



Напрежения в земната кора от GPS и триангулационни измервания в Централна Западна България

Николай Димитров, Иван Георгиев

Национален институт по геофизика, геодезия и география при БАН, 1113 София, ул. „Акад. Г. Бончев“, бл. 1

Crustal strain from GPS and triangulation data in Central Western Bulgaria

Nikolay Dimitrov, Ivan Georgiev

National Institute of Geophysics, Geography and Geodesy, Bulgarian Academy of Sciences, 1113 Sofia, Acad. G. Bonchev str., bl. 1; E-mail: nkdm@clg.bas.bg; ivan@bas.bg

Abstract. Triangulation data from first order geodetic network of Bulgaria measured between 1923 and 1929 and GPS data from last two decades have been processed together. The results for horizontal velocities is about 1–3 mm/y. The strain rate in Central Western Bulgaria region is estimated. Principal axes of the horizontal strain rate are calculated from the constrained velocity solution. The results are used to constrain the active faults in the region. The joint GPS and triangulation data analysis can contribute to estimation the crustal strain even in areas with low rate of deformation and to constrain the recent tectonics.

Key words: GPS, National triangulation network, crystal strain, recent tectonics.

Резюме. В статията е изследвана една възможност за комбиниране на GPS с ъглови измервания на точки от триангулационна мрежа на България, извършени през периода 1923–1929 г., за получаване на съвременни хоризонтални движения и напрежения на земната кора в района на централна западна България. В обработката са използвани измервания на Държавната триангулационна мрежа I клас на осем точки и GPS измервания на общо 15 точки. Извършена е съвместна обработка и анализ на GPS и ъгловите измервания и са получени стойностите на напреженията в основните направления. Резултатите от съвместната обработка на класическите и GPS измерванията показват възможността да се определят скорости и напрежения на земната кора в райони с относително слаби деформации, като същевременно допринасят за изясняване на тектонската обстановка.

Ключови думи: GPS, Държавна триангулационна мрежа, напрежения на земната кора, съвременна тектоника.

Увод

GPS технологията позволява изучаване на съвременната тектоника, защото дава количествени оценки за съвременните движения на земната кора в изследваните райони. GPS данните дават добра възможност да се изучат настоящите геодинамични процеси, но остава въпросът колко назад във времето могат да се интерполират получените резултати. Комбинирането на стари триангулационни измервания от 20-те години на миналия век с GPS измервания, извършени през последното десетилетие, може да даде отговор на този въпрос (Kotzev et al., 2005).

В статията се разглеждат резултатите, получени от обработка на GPS и класически измервания в района на централна западна България. Този район е от особен интерес поради високата плътност на населението и голямата концентрация на промиш-

лени ресурси. Това прави изследването на съвременните движения на земната кора в този район особено актуален въпрос. Резултатите могат да послужат за локализиране на съвременно активни разломи и разломни структури и оценка на сеизмичния риск.

За изследване на съвременната тектоника на централна западна България през 1996 г. е изградена геодинамична GPS мрежа в района в рамките на съвместен проект на Централната лаборатория по висша геодезия (ЦЛВГ) и Масачузетския технологичен институт (MIT – Massachusetts Institute of Technology) (Kotzev et al., 2006). Точките от мрежата са стабилизиращи с метални болтове в характерни скални масиви след теренно геоложко проучване. В настоящата обработка участват седем точки от геодинамичната мрежа, както и седем точки от първокласната триангулационна мрежа на България, измерени в различни периоди (табл. 1).

Таблица 1
GPS кампании

Table 1
GPS campaigns

GPS номер	ТТ номер	година на измерване				
		1997	2000	2003	2005	2006
BREZ		X	X			
BUHO		X	X			
LOZE		X	X			
SLIV		X	X			
VERI		X	X			
VLAD		X	X			
PLA1		X	X			
TREB	база			X		
GURM	база			X		
KALN	база			X		
KOZN	тт17			X		
MACH	тт11			X		
KONO	тт12			X		
CHER	тт16			X		
MUSA	тт26			X	X	X

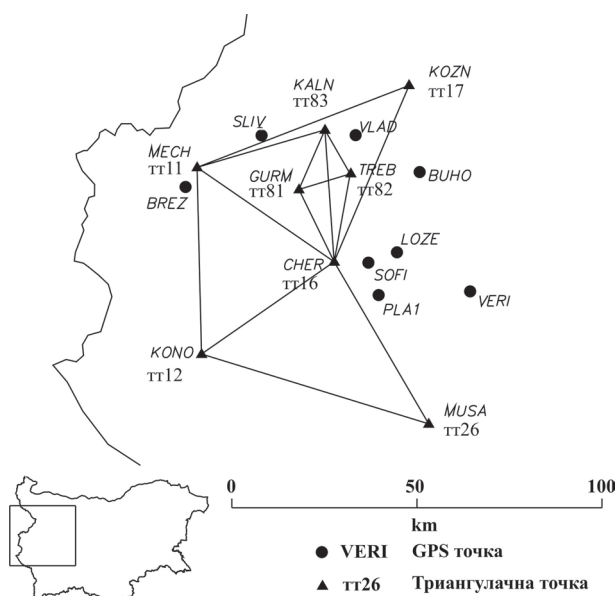
Точките от геодинамичната мрежа се намират в районите на Брезник (BREZ), Бухово (BUHO), Лозен (LOZE), Сливница (SLIV), Веринско (VERI), Владо Тричков (VLAD) и в района на Геодезическата обсерватория „Плана“ на ЦЛВГ (PLA1), а седемте триангулационни точки са: Требич (TREB), Гурмазово (GURM) и Кълна глава (KALN), които са точки от Софийската базисна мрежа, Козница (KOZN, ТТ17), Мечи камък (МЕЧ, ТТ11), Конявска планина (KONO, ТТ12), Черни връх (CHER, ТТ16) и връх Мусала (MUSA, ТТ26) (фиг. 1).

Триангулационните измервания, които са използвани в изследването, са ъглите между осем точки от първокласната мрежа, измерени през периода 1923–1930 г. (Йовев, 2007). Това са: изходната точка на мрежата ТТ16 (Черни връх), трите точки от софийската базисна фигура (Кълна глава, Требич и Гурмазово) и още четири точки, намиращи се в същия район (Козница, Мечи камък, Конявска планина и връх Мусала). За контрол и установяване на точността на ъгловите измервания и координатите на точките от първокласната триангулационна мрежа, измерена през 20-те години на миналия век, е извършена предварителна обработка и изравнение (Димитров, 2008). Установената точност на ъгловите измервания е от порядъка на 0,2"–0,8", а на координатите – 9–20 cm.

Обработка на измерванията

Обработката на GPS измерванията е извършена със софтуера Bernese, версия 4.2 (Bernese GPS software version 4.2, 2001). В процеса на обработката са

включени четири перманентни GPS станции от Европейската перманентна мрежа EPN (European Permanent Network). Това са GPS перманентните станции: SOFI (София), MATE (Матера), WTZR (Ветцел) и ANKR (Анкара). Координатите на тези станции, в Международната земна координатна система ITRS (International Terrestrial Reference System), реализация ITRF2000 (International Terres-



Фиг. 1. Схема на мрежата

Fig. 1. Design of the network

trial Reference Frame 2000), задават координатната и кинематичната система.

От съвместната обработка на GPS и триангулационните измервания са определени скоростите на точките (Димитров, Георгиев, 2010) (фиг. 2).

Изчисляване на напреженията

Съществуват няколко метода за оценка при наличие на новите технологии за измерване.

При метода на Франк (Frank, 1966) напреженията се изчисляват от ъгловата ротация на две взаимно перпендикулярни оси и се приема, че напреженията се разпространяват еднакво в пространството. Този метод се прилага за триангулационни измервания при две и повече епохи. Методът изисква през различните епохи измерванията да са с еднаква конфигурация на мрежата.

При различна конфигурация на мрежата се прилага метода на Прескот (Prescott, 1976). Това е разширен метод, при който се приема, че напреженията се разпространяват еднакво, както в прос-

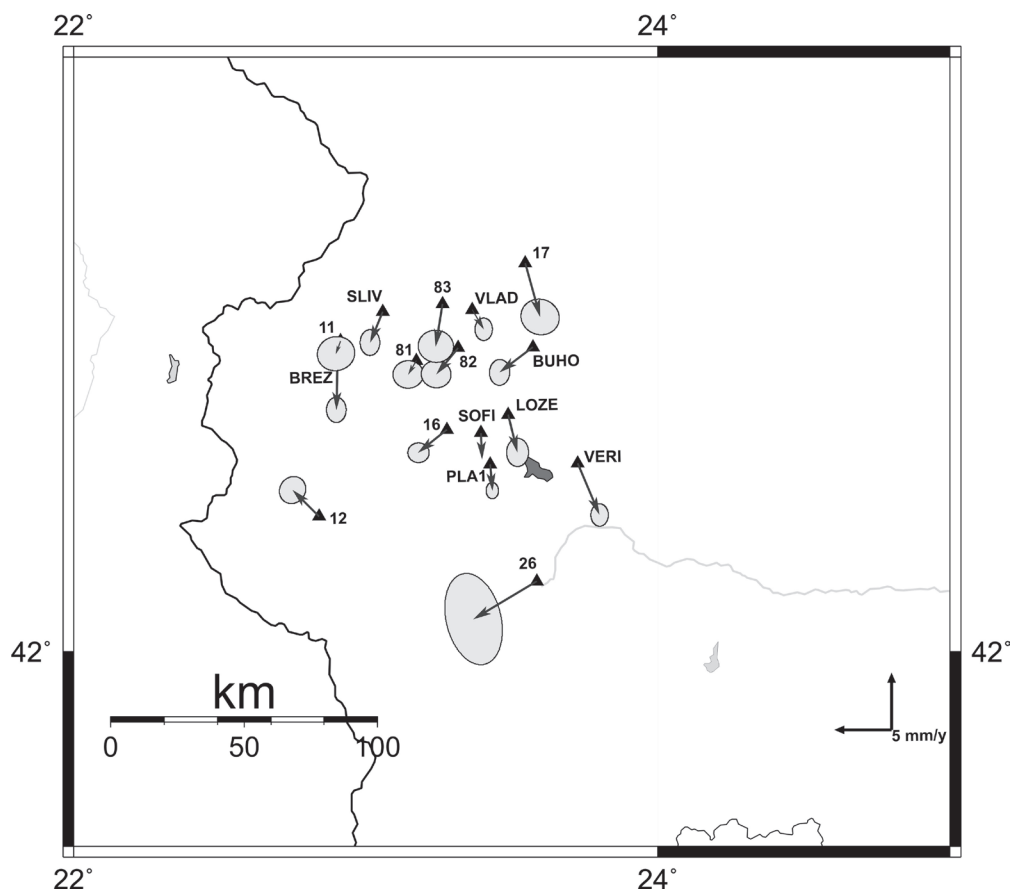
транството, така и във времето. Този метод обаче не дава добри резултати при наличие на разнородни данни.

Методът на едновременната редукция (Bibby, 1982) оценява градиента на скоростта, като приема, че градиентът е константа в цялата мрежа.

Предимството на тези методи е, че оценяват еднозначно търсените параметри. С тях се получава пространствено осреднено поле на скоростите.

Друг алтернативен подход е да се премахне допускането за пространствено унифициран градиент на скоростите и да се оценяват скоростите на точките директно. Комбинирането на наземни измервания с космически (GPS) прави възможно получаването на уникално поле на скоростите, а също така може да обедини различни наземни мрежи за получаване на унифицирано решение. Няколко изследвания показват, че такава техника е приложима (Snay, Drew, 1989; Grant, 1990).

За изчисляване на напреженията в земната кора използваме метода, описан от Dong (1993) и Feigl et al. (1990), в който се използват теоретически строги, практически ефикасни и гъвкави техники



Фиг. 2. Скорости на точките в района на централна западна България, получени от съвместната обработка на GPS и триангулационни измервания с 3σ елипси на грешките

Fig. 2. Site velocities in Central Western Bulgaria results from combined GPS and triangulation data solution

за комбиниране на разнородни данни. Оценяват се положенията на точките като функция от времето и също така полето на напрежения, получени от различни видове измервания, по различно време и по различна конфигурация на мрежата.

Същността на приложението метод се състои в следното:

При P на брой епохи, всяка епоха има N_p данни, съдържащи S_p наблюдения (ъгли, дължини и GPS-вектори), и M на брой станции.

Определяме предварителни оценки на координатите на станциите като вектор $\zeta^{(m)}$. Тези координати са приблизителни и трябва да са валидни за всяка епоха. За да се покаже движението на точките във времето, се допуска различна конфигурация на мрежата и за всяка епоха. Записваме координатите на точка m в епоха t_m като: $x_p^{(m)}$. За удобство се дефинира временно начало t_0 , за което координатите на точка m ще бъдат $x_0^{(m)}$, също така се дефинира и пространствено начало, за което в момента t_0 координатите са $x_p^{(0)}$. Координатите относно началото са:

$$\Delta x_0^{(m)} = x_0^{(m)} - x_0^{(0)} \quad (1)$$

Изборът на пространственото начало може да бъде произволен.

Позицията на станция m в епоха p ще бъде:

$$\Delta x_p^{(m)} = \Delta x_0^{(m)} + (t_p - t_0)u^{(m)}, \quad (2)$$

където $u^{(m)}$ е скоростта на точката m .

Като проста параметризация на полето на скоростите може да се опише $u^{(m)}$ с градиента $L_{ij} = \partial u_i / \partial x_j$, оценен по t_0 и $x_p^{(m)}$. Приема се еднакъв модел на напреженията и също, че L е константа във времето и пространството, така скоростта на точка m ще бъде:

$$u^{(m)} = u^{(0)} + L(x_0^{(m)} - x_0^{(0)}), \quad (3)$$

където $u^{(0)}$ е скоростта на началото.

Понеже L не е задължително да е симетрично, движението може да включва в едно произволно твърдо тяло ротация около началото. За обяснение на тази ротация се записва:

$$L = E + W, \quad (4)$$

където E е тензора на напреженията, а W – тензора на ротацията:

$$E = \frac{1}{2}(L + L^T) \quad (5)$$

$$W = \frac{1}{2}(L - L^T) \quad (6)$$

Получаване на параметрите:

Уравнение 4 може да се преобразува във вида:

$$L = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{12} & E_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & w \\ -w & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Това разлагане е използваемо, когато ротацията w е неопределена, поради липса на наблюдателни уравнения като астрономически азимути, GPS вектори. Напреженията могат да се представят в координатна система с принципни оси, разложени на т.н. собствени значения ε_i и собствени вектори e_i .

$$E = \sum_{i=1}^2 \varepsilon_i e_i e_i^T \quad (8)$$

Приема се, че екстензията е положителна, когато: $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ и θ се измерва на дясно от оста x_2 (север). Така собствените вектори са:

$$e_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ -\sin \theta \end{bmatrix}, \quad e_2 = \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix}; \quad (9)$$

Големината на напрежението и принципните оси са съответно:

$$\varepsilon_1 = E_{11} \cos^2 \theta + E_{22} \sin^2 \theta - 2E_{12} \sin \theta \cos \theta \quad (10)$$

$$\varepsilon_2 = E_{11} \sin^2 \theta + E_{22} \cos^2 \theta + 2E_{12} \sin \theta \cos \theta \quad (11)$$

Количествата $[\varepsilon_1, \varepsilon_2, \theta, \omega]$ дефинират така наречените собствени значения при два измервани случая (фиг. 3).

По така описания метод са изчислените принципните оси на напреженията в основните направления за мрежа от триъгълници по метода на Делоне (фиг. 4). Стрелките сочещи навътре показват компресия, а тези сочещи навън – екстензия.

Анализ на резултатите и заключение

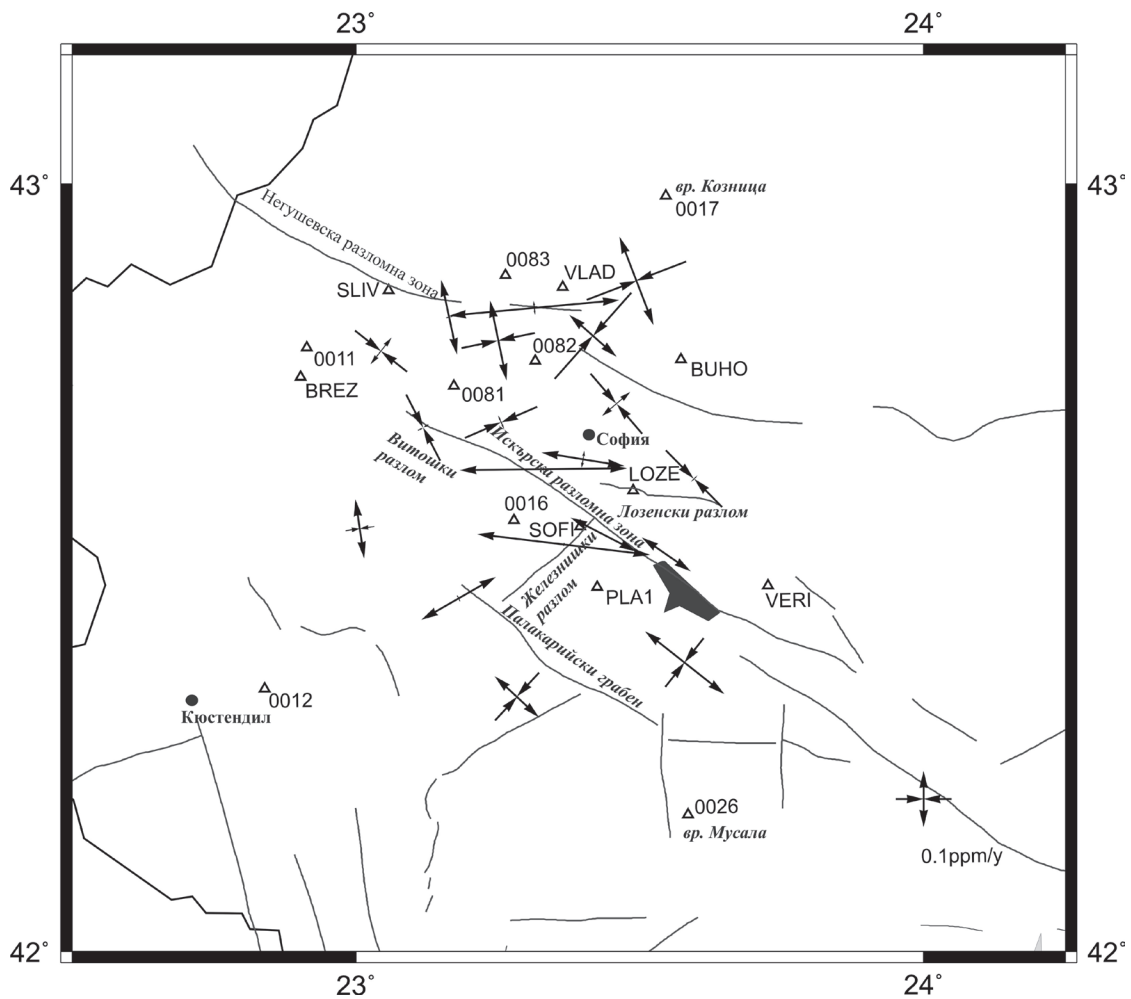
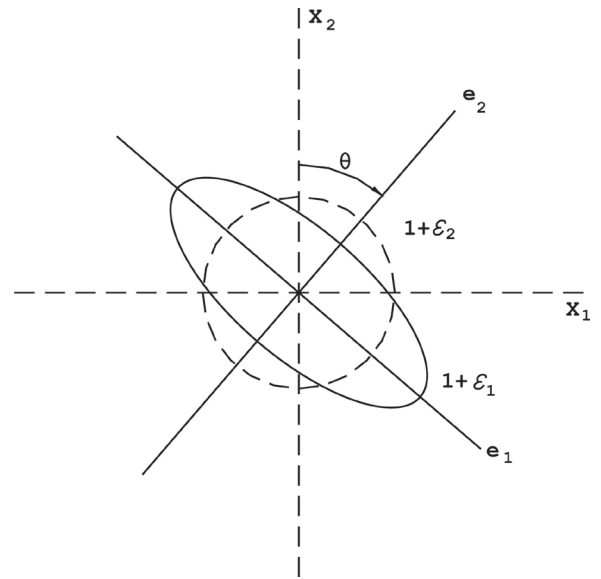
Получените хоризонтални скорости (Димитров, Георгиев, 2010, фиг. 2) и напреженията (фиг. 4) се съгласуват добре с полето на хоризонталните скорости в България и югозападната част на Балканския полуостров (Kotzev et al., 2008; Георгиев, 2010) и показват съвременната активност по Искърската разломна зона и Витошкия разлом. По-високите стойности на скоростите, северно от Искърската дислокация, са причина за възникване на компресия в зоната. Тази компресия е причина за придвижване в югоизточна посока на северната част по-бързо от южната и възникване на дясно отседно движение в тази част от Искърската разломна зона. Разликата между скоростите на точките, намиращи се северозападно от Витошкия разлом, и скоростите на

Фиг. 3. Параметризация със собствени значения

Единичната окръжност се деформира в елипса. Принципните оси на напрежението са e_1 и e_2 . Големината на напреженията в тези посоки са ε_1 и ε_2 .

Fig. 3. The eigenvalue parametrization

The unit circle deforms to the ellipse. The principal axes of the strain rate tensors are denoted by e_1 and e_2 . The strain rate in this directions are the eigenvalue ε_1 and ε_2 .



Фиг. 4. Главни оси на напреженията в района на централна западна България, получени от съвместната обработка на GPS и триангулационни измервания

Тънките линии показват вероятно активните разломи по морфологични данни

Fig. 4. Principal axes of the horizontal strain rate tensors in Central Western Bulgaria results from combined GPS and triangulation data solution

The slim lines shows the active faults

южнолежащите от тях точки показват наличие на екстензия в посока северозапад–югоизток. Общото движение на точките в района на централна западна България е в посока юг, което е в съгласие с екстензионното движение на Южна България и Северна Гърция – Южнобалканската екстензионна област (Burchfiel et al., 2000).

Резултатите от съвместната обработка на класическите и GPS измерванията показват възможността да се определят скорости и напрежения на земната кора в райони с относително слаби деформации, показват съвременна активност в района и същевременно допринасят за изясняване на тектонската обстановка.

Литература

- Георгиев, И. 2010. *Държавна и перманентна GPS мрежи на Република България – обработка на измерванията, анализ и приложение в геодинамиката*. Автореферат дисерт. д-р. София, БАН, ЦЛВГ.
- Димитров, Н., И. Георгиев. 2010. Определяне на съвременни движения на земната кора от съвместна обработка на GPS и триангулационни измервания. – В: *Сб. Резюме на „Геомедия“*, 38–41.
- Димитров, Н. 2008. Използване на стари триангулационни точки за определяне на съвременни движения на земната кора. – В: *Доклади от Научна конференция с международно участие*. София, ВСУ Л. Каравелов, VII–48–53.
- Йовев, И. 2007. Държавните геодезически мрежи на България и свързаните с тях референтни, координатни и височинни системи. – *Висша геодезия*, 16, 101–144.
- Bibby, H. M. 1982. Unbiased estimate of strain from triangulation data using the method of simultaneous reduction. – *Tectonophysics*, 82, 161–174.
- Burchfiel, B. C., R. Nakov, T. Tzankov, L. H. Royden. 2000. Cenozoic Extension in Bulgaria and Northern Greece: the northern part of the Aegean Extensional Regime. – In: Bozkurt, E., J. A. Winchester, J. D. A. Piper (Eds.). *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area Geol. Soc., Sp. Publ.* 173, 325–352.
- Dong, D. 1993. *The Horizontal Velocity Field in Southern California from a Combination of Terrestrial and Space-geodetic Data*. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Feigl, K. L., R. W. King, T. H. Jordan. 1990. Geodetic measurement of tectonic deformation in the Santa Maria fold and thrust belt, California. – *J. Geophys. Res.*, 95(B3), 2679–2699.
- Frank, F. C. 1966. Deduction of earth strains from survey data. – *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 56, 35–42.
- Grant, D. B. 1990. *Combination of Terrestrial and GPS Data for Earth Deformation Studies*. PhD Thesis, Unisurv report S-32.
- Kotzev, V., R. Nakov, B. C. Burchfiel, N. Dimitrov. 2005. Crustal Motion in Central West Bulgaria from Triangulation and GPS Data. – *C. R. Acad. bulg. Sci.*, 58, 6, 699–704.
- Kotzev, V., R. Nakov, Tz. Georgiev, B. C. Burchfiel, R. W. King. 2006. Crustal Motion and strain accumulation in western Bulgaria. – *Tectonophysics*, 413, 127–145.
- Kotzev, V., R. W. King, B. C. Burchfiel, A. Todosov, B. Nurce, R. Nakov. 2008. Crustal motion and strain accumulation in the South Balkan region inferred from GPS measurements. – In: Husebye, E. S. (Ed.). *Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Mitigation in Balkan Countries, NATO Science Series IV: Earth and Environmental Sciences, Springer Netherlands*, 81, 19–43.
- Pescott, W. H. 1976. An extension of Frank's method for obtaining crustal shear strains from survey data. – *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 66, 1847–1853.
- Snay, R. A., A. R. Drew. 1989. Combining GPS and Classical geodetic surveys for crustal deformation in the Imperial Valley, California, High Precision Navigation. – In: *Integration of Navigational and Geodetic Methods*. New York, Springer-Verlag, 225–236.

(Постъпила на 13.12.2010 г., приета за печат на 14.02.2011 г.)

Отговорен редактор Радослав Наков