

ПРИЛОЖЕНИЕ НА КОСМИЧЕСКИ ТЕХНОЛОГИИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ И МОНИТОРИНГ НА СЕИЗМОГЕННИ ЗОНИ

Димитър Димитров, Емил Ботев

*Национален институт по геофизика, геодезия и география – Българска академия на науките
e-mail: clgdimi@bas.bg*

Глобалните проекти и система за наблюдение на Земята (GEOSS) и Глобалният мониторинг за околна среда и сигурност (GMES) включват като приоритет при опазване на околната среда и за устойчиво развитие на обществото наблюдения на Земята, инструменти за оценка, методи за мониторинг и прогноза.

Сеизмогенни зони са районите, генетично свързани с историческа и инструментална сеизмичност, с потенциален сеизмичен риск от силни земетресения, и идентифицирани по сеизмоложки, геофизични и геоложки данни. България се намира в активна сеизмогенна зона, от което произтича и основната задача за науката да изучи протичащите в тези зони процеси, водещи до силни земетресения и да предприеме подходящи начини за ефективно противодействие. Това характеризира проблема с особена степен на актуалност в национален и световен мащаб и го поставя в категорията на приоритетните научни направления в областта на науките за Земята.

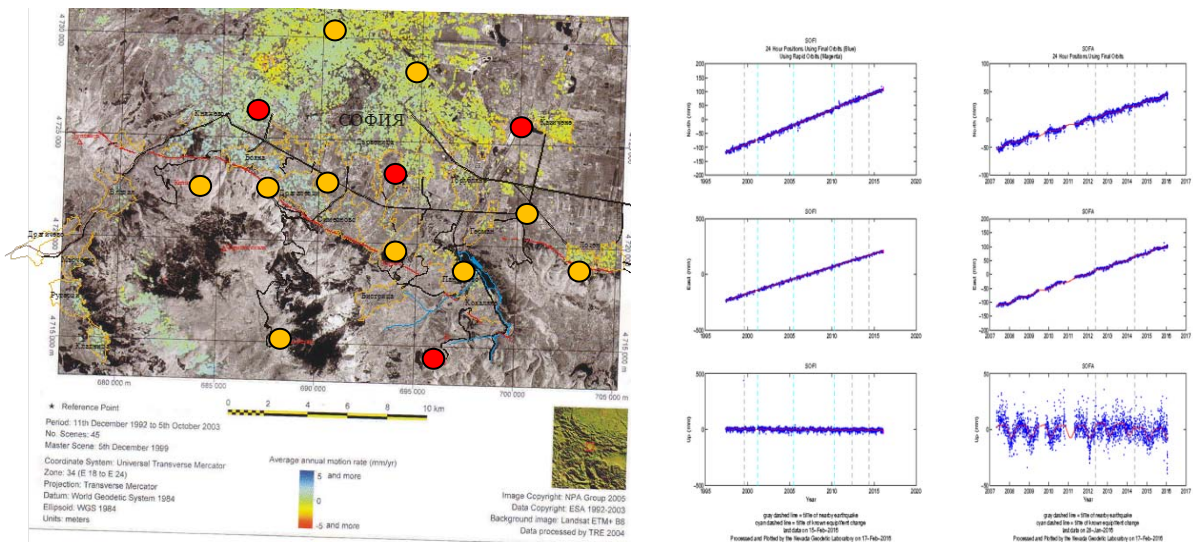
Приложението на космическите технологии на Глобалните навигационни спътникови системи (GNSS) и на радарната интерферометрия In SAR (Synthetic Aperture Radar) позволяват да се изучат сеизмогенните зони и физическите процеси, водещи до силни земетресения. Постоянните и периодични високоточни измервания с GNSS и прилагането на радарната интерферометрия In SAR са най-ефикасните съвременни космически техники за мониторинг и изследване на сеизмогенни зони.

По долу са представени резултатите от изследвания, осъществени през последните 20 години от автора или от колективи под негово ръководство или с негово участие в различни сеизмогенни зони у нас и по света.

Мониторинг на сеизмогенна зона в района на град София

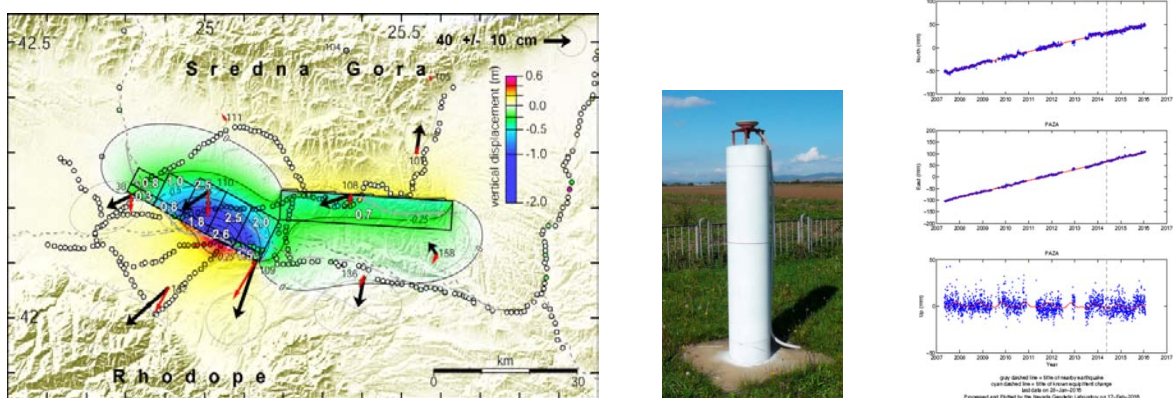
Районът южно от град София е изявена в структурно-геоморфоложко, тектонско и сеизмично отношение сеизмогенна зона, където могат да се очакват силни земетресения [1]. Тази зона се свързва с т.н. "Витошки разлом", разделящ Витошкия морфоблок от потъналия под неогенски утайки, сложно разбит Софийски грабен. Повърхностните изяви на Витошкия и Лозенският разломи са представени върху космически образ с определените с InSAR методът релативни вертикални деформации и мрежата за GNSS мониторинг (Фиг.1).

Получените от мониторинга идентични скорости на премествания на постоянните и периодично измерваните станции са от порядъка на 1-2 mm/год не свидетелстват за натрупване на значими тектонски напрежения по Витошкия разлом. Данните от постоянните и периодично преизмерваните с GNSS станции в района, осигуряват високоточен мониторинг на движенията в тази сеизмогенна зона във връзка с изследване на тектонските напрежения и сеизмичния риск [2].



Фиг. 1. В ляво - мрежата за мониторинг и GNSS на Витошкия разлом върху космически образ и резултат от InSAR изследване на зоната. Перманентните GNSS станции са представени с червени, а периодично измерваните с оранжеви кръгове. В дясно - компоненти на абсолютните скорости на постоянните станции на SOFI и SOFA, от двете страни на Витошкия разлом.

Изследвания и мониторинг на сеизмогенната зона Чирпан – Пловдив



Фиг. 2. Главните разломи, активирали се при земетресенията от 14 и 18 април 1928 г., получени от моделиране на ко-сеизмичните премествания определени по данни от GNSS преизмервания (черните стрелки). В дясно перманентна GNSS станция в гр. Пазарджик и компонентите от времевите и серии.

Приложението на космическата технология GNSS за определяне на скоростите на преместване на геодезически репери в района позволиха да се изучи зоната и да се определят геометричните параметри на главните разломи, активирали се през 1928 г. [3] (Фиг.2). Мониторингът на зоната с периодични GNSS измервания даде оценка на тектонските напрежения и съвместно с палеосеизмични изследвания определи сеизмичният цикъл на силните земетресения в района [4].

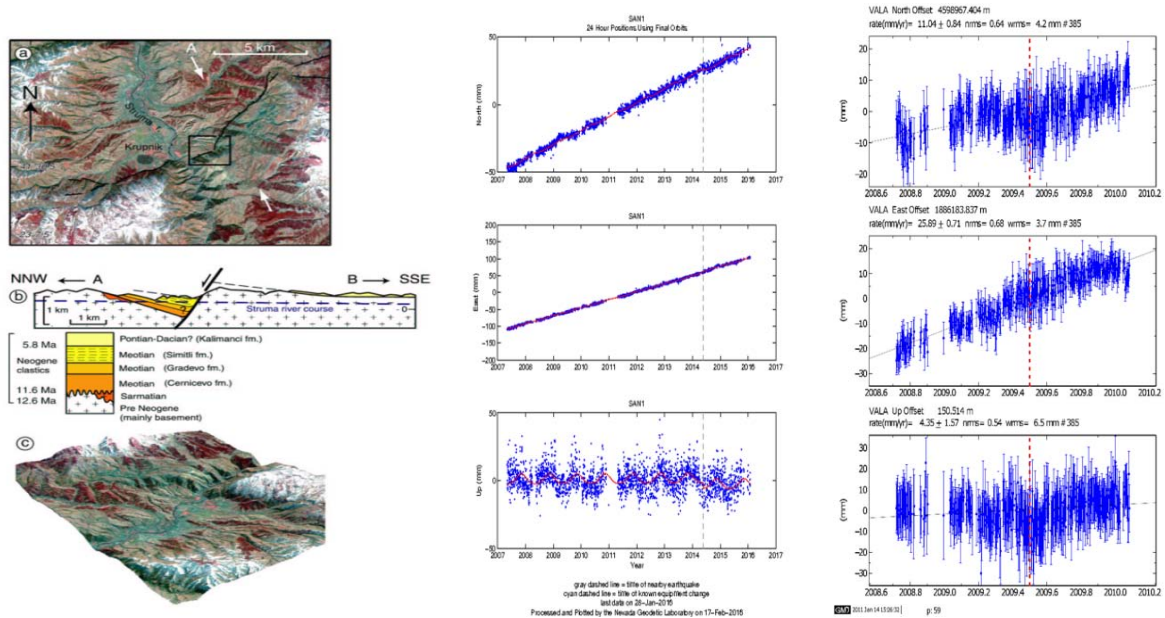
Изследвания и мониторинг на сеизмогенната зона югозападна България

Районът на югозападна България е известен с едни от най-силните земетресения поразили Европа с магнитуд (M) 7.3 и 7.8 на 4 април 1904 г. [1]. Многогодишният мониторингът на зоната с перманентни GNSS станции и периодични преизмервания на локална геодинамична мрежа около Крупнишкия разлом позволи да се оценят регионалните тектонски движения и локалните напрежения около Крупнишкия разлом (Фиг.3). По получените данни и съвместно резултатите от палеосеизмоложки изследвания се определи сеизмичният цикъл по Крупнишкия разлом [5].

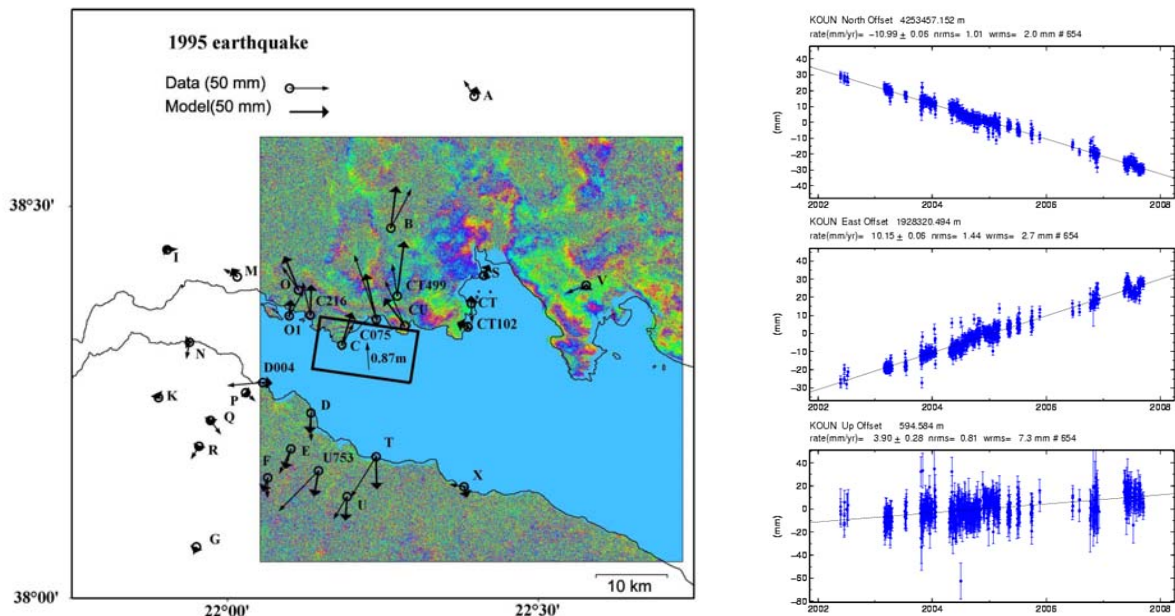
Изследвания на сеизмогенни зони в Централна Гърция

Коринтският залив в централна Гърция е от най-активните вътрешно континентални структури в Европа. Този асиметричен грабен е ограден от активни разломи предизвикали много катастрофални земетресения (Легион, 1861 г. $M=7$; Коринт, 1981 г. $M=6.7$). В тази зона от 1991 г. се осъществява мониторинг на повърхностните деформации с GNSS мрежа от 22 перманентни и 240 периодични преизмервани станции, като се установи средна скорост на разтягане на залива 14-15 mm/год.

За изследване на земетресението от 15.06.1995 г. бяха използвани данни от космическите методи GNSS и InSAR (Фиг. 3).



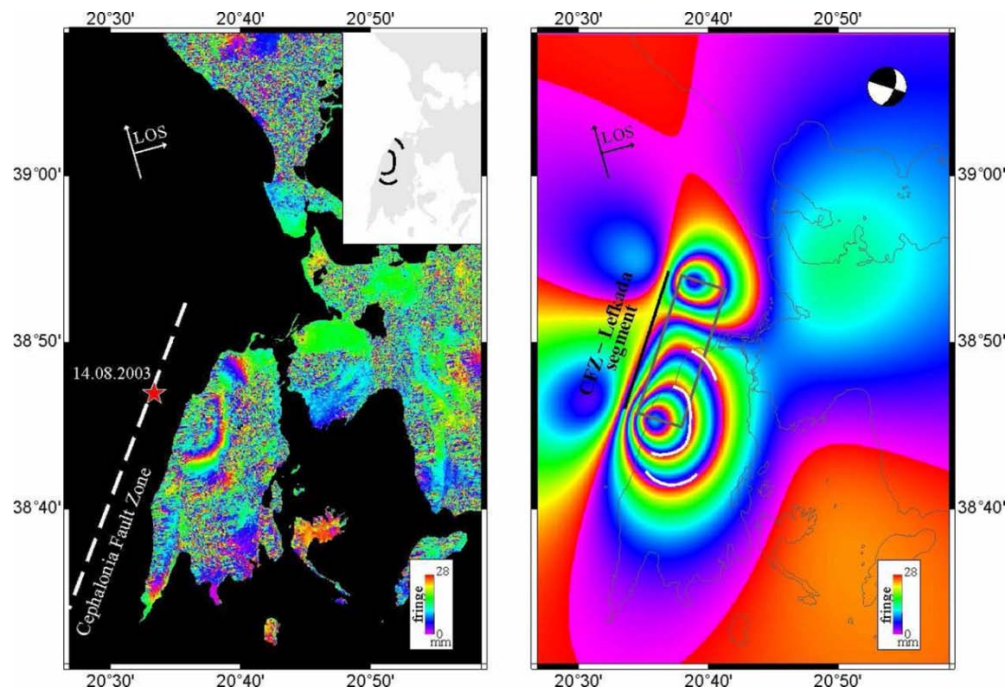
Фиг. 3. Крупнишкият разлом картиран върху космически образ, напречен геоложки профил и компоненти на абсолютните скорости на перманентните GNSS станции в градовете Сандански и Валандово. В дясно са представени времевите серии от станция Валандово и е потърсена връзка (червената линия) със случилото се в района земетресение през 2009 г. с $M=5.2$.



Фиг. 4. Районът на земетресението от 15.06.1995 г. със определените с GNSS и InSAR методите ко-сеизмичните деформации. Измерените и моделните премествания са представени съответно с тънки и по-плътни стрелки. В дясно е представено сравнение на дължини между перманентните станции от двата бряга на Коринтския залив. Пространствените вектори между станциите от двата бряга на залива се удължават, а между тези от северният бряг се скъсват.

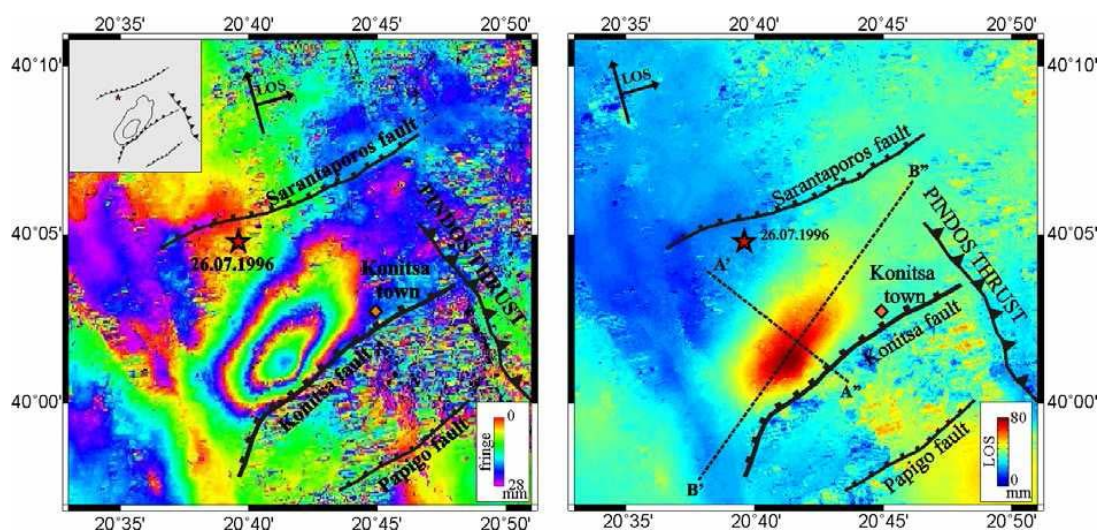
На фигура 4. са представени ко-сеизмичните премествания от земетресението от 1995 г. на 24 репери, определени с измервания GNSS, както и ко-сеизмичните деформации от InSAR изследване. Моделирането на получените косеизмични премествания позволиха да се определят геометричните сеизмотектонски параметри на главния разлом на труса [2].

Изследването на земетресението от 2003 г. Лефкада $M=6.3$ с методът InSAR и моделиране на косеизмичните деформации (Фиг. 5) показва възможностите на този космически метод за определяне на мястото и сеизмотектонските параметри на активираният се в морето разлом [6].



Фиг. 5. Остров Лефкада с определените с методът InSAR косеизмични деформации и разломът, активирал се при труса от 2003 г. В дясно - моделът на косеизмични деформации.

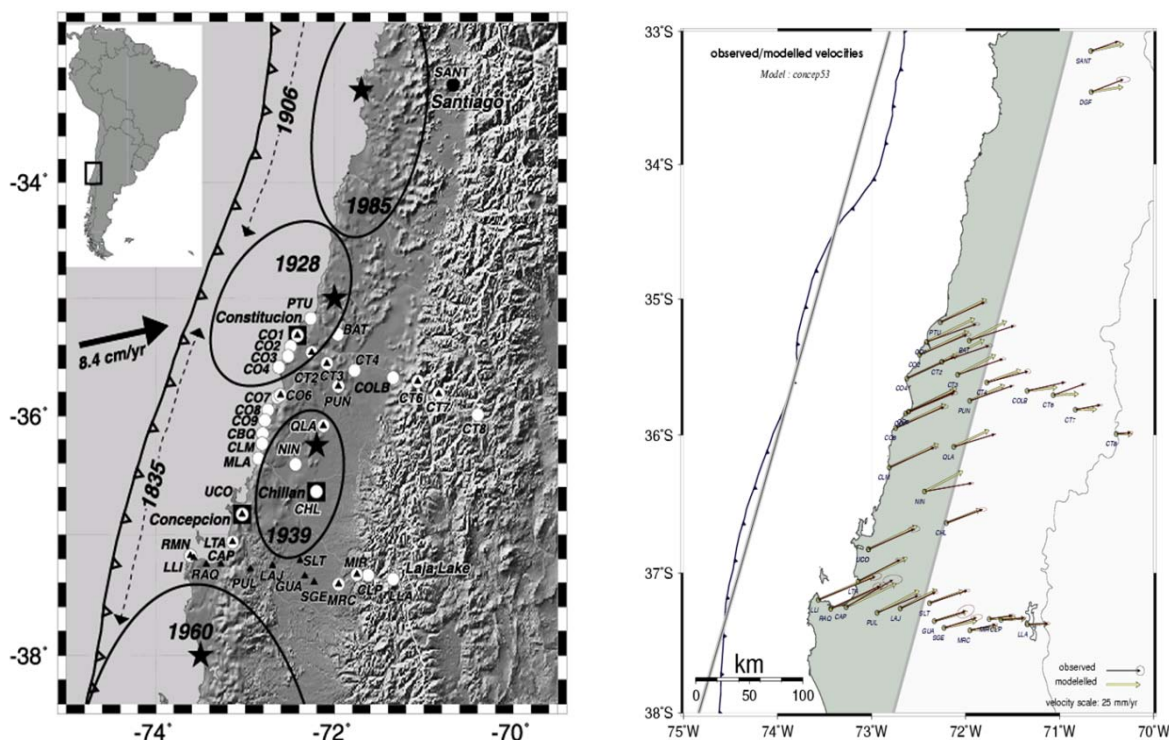
При изследването на земетресението от 26.07.1996 г. Коница $M=5.3$ в северна Гърция бяха подвърдени възможностите на методът InSAR за изучаване на физическите механизми на средно силни земетресения с (Фиг. 6).



Фиг. 6. Сеизмогенната зона на град Коница с определените с методът InSAR косеизмични деформации от земетресението от 1996 г. и активиралите се разломи.

Изследване на зоната на земетресението от 1835 г. в централно Чили

Бреговата ивица на Чили е една от най-сеизмогенните зони в света. Тук приблизително на всеки десет години стават силни земетресения с магнитуд $M > 8$. Районът заключен между 35° и 37°S е известен с много силното земетресение от февруари 1835 г. (Darwin, 1851) с $M=8,5$ (Lomnitz, 1971; Beck et al., 1998).



Фиг. 7. Геодинамична GNSS мрежа от 41 точки в сеизмогенната зона в Централно Чили с резултатите от GNSS монитоража 1996, 1999 и 2002 г. В дясно (в сиво) - зоната на сблъсъка на Тихоокеанската плоча Наска с тази на Южна Америка, получена от моделирането на интерсеизмичните премествания.

В този район беше стабилизирана и измервана през 1996, 1999 и 2002 г. с GNSS мрежа от 41 точки, което позволи да се определят значителни премествания на контролните станции, отражение на натрупваните в резултат на субдукцията интерсеизмични напрежения. Анализът на резултатите от трите цикъла измервания определи значителни интерсеизмични движения със скорост от 34 до 45 mm/год по бреговата ивица и от 10 до 20 mm/год по планинската верига на Андите спрямо стабилната част на Южноамериканската континентална плоча. Именно значителната разлика между скоростите на движение на реперите стабилизирани по бреговата ивица и тези по мощната планинска веригата на Андите е причина за акумулиране на сеизмогенни напрежения в областта над зоната на контакт. Получените данни позволиха да се определят точно мястото и параметрите на подпъхането: азимут $N 19^\circ$; наклон 16° ; хлъзгане 67 mm/год и дълбочина на сблъсъка 55 km. Резултатите доказаха, че земетресенията в тази зона не са чисто субдукционни и че между субдукционната зона и мощната верига на Андите се натрупват напрежения, увеличаващи опасността от ново силно земетресение [7].

По получените параметри беше изчислено натрупаното тектонско напрежение в района след последното силно земетресение от 1835 г. $M=8,5$, въз основа на което беше направен прогноз за очаквано силно земетресение в зоната с $M>8,5$ [7]. Прогнозът на случилото в изследваната зона земетресение през март 2010 г. с $M=8,8$ беше цитиран в [8] за „добър пример за предсказване на силни земетресения“.

Заклучение

Представените примери от приложението на космическите технологии GNSS и InSAR за изследване и мониторинг на сеизмогенни зони показва значението и предимствата им при установяване на закономерности в развитието на бавните и бързите движения в сеизмогенните зони, при опознаване на развиващите се в тях тектонски процеси, а именно на натрупване и освобождаване на тектонските напрежения, свързани с оценка на сеизмичният риск и предсказването на силни земетресения.

Литература:

1. Христосков, Л. „Сеизмология“, Издател: УИ "Св. Климент Охридски". 2005; 2007.
2. Димитров Д. Ст. „Геодезически изследвания на сеизмогенни зони“ Дисертация за дтн, ЦЛВГ, БАН, 2009.
3. Dimitrov, D. S., J.-C. Ruegg, R. Armijo, B. Meyer, E. Botev, P. Briole (2016) “The 1928 Plovdiv sequence (Bulgaria): fault model constrained from geodetic data and surface breaks”, *Geophys. J. Int.* (in press).
4. Vanneste, K., A. Radulov, P. DeMartini., G. Nikolov, T. Petermans, K. Verbeeck, D. Pantosti, T. Camelbeeck, D. Dimitrov, S. Shanov (2006), “Paleoseismologic investigation of the fault that ruptured in the April 14, 1928, Chirpan earthquake (M=6.8), Southern Bulgaria”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 111, B01303.
5. Meyer, B., M. Sebrier, D. Dimitrov (2007) “Rare destructive earthquakes in Europe: The 1904 Bulgaria event case”, *Earth and Planetary Science Letters*, 253, 3-4, 485-496.
6. Ilieva, M., P. Briole, A. Ganas, D. Dimitrov, P. Elias, A. Mouratidis, R. Charara (2016) “InSAR investigation and fault plane modelling of 14th of August 2003 Lefkada Island (Greece) earthquake”, *Tectonophysics*, (in press).
7. Ruegg, J. C., A. Rudloff, C. Vigny, R. Madariaga, J.B. de Chabaliar, J. Campos, E. Kausel, S. Barrientos and D. Dimitrov (2009) “Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitución and Concepcion in Chile”, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, PEPI 5140, 78-85.
8. Kanamori, H. (2015) “Earthquake Hazard Mitigation and Real-Time Warnings of Tsunamis and Earthquakes” *Pur and Applied Geophysics*, 172, 2335-2341.