

**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО ГЕОФИЗИКА, ГЕОДЕЗИЯ И
ГЕОГРАФИЯ**

ДЕПАРТАМЕНТ ГЕОДЕЗИЯ

инж. Петър Цочев Данчев

**ДЪРЖАВНА GPS МРЕЖА НА РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ – ОБРАБОТКА И
АНАЛИЗ НА ВТОРИЯ ЦИКЪЛ ИЗМЕРВАНИЯ И ПОЛУЧАВАНЕ НА
СКОРОСТИТЕ НА ТОЧКИТЕ ОТ ОСНОВНИЯ КЛАС**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за присъждане на образователна и научна степен „доктор“
Професионално направление 5.7 „Архитектура, строителство и геодезия“,
Научна специалност „Обща, висша и приложна геодезия“**



София, 2020

Дисертационният труд съдържа 140 страници, от които 12 приложения, разположени на 40 страници, 36 фигури и 5 таблици.

Библиографията обхваща 28 заглавия, от които 7 на български език и 21 на английски.

Дисертацията е обсъдена и допусната до защита на разширено заседание на департамент „Геодезия“ на НИГГГ-БАН, състояло се на 18. 09. 2020 г.

Защитата на дисертацията ще се състои на ____ . ____ . 2020 г.

от ____ ____ часа в зала ____ на блок ____, НИГГГ - БАН.

Материалите по защитата са на разположение в канцеларията на НИГГГ - БАН.

**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО ГЕОФИЗИКА, ГЕОДЕЗИЯ И
ГЕОГРАФИЯ**

ДЕПАРТАМЕНТ ГЕОДЕЗИЯ

инж. Петър Цочев Данчев

**ДЪРЖАВНА GPS МРЕЖА НА РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ – ОБРАБОТКА И
АНАЛИЗ НА ВТОРИЯ ЦИКЪЛ ИЗМЕРВАНИЯ И ПОЛУЧАВАНЕ НА
СКОРОСТИТЕ НА ТОЧКИТЕ ОТ
ОСНОВНИЯ КЛАС**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за присъждане на научно-образователна степен „доктор“

Професионално направление 5.7 „Архитектура, строителство и геодезия“

Научна специалност „Обща, висша и приложна геодезия“

Научен ръководител: проф. д-р Иван Георгиев ГЕОРГИЕВ

София, 2020

Научно жури:

Вътрешни членове:

- 1.
- 2.
3. резервен член

Външни членове:

- 1.
- 2.
- 3.
4. резервен член

СЪДЪРЖАНИЕ:

1	Увод	1
1.1	Актуалност на проблема	1
1.2	Цел на дисертацията	2
1.3	Основни задачи	2
1.4	Структура на дисертацията	4
2	Международна земна координатна система и нейните реализации ITRF	4
2.1	Международна земна координатна система ITRS	2
2.2	Реализации на Международната земна координатна система ITRF _{yy}	5
2.3	Реализации на Международната земна координатна система от Международната GNSS служба	9
3	Европейска земна координатна система ETRS89 и нейните реализации ETRF_{yy}	10
3.1	Връзка между ITRS и ETRS89	12
3.2	ETRS89 реализации на базата на ITRF	13
4	Стратегия при обработка и анализ на регионални/национални GPS/GNSS мрежи в EUREF – общи принципи	13
4.1	Получаване на координати и скорости в ITRF	14
4.2	Метод на обработка	18
4.3	Трансформация в ETRS89	19
5	ГНСС измервания на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа 2004 – 2018 г., включени в обработката и анализа	20
6	Научно-изследователски софтуер за обработка и анализ на ГНСС измервания Bernese	21
7	Стратегия, приложена при обработка на измерванията на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа 2004 – 2018 година	22
8	Качество на дневните решения	24

9	Получаване на координати и скорости на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа – комбинирано многогодишно решение	27
9.1	Координати и скорости в координатна система ITRS, реализация ITRF2014	27
9.2	Координати и скорости в ETRS89, реализация ETRF2014	29
9.3	Трансформиране на новополучените координати	30
10	Анализ на резултатите от обработката на измерванията на точките от Основния клас	32
10.1	Сравнение на координатите от официално приетото решение (БГС 2005) и новото решение от обработка и анализ на двата цикъла измервания	33
10.1.1	Сравнение на официалните координати в ETRF2000, епоха 2005.0 и новополучените координати, трансформирани в ETRF2000, епоха 2005.0	33
10.1.2	Сравнение на официалните координати в ETRF2000, епоха 2005.0 и новополучените координати, трансформирани в ETRF2014 епоха 2005.0	35
10.1.3	Сравнение на официалните координати в ETRF2000, епоха 2005.0 и новополучените координати, трансформирани в ETRF2014, епоха 2020.	37
10.2	БГС2005 и резултатите от обработката на измерванията на точките	40
11	Приноси	43
	Публикации, свързани с темата на дисертацията	44
	Използвана литература	45
	Приложение 1	48
	Приложение 2	51

1. Увод

1.1. Актуалност на проблема

Един от фундаменталните проблеми в геодезията е свързан с координатните геодезически системи. Те могат да се класифицират, основно на: глобални, континентални (регионални), национални и локални. При това, до голяма степен при тяхното изграждане важи йерархичният принцип. В близкото минало националните референтни/координатни системи обикновено се разглеждаха като статични. Днес те отразяват съвременните възгледи за структурата, формата, размерите, ориентацията на Земята и измененията им във времето. Земните координатни системи се материализират посредством множество от точки върху твърдата земна повърхност, заедно с техните координати, така че те по подразбиране са носители на три-дименсионната координатна система. Разглеждайки Земята като деформируемо тяло, тези координати са променливи във времето, под влияние, основно на тектонски движения, както и мигновени движения в следствие на големи земетресения. От друга страна, тъй като тези координати са резултат от изравнение, те са натоварени както със случайни, така и със систематични грешки, свързани с моделирането на не-линейни деформации.

Настоящият дисертационен труд е свързан с обновяването, поддържането и развирието на Българската геодезическа система и връзката и с международните. Мотивацията за него е да се отговори на въпроса – какво се случва с Държавната геодезическа мрежа 15 години след нейното създаване в резултат на глобалната и регионална тектокика, развитието на технологиите и промените в реализациите на Международната и Европейската земни координатни системи.

1.2. Цел на дисертацията

Целта на дисертационния труд е да бъде извършена обработка и анализ на измерванията на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа, за периода 2004 – 2018. Да се получат техните координати и скорости в последните реализации на международната и европейската земни координатни системи и резултатите да се използват за оценка на състоянието на БГС2005.

1.3. Основни задачи

За изпълнението на тази цел са обособени следните **основни задачи**:

(1) Обработка на втория цикъл наблюдения на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа от периода 2015 – 2018 година.

(2) Повторна обработка на първия цикъл наблюдения на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа от 2004 година.

(3) Получаване на координати и скорости на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа.

(4) Сравнение и анализ на получените резултати.

1.4. Структура на дисертацията

Дисертацията е обособена в четити глави и десет раздела.

В **Първа глава** са разгледани звездните и земните координатни системи, имащи пряко отношение към темата на дисертацията и използвани на различните етапи от обработката на ГНСС наблюденията. Акцентирано е на Международна земна координатна система ITRS, Европейска земна координатна система ETRS89 и техните реализации.

Втора глава представя систематизиран обзор на нормативната уредба, свързана с развитието на Българската геодезическа система. Разглеждат се предназначението и структурата на Държавната

геодезическа мрежа и са систематизирани дейностите (поддържане, възстановяване и наблюдателни кампании), извършени от полагането ѝ до днес.

В **Трета глава** се изследват съвременните стратегии и общите принципи при обработка и анализ на регионални и национални ГНСС мрежи, и съгъстяване на EUREF. Представена е стратегията, приложена в експерименталната част на дисертацията при обработка и анализ на измерванията на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа, извършени в периода 2004 – 2018 година. В тази част е представена извършената обработка и анализ на измерванията с научно-изследователския софтуер Bernese v 5.2 и полученото многогодишно комбинирано решение (координати и скорости), в координатна система ITRS, реализация ITRF2014, епоха 2010.0. Новополучените координати са трансформирани в Европейска земна координатна система ETRS89 и са представени в различни нейни реализации и епохи, като акцента е на последната реализация – ETRF2014, епоха 2010.0.

В **Четвърта глава** е направено изследване на състоянието и перспективите на Българската геодезическа система въз основа на резултатите от извършената обработка. Анализирани са разликите между приетите официални координати на точките от Държавната геодезическа мрежа в Българска геодезическа система 2005 и тези от полученото ново решение, конвертирани в различни реализации и епохи.

2. Международна земна координатна система и нейните реализации ITRF

2.1. Международна земна координатна система ITRS

Международната служба за ротация на Земята и координатните системи IERS и Секцията за координатни системи (*Terrestrial Reference Frame TRF*) на Френския национален географски института (*Institut Geographique National*) в Париж са международните структури, отговорни за дефиниране, реализация и разпространение на Международната координатната система. Дефиницията на ITRS е приета от Генералната асамблея на Международния съюз по геодезия и геофизика IUGG (*International Union of Geodesy and Geophysics*) в Перуджа, 2007 година, с Резолюция 2.

В резюме, дефиницията гласи:

- Геоцентрична земна координатна система GTRS (*Geocentric Terrestrial Reference System*) е новото означение на Конвенционалната земна координатна система CTRS (*Conventional Terrestrial Reference System*). Аббревиатурата CTRS се използва като общ термин за обозначаване на специфична земна координатна система чрез списък от конвенционални правила за фиксиране на началото, мащаба и ориентацията;
- Началото на GTRS е в центъра на земните маси, включително океаните и атмосферата;
- Временната координата на системата е Геоцентрично координатно време TCG (*Geocentric Coordinate Time*);
- Измененията на ориентацията на координатната система във времето се подчиняват на условието за отсъствие на ротация по отношение на хоризонталните тектонски движения по цялата земна повърхност, т.нар. no-net-rotation условие.

Международната земна координатна система ITRS е тридименсионна пространствена система, като първоначалната

ориентация на осите е фиксирана към координатната система на ВИН (*Bureau International de l'Heure*) за епоха 1984.0.

Днес, поради съвременните възможности за регистриране на малки (от сантиметрово и субсантиметрово ниво) вариации в преразпределението на земните маси, координатното начало се дефинира като средно местоположение на масовия център, отнесен към определена епоха.

2.2. Реализации на Международната земна координатна система ITRF_{yy}

Реализациите на Международната земна координатна система ITRS се получават в Центъра за анализ, разположен във Френския географски институт (*ITRS Center of the IERS, hosted by Institut Geographique National, Paris*). Те се публикуват под името ITRF_{yy} (*International Terrestrial Reference Frame*), като цифрите (yy) след аббревиатурата ITRF означава последната година, от която са използвани данни за получаване на съответната реализация.

Още два центъра за обработка генерират комбинирани решения, използвайки входните данни на ITRF. Това са: Институтът за геодезически изследвания на Техническия университет в Мюнхен (*Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, DGFI, TUM*), [Seitz et al., 2012] и Лабораторията за реактивно движение (*Jet Propulsion Laboratory, JPL*), [Wu et al., 2015].

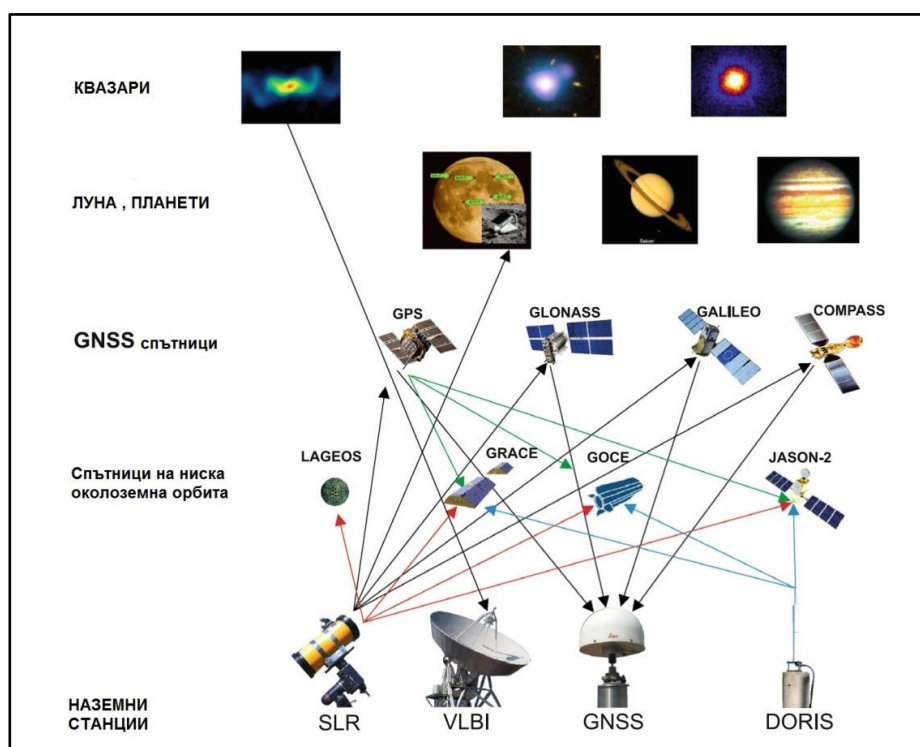
Използват се решения от четири **космически и спътникови наблюдателни техники**¹ (фиг. 1):

(1) Радио-интерферометрия със свръхдълги бази – VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*);

(2) Лазерна локация на луната и изкуствени спътници – SLR (*Satellite Laser Ranging*);

(3) Глобални навигационни спътникови системи – GNSS (*Global Positioning System*);

(4) Системата за високоточни определения на орбити и позициониране – DORIS (*Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite*).



Фигура 1 Космически и спътникови наблюдателни техники²

Получените резултати от използването на различните наблюдателни техники са независими и позволяват оценка на систематичните разлики помежду им. Всеки от временните редове е

¹ Тук термините: „съвременни методи на космическата геодезия“, „спътникови наблюдателни техники“, „наблюдателни техники“ и „четири космически и спътникови наблюдателни техники“ са употребени като синоними.

² Global, Regional and National Geodetic Reference Frames for Geodesy and Geodynamics, Bosy, J [16]

получен на базата на съответните индивидуални решения на центровете за анализ, на съответната международна служба.

Получаването на поредната реализация се осъществява в две стъпки:

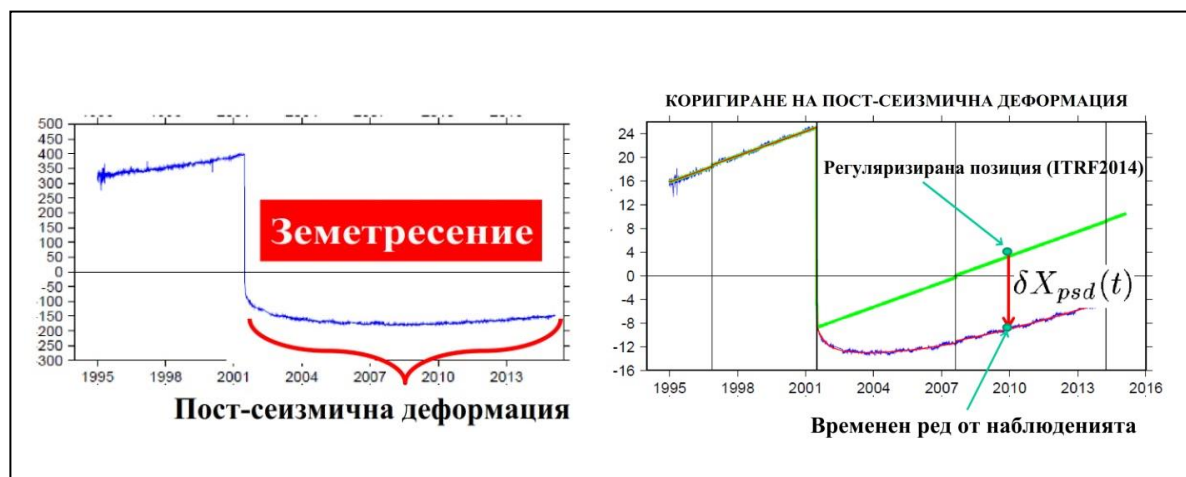
(1) **Обединяване** на индивидуалните временни редове и получаване на многогодишни оценки от всяка наблюдателна техника за координатите в съответната епоха и скорости, както и параметри на ориентация на Земята;

(2) **Комбиниране** на многогодишните решения от четирите наблюдателни техники, съвместно с информацията за локалните връзки в ко-локираните наблюдателни станции.

До момента са получени тринадесет реализации на ITRS, като първата е ITRF88, а последната (към настоящия момент) е ITRF2014, публикувана на 26.01.2016 г. Важна особеност на ITRF2000 е, че тя е първата реализация при която се комбинират индивидуалните решения без да се използва предварителен модел на движението на тектонските плочи. Нейното начало е дефинирано като средна стойност на положението, получено от SLR, мащаба е получен от SLR и VLBI. Ориентацията е съвпадна с тази на ITRF97, за епоха 1997.0, като промяната ѝ във времето следва конвенционално тази на модела NNR-NUVEL-1A. При оценка на полученото поле на скоростите е констатирано значително различие с модела NNR-NUVEL-1A, при което, специално за Европа се препоръчва използването компонентите на ъгловите скорости на Евроазиатската плоча, получени от 19 EPN станции, които са участвали в решението ITRF2000. Значителни промени, водещи до качествени подобрения в реализациите на ITRS настъпват след ITRF2000 (ITRF2005, ITRF2008 и ITRF2014).

Реализация на Международната земна координатна система ITRF2014³

Последната реализация на Международната земна координатна система е ITRF2014 и именно в нея е извършено настоящето изследване. Следвайки утвърдените при ITRF2005 и ITRF2008 процедури, ITRF2014 се генерира чрез преобработка на натрупаните до 2014 година наблюдения от съвременните методи на космическата геодезия, с прилагане на две иновации: **анализ на постсейзмични деформации** за онези станции, които са били обект на големи земетресения и **подобро моделиране на нелинейните движения на станциите** – сезонни (годишни и полугодишни) вариации. По-точното моделиране на действителното движение на станциите води до устойчивост във времето на техните координати и скорости. Поведението на станция, която е била обект на земетресение е илюстрирано на фигура 2.



Фигура 2 Пост-сейзмични деформации⁴

³ Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier, X. Collilieux (2016). **ITRF2014**: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear

⁴ Altamimi, Z (2016). Key results of ITRF2014 and implication to ETRS89 realization, EUREF2016 Symposium, San Sebastian, Spain, May 25-27, 2016

Основните характеристики на ITRF2014 са:

- **Начало:** Началото на ITRF2014 е дефинирано по такъв начин, че да има нулеви трансформационни параметри в епоха 2010.0 и нулеви измененията във времето (*zero translation rates*) по отношение на центъра на Земяните маси, дефиниран от временните редове на лазерна локация на изкуствени спътници (SLR), предоставени от Международната служба за лазерна локация ILRS.

- **Мащаб:** Мащабът на ITRF2014 е дефиниран по такъв начин, че в епоха 2010.0 да има нулев мащабен коефициент и нулеви измененията във времето (*zero scale rate*) по отношение на средната стойност на мащаба и изменението му във времето (*implicit scales and scale rates*) определени от временните редове на радиоинтерферометрия със свръхдълги бази и лазерна локация на изкуствени спътници (VLBI и SLR).

- **Ориентация:** Ориентацията на ITRF2014 е дефинирана, така че да има нулеви параметри на ротация в епоха 2010.0 и нулеви скорости на ротация между ITRF2014 и ITRF2008. Тези две условия са приложени за набор от 127 референтни станции, разположени на 125 места.

2.3. Реализации на Международната земна координатна система от Международната GNSS служба

В последните години (след декември 2001, GPS седмица 1143), за да се отчитат променящите се абсолютни калибрационни модели на GNSS антените Международната GNSS служба (IGS) преизчислява ITRF_{уу}-координатите и скоростите на избрани станции от своята перманентна мрежа (IGS), с цел те да бъдат напълно съвместими с актуалните GNSS модели за обработка и анализ. Списъкът с тези координати и скорости е известен като IGS_{уу}, където **уу** съответства на реализацията ITRF_{уу}. Всяка реализация IGS_{уу} се реферира с година,

свързана със съответната реализация ITRF_{yy}, на която е базирана. На практика това представлява собствена реализация на Земната координатна система (създадена от Международната служба IGS), базирана на съответната реализация на ITRS. Множество IGS реализации на една и съща ITRF_{yy}-реализация се идентифицират чрез добавяне на буква. Например на ITRF2008 съответства реализацията на IGS публикувана под името IGS08, а в последствие актуализирана и публикувана като следваща реализация IGS08. Последната публикувана реализация е IGS14, представена през януари 2017 (GPS седмица 1934). Тя е подмножество от 252 стабилни във времето GNSS станции, използвани при дефиниране на ITRF2014. Основната разлика между двете реализации идва от факта, че *при ITRF2014, индивидуалното решение, предоставно от наблюдението на Глобални навигационни спътникови системи се базира на калибрационен модел на фазовите центрове на антените igs08.atx, докато при IGS14 – на последният, подобрен модел – igs14.atx.* По този начин станциите, определени с обновени антенни модели получават и обновени координати в реализация IGS14, в сравнение с ITRF2014. Разликите в координатите между двете реализации рядко достигат 1 mm [IGS Mail 7399].

В случаите, когато се извършва обработка с IGS-продукти и се използва калибрационен модел на ГНС антените igs_{yy} (например igs14), резултатите ще бъдат в IGS_{yy} (IGS14).

3. Европейска земна координатна система ETRS89 и нейните реализации ETRF_{yy}

Основният недостатък на глобалните координатни системи (ITRS и WGS84) е, че координатите на точките в тези системи се изменят (основно) заради глобалните тектонични движения. Това изменение във времето прави тези координати неподходящи за практически приложения. За да бъде преодолян този проблем

Международната асоциация по геодезия IAG и CERGO (*Central European Initiative Working Group on Science and Technology*) решават през 1987 година да разработят и проектират нова Европейска геодезическа референтна система (*European Geodetic Reference Frame*, EUREF), базирана на GPS измервания. Тя трябва да унифицира националните референтни системи за геодезически измервания, картография, GIS и навигация в Европа.

Европейската земна координатна система ETRS89 е приета през 1990 година на EUREF симпозиума във Флоренция с Резолюция 1, която препоръчва: „... *координатната система, която предстои да бъде приета от EUREF, да съвпада с ITRS за епоха 1989.0, да бъде фиксирана към стабилната част на Евразийската плоча и да се обозначава с European Terrestrial Reference System 89 (ETRS89)*“.

Концепцията, залегнала в основата на ETRS89, се състои в създаването на високоточна континентална мрежа, еднородна като геометрия и точност, отнесена към геоцентъра и не влияеща се (в голяма степен) от изменения във времето. Координатната система ETRS89 концептуално се дефинира чрез мрежа от станции, намиращи се на стабилната част на Евразийската континентална плоча, чиито вътрешни деформации са пренебрежимо малки (за няколко годишен интервал). Наименованието ETRS89 идва от епохата 1989.0, която е годината на първото ETRS решение.

Координатната система ETRS89 е приета като официална геодезическа координатна система в Европейския съюз, както за отделните държави-членки, така и за европейските институции и агенции. Благодарение на изграждането и функционирането на Европейската перманентната мрежа EPN (*European Permanent Network*), координатната система на практика е четири димензионна.

3.1. Връзка между ITRS и ETRS89

Тъй като обработката и анализа на GPS/GNSS измерванията се извършват в ITRS, а окончателните координати и скорости (на регионално/национално ниво за Европа) са в ETRS89, то връзката между ITRS и ETRS89 е от особено значение.

Дефиницията на ETRS89 предполага удовлетворяването на две условия:

(1) ETRS89 да съвпада с ITRS за епоха 1989.0, от което следва, че 7-те трансформационни параметъра са нули за тази епоха;

(2) ETRS89 да е фиксирана към стабилната част на Евроазиатската плоча, т.е. движи се заедно с нея. С други думи, производните на 7-те трансформационни параметъра между ITRS и ETRS89 са нули, освен измененията на трите ротации във времето. Измененията на трите ротации във времето са трите компонента на ъгловия ротационен вектор на Евроазиатската континентална плоча в съответната реализация ITRF_{yy}.

Горните две условия водят до следната трансформационна връзка между ETRS89 и ITRS за координатите в епоха t (xxxx.x):

$$X_{yy(t)}^E = X_{yy(t)}^I + T_{yy(t)} + \begin{pmatrix} 0 & -\dot{R}_{Z yy} & \dot{R}_{Y yy} \\ \dot{R}_{Z yy} & 0 & -\dot{R}_{X yy} \\ -\dot{R}_{Y yy} & \dot{R}_{X yy} & 0 \end{pmatrix} \times X_{yy(t)}^I \times (t - 1989.0) \quad (1)$$

а за скоростите:

$$\dot{X}_{yy(t)}^E = \dot{X}_{yy(t)}^I + \begin{pmatrix} 0 & -\dot{R}_{Z yy} & \dot{R}_{Y yy} \\ \dot{R}_{Z yy} & 0 & -\dot{R}_{X yy} \\ -\dot{R}_{Y yy} & \dot{R}_{X yy} & 0 \end{pmatrix} \times \dot{X}_{yy(t)}^I \quad (2)$$

където $X_{yy(t)}^I$, $\dot{X}_{yy(t)}^I$ и $X_{yy(t)}^E$, $\dot{X}_{yy(t)}^E$, са координатите и скоростите на точка в реализация уу в двете системи ITRS и съответно ETRS89, в една и съща епоха t .

Производните на ротационните параметри (*rotation rate parameters*) $\dot{R}_{X_{yy}}$, $\dot{R}_{Y_{yy}}$ и $\dot{R}_{Z_{yy}}$ са трите компонента на Ойлеровия вектор на Евразия (ъгловата скорост) изразени в реализация ITRF_{yy}.

Транслационният вектор T_{yy} отчита (евентуални) разлики в началото при различните реализации ITRF.

Тъй като по дефиниция ETRS89 не поставя условие за вертикалните движения, то вертикалните скорости на точките в едноименните реализации на ITRS и ETRS89 са едни и същи.

Връзката между двете координатни системи е подробно описана в *EUREF Technical Note 1: Relationship and Transformation between International and the European Terrestrial Reference Systems*, Altamimi, Z., *EUREF Technical Note 1: Version June 28, 2018*.

3.2. ETRS89 реализации на базата на ITRF

От 1989 година последователните реализации на ETRS89 се изчисляват от реализациите ITRF_{yy}. Тези реализации са известни като ETRF_{yy} (ETRF91, ETRF92, ..., ETRF2014). Основните станции на ITRF_{yy} в Европа са също така и основни ETRF_{yy} станции. Координатите и скоростите във всяка реализация ITRF_{yy} могат да бъдат трансформирани в ETRF_{yy} и обратно чрез формулите за трансформация (1 и 2). Трансформационните параметри между ITRF_{yy} и ETRF_{yy} се определят и публикуват, регулярно, с всяка нова ITRF реализация.

4. Стратегия при обработка и анализ на регионални/национални GPS/GNSS мрежи в EUREF – общи принципи

Съвременната процедура за изчисляване на координати и скорости в реализация на Европейската земна координатна система ETRF има две основно стъпки:

(1) Получаване на координати и скорости, използвайки последната реализация на Международната земна координатна система ITRS, ITRF_{yy}, епоха t_c .

(2) Трансформиране от ITRF_{yy}, епоха t_c в необходимата реализация ETRF_{yy}, епоха t_c .

Тези принципи са в сила за регионални и национални мрежи, а процедурата обикновено се нарича **съгъстяване на ETRS89 на регионално или национално ниво**.

4.1. Получаване на координати и скорости в ITRF

Съществуват два основни подхода за получаване на регионално решение в ITRF:

Подход 1. Свободно от ограничения решение

В обработката се включва набор от ITRF станции с точно определени координати и скорости (референтни станции), като върху техните координати се налагат ограничения (средни квадратни грешки). Прави се т.нар. свободно от ограничения (*loosely constrained*) решение, т.е. на координатите и скоростите на станциите са задават априорни средни квадратни грешки (от порядъка на $\sim 10^{-5} - 10^{-6}$). Целта е тези ограничения да могат да бъдат отстранени при последваща обработка на нормалните матрици.

Подход 2. Минимално ограничено решение

Свързване на регионалното решение с ITRF, посредством трансформационни параметри, които се оценяват при обработката, използвайки набора от избрани (референтни) ITRF станции. Извършва се т.нар. минимално ограничено решение (*minimum constrained solution*), т.е. дефинира се земната координатна система с използване минимума от необходимата за това информация, без да се налагат ограничения върху станциите.

При свободното от ограничения решение (Подход 1) към наблюдателните уравнения се добавят ограниченията на ITRF станциите:

$$\vec{X} - \vec{X}_0 = 0 \quad (3)$$

където $\vec{X}$ е векторът на оценяваните параметри (координати и/или скорости) на референтните станции, а $\vec{X}_0$ на априорните им стойности.

В последните години, международната общност (EUREF) използва изключително **Подход 2**, който най-общо се нарича „мрежов подход“ (*network approach*). Във случая на „минимално априори ограничено“ решение (**Подход 2**), ограничения се налагат не върху координатите на станциите, а върху трансформационните параметри.

За дефинирането (или фиксирането) на една земна координатна система са необходими седем параметъра. Още седем параметъра – производните на първите седем, определят измененията им във времето. Изборът на тези 14 параметъра се нарича дефиниция на системата и определя началото, мащаба, ориентацията и изменението във времето на координатната система.

Нормалните уравнения, записани във вида:

$$N\Delta X = K, \quad (4)$$

където

$$\Delta X = X - X_0, \quad (5)$$

са сингулярни с 7/14 степени на свобода за дефиниране на координатната система, при определяне съответно само на координати или на координати и скорости.

Допълнителните уравнения (ограничения), идващи от връзката

$$X_T = X_R + A\theta \quad (6)$$

между две координатни системи (X_T в ITRF и X_R – регионалните станции), които се налагат, могат да се запишат във вида:

$$\mathbf{B}(\mathbf{X}_T - \mathbf{X}_R) = 0, \quad (7)$$

където:

$$\mathbf{B} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T, \quad (8)$$

а $\mathbf{A}$ е матрицата на частните производни спрямо оценяваните параметри, изчислена с априорните стойности $\mathbf{X}_0$:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \dot{1} & \dot{0} & \dot{0} & \dot{x}_0^i & \dot{0} & \dot{z}_0^i & \dot{-y}_0^i \\ 0 & 1 & 0 & y_0^i & -z_0^i & 0 & x_0^i \\ 0 & 0 & 1 & z_0^i & y_0^i & -x_0^i & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}, \quad (9)$$

когато се определят само координати и:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & 0 & 0 & x_i^0 & 0 & z_i^0 & -y_i^0 & & & & & & & \\ 0 & 1 & 0 & y_i^0 & -z_i^0 & 0 & x_i^0 & & & & & & & \approx 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_i^0 & y_i^0 & -x_i^0 & 0 & & & & & & & \\ & & & \approx 0 & & & & 1 & 0 & 0 & x_i^0 & 0 & z_i^0 & -y_i^0 \\ & & & & & & & 0 & 1 & 0 & y_i^0 & -z_i^0 & 0 & x_i^0 \\ & & & & & & & 0 & 0 & 1 & z_i^0 & y_i^0 & -x_i^0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \quad (10)$$

когато се определят координати и скорости, а $\boldsymbol{\theta}$ е векторът на трансформационните параметри – 7 или 14.

Основната разлика между двата подхода е, че първият (уравнение 3) ограничава оценките да бъдат равни на априорните стойности (със съответна грешка), докато при вторият (уравнение 7) оценките $\mathbf{X}_T$ се определят в същата Земна координатна система, както и $\mathbf{X}_R$, използвайки оператора $\mathbf{B}$, който съдържа цялата необходима информация за дефинирането на системата [Altamimi et al., 2003]. И двата подхода зависят от конфигурацията и качеството (точността) на (под)множеството от станции $\mathbf{X}_T$, използвани като ограничения.

Нормалните уравнения и решението за $\boldsymbol{\theta}$ могат да се запишат като:

$$\boldsymbol{\theta} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T (\mathbf{X}_T - \mathbf{X}_R) = \mathbf{B} (\mathbf{X}_T - \mathbf{X}_R), \quad (11)$$

където матрицата B съдържа необходимата информация за дефиниране на координатната система. Нормалните уравнения са:

$$B^T \Sigma_{\theta}^{-1} B (X - X_0) = 0, \quad (12)$$

където Σ_{θ} е диагонална матрица, съдържаща средните квадратни грешки на трансформационните параметри. Матрицата съдържа малки средни квадратни грешки за всеки 7 или 14 параметъра, които се избират/определят от потребителя. Добавянето на горното уравнение към сингулярната нормална матрица N , дава възможност тя да се обърне и едновременно с това да се получат оценяваните параметри в избраната земна координатна система X^T [Altamimi et al., 2003]. Минимум ограничителното условие е:

$$B^T \Sigma_{\theta}^{-1} B \Delta X = B^T \Sigma_{\theta}^{-1} B (X_T - X_R), \quad (13)$$

а сумарните нормални уравнения:

$$(N + B^T \Sigma_{\theta}^{-1} B) \Delta X = K + B^T \Sigma_{\theta}^{-1} B \times (X_T - X_R). \quad (14)$$

Минимум ограниченото решение, изразено в ITRF, за X е:

$$X = (N + B^T \Sigma_{\theta}^{-1} B)^{-1} \times (K + B^T \Sigma_{\theta}^{-1} B \times (X_T - X_R)) + X_0 \quad (15)$$

На практика Международната земна координатна система се състои от точки, „фиксиращи“ върху земната кора. Тя се дефинира, реализира и поддържа от Международната служба за ротация на Земята и координатните системи IERS чрез центровете за анализ и комбиниране на различните наблюдателни техники на спътниковата геодезия, както и чрез публикуваните от службата продукти – координати, скорости на наблюдателните станции, параметри на ориентация на Земята, атмосферни модели и т.н.

Общият модел, свързващ „мигновеното“ положение на точка от земната повърхност за епоха t , $X(t)$ и т.нар. регуляризирано положение е:

$$X(t) = X_{Reg}(t) + \sum_i \Delta X_i(t), \quad (16)$$

Причина за използването на „регуляризирано” положение (на точка фиксирана върху земната повърхност) е да се премахнат късо периодичните временни вариации (основно геофизични ефекти) чрез използването на конвенционални корекции $\Delta X_i(t)$, за да се получат координати с регулярни (постоянни) вариации. X_{Reg} се оценява чрез използването на конвенционални модели и константи, съгласно публикуваните от Международната служба IERS стандарти (*IERS Conventions 2010*). Използва се линеен модел – координати за дадена референтна епоха t_0 и скорости:

$$X_{Reg}(t) = X_0 + \dot{X} \cdot (t - t_0); \quad (17)$$

Конвенционалните модели обхващат тектоничните движения, приливите в твърдата земна кора, океанските приливи, полярния прилив и вариациите на геоцентъра.

4.2. Метод на обработка

Стъпка 1 – Генериране на дневни решения за мрежата, като се оценяват координатите на станциите. Препоръката на EUREF е GNSS анализът да следва насоките на EPN центровете за анализ (*Guidelines for the EPN Analysis Centre*), за да се гарантира съвместимост между „сгъстяващото” регионално решение и EPN. Прилага се „минимум ограничено” решение чрез избраните референтни EPN станции. Използва се калибрационния модел на GNSS антените, използван от EPN центровете за анализ (към момента се прилага `epn_14.atx`, еквивалентен на `igs14.atx`).

Стъпка 2 – Комбиниране (в повечето случаи последователно оценяване) **на дневните решения за получаване на координати и скорости** (при многогодишно решение) на сгъстяващите (неизвестните) станции.

При комбиниране на дневни решения само от една кампания получените координати, обикновено са отнесени към средната епоха на

кампанията (t_c). При комбиниране на дневни решения от няколко последователни кампании (чиито епохи се различават с повече от една година) се оценяват координатите и скоростите на всички станции, участващи в анализа. Комбинираното решение може да бъде отнесено към избрана епоха.

4.3. Трансформация в ETRS89

Има два възможни случая при трансформиране на координати от ITRF_{yy} в ETRF_{yy} за епоха t :

Случай А: ITRF_{yy} → ETRF_{yy}

Когато ГНСС измерванията са обработени в реализация ITRF_{yy}, епоха t (напр. ITRF2014) и трябва да се трансформират в ETRS89, реализация ETRF_{yy}, епоха t (напр. ETRF2014). В този случай се използват уравненията за трансформация на координати и скорости (Връзка между ITRS и ETRS89).

Случай Б: ITRF_{yy} → ITRF_{xx} → ETRF_{xx}

Когато ГНСС измерванията са обработени в реализация ITRF_{yy}, епоха t (напр. ITRF2014) и трябва да се трансформират в ETRS89, реализация ETRF_{xx} (напр. ETRF2000). В този случай се прилага двустъпкова процедура:

стъпка 1: Трансформация ITRF_{yy} → ITRF_{xx}

Получените в ITRF_{yy}, епоха t координати и скорости се трансформират в ITRF_{xx}, епоха t , използвайки публикуваните стойности на параметрите.

стъпка 2: Трансформация ITRF_{xx} → ETRF_{xx}

Трансформиране на ITRF_{xx} в ETRF_{xx}, както в Случай А.

Двустъпковата трансформация може да се замени от едностъпкова в случаите на използване на 14-параметрова трансформация.

5. ГНСС измервания на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа 2004 – 2018 г., включени в обработката и анализа

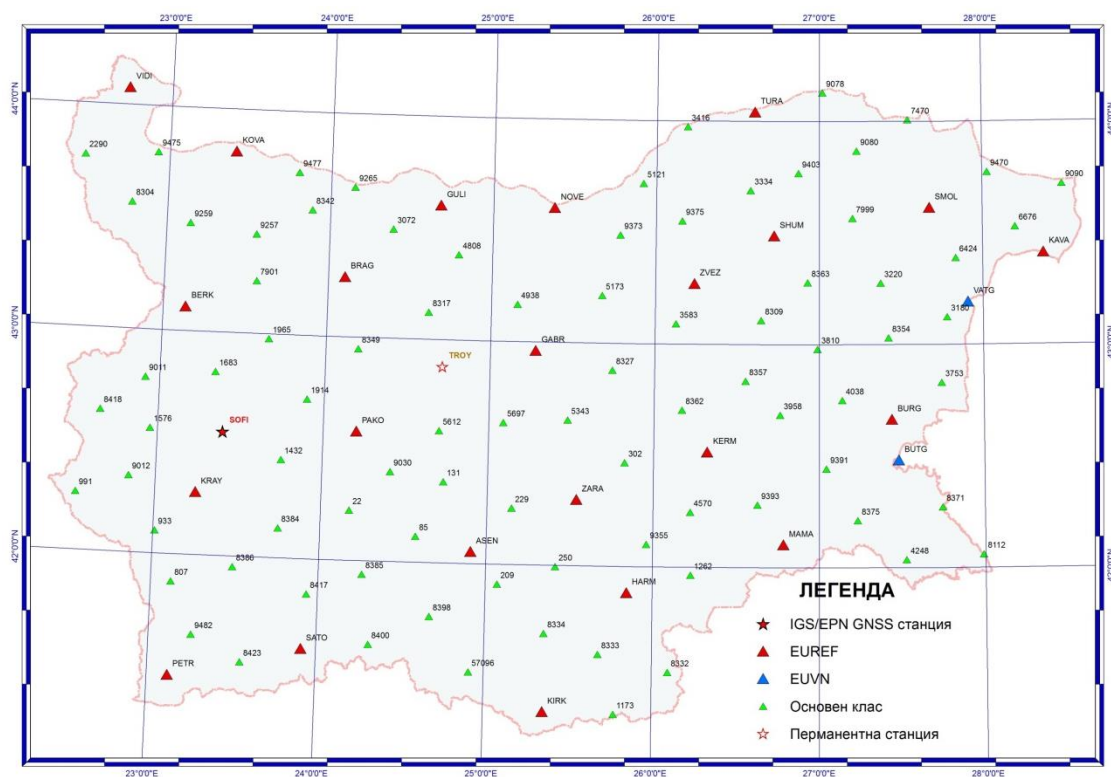
(1) **Първи цикъл** на измерване на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа – GPS кампания **2004 година.**

(2) **Втори цикъл** за измерване на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа – четири GPS кампании: **2015, 2016, 2017, 2018 година.**

(3) **ГНСС кампания 2014**, за измерване на възстановени точки от Основния клас.

(4) **ГНСС кампании от 1997 до 2015 г.** за измервания на точки от официалната реализация на EURFF територията на страната.

Схема с разположението на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа е представена на фигура 3.



Фигура 3. Основен клас на Държавната GPS мрежа

6. Научно-изследователски софтуер за обработка и анализ на ГНСС измервания **Bernese**

Обработката и анализа на ГНСС измерванията за целите на дисертацията е извършена със софтуера **Bernese, версия 5.2** (лиценз на Военно-географската служба).

Bernese е прецизен научно-изследователски софтуер за обработка на ГНСС данни, разработен в Астрономическия институт на Университета в Берн (*Astronomical Institute of the University of Bern, AIUB*), който отразява последните постижения в ГНСС технологиите и теорията за оценяване. Предназначен е за ефективна обработка на измервания от глобални, регионални и локални ГНСС мрежи, автоматична обработка на перманентни мрежи, мониторинг на йоносферата и тропосферата, определяне на спътникови орбити и параметри на ориентация на Земята. С Bernese, свободно се комбинират и обработват данни от GPS, GLONASS и GPS / GLONASS приемници. Може също така да обработва SLR наблюдения към GNSS сателити. Поддържа широк набор от международни формати за въвеждане/извеждане на данни (RINEX, SP3c, SINEX, IONEX, Clock RINEX, Troposphere SINEX, ANTEX, IERS ERP).

Софтуерът, изграден от няколко модула – трансфер, трансформиране, орбитален модул, модули за обработка и сервизен модул, позволява да се оценяват координати и скорости на станциите, стохастично и функционално представяне на ко-сеизмични и пост-сеизмични деформации, атмосферни параметри, спътникови орбити и параметри на ориентация на Земята.

7. Стратегия, приложена при обработка на измерванията на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа 2004 – 2018 година

Стратегията при обработката и анализа на измерванията съответства на изискванията на EUREF за обработка на регионални и национални мрежи и е в съответствие с описаните по-горе стандарти и последователност.

Обработката на измерванията от периода 2004 – 2018 година на точките от Основния клас е извършена в следната последователност:

(1) (**Reprocessing**) Обработка и анализ на измерванията от GNSS кампаниите 2004 в ITRF2014;

(2) (**Processing**) Обработка и анализ на измерванията от GNSS кампаниите 2015, 2016, 2017 и 2018 година в ITRF2014;

(3) (**Reprocessing**) Обработка и анализ на измерванията от GNSS кампания 2014 ITRF2014;

(4) (**Reprocessing**) Обработка⁵ и анализ на (допълнителните) измервания, извършени между 1997 и 2015 на 25-те точки от официалната реализация на EUREF на територията на страната в ITRF2014;

(5) (**Combination model**) Комбиниране на дневните решения от отделните кампании за получаване на многогодишно решение с окончателните координати и скорости на точките от Основния клас в ITRF2014;

(6) (**Transformations**) Трансформиране на окончателните координати на точките от Основния клас и техните скорости от ITRF2014 в ETRF2014 и ETRF2000.

Обработката на измерванията от отделните GNSS кампании е извършена в отделни проекти на софтуера Bernese, като резултатите от

⁵ Обработката е извършена в Центъра за обработка и анализ на GNSS измервания в НИГГГ, със софтуера GAMIT/GLOBK

тях са обединени в проект за получаване на многогодишното комбинирано решение.

Последователността на обработката на всяка една кампания е следната:

(1) Предварителна подготовка и обработка на данните;

(2) Обработка на измерванията от всяка отделна ГНСС кампания в ITRS, реализация ITRF2014 и **получаване на дневни мрежови решения** за всички станции от мрежата с минимум ограничения (*minimum constrained network solution*). Нормалните уравнения от дневните решения, ковариационните матрици и тропосферните файлове са запазени за последващото им комбиниране и получаване на комбинирано многогодишно решение за извеждане на окончателни координати и скорости.

(3) Комбиниране на нормалните уравнения от различните ГНСС кампании за **получаване на координати и скорости** на точките – многогодишно решение.

При обработката и анализа с Bernese, версия 5.2 са използвани измервания само от Глобалната позиционна система GPS. Основните елементи от приложената стратегия при обработката и анализа на измерванията на точките от Основния клас, съобразно стандартите за обработка (**вж.** раздел 5.1.2) са дадени в таблица 1.

Таблица 1 Основни елементи от приложената стратегия при обработка и анализ на измерванията

- Прецизни орбити на спътниците и хомогенни с тях координати на полюса, публикувани от Центъра за извеждане на орбити в Европа (CODE)
- Координатна система ITRS, реализация IGS14, съвместима с ITRF2014
- Референтни станции от EPN/IGS, IGS14
- Абсолютен калибрационен модел epn_14.atx на вариациите на фазовите центрове на антените, съвместим с igs14.atx
- Маска на височината 3°
- Тежести на наблюденията в зависимост от височината на спътника над хоризонта
- Тропосферни модели – изчисляват се от измерванията за всяко денонощие; априорен тропосферен модел – атмосферен модел Виена 1
- Оценяване на тропосферни параметри – по един тропосферен параметър на всеки час за всяка станция и тропосферни градиенти
-Йоносферни модели
- влияние на атмосферата върху координатите на станциите - ГНСС антените, (<i>atmospheric tidal loading corrections</i>)
- Влияние на Земни и океански приливи в координатите на станциите
- Полярнен прилив

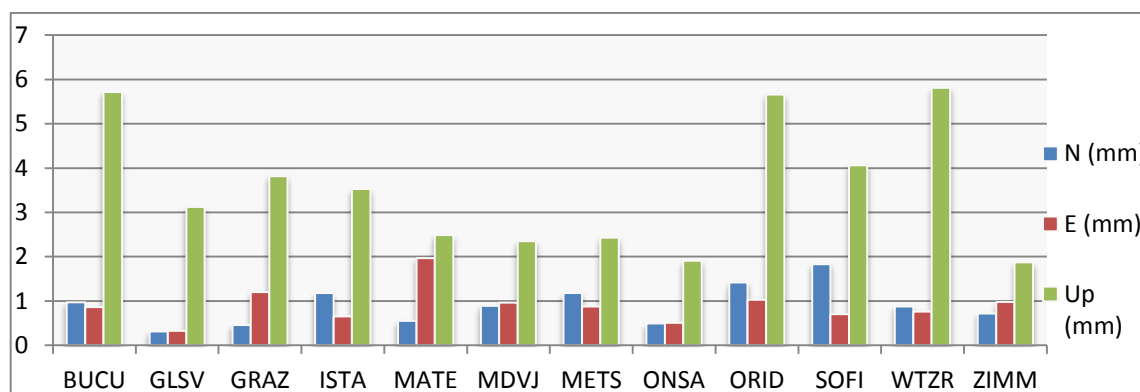
8. Качество на дневните решения

Дневните решения са индикатор за качеството на наблюденията и получените оценки на параметрите. Получаването на повтарящите се едноименни координати на станциите във времето (в дневните решения), т.нар. повтораемост на координатите (*repeatabilities*), е един от основните индикатори за качеството на получените решения при Bernese.

Първи цикъл измервания на точките от Основния клас от 2004 година

На фигура 4 са показани средните квадратни грешки в северната и източната компонента и по височина, получени от повторемостта на перманентните EPN станции, участващи в преобработката на измерванията от 2004 година.

Получените средни квадратни грешки на EPN станциите и на точки от Основния клас илюстрират много доброто качество на получените дневни решения за кампанията от 2004 година.

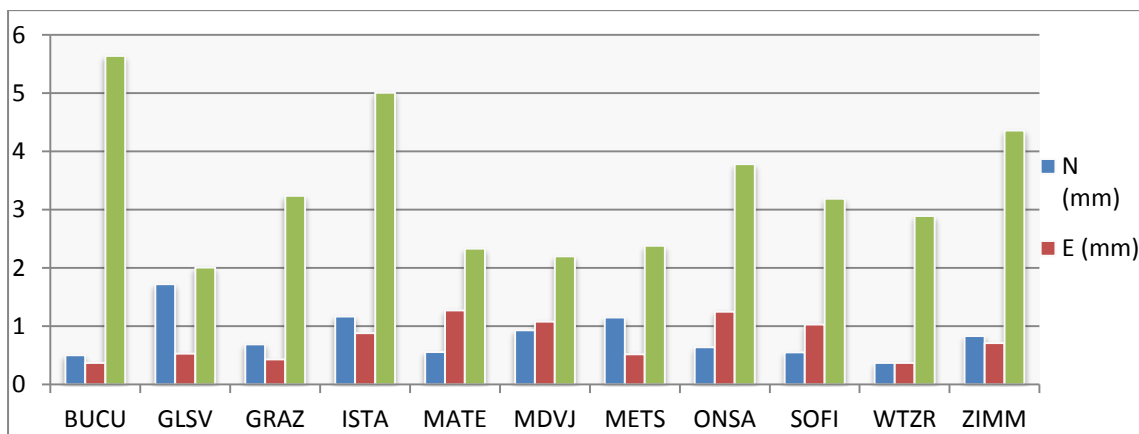


Фигура 4 Средни квадратни грешки в северната, източната компонента и по височина, получени от повторемостта на перманентните EPN станции от ГНСС кампанията 2004 година

Координатите на EPN перманентните станции, които се оценяват в комбинираното решение, получават стойности, съпоставими с EPN координатите в рамките на статистическата грешка.

ГНСС измервания от 2014 година на възстановените точки от Основния клас

За илюстрация на доброто качество повторемостта на координатите на перманентните IGS/EPN станции е показана на фигура 5.

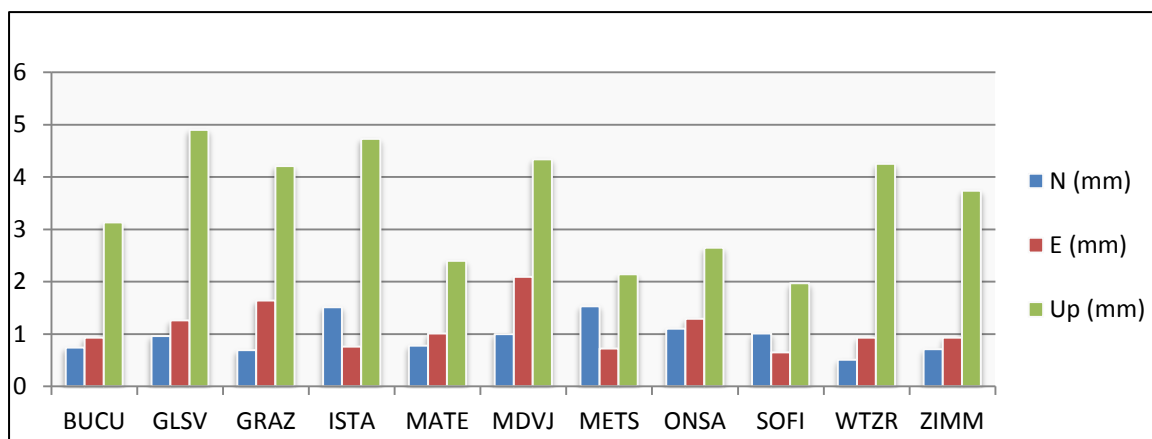


Фигура 5 Повторяемост на координатите на перманентните IGS/EPN станции от решението за ГНСС кампанията от 2014 година

Втори цикъл измервания на точките от Основния клас (2015 – 2018 година)

Обработката и анализа на ГНСС измерванията от кампаниите в четирите години е извършена в четири отделни проекта, следвайки описаната по-горе стратегия и последователност.

За илюстрация на резултатите от дневните решения, на фигура 6, са показани средните квадратни грешки от повторяемостта на координатите на перманентните IGS/EPN станции за кампанията от 2015 година.



Фигура 6 Средни квадратни грешки от повторяемостта на координатите на перманентните станции от IGS/EPN за кампанията от 2015 година

9. Получаване на координати и скорости на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа – комбинирано многогодишно решение

Основен инструмент за получаване на координати и скорости на точки, при обработка на сравнително големи мрежи (повече от 30 станции), с многогодишни наблюдения е модулът **ADDNEQ2** на Bernese.

9.1. Координати и скорости в координатна система ITRS, реализация ITRF2014

За получаване координатите и скоростите на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа, освен резултатите от решенията на отделните ГНСС кампании, посочени в т. 8, в решението са включени и резултатите от обработка на ГНСС кампаниите от 1997 до 2015 г. за измервания на точки от официалната реализация на EURFF територията на страната.⁶

В отделен проект са обединени и комбинирани ковариационните матрици на нормалните уравнения, като е приложен подход „минимално ограничено решение”. Координатите на изходните/референтните перманентни станции от EPN са фиксирани с точност 0.001 m.

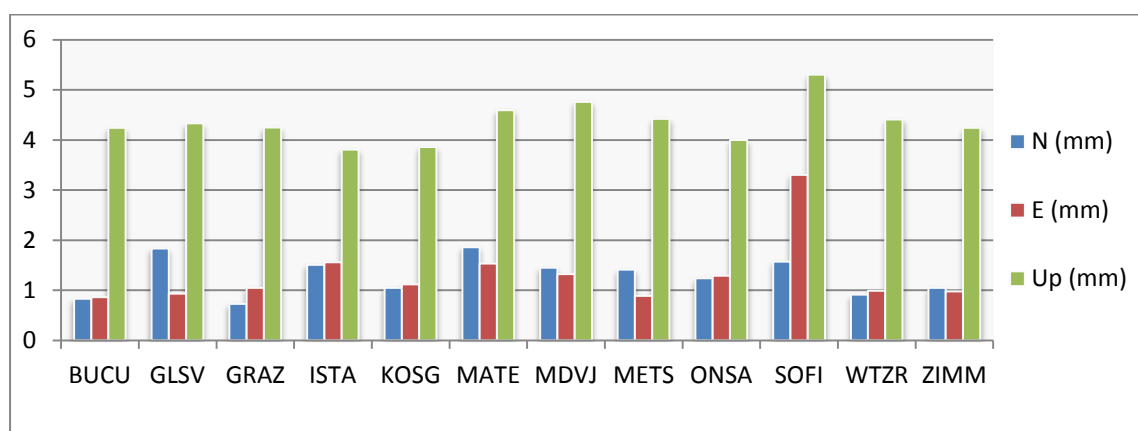
Получено е минимално ограничено решение, като координатите и скоростите на точките от Основния клас са в координатна система ITRS, реализация ITRF2014, епоха 2010.0⁷.

⁶ Обработката е извършена със софтуера GAMIT/GLOBK, с използване на стратегия, идентична с приложената с Bernese. Данните са предоставени от Центъра за обработка и анализ GNSS измервания в Департамент Геодезия на НИГГГ, проф. Георгиев

⁷ Официалната епоха на реализация ITRF2014 е епоха 2010.0

Качество на многогодишното решение

За доброто качество на полученото многогодишното решение може да се съди по средните квадратни грешки, получени от повторяемостта (*repeatabilities*) на координатите на перманентните станции и точките от Основния клас (фигура 7). Грешките на точките от Основния клас по положение са от порядъка на 1-2 mm и само в отделни случаи достигат 3-4. По височина грешките са от порядъка на 3-5 mm и само в единични случаи достигат 6-7 mm.



Фигура 7 Средни квадратни грешки, получени от повторяемостта на координатите на перманентните EPN/IGS станции от многогодишното решение

Точност на получените координати и скорости на точките от Основния клас

Точността на координатите на точките от Основния клас, получени от двата цикъла измервания е от порядъка на 1÷1.5 mm по положение и 2.5÷6 mm по височина. В Приложение 1 са представени средните грешки на координатите по x, y, z и изток, север и във височина, а на фигура 8 тяхното процентно разпределение.

Предвид изискванията към точността на координатите на точките от Основния клас според техническото задание: 5-10 mm по положение и 10-15 mm по височина, получената точност е повече от задоволителна.

За **точността на скоростите** на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа може да се съди по резултатите, показани в Приложение 2. Дадени са номерата/имената на точките, скоростите (изток и север), средните им грешки, коефициента на корелация между източната и северната компонента и скоростта по височина със средната ѝ грешка. Като се имат предвид продължителността на наблюдателните кампании в двете епохи и интервала между тях, точността на получените скорости е повече от добра.



Фигура 8 Разпределение на средните грешки по положение (компоненти изток, север и височина)

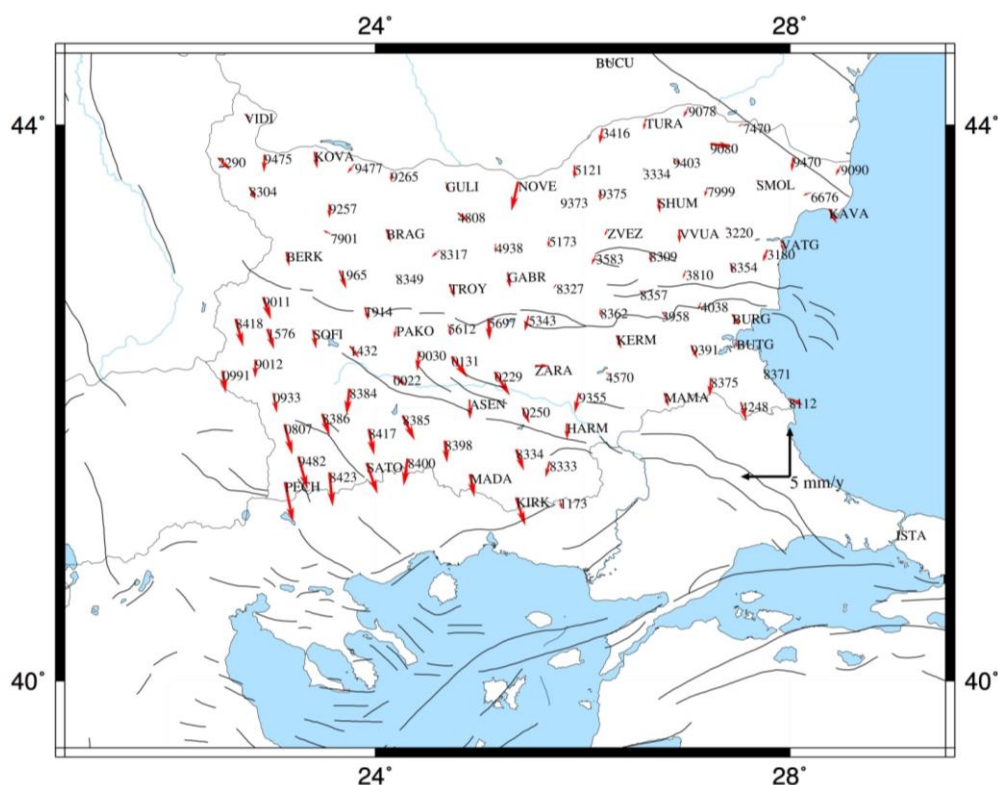
9.2. Координати и скорости в ETRS89, реализация ETRF2014

Координатите и **скоростите** на точките от Основния клас в ETRS89 се получават съгласно подхода, описан в раздели 3.1 и 4.3, посредством модула **ETRS89** на Bernese. Модулът **ETRS89** на Bernese е инструмент, позволяващ трансформация от ITRF_{yy} към реализациите на Европейската земна координатна система ETRS89. Чрез под-програма COOLVEL се предоставя възможност за привеждане на входните координати към определена епоха преди прилагането на самата трансформация.

Получаването на скоростите на точки в ETRS89 представлява премахване на скоростта на Евроазиатската плоча от получените ITRS, ITRF2014 скорости. Използван е модел на ротационния полюс *на движение на плочите, базиран на решението ITRF2014* [12]. По тази причина, ETRS89 скоростите се наричат и вътрешно-плочови (отразяват вътрешно-плочови деформации на континенталната плоча) и са релативни спрямо Евразия.

Координатите на точките от Основния клас са получени в координатна система ETRS89, реализация ETRF2014, епоха 2010.0⁸

На Фиг. 9 са показани получените релативни спрямо Евразия хоризонтални скорости на точките от Основния клас.



Фигура 9 Скорости на точките от Основния клас, релативни спрямо Евразия

9.3. Трансформиране на новополучените координати

За да могат да бъдат сравнени новополучените координати (Международната земна координатна система ITRS, реализация ITRF2014, епоха 2010.0) с координатите от официалното решение от

⁸ Официалната епоха на реализация ETRF2014 е епоха 2010.0

2005 година (ETRS89, ETRF2000, епоха 2005.0), те трябва да бъдат трансформирани в същата координатната система. За целите на анализа те са трансформирани в две различни реализации и три различни епохи (фиг. 10). Трансформацията е извършена съгласно схемата, изложена в раздели 3.1 и 4.3.

*(1) Трансформиране от ITRF2014, епоха 2010.0 в **ETRF2000, епоха 2005.0:***

- Трансформиране на координатите от реализация ITRF2014, епоха 2010.0 в ITRF2014, епоха 2005.0, с използване ITRS скоростите на точките.

- Трансформиране на координатите от ITRF2014, епоха 2005.0 в Европейската земна координатна система, реализация ETRF2000, епоха 2005.0, използвайки публикуваните трансформационни параметри между двете реализации.

*(2) Трансформиране на новополучените координати в **ETRF2014, en. 2005.0***

*(3) Трансформиране на новополучените координати в **ETRF2014, en. 2020.0***

За да е ясен смисълът на сравнението на координатите, трябва да се отбележи, че официалните координати на точките са получени в реализация ITRF2000 и след това са трансформирани в ETRF2000.



Фигура 10 Трансформиране на новополучените координати

10. Анализ на резултатите от обработката на измерванията на точките от Основния клас

От момента на официалното приемане на резултатите от обработката на измерванията на точките от Основния клас (2006 година) до сега, са публикувани четири последователни реализации на Международната земна координатна система ITRS: ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008 и ITRF2014 и съответните на Европейската.

Поддържането на Държавната геодезическа мрежа на България, освен дейностите по обследване на точките, възстановяване на разрушени точки, GPS кампании за измерване на възстановените точки, GPS кампании за преизмерване на точките от Основния клас, обработка и анализ на измерванията за получаване координатите и скоростите на точките, включва и *преизчислението на измерванията с появата на (всяка) нова реализация на международната и европейската координатни системи и анализ на получените разлики*. На практика, дейностите по поддържане на мрежата са постоянен процес.

Анализът на разликите между приетите официални координати на Държавната геодезическа мрежа и тези, от последователните нови реализации на координатната система, позволява да се определи срока на „валидността“ им и евентуалната необходимост от смяната на използваната на територията на страната реализация.

10.1. Сравнение на координатите от официално приетото решение (БГС 2005) и новото решение от обработка и анализ на двата цикъла измервания

Факторите, обуславящи разликите между официалните координати на точките в БГС2005 (ETRF2000, епоха 2005.0) и новополучените (ETRF2014, епоха 2010.0) могат да се разделят условно на две групи:

(1) Разлика в реализациите на координатната система, в която са обработени измерванията през 2006 и през 2018 година – съответно ITRF2000 и ITRF2014, както и в реализациите, в които са трансформирани – ETRF2000 и ETRF2014;

(2) Наличие на вътрешно-плочови деформации/движения в района на Южна България, които достигат до 3÷4 mm/y (**вж.** фигура 9).

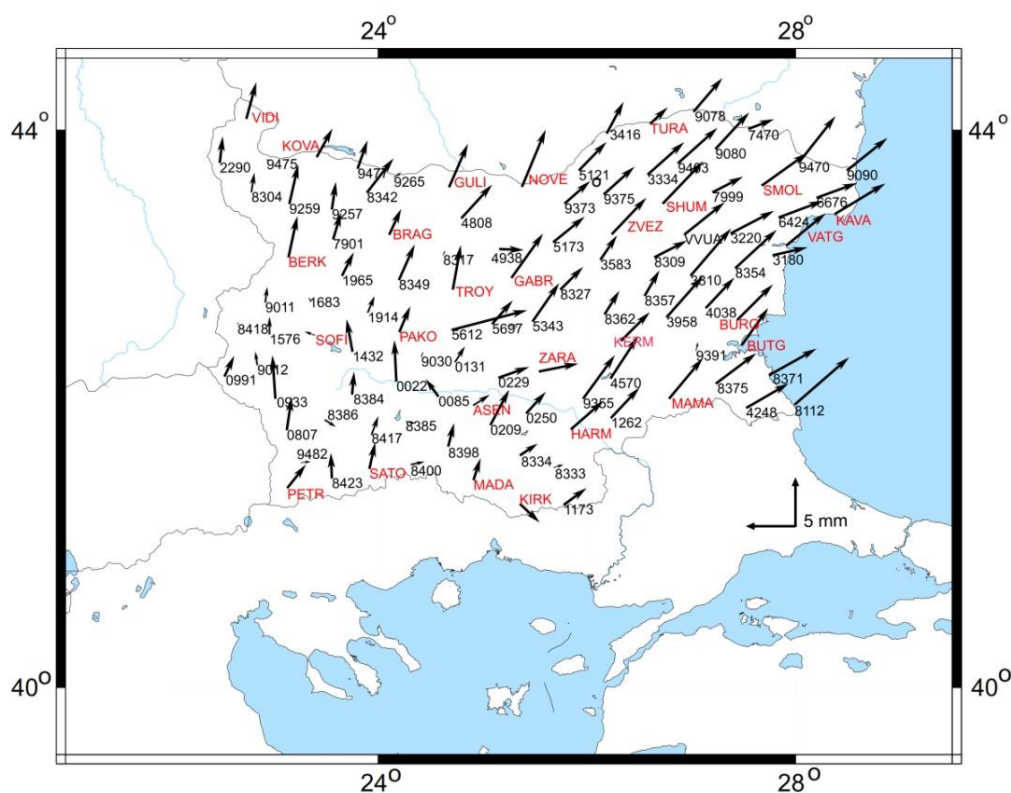
За да бъдат оценен сумарния ефект от разликите, дължащи се на различните реализации на координатната система и от съвременните движения на земната кора, те са анализирани поотделно.

10.1.1. Сравнение на официалните координати в ETRF2000, епоха 2005.0 и новополучените координати, трансформирани в ETRF2000, епоха 2005.0

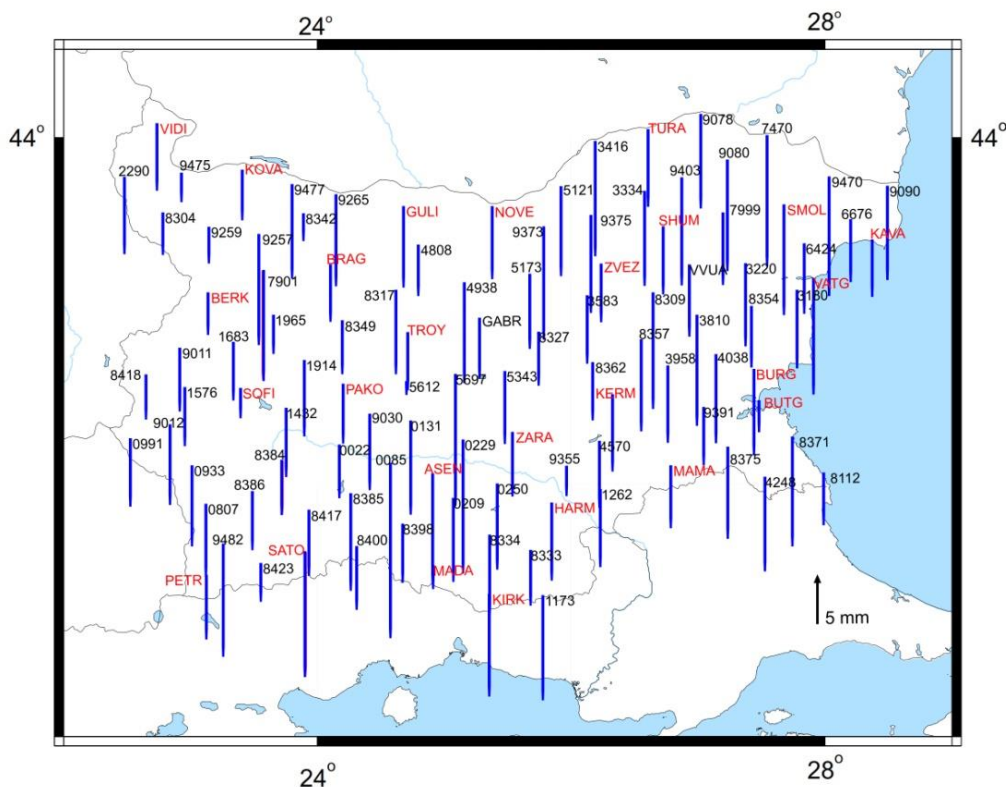
Разликите между новополучените (трансформирани в ETRF2000, ер. 2005.0) и официалните координати са показани графично, като вектори на фигура 10, като посоката на вектора се задава от източната и северна компонента на разликата. Разликите са получени като от новополучените координати са извадени

официалните, в едноименната реализация ETRF2000 и едноименната епоха 2005.0. По този начин, векторите показват разликата и посоката, с които се различават координатите. Разликите по височина са показани на фигура 11, като синият цвят показва отрицателни разлики.

Разликите (в ETRF2000, епоха 2005.0) по положение на точките (Фиг. 10) са от порядъка на милиметри и не надвишават 5-6 mm за отделни точки. Разликите във височините на точките са показани на фигура 12 (на фигурата синият цвят показва отрицателни разлики), като типичните им стойности са от порядъка на 1-2 cm, като в отделни случаи достигат 2.5 cm. Всички разлики във височините са отрицателни.



Фигура 11 Разликите между новополучените и официалните координати по положение, сравнени в ETRF2000, епоха 2005.0



Фигура 12 Разликите между новополучените и официалните координати по височина, сравнени в ETRF2000, епоха 2005.0

Извод

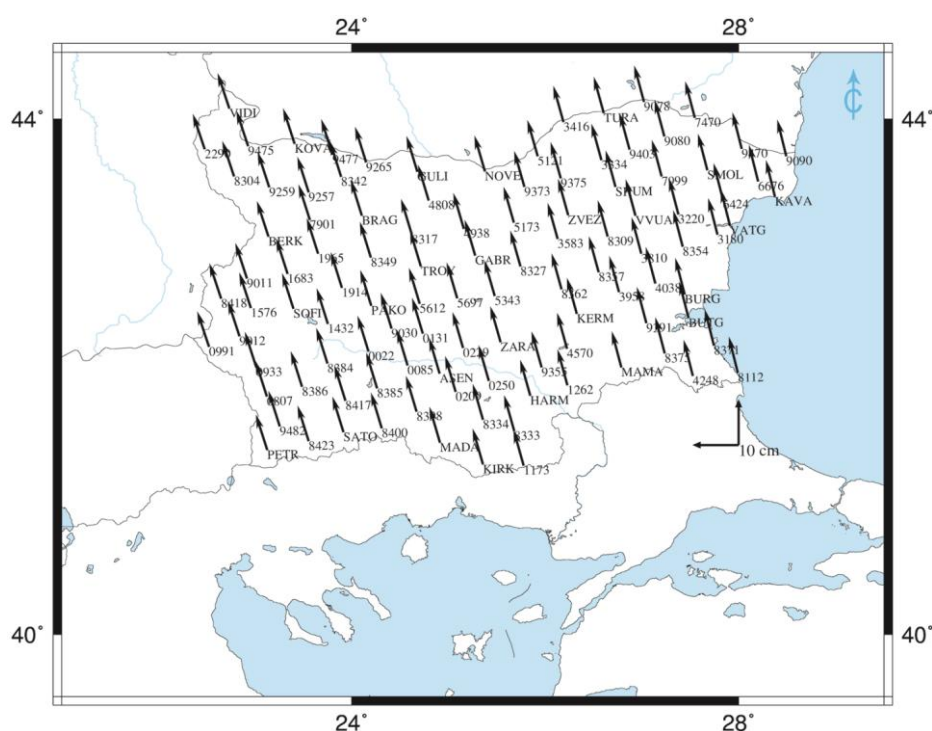
(1) Двете решения, официалното от 2005 година и новото, получено от двата цикъла измервания 2004/2005 – 2015/2018, са с много добро качество. Те са обработени и анализирани с еднакъв софтуер, но с различни версии, в различни реализации на Международната земна координатна система ITRS (ITRF2000 и ITRF2014), различни калибрационни модели на вариациите на фазовите центрове на GNSS антените.

10.1.2. Сравнение на официалните координати в ETRF2000, епоха 2005.0 и новополучените координати, трансформирани в ETRF2014 епоха 2005.0

За да бъде получена **оценка** на разликите в координатите на точките, дължащи се само на **разликата в двете реализации на Европейската земна координатна система (ETRF2000 и последната ETRF2014)**, са анализирани разликите в координатите между новото решение в реализация ETRF2014 и официалното решение в ETRF2000,

приведени в една и съща епоха – 2005.0. Разликите в положението на точките са показани като вектори на фигура 13, а във височина – на фигура 14.

Резултатите от сравнението между двете реализации ETRF2014 и ETRF2000, показват разлики в източната компонента между 2 и 2.5 cm и около 8 cm в северната, т.е. векторът на разликите по положение е от порядъка на 8 и повече сантиметра. Разликите във височините са в рамките на 1.5 – 2 cm и са отрицателни.



Фигура 13 Разлики по положение между новите координати, в ETRF2014 епоха 2005.0 и официалните, в ETRF2000 епоха 2005.0



Фигура 14 Разлики във височина между новите координат в ETRF2014, епоха 2005.0 и официалните в ETRF2000, епоха 2005.0

Извод

Разликата между двете реализации (ETRF2014 и ETRF2000) има значителен ефект върху координатите на точките, който достига до 8 cm по положение и 2.5 cm по височина.

10.1.3. Сравнение на официалните координати в ETRF2000, епоха 2005.0 и новополучените координати, трансформирани в ETRF2014, епоха 2020.0

За да бъде оценен съвместният ефект от смяната на реализацията на Европейската координатна система и съвременните движения на земната кора, новите координатите на точките от Основния клас получени в ETRF2014 са трансформирани в епоха, която е близка до настоящия момент – 2020.0, т.е. 2020 януари 01. Образувани са разликите между координатите в ETRF2014, епоха 2020 и ETRF2000, епоха 2005.

На фигура 15 са показани резултатите за положенията, а на фигура 16 за височините на точките. Те илюстрират какви са

разликите между координатите на точките от Основния клас в ETRF2000, епоха 2005.0, приети като официална реализация на Българската геодезическа система и положенията на същите точки към настоящия момент, епоха 2020.0, *дължащи се на смяната на реализацията* на Европейската координатна система *и съвременните движения на земната кора*.

Поради особеностите на тектонската позиция на територията на България в активния Източно Средиземноморски регион, разликите в положенията на точките са най-малки в района на Югозападна България – най-активния тектонски и сеизмотектонски район на територията на България. Разликите по положение се увеличават от югозапад към североизток, за да достигнат стойности от порядъка на 8÷8.5 cm в Североизточна България.



Фигура 15 Разлики по положение между новополучените координати, в реализация ETRF2014 епоха 2020.0 и официалните, реализация ETRF2000 епоха 2005.0



Фигура 16 Разликите във височините между новополучените координати в ETRF2014, епоха 2020.0 и официалните в ETRF2000 епоха 2005.0.

Разликите във височините на точките (фигура 16) варират от 0 до 4 cm, като преобладават отрицателните.

Извод

Разликите между новите координати (в ETRF2014, епоха 2020.0) и официалните, (в ETRF2000, епоха 2005.0), отчитащи съвместният ефект от различните реализации и съвременните движения на земната кора са значими и не могат да бъдат пренебрегнати при анализа на състоянието на Българската геодезическа система 2005. По положение разликите се увеличават от югозапад към североизток, за да достигнат стойности от порядъка на 8 – 8.5 cm в Североизточна България. Пазликите във височините на точките са преобладаващо отрицателни, като стойностите варират от 0 до 4 cm.

10.2. БГС2005 и резултатите от обработката на измерванията на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа в двата цикъла 2004 – 2018 година

Тъй като получаването на координатите на точките на Държавната GPS мрежа е основният фактор, довел до приемане на Българската геодезическа система 2005, логично възниква въпросът, как новите резултати от обработка на измерванията 2004 – 2018 година, ще се отразят на Българската геодезическа система? Или с други думи – има ли необходимост от смяна на реализацията на Европейската земна координатна система на територията на България?

Въпросът за смяната или запазването на реализацията на Държавната геодезическа мрежа в БГС 2005 (и след 2020 година) е комплексен и освен чисто научните аргументи, резултат на настоящият анализ, трябва да бъдат взети под внимание и редица други съображения като финансови, административни, логистични и не на последно място образователни.

Основните изводи, базирани на сравнението на координатите в разгледаните по-горе реализации и епохи на Европейската земна координатна система за територията на България са:

- Разликите между двете реализации на Европейската координатна система ETRF2000 и ETRF2014 са значителни – от порядъка на 8 cm по положение и $1.5 \div 2$ cm във височина.
- Съвместният ефект от разликите между двете реализации и съвременните движения на земната кора за период от 15 години (от епоха 2005.0 до епоха 2020.0) е също значителен. Разликите по положение се увеличават от югозапад, от порядъка на 2.5 cm, към североизток, за да достигнат стойности от $8 \div 8.5$ cm в Североизточна България. Разликите са нехомогенни и в различни части на страната

имат различни стойности. Разликите във височините на точките са преобладаващо отрицателни, като варират от 0 до 4 cm.

- Относителните положения на точките на територията на страната (не само на точките от Основния клас) не се запазват, дори само ако се вземат предвид съвременните движения на земната кора.

НАРЕДБА № 2 от 30 юли 2010 г. за „Дефиниране, реализация и **поддържане** на Българската геодезическа система" регламентира същността на Българската геодезическа система и нейната връзка с Европейската геодезическа референтна система, като в чл. 6, т. 2 казва, че: "Българската геодезическа система 2005 включва: геодезическа координатна система ETRS89". Терминът „*поддържане*“, включен в името на наредбата предполага и задължителното „*обновяване*“ на системата, което е неразделна част от поддържането ѝ.

Идентифицирани са четири възможности, касаещи БГС2005 в онази нейна част, отнасяща се до Европейската земна координатна система ETRS89, именно:

(1) смяна на реализация ETRF2000 с последната актуална реализация на Европейската земна координатна система ETRF2014;

(2) запазване на реализация ETRF2000, епоха 2005.0;

(3) запазване на реализация ETRF2000 и смяна на епохата;

(4) запазване на реализация ETRF2000 и смяна/използване на реализация ETRF2014 само за (някои) приложения, изискващи висока точност.

Последните две възможности – смяна на реализация ETRF2000 с ETRF2014 само за (някои) приложения или запазване на реализацията и смяна на епохата ѝ, като компромисни варианти звучат достатъчно разумно (от гледна точка икономия на ресурси), но биха внесли значително объркване сред ползвателите на БГС2005. Още повече,

отчитайки факта, че има какво да се желае все още по отношение въвеждането и прилагането на БГС2005.

Строгийт подход изисква използваната към момента реализация на Европейската координатна система ETRF2000 на територията на страната, да бъде заменена с последната – ETRF2014. Основните аргументи за смяната на реализацията могат да се обобщят:

(1) Наличие на значителни разлики между координатите на точките в епоха 2005.0 и към настоящия момент (~2020.0). Разликите в положението на точките достигат 8 – 8.5 cm, а по височина – до 4 cm.

(2) Поради съвременните движения на земната кора, разликите в координатите не са хомогенни, изменят се нелинейно и са различни за различните области на страната. Този факт показва, че съотношенията между линейните и ъглови елементи в мрежата не се запазват.

(3) Използването на реализация ETRF2000 за прецизни геодезически приложения е нецелесъобразно⁹.

(4) Използваната днес геодезическа ГНСС апаратура прилага различен калибрационен модел на фазовите центрове на антените от модела, използван при създаването на БГС 2005 (абсолютен/относителен калибрационен модел).

Значителната стабилност и подобрената точност на параметрите на координатното начало и мащаба на ITRF2014 и съответно, подобрената реализация на ETRS89 въз основа на ITRF2014, предполагат много добра съгласуваност на бъдещите (след ETRF2014) реализации. В подкрепа на горното са и препоръките на EUREF, реализация ETRF2014 да се използва за високоточни приложения, докато ETRF2000 се счита подходяща за целите на геореферирането [13].

⁹ Zuheir Altamimi, Key results of ITRF2014 and implication to ETRS89 realization, EUREF2016 Symposium, San Sebastian, Spain, May 25-27, 2016 - ***"TWG might recommend an ETRF2014 frame instead of ETRF2000"*** [10]

11. Приноси

(1) **Получени са координати на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа** чрез обработка и анализ на измерванията от периода 2004 – 2018, **в последните реализации на Международната и на Европейската земни координатни системи.**

(2) **Получени са скорости на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа** в Международната и на Европейската земни координатни системи, реализации ITRF2014 и ETRF2014

(3) На базата на извършените **анализи на разликите в координатите на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа**, получени в последната реализация на Европейската земна координатна система ETRS89 и официално приетите в Българската геодезическа система 2005 са **направени препоръки за обновяване на Българската геодезическа система 2005.**

ПУБЛИКАЦИИ, СВЪРЗАНИ С ТЕМАТА НА ДЕСЕРТАЦИЯТА

1. Георгиев Ив., П. Гъбенски, Т. Ташков, П. Данчев и др. (2006). ДЪРЖАВНА GPS МРЕЖА: Обработка на наблюденията от Основния клас, монография, Висша геодезия 18, специално издание.
2. Георгиев, Ив., П. Гъбенски, Т. Ташков, П. Данчев и др. (2007), Обработка на наблюденията от Второстепенния клас, монография, Висша геодезия 20, специално издание.
3. Георгиев, И., Г. Михайлов, П. Данчев, Н. Димитров и др. (2020), Държавна GPS мрежа. Обработка и анализ на измерванията на точките от основния клас 2004 - 2018 година, монография, Висша геодезия 23, специално издание, ISBN 978954964138.
4. Георгиев, И., Т. Беляшки, Е. Михайлов, Д. Димитров, П. Данчев, Г. Михайлов и др. Реализация на Европейската земна координатна система ETRS89 и Европейската вертикална референтна система EVRS на територията на България, Геомедия, Брой 4, стр. 38-41, ISSN 1313-3365.
5. Георгиев, И, П. Данчев, Г. Михайлов, М. Минчев, (2017) Държавна GPS мрежа на България - състояние, преизмерване на точките от основния клас и перспективи, Международна юбилейна научна конференция „75 години УАСГ“, 2017.
6. Данчев П., Г. Михайлов, Реализация на Международната Земна координатна система ITRF в района и околностите на Българската антарктическа база, Международен симпозиум "Съвременните технологии, образованието и професионалната практика в геодезията и свързаните с нея области“, СГЗБ; 2017; Геодезия, картография и земеустройство, брой 1-2, 2018 г.
7. Georgiev I., P. Gabenski, T. Tashkov, P. Danchev, D. Dimitrov and etc. (2009). National GPS Network of Bulgaria – Processing the Observations from the Main Order. EUREF Publication No. 16., Report on the Symposium of the IAG Sub-commission 1.3a Europe (EUREF), Riga, 14-17 June 2006, p. 145-155.

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА:

1. Георгиев Ив., П. Гъбенски, Т. Ташков, П. Данчев и др. (2006). ДЪРЖАВНА GPS МРЕЖА: Обработка на наблюденията от Основния клас, монография Висша геодезия 18, специално издание.
2. Георгиев, Ив., П. Гъбенски, Т. Ташков, П. Данчев и др. (2007), Обработка на наблюденията от Второстепенния клас, монография Висша геодезия 20, специално издание.
3. Георгиев, И., Г. Михайлов, П. Данчев, Н. Димитров и др. (2020), Държавна GPS мрежа. Обработка и анализ на измерванията на точките от основния клас 2004 - 2018 година, монография Висша геодезия 23, специално издание, ISBN 978954964138.
4. Георгиев, И., Т. Беяшки, Е. Михайлов, Д. Димитров, П. Данчев, Г. Михайлов и др. Реализация на Европейската земна координатна система ETRS89 и Европейската вертикална референтна система EVRS на територията на България, Геомедия, Брой 4, стр. 38-41, ISSN 1313-3365.
5. Георгиев, И, П. Данчев, Г. Михайлов, М. Минчев,(2017), Държавна GPS мрежа на България - състояние, преизмерване на точките от основния клас и перспективи, Международна юбилейна научна конференция „75 години УАСГ“, 2017.
6. Данчев, П. (2001), Съвременно състояние на Държавната астрономо-геодезична мрежа и на Държавните геодезични мрежи трети и четвърти клас. Международен симпозиум и изложба “Геодезически, фотограметрични и спътникови технологии – развитие и интегрирано приложение”, сборник доклади, София, 08-09 ноември, 2001
7. Георгиев, И., Т. Беяшки, Е. Михайлов, Д. Димитров, П. Данчев, Г. Михайлов и др. (2010) Реализация на Европейската земна координатна система ETRS89 и Европейската вертикална референтна система EVRS на територията на България, Геомедия, Брой 4,5, ISSN 1313-3365.
8. Altamimi, Z. 2002, Discussion on how to express a regional GPS solution in the ITRF. <http://euref.eu/symposia/book2002/162-167.pdf>.
9. Altamimi et al., 2002, ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications, Journal of geophysical research, vol. 107.
10. Altamimi, Z., X. Collilieux, J. Legrand, B. Garayt, C. Boucher (2007). ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. J. Geophys. Res., Solid Earth, Vol. 112, B09401, doi: 10.1029/2007JB004949.

11. Altamimi, Z., X. Collilieux, L. Métivier (2011). ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *J Geod* (2011) 85:457–473, doi: 10.1007/s00190-011-0444-4.
12. Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier, X. Collilieux (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, Vol. 121, 6109–6131, doi: 10.1002/2016JB013098.
13. Altamimi, Z (2016). Key results of ITRF2014 and implication to ETRS89 realization, EUREF2016 Symposium, San Sebastian, Spain, May 25-27, 2016.
14. Altamimi, Z., EUREF Technical Note 1: Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems, Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), France, June 28, 2018; <http://etrs89.ensg.ign.fr/pub/EUREF-TN-1.pdf>.
15. Altamimi, Xavier Collilieux, Laurent M, Paul Rebischung, ITRF2014 Plate motion model, *Geophys. J. Int.* (2017) 209, 1906–1912, 2017 March 30GJI Geodynamics and tectonics
16. BOSY, J., Global, Regional and National Geodetic Reference Frames for Geodesy and Geodynamics, *Pure Appl. Geophys.* 171 (2014), 783–808.
17. Boucher, C and Z. Altamimi, Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign.
18. Bruyninx, C., Z. Altamimi, A. Caporali, A. Kenyeres, J. Legrand, M. Lidberg (2018). Guidelines for EUREF Densification.
19. Bruyninx, C, Altamimi, Z. Caporali, A. Kenyeres, A. Legran, (2018) Guidelines for EUREF Densifications, IAG sub-commission for the European Reference Frame – EUREF, ver. 5; http://www.epncb.oma.be/documentation/guidelines/Guidelines_for_EUREF_Densifications.pdf.
20. Dach R., L. Simon, P. Walser, P. Fridez (eds.) (2015). Bernese GNSS Software Version 5.2. Astronomical Institute, University of Bern, November 2015, ISBN: 978-3-906813-05-9, DOI: 10.7892/boris.72297.
21. Dow, J., R. E. Neilan, and C. Rizos (2009), The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems, *J. Geod.*, 83(3–4), 191–198, doi:10.1007/s00190-008-0300-3.
22. Guidelines for the EPN Analysis Centres, Prepared by the EPN Coordination Group and the EPN Central Bureau, 2010 - 2018.

23. Lidberg, M., On possible alternatives for the realization of ETRS89 based on ITRF2014 (2017), EUREF Symposium 2017, Wroclaw, Poland.

24. Petit, G., Luzum, B., IERS Conventions (2010), IERS Technical Note No. 36, International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS).

25. Sacher, M., G. Liebsch, EVRF2019 as new realization of E.VRS, EUREF Symposium 2019.

26. *EUREF Terms of Reference*: <http://www.euref.eu/documentation/EUREF-ToR-2008.pdf>.

27. EUREF Symposium, 2017, Resolution No. 1

28. Reference Frames in Practice, Manual (2014), Commission 5 Working Group 5.2 Reference Frames, FIG

Приложение 1

Средни грешки на координатите по x, y, z и изток, север и във височина на точките от Основния клас на Държавната GPS мрежа

Точка	σ_x mm	σ_y mm	σ_z mm	σ_E mm	σ_N mm	σ_{Up} mm
0022	3.50	1.95	3.30	1.39	1.25	4.84
0085	3.01	1.65	2.83	1.20	1.03	4.16
0131	2.42	1.39	2.29	0.97	0.87	3.36
0209	3.01	1.71	2.80	1.22	1.03	4.15
0229	2.82	1.64	2.70	1.13	1.03	3.95
0250	7.51	4.12	7.75	3.37	2.46	10.77
0807	2.71	1.47	2.53	1.03	0.95	3.74
0933	2.96	1.61	2.84	1.19	1.03	4.12
0991	4.11	1.82	3.74	1.43	1.35	5.51
1173	2.93	1.69	2.74	1.16	1.03	4.07
1262	2.57	1.49	2.43	1.06	0.89	3.57
1432	2.66	1.46	2.56	1.08	0.93	3.71
1576	3.21	1.65	2.99	1.28	1.08	4.38
1683	7.95	4.44	7.98	3.04	2.71	11.40
1914	2.63	1.46	2.51	1.08	0.92	3.65
1965	3.57	2.01	3.44	1.47	1.23	4.99
2290	2.65	1.43	2.61	1.11	0.92	3.71
3180	2.53	1.54	2.49	1.07	0.91	3.60
3220	3.14	1.92	3.11	1.30	1.15	4.49
3334	2.40	1.42	2.39	1.02	0.86	3.42
3416	3.54	2.23	3.47	1.44	1.24	5.09
3583	2.14	1.25	2.09	0.90	0.77	3.01
3810	3.04	1.82	2.96	1.28	1.09	4.30
3958	2.60	1.56	2.58	1.09	0.91	3.72
4038	2.53	1.51	2.45	1.05	0.89	3.57
4248	2.78	1.71	2.64	1.13	1.00	3.92
4446	2.62	1.55	2.55	1.09	0.94	3.74
4570	3.06	1.82	2.95	1.23	1.13	4.31
4808	2.47	1.40	2.38	1.01	0.86	3.46
4938	3.81	2.20	3.77	1.59	1.32	5.41
5121	2.99	1.77	2.99	1.27	1.07	4.28
5173	2.45	1.43	2.44	1.04	0.88	3.48
5343	2.41	1.38	2.29	1.00	0.86	3.35
5612	2.88	1.61	2.75	1.20	1.00	4.01
5697	3.17	1.84	3.09	1.30	1.12	4.48
6424	2.96	1.96	2.89	1.92	1.76	7.38
6676	3.04	1.77	2.93	1.22	1.08	4.28
7470	3.52	2.09	3.33	1.47	1.19	4.93
7901	3.05	1.62	2.94	1.24	1.04	4.24
7999	3.33	1.99	3.33	1.41	1.17	4.77
8112	3.01	1.86	2.87	1.23	1.10	4.24
8304	3.22	1.75	3.10	1.28	1.19	4.47
8309	3.17	1.87	3.10	1.34	1.12	4.48

Точка	σ_x mm	σ_y mm	σ_z mm	σ_E mm	σ_N mm	σ_{Up} mm
8317	2.09	1.18	2.04	0.86	0.74	2.94
8327	2.17	1.24	2.10	0.91	0.78	3.03
8333	3.12	1.77	2.91	1.25	1.05	4.32
8334	3.40	1.96	3.23	1.39	1.18	4.74
8342	2.62	1.43	2.55	1.10	0.91	3.65
8349	3.47	2.00	3.36	1.30	1.21	4.92
8354	2.70	1.64	2.70	1.14	0.96	3.88
8357	3.68	2.21	3.59	1.51	1.34	5.22
8362	1.92	1.13	1.87	0.79	0.68	2.72
8371	2.85	1.71	2.73	1.17	1.00	4.01
8375	2.42	1.47	2.37	1.00	0.85	3.45
8384	2.97	1.65	2.74	1.19	1.02	4.07
8385	2.97	1.69	2.81	1.17	1.07	4.13
8386	3.89	2.12	3.67	1.56	1.32	5.38
8398	3.30	1.87	3.16	1.37	1.15	4.60
8400	2.38	1.32	2.21	0.96	0.84	3.26
8417	2.96	1.65	2.81	1.18	1.03	4.11
8418	3.46	1.83	3.28	1.40	1.17	4.77
8423	2.31	1.25	2.11	0.90	0.81	3.14
8428	4.85	2.72	4.76	1.98	1.74	6.83
8430	4.70	2.79	4.56	1.93	1.68	6.65
8431	5.11	3.06	4.90	2.04	1.77	7.23
9011	2.59	1.43	2.53	1.07	0.91	3.63
9012	2.22	1.19	2.06	0.90	0.81	3.02
9030	3.12	1.69	2.95	1.27	1.06	4.31
9078	2.35	1.40	2.37	1.00	0.84	3.37
9080	2.47	1.51	2.50	1.08	0.90	3.56
9090	2.63	1.64	2.64	1.11	0.93	3.81
9257	3.13	1.72	3.09	1.32	1.10	4.40
9265	2.87	1.64	2.85	1.20	1.00	4.08
9355	2.52	1.48	2.46	1.03	0.88	3.57
9373	1.78	1.03	1.75	0.75	0.64	2.52
9375	3.54	2.08	3.53	1.50	1.23	5.06
9391	5.05	3.09	4.90	2.00	1.82	5.19
9403	4.00	2.12	3.98	1.56	1.31	5.67
9470	2.94	1.80	2.95	1.24	1.05	4.24
9475	2.84	1.53	2.78	1.19	0.99	3.96
9477	2.81	1.52	2.76	1.20	0.98	3.93
9482	3.85	2.13	3.56	1.49	1.37	5.29

Точка	σ_x mm	σ_y mm	σ_z mm	σ_E mm	σ_N mm	σ_{Up} mm
ASEN	3.15	1.80	3.00	1.26	1.13	4.39
BERK	2.65	1.45	2.45	1.05	0.94	3.69
BRAG	3.60	2.03	3.48	1.46	1.30	5.04
BURG	2.87	1.77	2.79	1.16	1.02	4.09
BUTG	4.61	2.69	4.38	1.74	1.87	6.42
GABR	2.70	1.56	2.59	1.10	0.97	3.78
GULI	2.83	1.61	2.77	1.15	1.04	3.98
HARM	2.77	1.63	2.62	1.08	1.00	3.87
KAVA	2.08	1.27	2.07	0.87	0.74	2.98
KERM	2.47	1.46	2.38	0.99	0.90	3.48
KIRK	3.43	2.00	3.21	1.35	1.20	4.77
KOVA	3.32	1.84	3.28	1.37	1.21	4.67
MADA	2.30	1.32	2.21	0.93	0.80	3.22
MAMA	4.47	2.66	4.28	1.81	1.56	6.30
NOVE	1.91	1.10	1.88	0.81	0.69	2.70
PAKO	5.09	2.82	4.86	2.02	1.75	7.10
PETR	2.32	1.24	2.12	0.85	0.79	3.17
SATO	4.27	2.38	3.88	1.54	1.41	5.88
SHUM	4.45	2.63	4.36	1.79	1.59	6.33
SMOL	3.07	1.89	3.06	1.26	1.11	4.42
TURA	3.27	1.95	3.27	1.39	1.19	4.67
VATG	5.00	3.41	4.96	1.92	1.76	7.38
VIDI	3.23	1.76	3.19	1.35	1.17	4.53
VVUA	3.24	1.94	3.18	1.34	1.15	4.61
ZARA	3.08	1.79	2.94	1.22	1.11	4.32
ZVEZ	3.33	1.96	3.29	1.36	1.21	4.73

Приложение 2

Скорости на точките от Основния клас в ETRS89 (релативни спрямо Евразия)

Точка	E mm/y	N mm/y	σ_E mm/y	σ_N mm/y	r_{EN}	Up mm/y	σ_{Up} mm/y
0022	1.28	-1.11	0.15	0.15	0.263	-0.66	0.45
0085	-1.19	0.26	1.26	1.45	0.014	-10.94	5.07
0131	1.46	-2.08	0.14	0.14	0.313	2.67	0.41
0209	0.06	1.13	0.14	0.14	0.363	-1.18	0.40
0229	1.63	-2.12	0.14	0.14	0.345	0.53	0.40
0250	0.50	-1.56	0.22	0.28	0.183	1.09	0.86
0807	0.77	-2.61	0.14	0.12	0.301	-5.55	0.39
0933	0.16	-1.79	0.14	0.13	0.254	0.95	0.42
0991	0.92	-2.36	0.15	0.14	0.201	-0.80	0.48
1173	0.45	-1.10	0.15	0.15	0.360	0.31	0.45
1262	0.55	-1.21	0.15	0.16	0.338	-0.02	0.46
1432	0.69	-1.08	0.13	0.13	0.311	-0.74	0.40
1576	1.01	-2.07	0.14	0.15	0.199	-1.67	0.48
1683	0.21	-5.19	0.24	0.26	0.086	0.36	0.93
1914	0.62	-1.31	0.13	0.14	0.267	0.39	0.41
1965	0.62	-1.94	0.15	0.17	0.164	-0.16	0.53
2290	1.21	-1.25	0.14	0.16	0.126	1.72	0.51
3180	-0.05	-1.39	0.12	0.15	0.456	0.13	0.36
3220	0.28	0.07	0.15	0.17	0.300	-0.40	0.49
3334	0.56	0.02	0.11	0.14	0.393	-0.32	0.36
3416	0.12	-1.69	0.17	0.21	0.133	-0.24	0.65
3583	-0.10	-1.11	0.11	0.13	0.448	-0.83	0.33
3810	0.03	-0.92	0.14	0.17	0.305	-0.74	0.47
3958	0.40	-0.66	0.16	0.18	0.253	-0.32	0.55
4038	0.07	-0.96	0.14	0.16	0.331	0.06	0.46
4248	0.32	-1.87	0.16	0.18	0.326	0.97	0.51
4446	0.32	-1.08	0.16	0.18	0.332	0.98	0.52
4570	0.21	-0.09	0.16	0.17	0.273	1.73	0.53
4808	0.44	-0.96	0.13	0.14	0.279	0.08	0.41
4938	-0.03	-0.96	0.15	0.17	0.228	0.29	0.51
5121	-0.14	-1.39	0.14	0.17	0.221	0.43	0.51
5173	-0.14	-1.10	0.14	0.16	0.267	-0.88	0.47
5343	0.09	-1.51	0.13	0.14	0.360	-0.07	0.39
5612	0.21	-1.33	0.13	0.14	0.310	-0.47	0.41
5697	-0.03	-2.13	0.15	0.17	0.223	-1.32	0.52
6424	0.71	-2.47	0.15	0.17	0.348	-1.23	0.55
6676	-0.51	-0.55	0.14	0.17	0.359	-0.79	0.46
7470	-0.17	-0.40	0.15	0.20	0.201	1.19	0.58
7901	-0.43	0.32	0.13	0.14	0.241	-1.02	0.43
7999	-0.30	-0.99	0.14	0.17	0.300	-0.66	0.47
8112	1.40	-0.81	0.16	0.18	0.342	2.15	0.51
8304	0.59	-1.50	0.16	0.17	0.112	-0.82	0.57

Точка	E mm/y	N mm/y	σ_E mm/y	σ_N mm/y	r_{EN}	Up mm/y	σ_{Up} mm/y
8309	0.46	-1.64	0.14	0.16	0.318	-1.40	0.45
8317	-0.45	-0.79	0.12	0.12	0.370	-0.28	0.34
8327	0.07	-0.39	0.11	0.12	0.471	-0.53	0.31
8333	-0.07	-1.62	0.15	0.15	0.339	1.05	0.46
8334	0.63	-2.12	0.15	0.15	0.360	0.02	0.43
8342	0.40	-1.41	0.15	0.17	0.151	0.36	0.54
8349	0.24	-0.70	0.15	0.15	0.194	-1.50	0.51
8354	0.18	-0.99	0.15	0.18	0.304	-0.60	0.50
8357	0.29	-0.58	0.15	0.17	0.272	-2.24	0.50
8362	-0.08	-1.27	0.13	0.15	0.331	0.15	0.42
8371	0.62	-0.31	0.15	0.17	0.358	-4.09	0.47
8375	-0.30	-1.84	0.15	0.17	0.323	-0.36	0.51
8384	0.06	-2.50	0.15	0.15	0.214	-0.25	0.47
8385	1.12	-2.48	0.14	0.13	0.319	0.43	0.41
8386	0.65	-2.30	0.17	0.17	0.182	0.92	0.55
8398	0.21	-2.20	0.15	0.14	0.327	0.18	0.43
8400	-0.06	-2.89	0.14	0.12	0.380	0.57	0.36
8417	0.39	-2.54	0.14	0.13	0.311	-0.39	0.42
8418	0.96	-2.87	0.14	0.15	0.191	0.26	0.47
8423	0.52	-3.44	0.14	0.13	0.303	0.11	0.41
8428	-0.14	-0.28	0.15	0.17	0.305	-0.84	0.41
8430	0.51	-3.58	0.77	0.87	-0.018	2.16	3.00
8431	2.34	-0.54	0.89	0.99	-0.009	5.71	3.54
9011	0.60	-2.14	0.14	0.15	0.199	-0.13	0.47
9012	0.28	-1.96	0.12	0.11	0.331	-0.37	0.32
9030	0.11	-1.98	0.13	0.13	0.336	1.61	0.40
9078	-0.16	-1.18	0.11	0.14	0.378	0.43	0.36
9080	2.11	-0.29	0.15	0.18	0.232	-1.23	0.52
9090	-0.67	-1.03	0.14	0.17	0.327	0.26	0.47
9257	-0.08	-1.43	0.13	0.14	0.243	1.59	0.42
9265	-0.35	-0.90	0.17	0.18	0.303	-0.41	0.43
9355	-0.68	-1.98	0.15	0.16	0.325	2.96	0.46
9373	0.88	0.29	0.10	0.12	0.468	-9.04	0.29
9375	0.07	-1.09	0.15	0.18	0.227	-0.23	0.54
9391	0.58	-1.38	0.21	0.24	0.143	0.01	0.79
9403	0.72	-0.64	0.16	0.19	0.212	-2.62	0.59
9470	-0.35	-1.35	0.13	0.16	0.363	-1.40	0.42
9475	0.31	-1.94	0.14	0.15	0.142	2.45	0.49
9477	-0.37	-1.00	0.12	0.13	0.268	-0.86	0.38
9482	0.92	-3.26	0.20	0.20	0.120	-0.62	0.69
ASEN	-0.09	-2.26	0.14	0.14	0.346	0.90	0.40
BERK	0.45	-1.49	0.10	0.09	0.443	0.78	0.26
BRAG	0.38	-1.38	0.15	0.16	0.180	1.03	0.52
BURG	0.98	-1.61	0.12	0.13	0.527	0.48	0.33
BUTG	-0.58	-0.87	0.21	0.21	0.163	-0.06	0.70
GABR	0.19	-1.46	0.11	0.11	0.502	0.18	0.28
GULI	0.32	-1.08	0.13	0.14	0.270	-0.60	0.41

Точка	E mm/y	N mm/y	σ_E mm/y	σ_N mm/y	r_{EN}	Up mm/y	σ_{Up} mm/y
HARM	-0.40	-1.33	0.13	0.13	0.456	0.69	0.35
KAVA	0.32	-1.37	0.11	0.14	0.547	-1.21	0.29
KERM	0.41	-1.33	0.12	0.12	0.515	0.09	0.31
KIRK	0.82	-2.84	0.16	0.16	0.310	0.45	0.48
KOVA	0.37	-1.42	0.15	0.17	0.132	0.87	0.55
SAPA*	0.24	-2.30	0.18	0.20	0.105	-0.93	0.67
MADA	0.34	-2.31	0.14	0.13	0.416	1.03	0.37
MAMA	0.24	-1.33	0.17	0.19	0.254	0.99	0.59
NOVE	-0.13	-2.90	0.11	0.13	0.380	-0.45	0.33
PAKO	0.08	-1.38	0.19	0.21	0.120	0.00	0.69
PETR	0.77	-3.97	0.12	0.09	0.510	0.18	0.25
SATO	0.83	-2.65	0.15	0.14	0.338	0.05	0.46
SHUM	0.25	-1.30	0.13	0.15	0.352	0.50	0.43
SMOL	0.41	0.03	0.13	0.16	0.341	-1.31	0.44
TURA	-0.17	-1.19	0.14	0.17	0.234	0.60	0.50
VATG	0.11	-0.99	0.21	0.24	0.075	-2.81	0.82
VIDI	1.01	-1.32	0.13	0.14	0.129	-1.34	0.45
VVUA	0.38	-1.53	0.13	0.15	0.370	0.05	0.40
ZARA	0.96	-0.12	0.16	0.17	0.260	-0.95	0.51
ZVEZ	-0.46	-0.79	0.15	0.17	0.262	-1.49	0.51