



## TEN YEARS OF GPS STUDIES ON THE ACTIVE TECTONICS OF BULGARIA: AN OVERVIEW AND BASIC RESULTS

*Radoslav Nakov<sup>1</sup>, Valentine Kotzev<sup>2</sup>, Clark Burchfiel<sup>3</sup>, Robert King<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Geological Institute, Bulgarian Academy of Sciences; e-mail: radnac@geology.bas.bg, <sup>2</sup>Central Laboratory of Higher Geodesy, Bulgarian Academy of Sciences; e-mail: kotzev@bas.bg, <sup>3</sup>Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA; e-mail: bcburch@mit.edu

**Key words:** GPS, Bulgaria, Active tectonics

The territory of Bulgaria is located at the northernmost part of the well known Aegean Extensional System, defined as South Balkan Extensional Region (Burchfiel et al., 2000) (Fig. 1). In difference to the southern part of the system here the active deformation occurs at much lower rates, but the structures are well exposed and provide good opportunities for studies. The seismicity is also lower, but strong earthquakes are documented.

The results are obtained from a regional network of 17 points covering the country and a local network of 26 points covering SW Bulgaria, established respectively in 1996 and 1997. Presently, the number of the observed stations is 42. The regional network was firstly measured in 1996 and 1998. Up to day all 42 points were observed at least twice, some of them being observed up to five times. The velocities were obtained in a Eurasian fixed reference frame (Kotzev et al., 2001a; Kotzev et al., 2001b) as well as in a north Bulgarian fixed reference frame or in a west Bulgarian reference frame (Kotzev et al., 2002, 2004), mainly at the 70% confidential area.

The velocities usually do not exceed 1-2 mm/yr. tending to increase from the fixed point in NE Bulgaria. Some of the stations do not exhibit meaningful velocities, which is probably due to the low velocities and short period of observation. General extension is the main mode of deformation. However,

local zones of extension, compression and rotation may be observed due to velocity difference between some single stations. This extension in N-S direction is responsible for the origin of E-W trending normal faults and related to them grabens as well as strike-slip fault of NW-SE trend. Extension is oblique to the existing morphostructures, does pointing to a recent stage of deformation. Extension is more active in SW and South Bulgaria and tends to stop towards the Black Sea or may not be identified for the period of observation.

Based on the compiled map of the horizontal velocities (Kotzev et al., 2002a) a diffuse V-shaped zone of deformation was identified (Fig. 2). This zone marks the transition between the stable NE Bulgaria and the actively extending region to the south, probably representing the northern boundary of the Aegean extension on Bulgarian territory. A 3-D map of the crust velocity suggests that extension is the main force for building of topography. Combined GPS and seismological data are in good agreement (Kotzev et al., 2002; 2004).

The results obtained provide reliable data for quantifying crustal deformation across Bulgaria. However, due to the low rates of deformation further studies are necessary for a more detailed understanding of the local deformation.

## АКТИВНАТА ТЕКТОНИКА НА БЪЛГАРИЯ ПО ДАННИ НА КОСМИЧЕСКАТА ГЕОДЕЗИЯ (GPS) - 10 ГОДИШНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ: ОБЗОР И РЕЗУЛТАТИ

*Радослав Наков, Валентин Коцев, Кларк Бърчфийл, Робърт Кинг*

### Увод

Изучаването на активната тектоника се базира на комбинираното използване на геоложки, дистанционни и сеизмоложки методи. Чрез Глобалната позиционна система (GPS – Global Positioning System) космическата геодезия дава

възможност за бързо и надеждно количествено определяне на параметрите на съвременните геодинамични движения. Сегашната конфигурация на GPS спътници и наличието на глобална мрежа от около 200 следящи станции дават възможност да бъде получено хоризонталното

положение на точки в район с размерите на България с точност  $\pm 2$  mm. Значението на този метод за количественото изучаване на активната тектоника е сравнимо с този на абсолютната геохронология при изучаването на скалите.

### Същност на GPS

Системата е създадена и се поддържа от Министерството на отбраната на САЩ. Тя позволява непрекъснато, 24-часово определяне в реално време на пространственото положение във всяка точка от земната повърхност. Основа на системата е съвкупност от 24 спътника на височина 20 000 km, разположени в 6 орбитални равнини с период 24 часа. GPS спътниците излъчват микровълнови сигнали на две честоти. Сигналите се приемат на Земята от пасивни GPS приемници.

Прецизната орбитална и геодинамична информация, която предоставя IGS (International GPS Geodynamic Service) позволява резултатите да бъдат придобити от няколкодневни наблюдения. Повторните наблюдения през няколкогодишен период позволяват определянето на хоризонталните премествания. Опитът сочи, че за определяне на хоризонтални скорости от порядъка на 3-4 mm/година е необходимо интервалът между две последователни GPS кампании да бъде 2-3 години. Поради недостатъчната точност с която се моделира тропосферната рефракция, вертикалната компонента се определя от 3 до 5 пъти по-неточно от хоризонталните компоненти.

При интерпретацията на резултатите за целите на геодинамиката трябва да се има предвид, че получените данни отразяват картината в настоящия момент и тяхната евентуална екстраполация назад във времето трябва да се базира на геоложки факти. Изключително важен е изборът на референтна мрежа спрямо която да бъде отчетено движението на точките.

### Използвани GPS мрежи

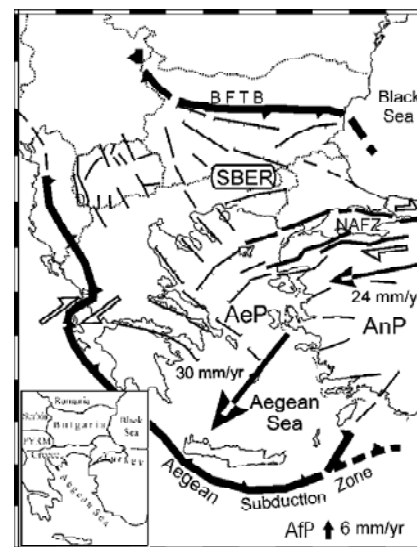
За определяне на кинематиката на основните геоложки структури в България през 1996 г. бе създадена първата регионална GPS мрежа за геодинамични изследвания от 17 точки, покриваща цялата страна (Коцев и др., 2000; Kotzev et al., 2001a). През 1997 г. бе създадена локална мрежа, състояща се от 26 станции за изучаване на геодинамиката на Софийския регион и югозападна България (Kotzev et al., 2001b). Регионалната мрежа бе за първи път цялостно измерена през септември 1996 г. и през септември

1998 г. Понастоящем в мрежата са включени 42 точки (Kotzev et al., 2004). В тях са проведени поне по две наблюдения, като в някои точки са проведени до 5 измервания.

Скоростите са получени спрямо две фиксирани референтни мрежи: Евразия (Коцев и др., 2000; Kotzev et al., 2001a; Kotzev et al., 2001b) и СЗ България (Kotzev et al. 2002, 2004). Резултатите от локалната мрежа за Югозападна България са интерпретирани допълнително и чрез фиксирана локална референтна мрежа (Kotzev et al., 2004). Интерпретациите са направени чрез използването основно на 70% доверителен интервал.

### Съвременна геодинамична позиция на България

Съвременната геодинамиката на Източното Средиземноморие и в частност Южните Балкани се определя основно от субдукцията на Африканската плоча в зоната на Егейската дъга, колизията на Арабската плоча с Евроазиатската (Анадолската) и последвалата протрузия на Анадола. Диференцираните тектонски движения в Егейския регион и Анадола мотивират отделянето на относително хомогенни геодинамични области, някои с характер на микроплочи (фиг. 1) (McClusky et al., 2000). Егейско море представлява действащ пример на екстензионна система,



Фиг. 1. Тектонска схема на Егейската екстензионна система. NAFZ, Северноанадолска разломна зона; AeP - Егейска плоча; AnP - Анадолска плоча; AfP - Африканска плоча; SBER - Южнобалканска екстензионна област; BFTB - Балканиден гънково навлачен пояс. GPS скоростите, дадени с черни стрелки, са по данни на McClusky et al. (2000).

развита над активна субдукционна зона. Територията на България заема най-северната част на системата, дефинирана като Южнобалканска екстензионна зона (Burchfiel и др., 2000). Тук деформацията протича със значително по-ниски стойности. За разлика обаче от района на Егейско море, където повечето структури са потопени, на българска територия те са разкрити и са достъпни за наблюдение.

### Основни резултати

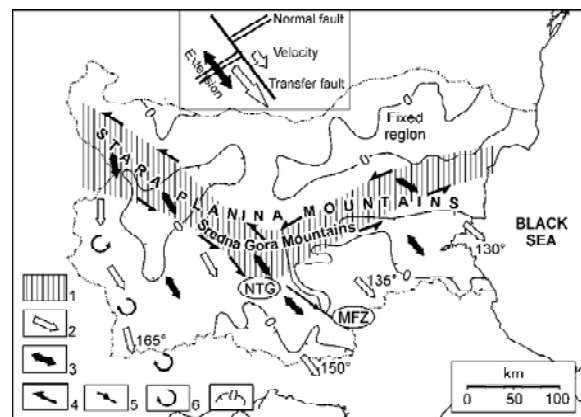
Скоростите на хоризонталните движения на земната кора за територията на България не надминават 3-5 mm/год., като обикновено са от порядъка на 1-2 mm/год. Някои станции не показват значими стойности. Имайки предвид много ниските стойности това може да се дължи и на недостатъчно дълъг период на наблюдения.

Посоката на движение на станциите със значими стойности е основно насочена на юг-югоизток спрямо Евразия. Това предизвиква екстензия в посока север-юг и образуването на съответни структури с посока изток-запад, например Софийският грабен, Горнотракийската грабенова система, Симитлийския грабен и др. Екстензията не съвпада отчетливо с основните морфоструктури (Дунавска равнина, Старопланинска верига и др.), а се разполага напречно на тях. Това предполага един съвсем млад етап на деформация. Екстензионните процеси са по-ясни в Южна и Западна България. В източна посока към Черно море екстензия липсва или е с много малки стойности за да бъде установена за периода на измерванията. На фона на общата доминираща екстензия се наблюдават и локални зони на екстензия, компресия и ротация в резултат на разликите от относителното придвижване на отделни блокове. За района на Ююгозападна България се доказва, че екстензията в посока север-юг се разпределя по разседа с приблизително екваториална посока (напр. Крупнишки, Пределски) и напречни отседи. Това обяснява и образуването на грабени (напр. Симитлийския), напречно на Струмската грабенова система. Екстензия в посока запад-изток по Струмската разломна зона липсва.

Станциите, разположени в СИ България показват нулеви стойности. Това позволи те да бъдат използвани за изграждане на фиксирана референтна мрежа. Въз основа на тази мрежа бе получена векторна карта на полето на хори-

зонталните скорости за територията на България. В комбинация със съществуващата карта на вертикалните скорости (Totomanov et al., 1979) е получена примерна карта. Картата на векторните скорости ясно очертава една относително стабилна област в СИ България. Южно от нея се разполага една преходна зона на деформация (фиг. 2), разделяща страната на северна и южна част. Зоната няма рязък характер, а е с дифузни граници. Деформацията се разпределя плавно от двете страни на старопланинското било като го сече. Тази зона бележи северната граница на Егейската екстензия на Българска територия като южно от нея деформацията протича много по-активно.

На фона на генерално насоченото на юг поле на хоризонталните скорости и екстензия се наблюдава диференциация на вертикалните движения с потъващи и издигащи се блокове (фиг. 2). Това предполага, че екстензията е основния фактор за формирането на съвременния релеф и наличието на сложна картина от диференцирани движения. Отседните движения по разломите с посока С-Ю и СЗ-ЮИ (напр. Маришка разломна зона) са резултат на относителните разлики в скоростите на блокове с придвижване с обща посока Ю-ЮИ. Екстензията се разпределя по разломи с комбинирани разседни и отседни



Фиг. 2. Кинематика на деформацията според векторното поле на скоростите с интерпретация на врезката. 1- преходна зона между стабилната СИ България и разтягащата се област, 2-азимутална посока на векторите на скоростите; 3-посока на екстензията; 4-относителна посока на отсядане; 5-трансферен разлом. 6-възможна посока на ротация. 7-нулева изолиния на вертикалните скорости с къси линии, насочени към отрицателните стойности. MFZ, Маришка разломна зона. NTG, Севернотракийска грабенова система.

движения. Тези с посока СЗ-ЮИ са главно с характер на относителни отседни, а тези с посока ЮИ-СЗ са с преобладаване на разседната компонента (фиг.2).

Изчислените напрежения в земната кора за Югозападна България (Kotzev и др., 2002b) показват стойности от порядъка до няколко десетки nstrain/год. (100 nstrain/год. се равняват на 1mm/год на разстояние 100 km). За района на София акумулираните напрежения са 25-30 nstrain/год. Главните напрежения са на опън в генерална посока С-Ю (с локална ротация в ЮИ част на Софийското поле) предизвикващи основно образуването на разседи с генерална посока И-З. Ориентацията на напреженията по GPS данни е близка до тези по сеизмични данни.

За цялата територия на България напреженията, изчислени по GPS данни (Kotzev et al., 2004b) показват акумулирането на по-значими опънови напрежения в Западна България с концентрация около София. Тези напрежения са значително по-големи и в сравнение със сеизмичните райони на Тракийското поле и Крупник, в които са възникнали силни земетресения през миналия век. Тези резултати предполагат акумулирането на сеизмична енергия в района на София, докато същата е била разтоварена в районите със силни земетресения възникнали през XX век.

## Литература

Burchfiel, B.C., R. Nakov, Tz. Tzankov, L. Royden. 2000. Cenozoic extension in Bulgaria and northern Greece: the northern part of the Aegean extensional regime. – In: *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area, Geological Society London, Special Publication 173*, 325-352.

Kotzev, V., R. Nakov, B.C., Burchfiel, R., King, R., Reilinger. 2001a. GPS study of active tectonics in Bulgaria: results from 1996 to 1998. – *Journ. Geodynamics*, 31, 189-200.

Kotzev, V., R. Nakov, B.C., Burchfiel, R., King, 2001b. GPS constraints on the kinematics of southwestern Bulgaria. – *C. R. Acad. bulg. sci.*, 54, 7, 51-54.

Kotzev, V., R. Nakov, B. C. Burchfiel, R. W. King. 2002a. Three-dimensional crustal velocity field for Bulgaria. – *C. R. Acad. Bulg. Sci.*, 55, 12, 67-72.

Kotzev, V., R. Nakov, Tz. Georgiev, B. C. Burchfiel, R. W. King. 2002b. Active deformation in southwestern Bulgaria inferred from GPS and seismicity data. – *C. R. Acad. Bulg. Sci.*, 55, 12, 73-78.

Kotzev, V., R. Nakov, B. C. Burchfiel, R. W. King. 2004. Crustal motion in Bulgaria inferred from GPS measurement. – *C. R. Acad. Bulg. Sci.*, 57, 5, 55-62.

## Заключение

GPS данните дават за пръв път количествени стойности за хоризонталната деформация на земната кора в България получени от точен метод. Тези стойности са от порядъка на 1-2 mm/год. Те показват тенденция към увеличаване от нулеви до значими в посока от север към юг и доказват, че екстензия с генерална посока север-юг е основната форма на деформация. Скоростите за България са значително по-ниски от тези в южната част на Егейската екстензионна зона (южно от Северноанадолския разлом – в Анадола и Егейско море), но определено показват наличието на активна тектонска деформация. Дори скорости от 1 mm/год за период от 1 млн. години ще предизвикват премествания от 1 km.

Комбинирането на GPS данни с такива от класическата геодезия и сейсмологията показва добро съвпадение и доказва надеждността на метода.

Получените досега резултати дават надеждна количествена и кинематична представа за активната тектоника на България, като за Югозападна България данните са с висока детайлност. Поради ниските скорости на деформация е необходим един по-продължителен период на наблюдение и нови измервания за получаването на една по-детайлна картина в локален план.

Kotzev, V., Tz. Georgiev, R. Nakov, B. C. Burchfiel, R. W. King. 2004. Crustal strain in Bulgaria. – *C. R. Acad. Bulg. Sci.*, 57, 6, 99-104.

McClusky, S., S. Balassanian, A. Barka, C. Demir, S. Erginav, I. Georgiev, O. Gurkan, M. Hamburger, K. Hurst, H. Kahle, K. Kastens, G. Kekelidze, R. King, V. Kotzev, O. Lenk, S. Mahmoud, A. Mishin, M. Nadarya, A. Ouzounis, D. Paradissis, Y. Peter, M. Prilepin, R. Reilinger, I. Sanli, H. Seeger, A. Tealeb, M.N. Toksoz, G. Veis. 2000. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. – *J. Geophys. Res.*, 105, 5695-5719.

Totomanov, I., B. Vrablyanski, M. Mladenovski. 1979. – In: *Map of Recent Vertical Movements in the Carpatho-Balkan Region*. Scale 1: 1 000 000 (Job, I. et al., eds.), Budapest, Cartografia.

Коцев, В., Р. Наков, Кл. Бърчфийл. 2000. Първи GPS данни за активната тектоника на България. – *Сп. на БАН, СХИИ*, 4, 59-68.