/pga>)



Фиг. 5. Вертикалните премествания, регистрирани след земетресенията на 6 февруари

## Заклучение

В заключение може да се отбележи, че там където се наблюдават най-високите ускорения плътността на епицентрите е сравнително ниска. В тази област са най-интензивните разрушения по разлома, което се потвърждава и от оценените деформации от SAR данни.

## Литература:

1. Kalafat, D., Zulfikar, A., Akcan, S. Seismicity of Turkey and Real-Time Seismology Applications in Determining Earthquake Hazard. Academic Platform Journal of Natural Hazards and Disaster Management 2(2), 96–111, 2021, DOI:10.52114/apjhad.1039670
2. Sengor, A.M.C. and Görür, N. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study, in Strike-Slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation, edited by K. T. Biddle and N. Christie-Blick, Spec. Publ. Soc. Econ. Paleontol. Mineral., 37, 227–264, 1985
3. Şengör, A. M. C., O. Tüysüz, C. İmren, M. Sakiç, E. Eyidoğan, N. Görür, X. Le Pichon, and C. Rangin), The North Anatolian Fault: A new look, Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 33, 37–112, 2005, doi:10.1146/annurev.earth.32.101802.120415
4. Allen, C. R. Active faulting in northern Turkey, Rep. 1577, 32 pp., Div. of Geol. Sic., Calif. Inst. of Technol., 1969
5. Barka, A., Kadinsky-Cade K. Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. Tectonics, 7, 663–684, 1988
6. Duman, Y., and Emre, Ö. The East Anatolian Fault: geometry, segmentation and jog characteristics, Geological Society, London, Special Publications, Vol. 372, 495–529, 2013, <https://doi.org/10.1144/SP372.14>
7. Nalbant, S. S., J. McCloskey, S. Steacy, and A. A. Barka. Stress accumulation and increased seismic risk in eastern Turkey, Earth Planet. Sci. Lett., 195, 291–298, 2002, doi:10.1016/S0012-821X(01)00592-1.
8. Ambraseys, N. and Jackson, J. Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region. Geophysical Journal International, 133, 2, 390–406, 1998, doi:10.1046/j.1365-246X.1998.00508
9. Çetin, H., H. Güneyli, and L. Mayer. Paleoseismology of the Palu- Lake Hazar segment of the East Anatolian Fault Zone, Turkey, Tectonophysics, 374, 163–197, 2003, doi:10.1016/j.tecto.2003.08.003
10. Boğaziçi University Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute - Regional Earthquake-Tsunami Monitoring Center, that is available at <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/en/>
11. USGS NEIC 2023, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jllz/executive>
12. Frankel, A. Mapping seismic hazard in the central and eastern United States. Seismol. Res. Lett. 1995, 66, 8–21.
13. Lekkas, E., Carydis, P., Vassilakis, E., Mavroulis, S., Argyropoulos, I., Sarantopoulou, A., Mavrouli, M., Konsolaki, A., Gogou, M., Katsetsiadou, K.-N., Kotsi, E., Spyrou, N.-I., Diakakis, M., Kranis, H., Skourtsos, E., Lozios, S., Soukis, K. The 6 February 6 2023 Turkey-Syria Earthquakes. Newsletter of Environmental, Disaster and Crises Management Strategies, 29, ISSN 2653-9454, 2023, DOI: 10.13140/RG.2.2.17643.82726
14. Massonnet, D., K. Feigl. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface", Rev. Geophys., 36 (4) ,1998, pp. 441–500,
15. Basili, R, Kastelic V, Demircioglu M, Garcia Moreno D, Nemser E, Petricca P, Sboras S, Besana-Ostman G, Cabral J, Camelbeeck T, Caputo R, Danciu L, Domac H, Fonseca J, Garca-Mayordomo J, Giardini D, Glavatovic, Gulen,L, Ince Y, Pavlides S, Sesetyan K, Tarabus iG, Tiberti,M, Utkucu M, Valensise G, Vanneste K, Vilanova S, Wssner, J. The European Database of Seismogenic Faults (EDSF) compiled in the framework of 538 the Project SHARE, 2013, <http://diss.rm.ingv.it/share-edsf/>, <http://doi.org/10.5396092/INGV.IT-SHARE-EDS>
16. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
17. InSAR product by ASF DAAC HyP3 2023, (contains modified Copernicus Sentinel data 2023, processed by ESA).