



Получена: 06.06.2020 г.

Приета: 22.06.2020 г.

КИНЕМАТИЧНИ АСПЕКТИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИЯ НА ETRS89, ЕПОХА 2005 ЗА ТЕРИТОРИЯТА НА РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ

Ю. Цановски¹, Ц. Данчев²

Ключови думи: ETRS89, ГНСС, скорости, деформации

РЕЗЮМЕ

Статията цели да покаже практическата възможност за реализация на Европейската земна координатна система (ETRS89) на територията на Република България, чрез прилагането на модел на хоризонтални вътрешноплочови скорости, използвайки мрежа от перманентни ГНСС станции. В настоящата разработка е генериран модел, в който са използвани данни от 30 станции на една от лицензираните инфраструктурни мрежи в страната. Използван е алгоритъм за локализиране на блокови структури със сходни полета на хоризонталните скорости. За оценка на получения модел са използвани данни за 45 станции на друга инфраструктурна ГНСС мрежа, действаща на територията на страната, както и предоставени скорости на 109 точки от Държавната GPS мрежа. Резултатите са окуражаващи за практическото приложение на ETRS89 на територията на България.

1. Въведение

През 1987 г. Международната асоциация по геодезия IAG (International Association of Geodesy) и CERGO (Central European Initiative Working Group on Science and Technology) предлагат проектирането и разработването на нова Европейска геодезическа референтна система (Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe – EUREF) – ETRS (European Terrestrial Reference System), базирана на GPS измервания. Причината за решението е с оглед на основния недостатък на глобалната координатна

¹ Юри Цановски, доц. д-р инж., кат. „Висша геодезия”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: tzanovski_fgs@uacg.bg

² Цочо Данчев, инж., кат. „Висша геодезия”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: tsdanchev_fgs@uacg.bg

система ITRS (International Terrestrial Reference System) и нейните реализации ITRF_y (International Terrestrial Reference Frame), а именно изменението на координатите в следствие на глобалните тектонични движения.

За официална геодезическа референтна система в Европейския съюз е приета ETRS89, която е реализирана благодарение на изграждането и функционирането на EPN. Координатната система е тримеренционална кинематична система.

В Република България опитите за въвеждане на Европейските стандарти са започнали още преди да бъдем приети за членове на Европейския съюз. Проектът на Държавната GPS мрежа и програмата за измерването ѝ са разработени от поделенията на Военно-географската служба на Българската армия: 26480 – София и 24430 – Троян.

През 2002 – 2003 година е извършено разузнаване (802 точки), ремонтване (219 точки) и изграждане на нови (123) точки. Постигнато е 74% съвместяване на съществуващи точки, които са прекоординирани, за да послужат за извеждане на трансформационни параметри със „старите“ координатни системи.

През 2004 – 2005 са проведени кампании за измерване на основния и второстепенен клас, като през 2017 е извършено прекоординиране на част от Държавната GPS мрежа [1].

Точките от основния клас са 128, равномерно разположени върху терена, със средна гъстота 35 km, трайно стабилизиращи на терена с възможност за центриране 1 mm. Точките от Второстепенната мрежа са 345 на брой, като съвместно с основния клас постигат гъстота, напълно достатъчна за практически приложения.

С оглед на годината на реализиране на измерванията, както и на резултатите от обработката на основния клас, бихме могли да твърдим, че на практика EUREF е съгласна за територията на Р България с уточнението, че получените координати на точките са в координатна система ETRS89, реализация ETRF2000, епоха 2005.0, а заедно с техните скорости се явяват реализация на Българска геодезическа система 2005, въведена с ПМС 153/29.07.2010 г.

2. Проблем

Към момента, с оглед на природата на DGPS мрежата (статична мрежа с периодични измервания), извеждането на скорости, е трудоемка, отнемаша време задача, изискваща солидна финансова подкрепа. В България няма действаща Държавна перманентна мрежа, с която би могло директно Държавната GPS мрежа да се реализира като кинематична, същата би била с неоспорими предимства. Трябва да се вземе предвид обаче, че реализирането и поддръжката на такава мрежа би изисквала огромни финансови ресурси и е въпрос на държавна политика.

През 2017 г. от Военно-географската служба е направено обследване, ремонт и изграждане на точки от основния клас, като някои са и преизмерени, в следствие на което са изчислени техните скорости. Колективът не разполага с официално публикувани към момента и това забавяне до голяма степен обезсмисля извеждането им, т.е. получените резултати вече не са значими. Впечатление прави и значителният брой унищожени точки, при които изчислението на скорости е невъзможно, т.е. практически се губи възможността за локализиране и мониторинг на локални разломи.

Липсата на официално определени скорости за период от вече 14 години при определени приблизителни скорости на база Перманентна станция SOFI, на територията на България от 3 mm/год. води до несъответствие между предоставените данни за положението на точките от DGPS мрежата и действителното им местоположение. Големината

на определените скорости предполага тяхното преизчисляване на минимум 10 години, или бихме могли да твърдим, че определените координати са практически приложими за 10-годишен период. Също така задължително трябва да се отразят и вътрешноплочовите премествания при реализирането на координатната система.

Отчитайки недостатъците на „статичната” DGPS мрежа и наличието на вече 4 частни, комерсиални Инфраструктурни мрежи, сертифицирани от АГКК, за предоставяне на данни във и извън реално време за геодезически приложения, Научният колектив е разработил методика за локализиране на блокови структури със сходни хоризонтални скорости, които могат да бъдат припознати от всички обхванати в областта точки. Изчислението, извеждането и верифицирането на хоризонталните скорости би могло да става през всеки 2 години (периода на валидност на сертификат за качество на Инфраструктурната мрежа, издаван от АГКК), като покритието с физически станции е върху цялата територия на страната, а някои от Инфраструктурните мрежи имат разположени и станции в съседни държави.

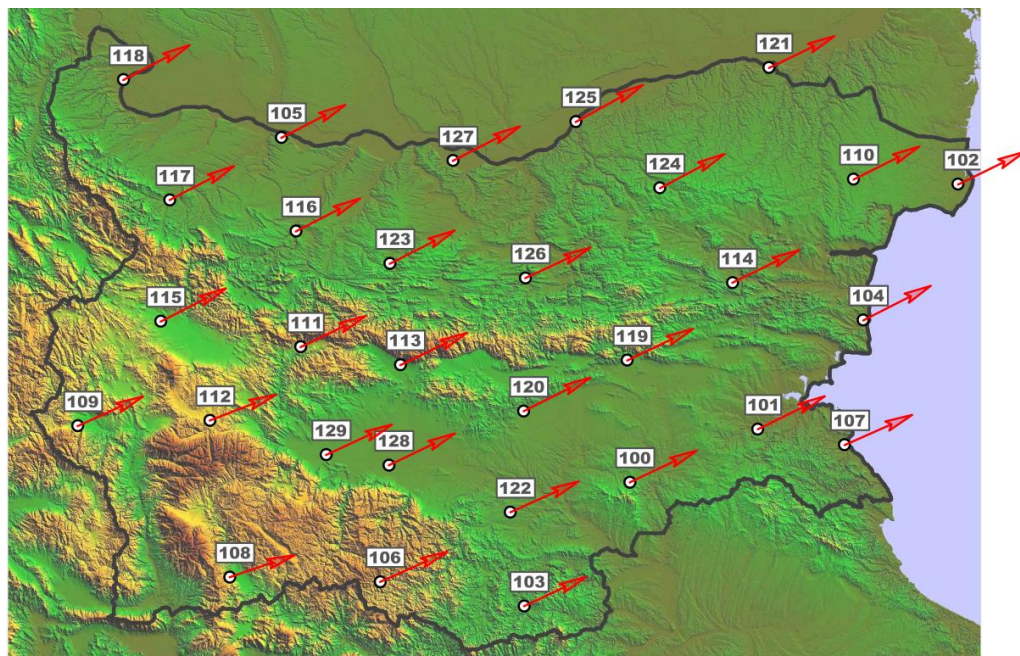
3. Обработка и анализ на измерванията

Извършена е обработка и анализ на сурови данни от сертифицирани Инфраструктурни мрежи. В случая са използвани данни от ГеоНет и 1Йокто. Използвани са данни от 30 перманентни станции на мрежа ГеоНЕТ, за период от 4 години (6 цикъла общо) и данни от 45 станции на мрежа 1Йокто, за период от 2 години (3 цикъла общо).

Данните са обработени чрез използване на идентични стратегии със софтуерен продукт Bernese 5.2 [2], осигуряващ определяне на прецизни координати и скорости на изследваните станции. Стратегията е разработена и са приложени най-съвременните концепции в областта, препоръчани от EUREF:

- световната земна координатна система ITRS е базирана на последната реализация ITRF2014;
- обработени са кодови и фазови наблюдения от двете GPS честоти;
- обработени са едновременно единичните и двойните фазови разлики с използването на йноносферни модели;
- използвани са пет линейни комбинации на честотите L1 и L2;
- използвани са абсолютни модели на вариациите на антенните фазови центрове, изведени за реализация ITRF2014;
- предварително за перманентните станции от инфраструктурните мрежи са изведени годишни стойности на тектонските скорости от модела NUVEL 1A, като по този начин е моделирано движението на станциите заради тектонските движения, приливите в твърдата земна кора и океанските приливи;
- за всяка една от станциите е изведен тропосферен модел за оценка на тропосферния градиент;
- използвани са прецизни орбитни данни, както и хомогенни с орбитите координати на полюса от Центъра за извеждане на орбити в Европа (CODE);
- при обработката са синхронизирани часовниците на всички приемници и спътници;
- използвани са различни стратегии за разрешаване и фиксиране на неопределеностите;

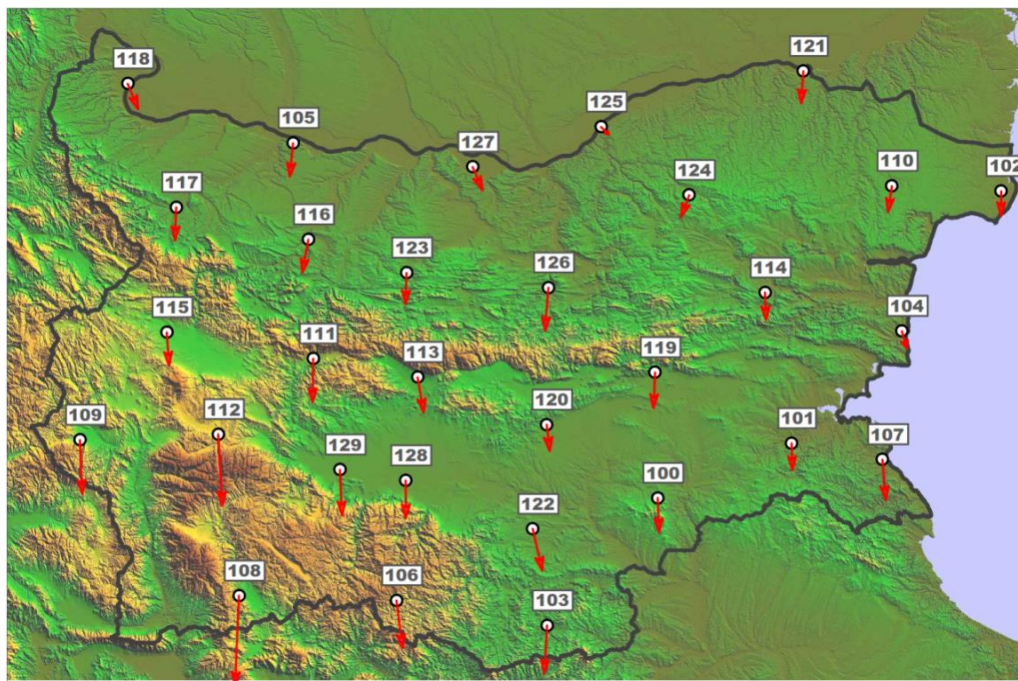
- моделирани са параметри, зависими от времето, чрез линейна непрекъсната функция. Приложени са по-късно при оценяване на тропосферните градиенти, параметрите на ориентация на Земята и извеждане на глобалните йоносферни модели;
- при разрешаване на неопределеностите са получени последователно плаващо и фиксирано решение за епохата на измерване, като в началото неопределеностите са третираны като неизвестни параметри и са оценени техните стойности като реални числа, чрез използвани по-напред статистически тестове на ковариационните им матрици;
- за фиксиране на неопределеностите (Ambiguity Resolution Strategy, ARS) е използвана квази-йоносферна стратегия (Quasi Ionosphere Free, QIF);
- предварително координатите на станциите, участващи в решенията и полюсния модел, са приведени в епохата на измерване;
- комбинирани са системите нормални уравнения от всички дневни решения за извеждане на координатите и реалните тектонски скорости на всички станции, при минимални ограничаващи условия, като координатите на изходните перманентни станции от EPN са фиксирани с точност 0,001 m;
- контролът на получените резултати се осъществява чрез Хелмертова трансформация между координатите на опорните станции с известни координати в ITRF2014 и получените от свободните от ограничения дневни решения. Оценката на точността се прави на базата на изчислените средни квадратни грешки в положение север (North), изток (East) и нагоре/височина (Up) на тези станции.



Фиг. 1. Абсолютни ITRS скорости на станциите (мащаб: 1 cm \approx 0,025 m/y)

Визуализация на хоризонталните скорости на станциите на мрежата ГеоНЕТ в координатна система ITRS (ITRF2014) е представена на фиг. 1.

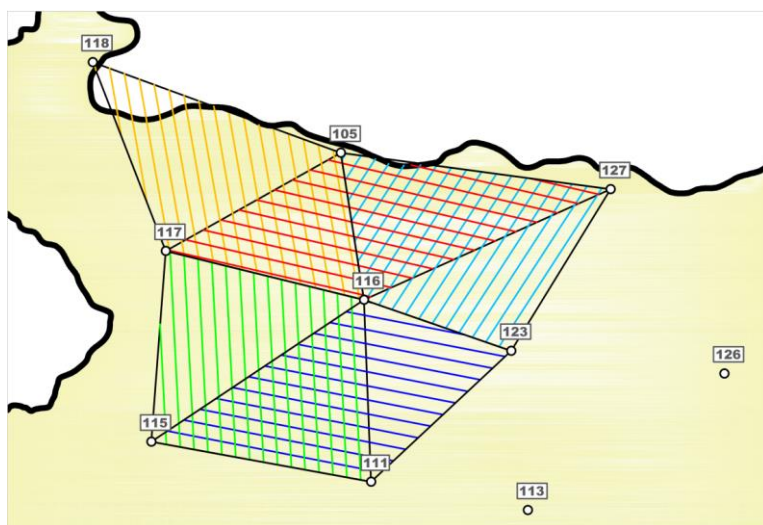
Поради предоставянето на изходната информация от Инфраструктурните мрежи в различни периоди. Получените координати и скорости в координатна система ITRS са трансформирани в официалната координатна система в България – ETRS89, ETRF2000, епоха 2005.0 (БГС2005), като са използвани официалните трансформационни параметри на EUREF [3]. На фиг. 2 са показани относителните хоризонтални скорости на станциите спрямо Евразия.



Фиг. 2. Относителни ETRS89 скорости на станциите (мащаб: 1 cm \approx 0,005 m/y)

4. Локализиране на обусловени вътрешноплочови блокове на територията на страната

За определяне на полето на хоризонтални скорости е използван метод за изчисляване на средния тензор на напрежение и вектор на ротация (както и параметри на Ойлеровите завъртания) по полигони, базиран на алгоритъма MELD (Median Estimation of Local Deformation) [4]. Средният тензор на напрежение и вектор на ротация е определен от N на брой локални изчисления, всяко от които е определено от четири скоростни вектора при възлите на застъпващи се сферични четириъгълници [5]. За центъра на тежестта на всеки четириъгълник са определени шестте параметъра, описани подробно в [4]. Съставени са 34 броя застъпващи се четириъгълници с върхове, съвпадащи със станциите от фиг. 1 и фиг. 2. На фиг. 3 са показани част от съставените четириъгълници.

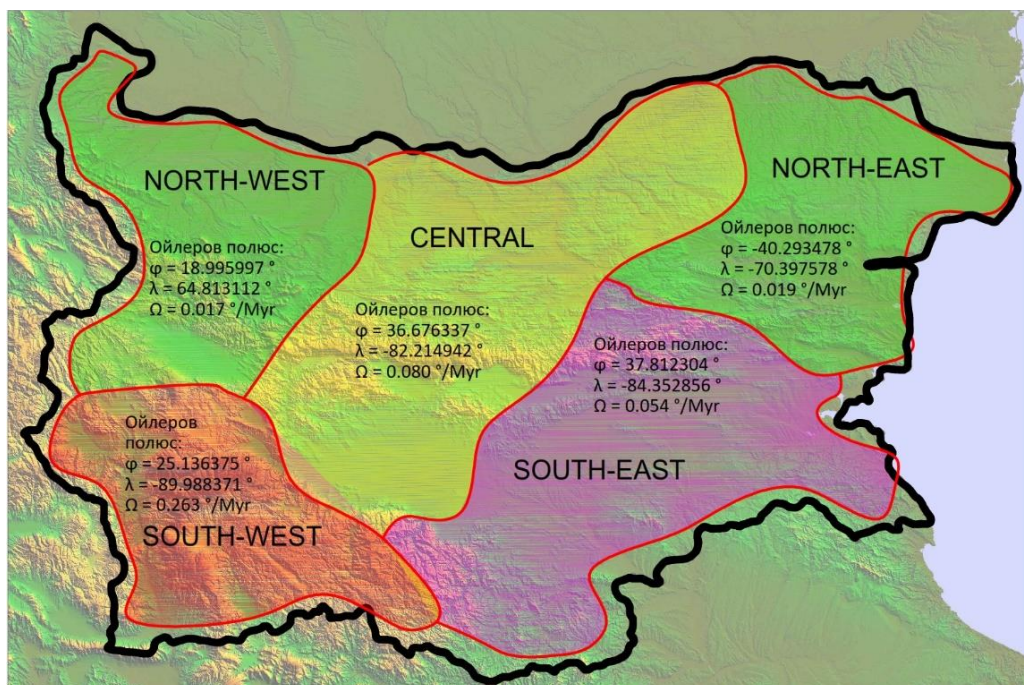


Фиг. 3. 5 от застъпващите се сферични четириъгълници на територията на северозападна България

Локалният тензор на напрежение и вектор на ротация са получени за всеки от 34-те четириъгълници. Фигури с подобни стойности на вектори на ротация са групирани в полигони. Тъй като полигоните са съставени от фигури със сходни стойности, можем да допуснем, че поведението на всеки от тях ще бъде като на твърдо тяло с еднакви Ойлерови параметри за целия блок. След групирането, компонентите на деформация са определени отново, но този път за целите полигони. В резултат, територията на България е разделена на 5 блока (или микроплочи) със сходни компоненти на деформация, показани в табл. 1. Приблизителни граници на тези блокове, заедно със стойности на Ойлеровите параметри за всеки от тях, са показани на фиг. 4.

Таблица 1. Изчислени параметри на деформация за всеки блок и съответната стойност на σ

БЛОК	ϵ_{ee}	σ_{eee}	ϵ_{nn}	σ_{enn}	ϵ_{en}	σ_{fen}
NW	-0,011	0,006	0,018	0,001	0,002	0,000
NE	0,012	0,005	0,004	0,000	0,011	0,005
CE	-0,043	0,010	-0,037	0,011	-0,042	0,010
SW	-0,082	0,139	-0,182	0,314	-0,123	0,206
SE	-0,026	0,001	-0,023	0,014	-0,030	0,013
	ω_{x_1} °/Муг	$\sigma_{\omega_{x_1}}$ °/Муг	ω_{y_1} °/Муг	$\sigma_{\omega_{y_1}}$ °/Муг	ω_{z_1} °/Муг	$\sigma_{\omega_{z_1}}$ °/Муг
NW	0,007	0,001	0,015	0,001	0,006	0,000
NE	-0,005	0,001	0,014	0,001	-0,012	0,006
CE	0,009	0,004	-0,064	0,015	0,048	0,010
SW	0,000	0,008	-0,238	0,408	0,112	0,188
SE	0,004	0,002	-0,042	0,002	0,033	0,013



Фиг. 4. Приблизителни граници на микроплочите и стойности на Ойлеровите параметри за всеки от тях

5. Приложение на модела

Ако се използват стойностите на компонентите на деформация за всеки блок и геодезическите координати на дадена точка (B, L), е възможно интерполирането на относителната скорост на тази точка, в зависимост от това в кой блок попада. За оценка на модела на вътрешноплочовите скорости за територията на България са използвани 45 станции на мрежата Ийокто с техните координати и скорости, определени в реализацията на ETRS89 – ETRF2000, епоха 2005. Направено е сравнение на получените скорости на станциите, с използване на модела и тези, получени при обработката с Bernese (табл. 2).

Таблица 2. Разлики между интерполирани и изчислени скорости на мрежата Ийокто

Критерии	Брой станции
до 1 mm/y	19
от 1 mm/y до 2 mm/y	13
от 2 mm/y до 1 cm/y	9
над 1 cm/y	4

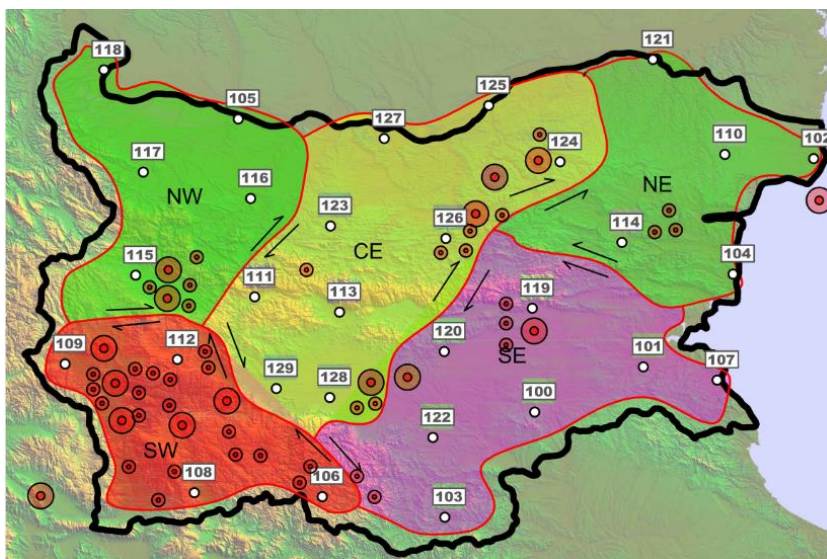
В процес на лична комуникация [6] са предоставени данни от предварително изчислени координати и скорости на 109 точки от Държавната GPS Мрежа за периода 2004 – 2019 г. Сравнение между предоставените и интерполираните скорости е дадено в табл. 3.

Таблица 3. Разлики между интерполирани и изчислени скорости от DGPS

Критерии	Брой станции
до 1 mm/y	67
от 1 mm/y до 2 mm/y	33
от 2 mm/y до 3 mm/y	7
над 3 mm/y	4

6. Заключение

Територията на Република България се намира в края на Евразийската тектонска плоча, което обуславя съвременната сеизмична активност. Множество автори публикуват своите разработки с предположението за вътрешноплочово райониране на страната (наличието на вътрешно-плочови разломи) – [7 – 10]. С настоящата разработка, на базата на качествени перманентни ГНСС измервания, е извършено райониране на територията в 5 обусловени блока. Границите между блоковете подлежат на допълнително прецизиране, но както е видно от фигура 5, където са показани приблизителните граници и провекторите на земетресения с $M > 4$ по Рихтер, разделянето на блокове е факт.



Фиг. 5. Приблизителни граници на обособените блокове, ротацията им един спрямо друг и епицентровете на част от по-големите земетресения за територията на България

Следва да се обърне внимание на голямата активност в Югозападния блок, където е нужно да се разположат по-гъсто станции, както и на появилия се централен блок. На пръв поглед „вклиняването” му между два на практика идентични блока (Северозападен и Североизточен) и преминаването му през Старопланинския масив е нелогично явление. Резултатите обаче показват наличието на аномалия в хоризонталните полета на скоростта, която, макар и частично, е залегнала и в публикациите на други автори. Точното дефиниране на границите на блока са предмет на по-задълбочен бъдещ анализ.

От направените сравнения на интерполирани скорости от създадения модел, с изчислени фактически скорости на друга Инфраструктурна мрежа и на част от точките от „статичната” Държавна GPS мрежа, ясно личи значимостта и ефектът на представената разработка. На практика с минимално изразходвани средства, на базата на използването на данни от комерсиално изградени Инфраструктурни мрежи, Държавата, в лицето на АГКК към МРРБ, би могла да реализира достатъчно надеждно БГС2005 за територията на страната.

Ако приемем за горна граница скорост от порядъка на 2 mm/год. (за период от 2 години максималната допусната грешка от модела би била 4 mm, което е под стойността на ср. кв. гр. в определените координати на точки от DGPS мрежа), то в 71% от първото сравнение и в 90% от второто се получават надеждно определени интерполирани скорости, респективно координати.

Остатъчните отклонения от заложените критерии се дължат на наличието на гръби грешки (преместени или възстановени точки) и попадането на точки в най-активния сеизмичен район – Югозападна България. Някои от точките попадат в граничните райони на микроплочите, за отстраняването на които следва да се направи детайлен анализ и прецизиране на местоположението на локалния разлом.

Получените резултати са окуражаващи за прилагане на методологията и надеждно реализиране на БГС2005 за територията на страната и всички последствия от въвеждането ѝ, с минимален финансов ресурс и гарантирана устойчивост във времето. Получените резултати биха били полезни при локализирането на вътрешноплочови деформации, микро-плочи и разломи, което би спомогнало за сеизмичното райониране на територията на страната.

Благодарности

Бихме искали да благодарим на инфраструктурните мрежи ГеоНЕТ и 1Йокто за предоставянето на суровите измервания, както и на Военно-географска служба за мощта им при обработката им.

Настоящата научноизследователска разработка по договор №БН-230/2019 е подкрепена финансово от Център за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Георгиев, И., Гъбенски, П., Гладков, Г., Ташков, Т., Данчев, П., Димитров, Д.* (2005), Държавна GPS мрежа: Обработка на наблюденията от основния клас, София, 2005.
2. *Dach, R., Lutz, S., Walser, P., Fridez, P.* Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual, University of Bern, 2015.
3. *Altamimi, Z.*, EUREF Technical Note 1: Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems, 2018.
4. *Kreemer, C., Hammond, W., Blewitt, G.* A robust estimation of the 3-D intraplate deformation of the North American plate from GPS. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, pp. 4388–4412. 2018. <https://doi.org/10.1029/2017JB015257>.
5. *Tsanovski, Y., Danchev, Ts.* Horizontal intraplate velocity field model for the territory of Bulgaria derived from GNSS solution, SGEM 2019 Conference Proceedings, ISSN 1314-

2704, 2019. kinematic aspects in the implementation of etrs89, epoch 2005 for the territory of the republic of Bulgaria.

6. *Георгиев, И.* Зам. директор на НИГГГ, БАН, Лична комуникация, 2019.

7. *Vassileva, K., Atanasova, M.* Inferred plate tectonic transition boundaries in Bulgaria from GPS, 8th National conference on Geophysics, 25th November, 2016.

8. *Georgiev, I., Dimitrov, D., Briole, P., Botev, E.* Velocity field in Bulgaria and northern Greece from GPS campaigns spanning 1993-2008. Proceedings of 2nd INQUA-IGCP-567 International Workshop on Active Tectonics, Earthquake Geology, Archaeology and Engineering, Corinth, Greece, 54–56, 2011.

9. *Gospodinov, S.* Determination of block deformations of the Earth's crust by measured baselines, monography, 2011.

10. *Zagorchev, I.* Cenozoic Block Rotations in the Balkan Peninsula. Proceedings of 3th International Symposium of the Black Sea region, 1–10 October, 2011, Bucharest, Romania, 220-222, 2011.

KINEMATIC ASPECTS IN THE IMPLEMENTATION OF ETRS89, EPOCH 2005 FOR THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF BULGARIA

Y. Tsanovski¹, Ts. Danchev²

Keywords: ETRS89, GNSS, velocities, deformation

ABSTRACT

The aim of the paper is to demonstrate the possibility of practical realization of European Terrestrial Reference System 89 (ETRS89) for the territory of the Republic of Bulgaria, by developing an intraplate velocity field model using velocities of a network of continuously operating GNSS station. The current study uses data from 30 private COR stations, covering evenly throughout the country. An algorithm is used to determine block structures with similar horizontal velocity field. To evaluate the obtained model, data for 45 stations of another GNSS infrastructure network operating on the territory of the country is used, as well as the velocities of 109 sites from the State GPS network. The results are encouraging for the practical application of ETRS89 on the territory of Bulgaria.

¹ Yuri Tsanovski, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Geodesy”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: tzanovski_fgs@uacg.bg

² Tsocho Danchev, Eng., Dept. “Geodesy”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: tsdanchev_fgs@uacg.bg