



1869



ЦЕНТРАЛНА ЛАБОРАТОРИЯ ПО ВИСША ГЕОДЕЗИЯ
ВОЕННОТОПОГРАФСКА СЛУЖБА

ДЪРЖАВНА GPS МРЕЖА

ОБРАБОТКА НА НАБЛЮДЕНИЯТА ОТ

ОСНОВНИЯ КЛАС

София
Септември 2005

Иван Георгиев¹, Пламен Гъбенски²
Георги Гладков², Тошко Ташков²
Димитър Димитров¹

ДЪРЖАВНА GPS МРЕЖА

ОБРАБОТКА НА НАБЛЮДЕНИЯТА ОТ ОСНОВНИЯ КЛАС

¹ Централна лаборатория по висша геодезия при Българска академия на науките

² Военнотопографска служба на Българската армия

СЪДЪРЖАНИЕ

1. Въведение.....	5
2. Държавна GPS мрежа.....	6
2.1. Предназначение и структура на Държавната GPS мрежа.....	6
2.2. Проектиране на точките от основната GPS мрежа.....	6
2.3. Номерация на точките.....	8
2.4. Разузнаване и изграждане на Държавната GPS мрежа	8
3. Координатни системи	11
3.1. Земна координатна система (ЗКС) (TRS).....	11
3.2. Основни концепции за Земната координатна система.....	11
3.2.1. Идеална Земна координатна система (iTRS)	11
3.2.2. Конвенционална Земна координатна система (CTRS).....	11
3.2.3. Конвенционална реализация на Земна координатна система (CTRF).....	12
3.2.4. Международна Земна координатна система (ITRS).....	12
3.2.5. Реализация на координатната система ITRS – ITRF	12
3.2.6. Реализация на ITRS на Международната GNSS служба (IGS00)	13
3.3. Световна геодезическа система 84 (World Geodetic System 84 WGS84).....	13
3.4. Европейска земна координатна система ETRS89 (European Terrestrial Reference Frame 89)	13
3.4.1. Основна концепция на EUREF	14
3.4.2. Геодезическа референтна система GRS80	15
3.4.3. EUREF перманентна GPS мрежа (EPN)	17
3.4.4. Сгъстяване на EUREF	19
3.4.5. Европейска унифицирана височинна мрежа EUVN (European Unified Vertical Network)	20
3.4.6. Въпросът за Европейския геоид.....	20
3.4.7. Европейска комбинирана геодезическа мрежа – проектът ECGN.....	21
3.5. ITRF2000 и ETRF2000	21
3.6. Стабилната част на Европа.....	22
3.7. Модел на скоростите за Европа – проектът DEVF	23
3.8. Трансформация между ITRS и ETRS89	25
3.9. Обработка на регионална GPS мрежа в ITRF	29
3.10. Някои изисквания към стратегията при обработка на регионални GPS мрежи	29
3.10.1. Нова стратегия от 1997 година.....	29
3.11. Общи съображения при обработката на регионални GPS мрежи.....	30
3.12. Софтуерът Bernese – основен инструмент на EUREF.....	30
3.12.1. Bernese версия 5.0.....	31
4. Измерване на основната GPS мрежа	32
5. Обработка на измерванията от Държавната GPS мрежа – основен клас, 2004 година	33
5.1. Генерална стратегия.....	33
5.2. Предварителна обработка (data preprocessing).....	33
5.3. Обработка (data processing)	34
5.4. EUREF перманентни станции, участващи в решението	36
5.5. Дневни решения (daily solutions)	37
5.5.1. Контрол и качество на дневните решения	37
5.6. Решение за кампанията 2004 година (BG 2004)	39
5.6.1 Резултати	39
5.6.1.1. Хелмертови трансформации и оценка качеството на решението	39

5.6.1.2. Повтаряемост (repeatabilities) на координатите на станциите	40
5.6.1.3. Проблемни станции.....	41
5.6.1.4. Десет и петнадесет градусови решения.....	41
5.6.2. Координати на точките в координатна система ITRF2000, епоха 2004.8	42
5.6.3. Координати на точките в координатна система ETRS89 – ETRF2000, епоха 2004.8.....	42
6. Обработка на GPS кампанията EUREF BG 1993.....	43
6.1. Измервания	43
6.2. Обработка и анализ	43
6.3. Резултати.....	43
6.3.1. Сравнение на новополученото решение за GPS кампанията EUREF BG 93 и официалното решение.....	43
6.3.2. Сравнение на официалното решение за кампанията EUREF BG 93 и решението от кампанията от 2004 година (BG 2004).....	44
7. Сравнение между резултатите от GPS кампаниите EUVN-97 и BG-2004	47
8. Получаване скоростите на EUREF точките (БУЛРЕФ) в България	50
8.1. Скорости на EUREF точките Видин, Каварна, Сапарева баня и Сатовча.....	51
8.2. Резултати.....	51
8.2.1. Абсолютни и релативни скорости	51
8.2.2. Скорости на EUREF точките в България	51
8.2.3. Проверка, контрол и надеждност на решението.....	54
9. Получаване координатите на точките от Държавната GPS мрежа за епоха 1989.0	59
10. Сравнение и контрол на резултатите от обработката на Държавната мрежа с измервания от Второстепенната GPS мрежа	60
11. Сравнение на координатите от окончателното решение с резултатите от експресната обработка	62
12. Как да бъде обработена Второкласната GPS мрежа – изводи и препоръки от обработката на Държавната мрежа основен клас.....	67
13. Кои координати да бъдат приети за използване в практиката?	68
14. Грешка, която се прави при използване на ETRS89 координатите като изходни.....	69
15. Българската геодезическа система и резултатите от обработката на Държавната GPS мрежа на България	71
Литература	73
Използвани съкращения	76
П Р И Л О Ж Е Н И Я.....	78
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Средно квадратични отклонения на IGS станциите между ITRF2000 и дневните решения получени от Хелмертова трансформация.....	79
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Сравнение на дневните решения от BG 2004 едно спрямо друго	85
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Сравнение между десет и петнадесет градусовите решения за кампанията 2004 година – средноквадратични отклонения получени от Хелмертова трансформация	96
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Годишникъ на ДГИ, 1930-1931.....	100

1. Въведение

Задачите на геодезията и картографията в национален мащаб включват: изграждането, поддържането и осигуряването на пространствени геоинформационни данни, жизнено необходими за ефективното функциониране на националната икономика, правителството и местните администрации, а така също и правния и технически контрол, закони и технически стандарти.

Без да претендираме за пълна изчерпателност, тези основни задачи на геодезията и картографията, се изпълняват чрез:

- основни геодезически измервания и мрежи – спътникови, геодезически, гравиметрични и магнитни;
- въздушна и спътникова фотограметрия;
- топографско картиране;
- регистър на собствеността – градски и поземлен кадастър;
- общи и административни карти;
- поддържане на национални геодезически и картографски бази данни.

Може да се твърди, че в основата на всички геодезически дейности лежи Основната (или Първокласна) геодезическа мрежа на държавата. Не е необходимо да се доказва, че изискванията към една Основна геодезическа мрежа са изключителни, както при проектирането и материализирането ѝ на терена, така и по отношение на измерванията и особено на тяхната обработка и по-нататъшното използване на получените резултати.

Настоящото изложение представя резултатите от обработката на Държавната GPS мрежа на Република България и представлява Отчет за извършената дейност за периода 2002 –2005 година, съгласно сключеното споразумение между МРРБ и МО - № Д-3/12.09.2002 г за изпълнение на т.2 от ПМС № 140/04.06.2001.

Измерванията на Държавната GPS мрежа са осъществени през юли – октомври 2004 година от екипи на Военнотопографската служба на Българската армия. Обработката и анализа на мрежата бе извършен през 2005 година в Централната лаборатория по висша геодезия при Българската академия на науките.

Отчетът е структуриран в 14 глави, като първата е настоящето Въведение. Втората глава дава необходимите сведения за структурата и проектирането на Държавната GPS мрежа. Третата глава дава общи сведения за използваните координатни системи, без познаването на които резултатите от обработката не биха могли да бъдат разбрани. Четвъртата глава дават кратка информация за измерванията. Всички останали глави в отчета са посветени на обработката и анализа на GPS измерванията, на резултатите и на анализа и оценката на надежността на получените координати и скорости.

Тук би следвало да се цитира в пълен текст Резолюция 2 от EUREF симпозиума в Толедо, Испания, 4-7 юни, 2003 година, която буквално гласи:

“Подкомисията на Международната асоциация по геодезия за Европа (EUREF)

Отчитайки приемането на ETRS89 като официална и унифицирана Земя координатна система (за Европа – Резолюция 1 от EUREF симпозиума във Флоренция, 28-31 май, 1990 година),

Изисква Европейските страни, които още не са приели ETRS89 като основа за рedefиниране на техните национални координатни системи, да направят това *колкото е възможно по-бързо.*”

Цитираната резолюция не се нуждае от коментар!

2. Държавна GPS мрежа

Проектът на Държавната GPS мрежа и програмата за измерването ѝ са разработени от подразделенията на Военотопографската служба на Българската армия – 26480, София и 24430, Троян и “Българска геоинформационна компания ООД”.

2.1. Предназначение и структура на Държавната GPS мрежа

Държавната GPS мрежа се създава в изпълнение на ПМС 140/04.06.2001 г, което определя Българска геодезическа система и служи за радикално обновяване на Държавната геодезическа мрежа на Република България.

Държавната GPS мрежа на страната се базира на:

- перманентните GPS станции от Перманентната европейска мрежа EPN (European Permanent Network), съответно на Международната GNSS служба IGS (International GNSS Service);
- мрежата от EUREF точки в България или “БУЛРЕФ”, като реализация на Европейската координатна система ETRS89 в България.

Държавната мрежа се състои от два класа точки, обединени в Основна (Фигура 1 и 2) и Второстепенна мрежа.

Основната мрежа се създава с цел да реализира, разпространи и поддържа на територията на страната Европейската координатна система ETRS89 с точност 10 мм по положение и 15-20 мм по височина чрез използването на GPS технологията. С цялостната реализация на Основната и Второстепенната мрежи ще се достигне пълнота, която ще позволи точките им да се използват като изходни за изграждане на местни геодезически мрежи за нуждите на практическите приложения.

Отговорностите за изграждането, измерванията, обработката, разпространението на резултатите и поддръжката на Държавната GPS мрежа са регулирани с ПМС 1/06. 01. 2005 г., за разпределение на задачите по геодезия и картография с национално значение.

2.2. Проектиране на точките от основната GPS мрежа

Основната GPS мрежа включва следните видове точки:

1. Всички точки от мрежата “БУЛРЕФ”, в това число точките от Европейската унифицирана височинна мрежа EUVN (European Unified Vertical Network) – Бургас (BUTG) и Варна (VATG);
2. Точки от съществуващата Държавна геодезическа мрежа I и II клас. Тези точки трябва да послужат за изчисление на трансформационните параметри между координатната система ETRS89 и съществуващите на територията на страната координатни системи;
3. Точки от Държавната геодезическа мрежа III и IV клас;
4. Новопостроени точки през периода 2002 – 2003 година специално за Държавната GPS мрежа;
5. Точки със специален статут (на места, където е вероятно в бъдеще да се изградят перманентни GPS станции).

В допълнение, към основната GPS мрежа, са избрани т.нар. “допълнителни” точки. Те са разделени на две подгрупи – свързващи и дублиращи точки, не са част от основната мрежа и се измерват по специална програма.

Свързващите точки са избрани в близост до точките “БУЛРЕФ” и в районите, където няма достатъчен брой точки от съществуващата ДГМ I и II клас. Предназначени са да подпомогнат изчисляването на трансформационните параметри между ETRS89 и

съществуващите в страната координатни системи. Някои от тези точки са включени в проекта на Второстепенната GPS мрежа и ще останат такива след нейното измерване. Останалите ще отпаднат и няма да бъдат поддържани в бъдеще. Точките задължително отговарят на изискванията за високоточно центриране на GPS апаратура и благоприятни условия за GPS измервания.

Дублиращите точки са избрани в близост до точките “БУЛРЕФ” и точките със специален статут. Изискванията към тях са същите като към точките от Държавната GPS мрежа. Предназначени са за евентуално заместване и възстановяване на разрушени и/или унищожени точки от “БУЛРЕФ”.

За изискванията към GPS точките вж. “Държавна GPS мрежа – Проект на мрежата и програма за измерване”, Министерство на отбраната, Военнотопографска служба, София, май 2004.

Т а б л и ц а 1. Точки от основната GPS мрежа

№	Вид на точките	Брой	Забележка
1	Точки от мрежата “БУЛРЕФ”	15	От тях 1 ДГМ II клас
2	Точки от EUVN	2	
3	Точки ДГМ I и II клас	25	
4	Точки ДГМ III и IV клас	46	
5	Нови точки	22	
6	Точки със специален статут	2	
	Всичко	112	

Т а б л и ц а 2. Допълнителни точки

№	Вид на точките	Брой	Забележка
1	Свързващи	24	
	-към “БУЛРЕФ” точки	10	
	-други	14	
2	-Дублиращи		
	- към “БУЛРЕФ” точки	14	
	- към точки със специален статут	2	
	Всичко	38	

Т а б л и ц а 3а. EUREF точки (БУЛРЕФ) в България

№	Точки от “БУЛРЕФ”			Свързващи		Дублиращи	
	Номер	Име	Клас	Номер	Клас	Номер	Клас
1	2	3	4	5	6	7	8
1	11101M002 ¹	SOFI	I	11101M002	I		
2	31	PANA	II	31	II		
3	8140	GABR		79	II	8404	
4	8141	SHUM		177	II	8405	
5	8142	KAVA		93	II	6784	IV
6	8143	HARM		148	II	8409	
7	8144	BURG		70	I	8406	

¹ Това е номерът на точка SOFI в съответствие с приетите стандарти на EUREF/IGS

Т а б л и ц а 3а. (Продължение)

1	2	3	4	5	6	7	8
8	8145	SAPA				8412	
9	8146	PETR		103	I	8411	
10	8147	SATO					
11	8148	BERK				8402	
12	8149	VIDI		7	I	8401	
13	8150	GULI		67	II	8403	
14	8151	KERM		165	II	4499	IV
15	8152	MAMA		194	II	8408	

Т а б л и ц а 3б. Точки със специален статут

№	Точка	Местоположение	Описание	Дублираща точка
1	TROY	Троян	Поделение 24430	8318
2	VVUA	Шумен	Военно училище	8363

При проектирането и избора на точките от основната GPS мрежа са съблюдавани следните основни изисквания:

1. Средно разстояние между точките 35 км;
2. Точките да са трайно стабилизирани на терена и да позволяват центриране на GPS антената или конвенционални геодезически инструменти с точност 1 мм;
3. Да са налице благоприятни условия за GPS измервания;
4. Безпрепятствен достъп с обикновено моторно превозно средство до точките или в непосредствена близост по всяко време и във всякакви условия.

2.3. Номерация на точките

Всички точки от основната GPS мрежа се идентифицират по номер и по име.

Всички точки от “БУЛРЕФ” и ДГМ имат уникални номера. За да се различават точките от ДГМ I, II, III и IV класове, чийто номера съвпадат, към номерата им се добавя съответно: 9000 към I и 9200 към II клас.

Номерата на новопостроените точки започват от 8300.

Имената на точките от “БУЛРЕФ”, в това число EUVN, са четирибуквени съкращения, изписани на латиница.

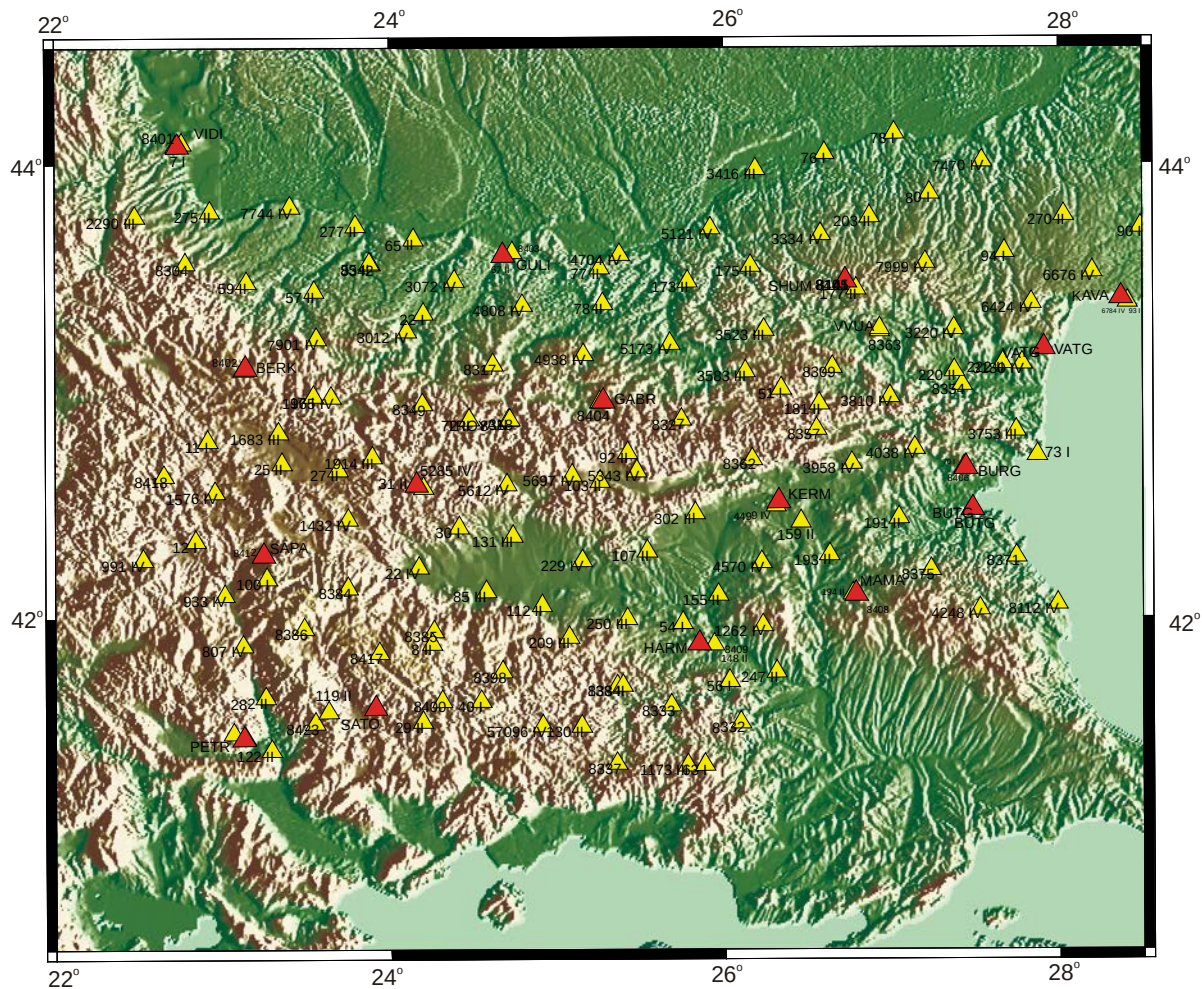
На Фигури 1 и 2 е показано разположението на точките от основния клас на Държавната GPS мрежа. С червен цвят са дадени EUREF (БУЛРЕФ) точките в България.

2.4. Разузнаване и изграждане на Държавната GPS мрежа

През 2002 – 2003 година е извършено разузнаване на точките от Държавната GPS мрежа, ремонт на съществуващи и строеж на нови точки. Разузнати са общо 802 точки от ДГМ и ГММП, ремонтирани са 219 съществуващи и са построени 123 нови точки. Постигнато е 74% съвместяване на точките от Държавната GPS мрежа със съществуващите точки от ДГМ. Изготвен е окончателен проект и програма за наблюдение на Държавната GPS мрежа, одобрен от комисия, назначена със заповед на Министъра на регионалното развитие и благоустройството - МРРБ.



Фиг.1. Държавна GPS мрежа основен клас



Фиг.2. Държавна GPS мрежа изобразена върху релефа

3. Координатни системи

Две са основните причини тук да бъдат разгледан, макар и не подробно, въпросът за дефинирането, поддържането и реализацията на съвременните координатни системи, използвани в космическата геодезия.

На първо място, обработката и анализът на GPS измерванията и получените резултати не могат да бъдат адекватно коментирани и анализирани без познаване на координатните системи и връзките между тях. По-нататъшното използване на получените в този отчет резултати е също в тясна връзка с процесите на реализацията и поддържането на координатните системи.

На второ място, съществува съществена празнина и неразбиране в българската литература (а и не само в нея) на понятията и дефинициите, свързани със съвременните координатни системи.

3.1. Земна координатна система (ЗКС) (TRS)

Дефиниция

Земната координатна система (ЗКС) (Terrestrial Reference System TRS) е пространствена координатна система, ротираща със Земята при нейното денонощно движение в пространството. В такава една координатна система положенията на точките изпитват само малки вариации във времето, предизвикани от геофизични ефекти – тектонични движения, приливни изменения, следледниково издигане.

Реализация на Земната координатна система (Terrestrial Reference Frame - TRF) е множеството от физически точки върху земната повърхност с (прецизно) определени координати и скорости (и представени в специфична координатна система – правоъгълна, геодезическа, сферична и др.). Множеството от точки е прието да се нарича реализация на Земната координатна система (РЗКС).

3.2. Основни концепции за Земната координатна система

Три са основните концепции за ЗКС:

3.2.1. Идеална Земна координатна система (iTRS)

Една “идеална” ЗКС се дефинира като 3-D пространствена геоцентрична правоъгълна координатна система, ротираща със Земята. По смисъла на Нютоновата механика, геометрията на физическото пространство е като на Евклидово афинно пространство с дименсия три. Избора на афинните координати (O,E) е: O – точка от пространството наречена начало (геоцентъра), а E е базата на векторното пространство, с приети ограничения за координата E – базисните вектори да са ортогонални и да имат еднаква дължина. Ориентацията се задава чрез едно допълнително условие.

В съвременната спътникова геодезия за “идеална” се приема геоцентричната координатна система с начало геоцентъра и екваториална ориентация (оста Z сочи към полюса).

3.2.2. Конвенционална Земна координатна система (CTRS)

С такава координатна система се обозначава множеството от всички конвенции – модели, алгоритми, константи и др., които определят еднозначно оценяването на

координатите и скоростите на точките (и ковариационната им матрица) в една идеална ЗКС.

3.2.3. Конвенционална реализация на Земна координатна система (CTRF)

Една конвенционална реализация на Земната координатна система се дефинира като множество от физически точки с (прецизно) определени координати и скорости, чрез използването на множеството конвенции за определянето им. Тази координатна система се нарича реализация на “идеалната” Земна координатна система (iTRS). Различават се два типа РЗКС – динамична и кинематична, в зависимост от това дали се прилага динамичен модел при определяне координатите на точките или не.

РЗКС е *достъпна за ползване от потребители*.

3.2.4. Международна Земна координатна система (ITRS)

Международната служба за ротация на Земята (MCP3) (International Earth Rotation Service IERS) и Секцията за Координатни системи (Terrestrial Reference Frame TRF) на Националния географски института (Institut Geographique National), Париж, са международните структури, които отговарят за дефинирането, реализацията и разпространението на Международната Земна координатна система (ITRS) в съответствие с резолюциите на Международната асоциация по геодезия (International Association of Geodesy IAG). Международната служба за ротация на Земята дефинира Конвенционалната Земна координатна система (CTRS), която е база на Международната Земна координатна система (ITRS) и нейната реализация (ITRF).

Дефиниция на ITRS

- геоцентрична;
- единица за дължина метър и временна координата в съответствие с локална геоцентрична система (в смисъла на релативистката механика);
- ориентация – начална ориентация идентична с тази на Международното бюро за време (Bureau International de L'heure BIH), чийто приемник е MCP3;
- измененията във времето на ориентацията се ограничават чрез условието ротацията по отношение на хоризонталните движения на земната кора върху цялото земно кълбо да е минимална (т.нар. no-net-rotation condition).

Дефиниция на CTRS

- геоцентрична, ротираща със Земята;
- идентична с Геоцентричната координатна система (Terrestrial Geocentric System TGC), дефинирана с резолюциите на Международната асоциация по геодезия;
- временна координата – геоцентрично координатно време (Geocentric Coordinate Time TGC);
- начало в геоцентъра на Земята, включваща океаните и атмосферата;
- минимална ротация по отношение на хоризонталните тектонски движения.

3.2.5. Реализация на координатната система ITRS – ITRF

Реализацията на Международната Земна координатна система ITRS под името ITRF_{yy}, където yy е годината на публикуване, се осъществява от MCP3. Настоящата процедура,

чрез която се получават реализациите на ITRS се състои от комбиниране на индивидуалните решения, получени от центровете за анализ на космически наблюдения на MCP3 – Радиоинтерферометрия със свръхдълги бази (Very Long Base Interferometry VLBI), Лазерна локация на Луната (Lunar Laser Ranging LLR), Лазерна локация на ИСЗ (Satellite Laser Ranging SLR), GPS и DORIS (Doppler Orbit Determination and Radiopositioning Integrated on Satellite) – координати, скорости и ковариационни матрици. Получените резултати от използването на различните наблюдателни техники са независими и позволяват да се получи и оценка на систематичните разлики помежду им.

3.2.6. Реализация на ITRS на Международната GNSS служба (IGS00)

От декември 2001 година (GPS седмица 1143) всички продукти на IGS (ефемериди, координати на полюса и т.н.) се базират върху т.нар. IGS реализация на ITRS (ITRF2000, епоха 1997.0) – IGS00. Реализацията IGS00 се базира на 54 референтни станции с високоточно определени координати и скорости в ITRF2000. Европейските станции, използвани за дефиниране на IGS00 са показани на Фигура 4.

Предпочитанието, и препоръката, на EUREF са за директно използване на ITRF, а не на IGS00 реализацията. Разликата между двете реализации към момента може да се смята за пренебрежимо малка.

3.3. Световна геодезическа система 84 (World Geodetic System 84 WGS84)

Глобалната земна координатна система WGS84 е въведена (дефинирана и реализирана) от Националната агенция за геопространствено разузнаване - National Geospatial Intelligence Agency (NGIA), бившата Национална агенция за изображения и картография – National Imaginery and Mapping Agency (NIMA), и Министерство на отбраната (Department of Defense DoD) на Съединените щати. Началната реализация на WGS84 се базира само на положения, определени чрез наблюдения на спътниковата система TRANSIT и точността ѝ е от порядъка на 1-2 метра. През следващите години точността на последователните реализации на WGS84 е значително подобрена.

Като първа стъпка към по-добро съответствие между WGS84 и ITRS през 1993 година цялата мрежа от точки на WGS84 е преизчислена по отношение на 8 GPS точки, фиксирани към техните ITRF92 координати. Тази реализация е известна като WGS84 G730 (730 GPS седмица). Съответствието между ITRF92 и WGS84 на реализацията G730 е на ниво 10 см.

По-нататъшното подобрение на координатите на следящите станции довежда през 1996 година до реализацията WGS84 - G873. Тази реализация съдържа 13 земни станции (на NGIA и Въздушните сили на САЩ), като само една от тях е в Европа. Координатите на G873 се съгласуват с тези от ITRF94 на ниво 2 см и по-малко.

Резолюция 4 от EUREF симпозиума в Хелзинки, 3-6 май, 1995 година, препоръчва използването на ITRS или ETRS89, в техните последователни реализации, вместо използването на WGS84 за всички приложения, които изискват субметрова точност.

3.4. Европейска земна координатна система ETRS89 (European Terrestrial Reference Frame 89)

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) - ETRS, базирана на GPS измервания. Тя трябва да унифицира националните референтни системи за геодезически измервания, картография, GIS и навигация в Европа.

EUREF трябва да покрива територията на Европа и да осигурява високоточна мрежа с широк спектър приложения: геодинамика, геодезия, картография, навигация и т.н. Програмата EUREF се координира от Международната асоциация по геодезия IAG, подкомисия за Европа.

Концепцията, залегнала в основата на EUREF, се състои в създаването на високоточна континентална мрежа, однородна като геометрия и точност, отнесена към геоцентъра и невяляеща се (в голяма степен) на изменения във времето. EUREF концептуално се дефинира чрез мрежа от станции, намиращи се на стабилната част на Евроазиатската континентална плоча, чиито вътрешни (intra-plate) деформации са пренебрежимо малки (за няколко годишен интервал). Епохата 1989.0 е приета за основна (начало), тъй като това е годината на първото EUREF решение.

Координатната система EUREF е приета като официална геодезическа референтна система в Европейския съюз. Благодарение на изграждането и функционирането на Перманентната мрежа European Permanent Network (EPN), координатната система на практика е четири дименсионална.

По време на генералната асамблея на Международния съюз по геодезия и геофизика във Ванкувър (1987) е създадена нова подкомисия на Международната асоциация по геодезия със задача да дефинира и въведе новата 3-D координатна система за континента Европа. През 1989 – 1990 на територията на няколко западноевропейски държави координатната система е въведена, което е (физическата) реализация на ETRS89 – ETRF89. През следващите години EUREF мрежата се разширява в централна и източна Европа.

3.4.1. Основна концепция на EUREF

Основната идея на EUREF е използването на новата технология GPS (фазовите наблюдения) за изграждането на новата координатна система.

Основните изисквания към EUREF са:

- координатната система да използва дефинициите и константите на GRS80 и да е геоцентрична;
- някои от точките на EUREF да са идентични с тези на геоцентричната ITRF.

Резолюция на EUREF, приета на срещата във Флоренция през 1990 година, (Резолюция 1), гласи: “Подкомисията за EUREF препоръчва координатната система, която да бъде приета от EUREF да съвпада с ITRS за епоха 1989.0, да е фиксирана към стабилната част на Евроазиатската плоча и да се обозначава с ETRS89”.

През 1989 Международната служба за ротация на Земята осигурява най-добрата глобална реализация на земна координатна система – ITRF89. По тази причина, подкомисията EUREF решава да базира Европейската земна координатна система European Terrestrial Reference System (ETRS), наречена ETRS89, върху ITRF89. Подбират се 22 (плюс 15) SLR и VLBI станции, чиито координати в Земната координатна система ITRF89, за епоха 1989.0, представляват първата реализация на

Европейската земна координатна система ETRS89 – ETRF89. По този начин ETRF89 представлява подмножество на ITRF89.

Поради движението на Евроазиатската континентална плоча координатите на Европейските станции се променят с около 25 мм/година. За да се избегне това значително изменение на координатите във времето, е решено, ETRS89 да се движи/ротира заедно със стабилната част на Европа, така че съотношенията между станциите да се запазват. Това е от много голямо значение за практическите приложения.

От 1989 година, всички последователни реализации на ETRS89 се изчисляват от последователните реализации на ITRF_{yy} чрез ротация на положенията до мястото им на Евроазиатската плоча за епоха 1989.0. Тези реализации са известни като ETRF91, ETRF92, ... ETRF2000. Основните станции на ITRF_{yy} в Европа са също основни ETRF_{yy} станции. Всички те са определени с милиметрова точност и са съвместими с глобалната реализация ITRF. Координатите и скоростите във всяка ITRF_{yy} могат да бъдат трансформирани в ETRF_{yy} и обратно чрез трансформационни формули. Трансформационните параметри между ITRF и ETRF се определят регулярно, с всяка тяхна (на ITRF) реализация. Трите трансляционни компонента съответстват на трансляциите между ITRF89 и ETRF89 за епоха 1989.0, а трите ротационни изменения са точно компонентите на ъгловата скорост на Евроазиатската плоча в реализациите ITRF_{yy}. Самите трансформационни параметри се променят бавно и измененията им се определят също регулярно, с всяка нова реализация на ITRS.

Проведените основни GPS кампании, след като проектът EUREF стартира през 1989 година с измервания в западна Европа и Гърция, със съответния брой точки, са:

- октомври/ноември 1991, Чехословакия и Унгария – 10;
- юли 1992, Полша – 10;
- август/септември 1992, Естония, Литва и Латвия – 24;
- октомври 1992, България – 7;
- май/юни 1994, Хърватия и Словения – 18;
- септември 1994, Румъния – 7;
- юни 1995, Украйна – 15;
- август 1996, Македония – 7;
- май 1999, Молдова – 5.

Точността на определените координати е от порядъка на 1-2 см в началото и достига през последните години до няколко милиметра за координатите на перманентните станции. EUREF е най-значителната геодезическа континентална координатна система от гледна точка на плътност, точност, научни и практически постижения.

3.4.2. Геодезическа референтна система GRS80

Дефиниция

Геодезическата референтна система GRS80 (Geodetic Reference System) се характеризира с:

А. Базира се върху теорията на геоцентричния еквипотенциален елипсоид, дефиниран чрез следните **конвенционални** константи:

- екваториален радиус на Земята: $a = 6378\,137\text{ m}$,
- геоцентрична гравитационна константа на Земята (включително атмосферата): $GM = 3986\,005 \times 10^8\text{ m}^3\text{ s}^{-2}$,

- динамичен фактор на Земята (зоналната хармоника J_2 , с изключен перманентен прилив : $J_2 = 108\,263 \times 10^{-8}$,
- ъглова скорост на Земята : $\omega = 7292 \times 10^{-11} \text{ rad.s}^{-1}$

В. Използване на същите формули за изчисление, приети на XV-та Генерална асамблея на IUGG в Москва, 1971 година и публикувани от IAG, за Геодезическа референтна система 1967;

С. Елипсоид, ориентиран по такъв начин, че малката полуос да е паралелна на направлението, дефинирано с конвенционалното международно начало (Conventional International Origin) и началния меридиан да е паралелен на приетия от BIH/ERS нулев меридиан (началото на дължините).

Числени стойности

Производни геометрични константи

$$\begin{aligned} b &= 6\,356\,752.3141 \\ e^2 &= 0.006\,694\,380\,022\,90 \\ f &= 0.003\,352\,810\,681\,18 \end{aligned}$$

малка полуос
е = първи ексцентрицитет
сплеснатост

Производни физически константи

$$U_0 = 6\,263\,686.0850 \times 10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$$

нормален потенциал на елипсоида

$$M = 0.003\,449\,786\,003\,08$$

$$m = \frac{\omega^2 a^2 b}{GM}$$

$$\gamma_e = 9.780\,326\,7715 \text{ m.s}^{-2}$$

нормална гравитация на екватора

$$\gamma_p = 9.832\,186\,3685 \text{ m.s}^{-2}$$

нормална гравитация на полюса

$$F^* = 0.005\,302\,440\,112$$

$$f^* = \frac{\gamma_p - \gamma_e}{\gamma_e}$$

$$K = 0.001\,931\,851\,353$$

$$k = \frac{b \gamma_e - a \gamma_e}{a \gamma_e}$$

Гравитационна формула 1980

Затворена формула на Сомилияна (Somigliana) за нормалната гравитация:

$$(1) \quad \gamma_0 = \frac{a \gamma_e \cos^2 \phi + b \gamma_p \sin^2 \phi}{\sqrt{a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi}}.$$

За изчисления формулата:

$$(2) \quad \gamma_0 = \gamma_e \frac{1 + k \sin^2 \phi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}$$

със стойности на γ_e , k , и e^2 е по-удобна. ϕ обозначава географската ширина.

Развитието в ред

$$(3) \quad \gamma_0 = \gamma_e \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} a_{2n} \sin^{2n} \phi \right)$$

$$\text{със} \quad a_2 = \frac{1}{2} e^2 + k$$

$$a_6 = \frac{5}{16} e^6 + \frac{3}{8} e^4 k$$

$$a_4 = \frac{3}{8}e^4 + \frac{1}{2}e^2k$$

получава вида

$$a_8 = \frac{35}{128}e^8 + \frac{5}{16}e^6k$$

$$(4) \quad \gamma_0 = \gamma_e (1 + 0.005\,279\,0414 \sin^2 \phi + 0.000\,023\,2718 \sin^4 \phi + 0.000\,000\,1262 \sin^6 \phi + 0.000\,000\,0007 \sin^8 \phi)$$

и има относителна грешка от 10^{-10} , съответстваща на $10^{-3} \mu\text{ms}^{-2} = 10^{-4} \text{mgal}$.

Конвенционалният ред

$$(5) \quad \gamma_0 = \gamma_e \left(1 + f^* \sin^2 \phi - \frac{1}{4} f_4 \sin^2 2\phi \right),$$

$$\text{със} \quad f_4 = -\frac{1}{2}f^2 + \frac{5}{2}f_m$$

получава вида:

$$(6) \quad \gamma_0 = 9.780\,327 \left(1 + 0.005\,3024 \sin^2 \phi - 0.000\,0058 \sin^2 2\phi \right) \text{m s}^{-2}.$$

Начало и ориентация

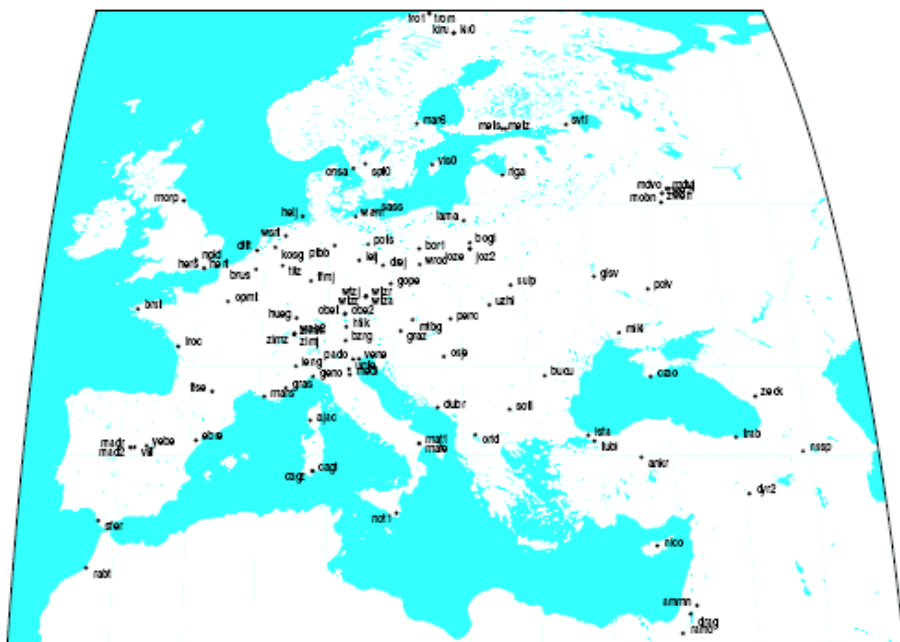
IUGG Резолюцията № 7 от Генералната асамблея в Москва априори постановява, че Геодезическата референтна система 1980 е геоцентрична, т.е., че нейното начало е в масовия център на Земята. Така центърът на елипсоида съвпада с геоцентъра.

Ориентацията на системата е дефинирана по следния начин: ротационната ос на елипсоида е с направлението на конвенционалното международно начало (Conventional International Origin) за движение на полюса (CIO), и нулевият меридиан е дефиниран от Bureau International de l'Heure (BIH).

На тази дефиниция съответства правоъгълна пространствена координатна система XYZ, чието начало е в геоцентъра, оста Z-е ротационната ос на ротационния елипсоид, дефинирана от направлението на CIO, а оста X-минава през нулевия меридиан, съгласно дефиницията на BIH.

3.4.3. EUREF перманентна GPS мрежа (EPN)

Концепцията на перманентна GPS мрежа трябва да се разглежда като практическа реализация на една четири дименсионална мрежа. Развитието на GPS технологията и автоматизацията позволиха да се проектират и развият големи мрежи от станции, наблюдаващи непрекъснато и чиито координати (и скорости) се определят и обновяват непрекъснато. Един такъв пример е Международната GNSS служба. Към момента повече от 300 перманентни станции, разположени върху цялото земно кълбо, работят в рамките на IGS.



Фиг.3. EUREF перманентни станции



Фиг.4. EUREF перманентни станции, задаващи координатната система IGS00 на територията на Европа

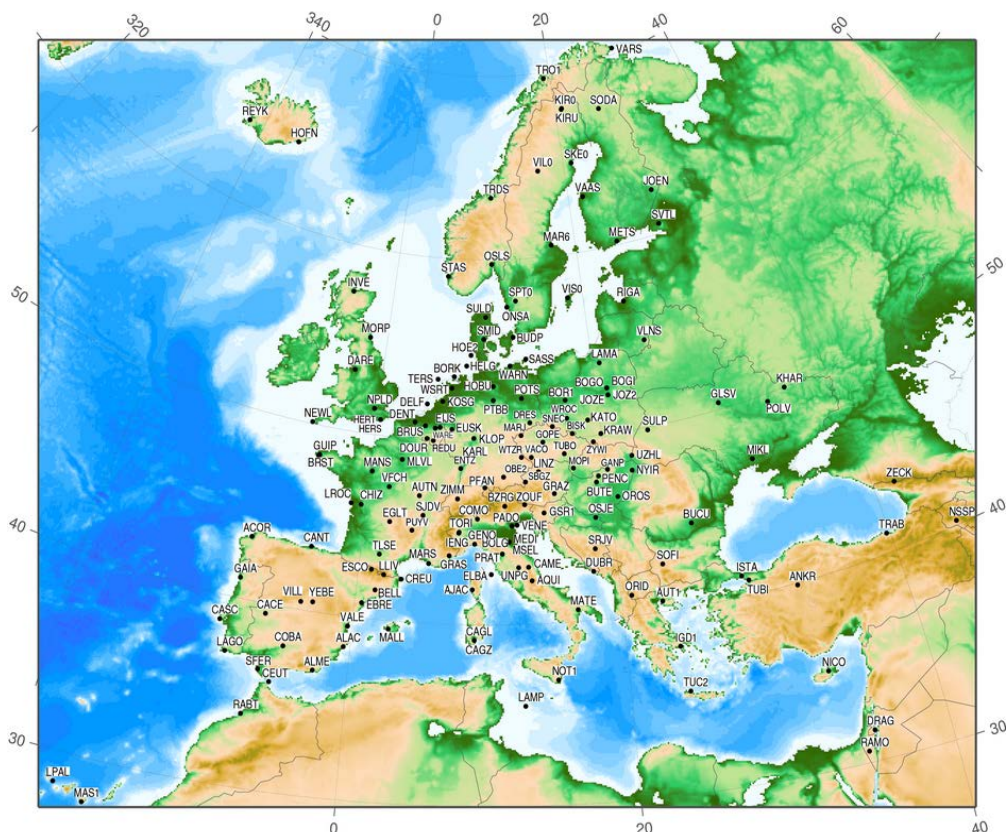
От континентален мащаб е EUREF перманентната мрежа (EUREF Permanent Network - EPN). Проектът EPN започва своята дейност през 1995 година и към момента се състои от повече от 150 перманентни станции в 32 европейски страни.

От своя страна EUREF е регионално съгъстяване за Европа на Международната GNSS служба, и по-точно, на нейната глобална мрежа (Резолюция 3 на EUREF симпозиума в Хелзинки, 3-6 май, 1995 година).

От 1997 година IERS включва EUREF перманентната мрежа EPN при всяка от последващите реализации на ITRS (Резолюция 1 от EUREF симпозиума в София, 4-7 юни, 1997 година).

3.4.4. Съгъстяване на EUREF

EUREF мрежата дефинира координатната система в континентален мащаб. Това обаче не е достатъчно за всекидневните приложения в национален мащаб. По тази причина повечето от държавите в Европа са проектирали и въвели “съгъстяване” на мрежата EUREF на техните територии като национални мрежи. Този подход е приложен за първи път в Германия през 1991 година. Целта на една такава “съгъстена” национална мрежа е да установи връзка между континенталната EUREF мрежа и конвенционалната геодезическа мрежа на съответната страна.



Фиг.5. Разположение на EUREF перманентните станции на територията на Европа

През 1999 година, в Marne-la-Vallee, Франция, на симпозиума “Spatial Reference Workshop” са разгледани възможностите за създаване на Европейска референтна система за пространствена информация. От проведените разисквания става ясно, че ETRS89 е приета от повечето европейски агенции, гражданската авиация, индустрията и т.н. и е официална координатна система в много държави от Европейския съюз (ЕС). Това означава, че ETRS89 е “де факто” стандарт за страните членки на ЕС.

3.4.5. Европейска унифицирана височинна мрежа EUVN (European Unified Vertical Network)

GPS технологията позволява получаване на 3-D координати, въпреки че вертикалната компонента е по-трудна за определяне и по-неточна от хоризонталните. Практическите и икономически нужди на страните в Европа изискват унификация на височинните системи в рамките на целия континент. В тази ситуация комисията EUREF решава през 1995 година да започне Европейски проект за установяване на Европейска унифицирана височинна система EUVN.

Принципната задача на EUVN е създаване на хомогенна и унифицирана височинна система в континентална Европа. Разликите между националните височинни системи, отнесени към различни морски нива, трябва да бъдат изведени. Следователно, разликите между морските нива от Черно море, около Европа до Бяло море трябва да бъдат определени. Мрежата EUVN има за цел също да осигури координатната система за кинематични изследвания на вертикалните движения и разделянето на измененията на морското ниво и движенията на земната кора по бреговата ивица.

Според Резолюция 2 от EUREF симпозиума в Хелзинки, 3-6 май, 1995 година, “EUVN се дефинира като част от EUREF мрежата плюс точки, съвпадащи с основни нивелачни репери и мареографни станции”. Мрежата EUVN се състои от: перманентни EPN станции; GPS станции, разположени в близост до мареографните станции; GPS точки, съвпадащи с възлови репери от прецизните национални нивелачни мрежи.

Първата GPS кампания в рамките на проекта EUVN се осъществява през май 21-29, 1997 година, и обхваща 220 станции в 32 страни. Всички тези точки получават три измерени координати в ETRS89. Средната точност на определените височини в EUVN е около 0.5 см. По-нататъшните усилия на GPS базираната EUVN ще бъдат (и в момента са) насочени към комбинирането ѝ с класическите нивелачни и гравиметрични данни с оглед да бъде създадена унифицирана Европейска вертикална система EVS (European Vertical System).

3.4.6. Въпросът за Европейския геоид

Тъй като въпросът за Европейския геоид, в неразривна връзка с използваните модели на геоида на национално ниво, е неотделим от въпросите на Европейската координатна система, тук ще бъде приведена почти дословно Резолюция 4 от EUREF симпозиума в Дубровник, 16-18 май, 2001 година:

“Подкомисията EUREF

Оценявайки:

- Европейската вертикална референтна мрежа (European Vertical GPS reference network EUVN) и определените елипсоидни GPS височини и нивелачните връзки с Унифицираната Европейска нивелачна мрежа (UELN),

- Дефиницията на Европейската вертикална референтна система (European Vertical Reference System (EVRS) и нейната първа реализация UELN95/98, наречена EVRF2000,

Вземайки предвид:

- Наличието на голям брой регионални и локални модели на геоида в Европа,
- Неотложната нужда за целите на навигацията от референтна височинна повърхнина,

Възлага на Техническата работна група (TWG) на EUREF и Европейската подкомисия на IAG IGGG (International Gravity and Geoid Commission) да предприеме всички необходими стъпки за създаването на Европейски модел на геоида с дециметрова точност, съгласуван с ETRS89 и EVRS.”

Всички Национални агенции се насърчават да изпращат своите данни, допринасяйки за бъдещия Европейски модел на геоида.

3.4.7. Европейска комбинирана геодезическа мрежа – проектът ECGN

През 2002 година EUREF и IGGC подкомисиите за Европа предлагат разработването на Интегрирана геодезическа мрежа ECGN за Европа. Основна задача е осигуряване на дългосрочна стабилност и надеждност на земната координатна система с точност от порядъка на 10^{-9} в глобален и регионален мащаб, и изграждане на модел за взаимодействието между различните зависими от времето влияния на Земята като система и свързаните с нея наблюдения. ECGN ще интегрира пространствената и височинната система в Земното гравитационно поле. Това е в съгласие с планирания от Международната асоциация по геодезия проект за Интегрирана глобална геодезическа система за наблюдение IGGOS. Във фундаментални геодезически станции проектът ECGN ще установи една Европейска мрежа за пространствени/спътникови наблюдения (GPS, GLONASS), прецизно нивелирани възлови репери и мареографни станции, заедно с гравиметрични наблюдения, както и друга спомагателна информация (например метеорологична). Работна група на ECGN е формирана през януари 2003 година и проектът е стартирал.

В тази връзка е и приетата Резолюция 3 на EUREF симпозиума в Толедо, 4-7 юни, 2003 година. Тя касае всички Национални геодезически и/или картографски агенции в Европа, в голяма степен и Българската, затова е целесъобразно да се цитира пълният ѝ текст:

Подкомисията за Европа

Оценявайки важността на пан-Европейската координатна система ETRS89 и EUVN като гръбнак за Геодезическа референтна система и като част от Европейската пространствена инфраструктура,

Отбелязвайки нуждата от трансформация на географската информация, базирана на националните координатни системи в пан-Европейската координатна система с най-високата възможна точност,

Подкрепя предложението за попълване на настоящата EUREF/EuroGeographics информационна система за Европейската координатна система с информация за височинните системи, параметрите на гравитационното поле и трансформациите, за да бъде реализирана Геодезическа информационна и обслужваща система (за Европа) и

Настоява Националните агенции

- да осигурят геодезическата информационна и обслужваща система с необходимата информация,
- да позволят информацията да бъде направена публично достояние.

3.5. ITRF2000 и ETRF2000

Реализацията на ITRS – ITRF2000 се смята за изцяло подобрена координатна система като мрежа, качество, надеждност и точност. Индивидуалните решения, от които ITRF2000 е получена чрез комбинация, са свободни от всякакви ограничения и

директно отразяват актуалното качество на космическите наблюдения при оценяването на координатите и скоростите. Началото на ITRF2000 е в масовия център на Земята, определен от лазерна локация на ИСЗ, а мащабът е изведен от лазерна локация на ИСЗ и свръхдългобазисна интерферометрия. Ориентацията съвпада с тази на ITRF97, а измененията в ориентацията се ограничават от тектонския модел NUVEL-1A (минимално изменение на ориентацията върху цялата земна повърхност).

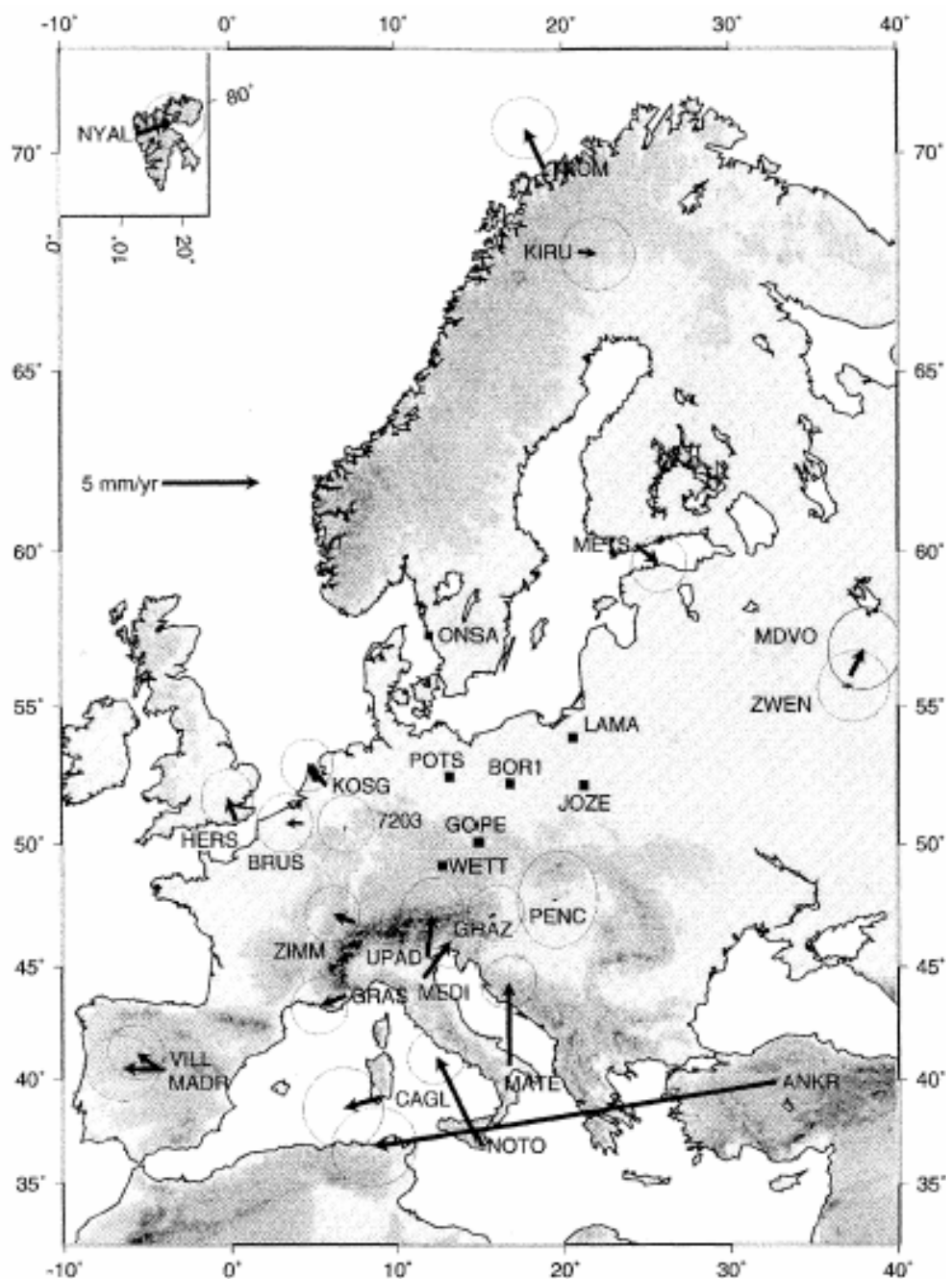
Най-важният резултат от реализацията на ITRS – ITRF2000, свързан с Европейската координатна система ETRS89 и нейните реализации (включително последната ETRF2000) е този, свързан с ротационния полюс на Евроазиатската континентална плоча, от своя страна неразривно свързан с дефиницията на EUREF. Въпреки, че върху измененията в ориентацията на ITRF2000 (orientation rate) са наложени ограниченията на модела NUVEL-1A (т.е. този модел е използван за нейната дефиниция), остатъчните разлики между модела NUVEL и получените ITRF2000 скорости са значителни, което означава, че модела NUVEL не може да обясни (апроксимира) напълно съвременните движения в Европа, така както са получени според ITRF2000. Несъвпадението между ITRF2000 и модела NUVEL-1A е средно 3 мм/год.

По тази причина е изведен нов ротационен полюс за Евроазиатската плоча, определен от ITRF2000 скоростите на 19 европейски високоточни станции. Новият ротационен полюс е приет от EUREF през 2001 година с Резолюция 2 от EUREF симпозиума в Дубровник, 16-18 май, 2001 година: “Препоръчва NUVEL-1A-NNR ротационната скорост да бъде заменена с тази, определена от ITRF2000 в трансформационните формули между ETRS89 и ITRS”.

3.6. Стабилната част на Европа

На Фигури 6 и 7 се показани скоростите на европейските станции, като от тях е извадено движението им според ротационния полюс, определен от Nocquet et al., (Nocquet et al., 1997). Авторите определят 29 станции, които удовлетворяват условието за “стабилност” (без вътрешно-плочови деформации). На практика това означава, че остатъчните скорости са по-малки от 0.8 мм/год и среднотежестната грешка на остатъчните скорости е по-малка от 0.4 мм/год. Районът обхваща територия от Централна Европа до най-западната ѝ част, включително Испания. Авторите показват също, че скоростите в координатна система, дефинирана от тези 29 станции, се различават значително от нула в района на Иберийския полуостров, в Италия, в Алпите и на Балканите. Това означава, че те не могат да бъдат приети за незначителни.

За практическите приложения е наложително използването на фиксирани координати за определена епоха. По тази причина, получените в ITRF координати се трансформират в ETRS89 за централната епоха (средата) на наблюдателната кампания. След това, използвайки ротационния полюс (отчитащ “твърдото” движение на точките) те се трансформират в желаната референтна епоха. Движението на точките, според ротационния полюс, отчита “твърдото” движение на цялата европейска част на Евразия. Съществуват обаче и други движения, главно хоризонтални, в тектонски активните райони, т.нар. вътрешно-плочови деформации (intra-plate deformation). Следователно, окончателните координати трябва да бъдат коригирани и заради тези движения. Това изисква познаване на тридименсионалните скорости на земната кора.



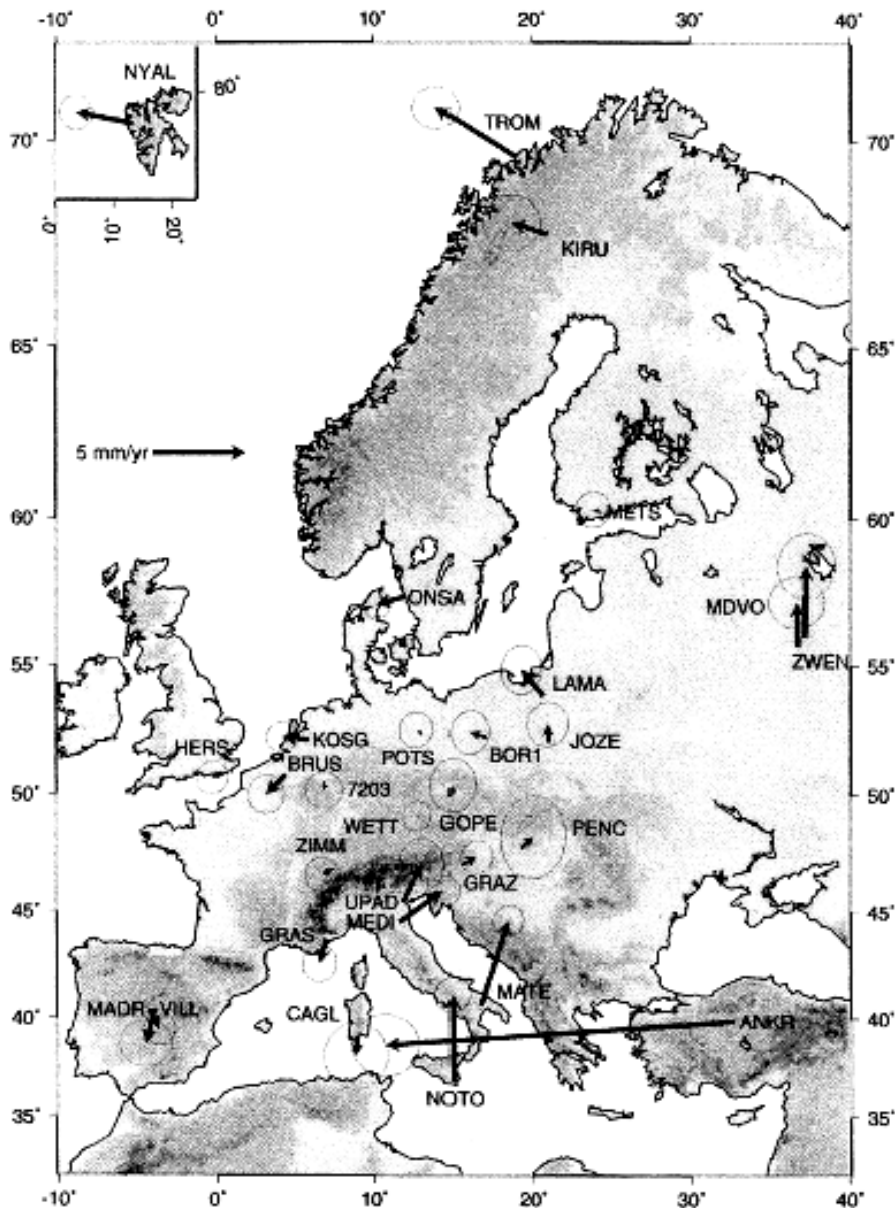
Фиг.6. ITRF97 скорости в координатна система, дефинирана от модела NUVEL -1A (Nocquet et al., 2001)

3.7. Модел на скоростите за Европа – проектът DEVF

Координатната система ETRS89 се смята за Европейската координатна система за всички геодезически приложения. По тази причина, работната група на EUREF е инициатор на проект за получаване на европейско поле на скоростите - Dense European

Velocity Field (DEVF), чиято основна цел е да осигури дългосрочното поддържане на ETRS89. Проектът DEVF ще позволи по-скоро кинематична, отколкото статична реализация на ETRS89 и по този начин ще се осигури по точно позициониране.

По дефиниция ETRS89 и нейните реализации се движат със стабилната част на Евроазиатската плоча. Взимайки пред вид, че ETRS89 трябва да покрие целия Европейски континент, включително и т.нар. деформационни зони, всички (видове) деформации на земната кора трябва да бъдат взети предвид при реализирането на DEVF. Проектът се развива непрекъснато с подобряването, съгъстяването и разширяването на EUREF.



Фиг.7. ITRF97 скорости спрямо априори стабилен Европейски полюс (Nocquet et al., 2001)



Фиг.8. ETRS89 скорости на перманентните EUREF станции спрямо стабилната част на Европа (Altamimi and Legrand, 2004)

3.8. Трансформация между ITRS и ETRS89

Одобрената от работната група на EUREF процедура за трансформация между ITRF и ETRF се състои от три стъпки (Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign, Claude Boucher, Zuheir Altamimi, Version 5, 12-04-2001):

1. Реализацията на ITRS – ITRF_{yy} се състои от
 - положения в епоха t_0 , $X^I_{yy}(t_0)$ и
 - скорости $\dot{X}^I_{yy}$

така, че положението на точка в епоха t се изчислява:

$$(7) \quad X^I_{yy}(t) = X^I_{yy}(t_0) + \dot{X}^I_{yy}(t - t_0);$$

2. Моделът на трансформация между две системи е седем-параметрична трансформация, като трансформационните параметри се считат линейни във времето;
3. Приема се, че всяка нова реализация, одобрена от Работната група, има минимално систематично изместване спрямо ETRF89 и притежава собствен мащаб особено, ако е значително по-точна от ITRF89.

Както беше споменато, от всяка реализация на ITRS, под името ITRF_{yy}, се получава съответната ETRS, под името ETRF_{yy}. Получаването на координатите на точки, получени от дадена GPS кампания в епоха t_c , се извършва по следния начин:

1. GPS измерванията се обработват в ITRS, съответната реализация ITRF_{yy} за епохата t_c .

За тази цел се използва последната реализация ITRF_{yy}. Координатите на станциите с известни координати в ITRF_{yy} (главно перманентните) се фиксират (или получават малки средни квадратни грешки):

$$(8) \quad X^I_{yy}(t_c) = X^I_{yy}(t_0) + \dot{X}^I_{yy}(t_c - t_0).$$

Получените резултати са отнесени в координатната система ITRS, ITRF_{yy} за епоха t_c .

2. Получаване на координатите в ETRS89 за епоха t_c :

$$(9) \quad X^E_{yy}(t_c) = X^I_{yy}(t_c) + T_{yy} + \begin{pmatrix} 0 & -\dot{R}^3_{yy} & \dot{R}^2_{yy} \\ \dot{R}^3_{yy} & 0 & -\dot{R}^1_{yy} \\ -\dot{R}^2_{yy} & \dot{R}^1_{yy} & 0 \end{pmatrix} X^I_{yy}(t_c) \cdot (t_c - 1989.0),$$

където T_{yy} са трансляциите между двете системи (Таблица 6), а $\dot{R}_{yy}$ са точно компонентите на ъгловата скорост на Евразийската плоча. В Таблица 7 са дадени оценки на ъгловата скорост.

3. Получаване на координатите за епоха 89.0:

$$(10) \quad X^E(1989.0) = X^E(t_c) + \dot{X}^E(1989.0 - t_c),$$

$\dot{X}^E$ са скоростите на точката в ETRS89. За стабилната част на Европа те се приемат равни на нула.

Възможен е и друг подход: координатите да се трансформират първо в ITRF_{yy} за епоха t_0 (при известни скорости в ITRF), и след това да се получат ETRF_{yy} за епоха 1989.0. Възможните варианти за трансформиране са показани схематично на Фигура 9, а параметрите и тяхното изменение в Таблицы 4, 5, 6 и 7.

Т а б л и ц а 4. Трансформационни параметри от ITRF_{yy} в ITRF89

From	T1 [cm]	T2 [cm]	T3 [cm]	D 10 ⁻⁸	R1 [mas]	R2 [mas]	R3 [mas]	I ₀ [yr]	Ref. IERS TN
ITRF90	0.5	2.4	-3.8	0.34	0.0	0.0	0.0	88.0	9
ITRF91	0.6	2.0	-5.4	0.37	0.0	0.0	0.0	88.0	12
ITRF92	1.7	3.4	-6.0	0.51	0.0	0.0	0.0	88.0	15
ITRF93	1.9	4.1	-5.3	0.39	0.39	-0.80	0.96	88.0	18
ITRF94	2.3	3.6	-6.8	0.43	0.0	0.0	0.0	88.0	21
ITRF96	2.3	3.6	-6.8	0.43	0.0	0.0	0.0	88.0	24
ITRF97	2.3	3.6	-6.8	0.43	0.0	0.0	0.0	88.0	27
ITRF2000	2.97	4.21	-8.65	0.585	0.0	0.0	0.0	97.0	

Т а б л и ц а 5. Изменения на трансформационните параметри във времето от ITRF_{YY} в ITRF89

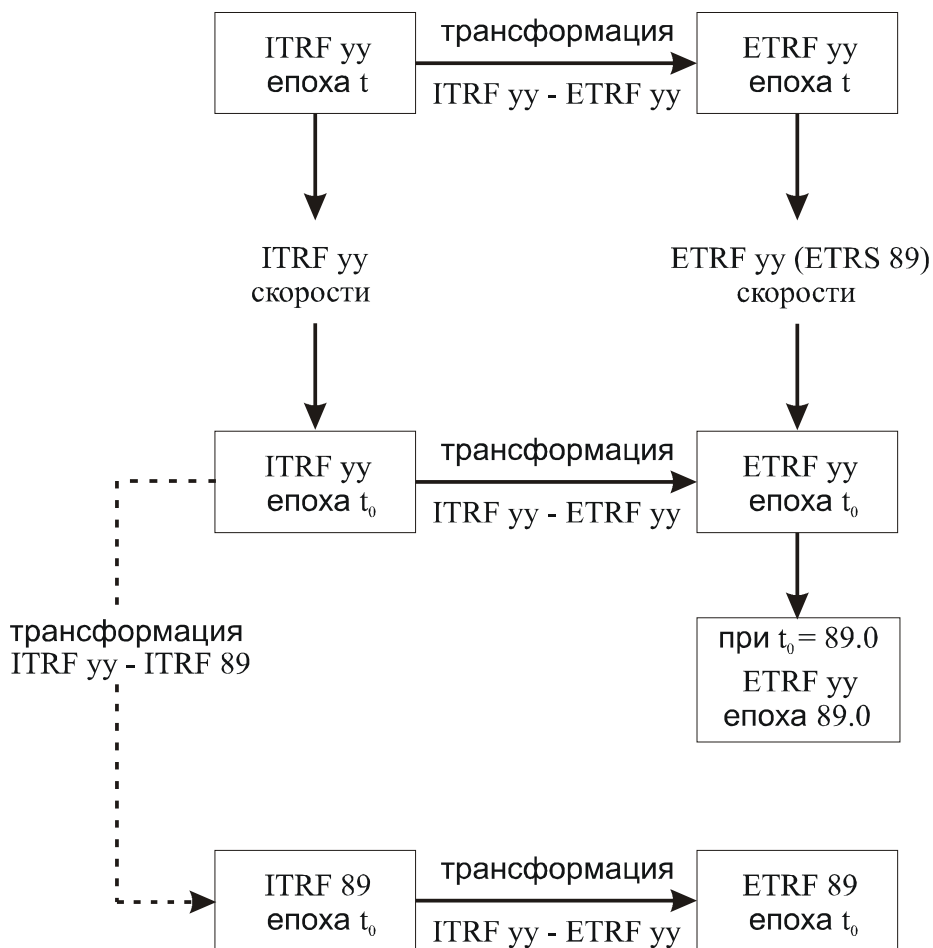
From	T1 [cm/y]	T2 [cm/y]	T3 [cm/y]	D [10 ⁻⁸ /y]	R1 [mas/y]	R2 [mas/y]	R3 [mas/y]	Ref. IERS TN
ITRF90	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	18 21 24 27
ITRF91	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	
ITRF92	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	
ITRF93	0.29	-0.04	-0.08	0.00	0.11	0.19	-0.05	
ITRF94	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	
ITRF96	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	
ITRF97	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	
ITRF2000	0.0	-0.06	-0.14	0.00	-0.001	0.004	0.019	

Т а б л и ц а 6. Оценки на трансляционните параметри T_{YY}

YY		T1 [cm]	T2 [cm]	T3 [cm]
89		0	0	0
90	A	1.9	2.8	-2.3
	B	2.6	2.5	-2.6
	±	0.7	0.7	0.7
91	A	2.1	2.5	-3.7
	B	2.3	2.1	-3.1
	±	0.7	0.7	0.7
92	A	3.8	4.0	-3.7
	B	4.3	3.4	-3.2
	±	0.8	0.8	0.8
93	A	1.9	5.3	-2.1
	B	1.0	5.9	-1.4
	±	0.5	0.5	0.6
94	A	4.1	4.1	-4.9
	B	2.9	4.3	-3.6
	±	0.4	0.5	0.5
96	A	4.1	4.1	-4.9
	B	3.9	4.1	-3.9
	±	0.4	0.4	0.4
97	A	4.1	4.1	-4.9
	B	3.4	4.4	-4.3
	±	0.4	0.4	0.4
00	A	5.4	5.1	-4.8
	B	4.2	5.1	-4.6
	±	0.4	0.4	0.4

Т а б л и ц а 7. Оценки на ротациите R_{YY}

YY	R1 [mas/y]	R2 [mas/y]	R3 [mas/y]
89	0.11	0.57	-0.71
90	0.11	0.57	-0.71
91	0.21	0.52	-0.68
92	0.21	0.52	-0.68
93	0.32	0.78	-0.67
94	0.20	0.50	-0.65
96	0.20	0.50	-0.65
97	0.20	0.50	-0.65
00	0.081	0.490	-0.792
	± 0.021	± 0.008	± 0.026



Фиг.9. Схематична илюстрация на трансформацията между ITRF_{yy} и ETRF_{yy}

3.9. Обработка на регионална GPS мрежа в ITRF

Координатите на точките от една регионална мрежа, оценявани при използване на продуктите на IGS, се получават в координатната система ITRF. За да се получат оптимални оценки на координатите (и скоростите) се препоръчва да се осигури връзка между ITRF и регионалната мрежа чрез подбор на ITRF GPS станции с високо качество. Между по-важните критерии за избор на такива станции са:

- в случай, че нито една (или малко на брой) от станциите от регионалната мрежа няма ITRF координати и скорости, известен брой ITRF станции трябва да бъдат включени при GPS обработката;
- тези станции трябва да са с продължителна серия наблюдения (поне 3 години);
- несъвпаденията между ITRF координатите и поне три различни решения, използвани за получаване на ITRF от центровете за анализ, да бъдат по малки от 5 (максимум 10) мм по положение и 2-3 мм/год за скоростите им.

Основният метод, позволяващ да се получат координатите на регионалната мрежа в ITRF, е да се фиксират (по-скоро да се използват малки средни квадратни грешки, т.нар. tightly constrained) координатите на избраните станции към ITRF стойностите им за средата на наблюдателния период и да се получи регионално решение. Ограниченията трябва да могат лесно да бъдат премахнати. Такава е, например, настоящата процедура, която се прилага от EUREF за седмичните решения – 12 ITRF станции се “ограничават” (0.0001 м) към техните ITRF2000 стойности.

3.10. Някои изисквания към стратегията при обработка на регионални GPS мрежи

3.10.1. Нова стратегия от 1997 година

От март 1997 година се прилага нова стратегия за обработка на GPS наблюденията, при рутинната обработка на EUREF мрежата, базирана на три модификации, описани по-долу:

1. Прилагане на функция на Нийл (Niell) (mapping function) изведена от Нийл (Niell, 1993) и получена от радиосондиране на атмосферата, за отчитане ефекта на тропосферната рефракция

2. Тропосферната рефракция и multipath ефекта предизвикват значително влошаване качеството на наблюденията, особено ниско над хоризонта. GPS групата на CODE¹ въвежда тежести, зависещи от височината на наблюденията (elevation dependant) – тежестна функция $w(z)$, при която грешката нараства по същия начин с увеличаване на височината както закъснението на сигнала, т.е. $w(z)=\cos^2(z)$.

3. Тропосферен градиент. На ниски височини над хоризонта азимуталните вариации на тропосферното закъснение играят важна роля. Генерализирана (mapping) функция за отчитане на този ефект е разработена и тествана в центъра CODE. Тя има вида:

$$(11) \quad \Delta r(A, z) = m_f(z) \Delta r_h + \frac{dm_f(z)}{dz} \cos A \Delta r_n + \frac{dm_f(z)}{dz} \sin A \Delta r_e,$$

където

z, A – зенитен ъгъл и азимут на спътника;

$\Delta r(z, A)$ – тропосферна корекция в направления (z, A) ;

¹ CODE Center for Orbit Determination for Europe

Δz_h – корекция заради закъснението на сигнала (zenith delay parameter);
 Δz_n , Δz_e – градиент на закъснението в посока север-юг и изток-запад съответно;
 $m_i(z)$ – (mapping) функция.

В горната формула Δz_h е конвенционалният зенитен параметър, а Δz_n , Δz_e са градиентни параметри.

Използването на зависимите от височината на спътниците тежести води до значително подобряване на определяната вертикална компонента, а оценяването на тропосферните градиенти има значителен ефект върху резултатите, подобрявайки точността на хоризонталните компоненти два пъти.

3.11. Общи съображения при обработката на регионални GPS мрежи

1. Основен въпрос е включването в обработката на регионалната мрежа на (перманентни) GPS станции с известни координати и скорости в ITRF, наричани по-долу опорни или основни (т. нар. anchor sites). Мрежите от регионален мащаб трябва да включват поне 5-6 от глобалните IGS/EUREF станции. На Фигури 3 и 5 са показани перманентните EUREF/IGS станции.

2. Обработка

При обработката на мрежи от регионален мащаб за получаване на оптимални резултати се използва т.нар. мрежов подход (network approach). Той се състои най-общо в следното:

- дефиниране на мрежата, включително и на референтните станции, с известни координати и скорости;
- изчисляване на априорните координати на всички станции за епохата на наблюденията, за перманентните станции - с използване на техните скорости;
- проверка и редактиране на наблюденията и определяне на добри априорни координати на всички нови станции;
- обработка на мрежата и фиксиране на неопределеностите;
- генериране на нормални уравнения със “слаби” априорни ограничения (loose constraints) за всички станции. Понякога се приемат априорни ограничения 0.001 м (tight constrained) за една станция, за да се получат координатите на останалите в ITRF_{yy};
- изравнените координати на перманентните станции (anchor sites) се сравняват с техните изходни ITRF_{yy} координати чрез Хелмертова трансформация. С това се прави оценка на качеството на измерванията и обработката, като тази оценка служи за независим контрол на мрежата в допълнение към получените средни квадратни грешки;
- качеството на решението/решенията се контролира чрез повтаряемостта на координатите на станциите, а систематичните ефекти могат да бъдат оценени чрез Хелмертова трансформация между дневните решения едно спрямо друго.

3.12. Софтуерът Bernese – основен инструмент на EUREF

Софтуерът Bernese е разработен в Астрономическия институт на Университета в Берн, Швейцария (Astronomical Institute, University of Berne (AIUB)) като научноизследователски софтуер за високоточна обработка и анализ на GPS (така също GLONASS, SLR) наблюдения и научноизследователски приложения. От появянето му през 1993 година софтуерът има седем основни версии, като последната – 5.0 е достъпна от 2004 година. Основните му характеристики са: висока точност и

надеждност на получените резултати; висока мобилност; използването на последните научни и технологични постижения; висока ефективност. Софтуерът е непрекъснато развиващ се и поради ангажиментите на центъра за анализ CODE в EUREF и IGS. Що се отнася до EUREF на практика Bernese е основният софтуер за обработка и анализ на GPS наблюденията (и в 11-те центъра за анализ в Европа).

3.12.1. Bernese версия 5.0

Bernese версия 5.0 софтуерът е качествено нова версия на програмата. Основните му характеристики са:

- отговаря на най-съвременните изисквания за точност на получените резултати;
- поддържа всички статични GPS приложения;
- RINEX интерфейс;
- възможност за обработка на всички видове наблюдения от високоточни геодезически приемници, кодови и фазови измервания и на двете честоти;
- единични и двойни разлики могат да бъдат обработвани едновременно в една и съща стъпка, с възможност за използване на различни йоносферни модели;
- пет линейни комбинации на честотите L1 и L2 могат да бъдат използвани при обработката;
- обработка на наблюдения от различни типове приемници и антени с корекции заради вариациите на фазовите центрове на антените;
- различни стратегии за разрешаване и фиксиране на неопределеностите, позволявайки обработката на дълги базови линии (до няколко хиляди километра);
- комбинирана обработка на GPS, GLONASS и GPS/GLONASS наблюдения. Обработка на SLR наблюдения на GPS и GLONASS спътниците;
- възможност за обработка на кинематични измервания;
- моделиране на движенията на земните станции заради тектонски движения, приливи в твърдата земна кора и океански приливи;
- различни функции за определяне ефекта на тропосферата, оценяване на тропосферни градиенти;
- моделиране на параметри, зависими от времето (time-dependant parameters), чрез piece-wise линейна непрекъсната функция. Прилага се при оценяване на тропосферните (и градиентни) параметри, параметрите на ориентация на Земята и получаване на глобални йоносферни модели;
- едновременно оценка на голям брой различни параметри;
- програмата за оценяване може да бъде използвана за обработка по различни схеми – по “базови линии”, по “сесии”, “кампании” и “мултикампании”. Нормалните уравнения могат да бъдат комбинирани, без преобработка на наблюденията, за получаване на различни видове решения;
- от нормалните уравнения могат да бъдат елиминирани различни параметри и типове параметри. Това е особено удобен инструмент при дефинирането на координатни системи, включително с “minimum constrained” решения;
- поддържане на всички международно приети входно/изходни формати.

4. Измерване на основната GPS мрежа

Държавната GPS мрежа е измерена с високоточни геодезически приемници на фирмата Trimble. Измерванията на всички точки от основния клас са извършени в сесии с продължителност две денонощия, считано от 0 часа UTC, като са измерени и допълнително две сесии с продължителност от 5 до 8 часа – преди и след основните две сесии. Измерванията на допълнителните точки е извършено в сесии от по 6 часа, едновременно с точките от основния клас. Всички измервания са извършени при 15 секунди скорост на записа и 10 градуса височина над хоризонта.

5. Обработка на измерванията от Държавната GPS мрежа – основен клас, 2004 година

Обработката на GPS измерванията е извършена в ITRF2000 реализацията на координатната система ITRS.

Обработката е извършена с научноизследователския софтуер Bernese 5.0 (последна версия) – софтуер за обработка на GPS, отразяващ последните постижения в тази област. Софтуерът е създаден като “инструмент за постигане на най-висока точност при обработката на GPS в различни приложения”. Основната програма включва различни опции – от определяне орбитата на спътниците до комбиниране на различни решения, използвайки нормалните уравнения.

5.1. Генерална стратегия

Преди използването на Bernese 5.0 трябва да бъде дефинирана стратегията за обработката на наблюденията в зависимост от поставената цел. Целта е да бъдат определени високоточни координати на точките от Държавната мрежа на Република България. На практика това означава получаването на координатите на точките с милиметрова точност при разстояния между тях, вариращи от 30-40 км до няколкостотин и повече, за връзка с перманентните EUREF станции. За постигане на такава точност необходимите условия са:

- точна реализация на координатната система, в която да се извършат изчисленията и към която точките да бъдат привързани;
- фазови наблюдения извършени на двете честоти; прецизни орбитни параметри (ефемериди) за GPS спътниците, както и хомогенни с орбитите координати на полюса; оценки (за синхронизиране) на часовниците на спътниците и перманентните станции;
- при фиксиране на неопределеностите трябва да бъдат използвани йоносферни модели за района на Европа, а тропосферните параметри (и градиенти) трябва да бъдат оценявани за всяка станция.

GPS кампанията за определяне координатите на Държавната GPS мрежа – основен клас, е разделена на 24 часови дневни сесии. За всяка сесия се изчислява т.нар. дневно решение (daily solution), които решения (нормални уравнения) след това се комбинират за получаване на решение за кампанията. Определянето на скоростите на точки, за което ще стане дума по-нататък, се получава чрез комбинирането на решенията от отделните кампании. Така, една GPS сесия обозначава и обхваща едно цяло денонощие и е основната работна единица при обработката на GPS кампанията.

Приложената стратегия при обработката на GPS измерванията се базира на последните постижения в тази област при обработката на регионални мрежи и на обработката на перманентните измервания на EUREF мрежата (вж. напр. Boucher and Altamimi, 2001; Peter Y., 2001; Becker et al., 2002; Altamimi 2003; Rotacher et al., 1997). Използването на информацията за вариациите на фазовите центрове на GPS антените е от изключително важно значение – наблюденията са извършени само с приемници Trimble, но с различни модели на антените.

5.2. Предварителна обработка (data preprocessing)

Всички сурови наблюдения са трансформирани преди обработката в международно приетия формат RINEX (Receiver Independent Exchange Format). Височините на

антените са внимателно проверени и приведени до референтната точка (т.нар. Antenna Reference Point – ARP).

Началната стъпка на предварителната обработка е определянето на приблизителни координати на новоопределяемите точки чрез обработка на кодовите измервания (single point positioning) за да се определят (и синхронизират) часовниците на GPS приемниците. Корекциите на часовниците са необходими при образуването на двойните разлики. Корекциите на часовниците на GPS приемниците се изчисляват за всяка епоха от кодовите измервания и се записват във файла с фазовите измервания. Софтуерът Bernese използва двойните разлики (ДР) като основна “наблюдавана” величина. Единичните разлики се записват във файл, докато двойните се образуват по време на обработката.

Единичните разлики се образуват чрез използване на стратегията OBS-MAX¹, която избира (независимата) конфигурация на базовите линии при условията максимален брой едновременно наблюдения и минимални дължини.

Следващата стъпка се състои в сканиране и корекция на единичните разлики. Основната задача е да се открият интервали в данните, които съдържат циклични прекъсвания (cycle slips) и те да бъдат коригирани, както и локализиране на неизползваемите (кратки) интервали с измервания и те да бъдат отстранени. Софтуерът Bernese използва само фазови измервания (комбинации от тях) за корекции на единичните разлики и е независим от кодовите измервания. Това означава още, че Anti-Spoofing-ът (A/C) не оказва влияние върху обработката. Коригираните единични разлики са вход за основната програма за оценяване.

5.3. Обработка (data processing)

За всяко едно дневно решение изчисленията са разделени на три основни стъпки – проверка за (рязко) отклоняващи се наблюдения, получаване на неопределеностите на фазовите измервания (phase ambiguity resolution) и получаване на решение за мрежата (network solution).

За по-доброто и надеждно изчисляване на неопределеностите се използват модели на йоносферата. Фиксирайки неопределеностите към техните цели стойности и третирайки ги като известни параметри на следващата стъпка в процеса на оценяване, броят на неизвестните параметри се редуцира значително, а така също решението се подобрява като надеждност/стабилност и точност. Merward (1995) показва, че подобряването на решението зависи от отношението между броя на неизвестните параметри, без неопределеностите, и броя на наличните наблюдения за оценяването на тези параметри (дължината на сесията). В Таблица 8 са дадени основните елементи от стратегията при обработката на мрежата.

Т а б л и ц а 8. Основни елементи от стратегията при обработката на Държавната GPS мрежа

- Bernese GPS софтуер, Версия 5.0
- IGS орбити на спътниците и IGS координати на полюса, трансформирани в ITRF2000, ако са получени преди 2000 година
- Координатна система ITRF2000

¹ Съществуват различни стратегии за формиране на първите разлики. Стратегията OBS-MAX е най-подходяща при обработката на мрежи с обхвата и продължителността на измерванията като на тази от Държавната GPS мрежа.

Т а б л и ц а 8. (Продължение)

- IGS_01 модел на вариациите на фазовите центрове на антените (elevation dependent phase center corrections)
- 10 и 15 градуса маска на височината (направени две решения съответно)
- тежести на наблюденията в зависимост от височината над хоризонта
- Йоносферни модели за района на Европа за всяко денонощие от CODE
- Квази йоносферна стратегия за фиксиране на неопределеностите(QIF-Ambiguity resolution)
- Тропосферни модели – изчисляват се от измерванията за всяко денонощие, априорен тропосферен модел на Нийл (Niel)
- Оценяване на тропосферни параметри – по един тропосферен параметър на всеки час за всяка станция
- Дневните решения (съответно нормалните уравнения) се изчисляват със средни квадратни грешки на IGS станциите (anchor sites) 0.01 m (loosely constrained solution)
- Комбинираните нормални уравнения за всяка кампания/епоха се генерират от дневните нормални уравнения
- IGS/EUREF перманентните станции са основни/референтни с координати и скорости в ITRF2000

За да бъдат коректно фиксирани неопределеностите в мрежа от регионален мащаб е препоръчително да се използват модели на йоносферата (Hugentobler et al., 2001). Модели на йоносферата за Европа се изчисляват регулярно в CODE с използването на двойни разлики. Получените от анализа на двойните разлики йоносферни модели са доказали качествата си при фиксиране на неопределеностите за средно дълги и дълги базови линии (Merwrd, 1995) – средно 85-90% от фазовите неопределености се фиксират успешно. Дневните йоносферни модели, използвани в настоящето решение, съдържат данни за йоносферата за всеки час и са получени от ftp страницата на CODE.

Съществуват няколко метода за фиксиране на фазовите неопределености в Bernese 5.0. По принцип наблюденията се анализират в две стъпки: в началото неопределеностите се третират като неизвестни параметри и се оценяват техните стойности като реални числа; фиксирането им като цели числа се базира на оценките им от предишната стъпка и техните ковариационни матрици чрез използване на статистически тестове.

Съгласно Rothacher et al., (1997) стратегията¹ за фиксиране на неопределеностите (Ambiguity Resolution Strategy – ARS), подходяща за мрежи с мащаб, като основния клас на Държавната GPS мрежа и продължителност на сесиите е т.нар. квази-йоносферна стратегия (Quasi Ionosphere Free – QIF).

За разлика от другите стратегии за фиксиране на неопределености, QIF стратегията използва само фазови наблюдения, което е преимущество, когато анти-спуфингът A/S е включен. При QIF стратегията се анализират и фиксират едновременно наблюденията и на двете честоти L1 и L2. Използва се принципно йоносферната (ionosphere free) линейна комбинация L3. Разликите между реалните и целите L3 оценки се използват като критерии за избора на най-добра двойка от цели числа (Merward, 1995). В случая, при обработката на Държавната GPS мрежа, средното съотношение между установените и фиксирани неопределености е между 80% и 85%. Съотношението между установените и разрешени неопределености е в корелация с качеството на

¹ Трябва да се отбележи, че съществуват различни стратегии за фиксиране на неопределеностите в Bernese 5.0, в зависимост от мащаба на мрежата, продължителността на наблюденията, типа на наблюденията и т.н.

използваните йоносферни модели (Peter, 2001) – високата йоносферна активност сваля процента на фиксираните неопределености. Това е една допълнителна причина за използването на йоносферни модели при обработката на наблюденията.

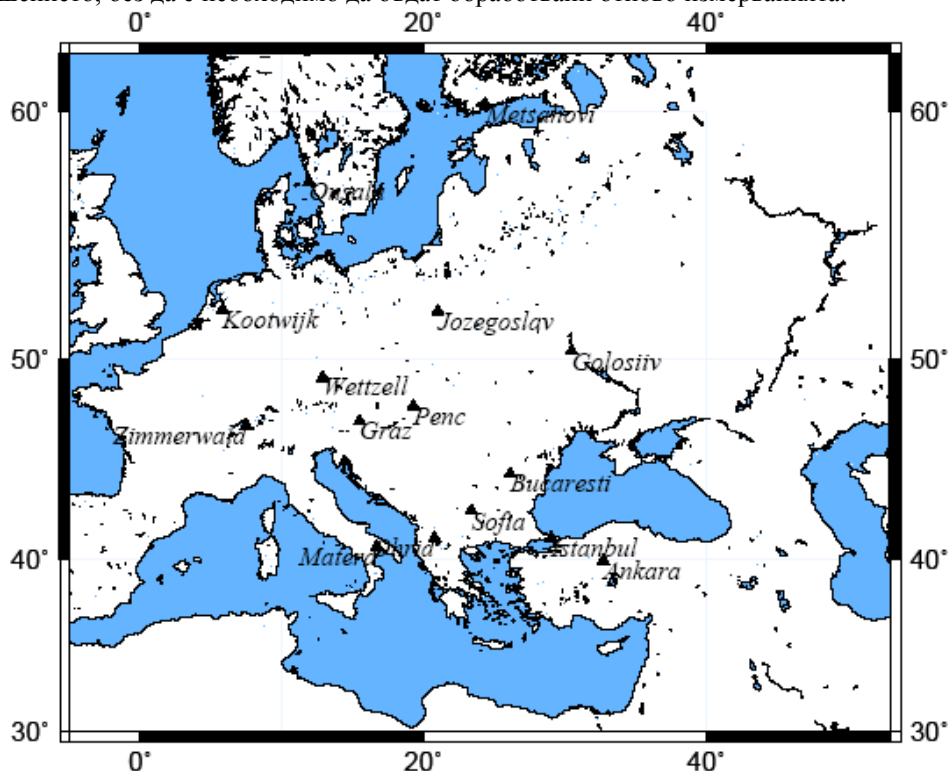
На последната стъпка преди окончателното дневно решение се определя тропосферен модел за всяка една от станциите, който се използва в следващите стъпки.

5.4. EUREF перманентни станции, участващи в решението

На Фигура 10 са показани IGS/EUREF перманентните станции, участващи в обработката. Това са станциите Onsala (ONSA), Metsahovi (METS), Kootwijk (KOSG), Graz (GRAZ), Wettzell (WTZR), Zimmerwald (ZIMM), Matera (MATE), Penc (PENC), Jozegoslav (JOZE), Golosiiv (GLSV), Ohrid (ORID), Istanbul (ISTA), Ankara (ANKR), Bucuresti (BUCU).

Всички тези станции са подбрани според критериите, изложени в 3.9. Още един критерий при избора на перманентните станции, използвани в настоящето решение, е по-голяма част от тях да бъдат станции, участващи при реализацията IGS00 на ITRS (вж. Фигура 4).

Изключение правят станциите в Букурещ (BUCU), Охрид (ORID) и Истанбул (ISTA). Тези станции нямат координати и скорости в ITRF2000. Включени са в решението, за да бъдат оценени техните координати и скорости и да бъдат сравнени с получени от други автори резултати. Още повече, при следващата реализация на ITRS, те със сигурност ще бъдат включени. Едно от достоинства на софтуера Bernese е, че лесно може да бъде сменена реализацията на координатната система, залегнала в решението, без да е необходимо да бъдат обработвани отново измерванията.



Фиг.10. EUREF перманентни станции участващи в обработката

5.5. Дневни решения (daily solutions)

На този етап от обработката се използва йоносферната (ionosphere free) линейна комбинация L3 като основна наблюдателна величина. Неопределеностите, които са фиксирани в предишната стъпка се третират като известни параметри, останалите се елиминират преди обръщането на нормалната система. Корелацията между двойните разлики се отчита коректно, 2 мм е априорната средна квадратна грешка на всяко наблюдение (т.нар. нулева разлика). За всяко наблюдение се използва тежест в зависимост от височината над хоризонта в съответствие с формулата от 3.10.1. За отчитане ефекта на тропосферната рефракция се използва априорен модел на Нийл, като допълнително се оценяват тропосферните параметри за всяка станция/точка на всеки един час (при наблюдения от 24 часа се оценяват 24 параметъра). Оценяват се и тропосферни градиенти в съответствие с формулата от 3.10.1.

Полученото дневно решение е свободно от ограничения, т.е. не са фиксирани координатите на нито една станция. Само ITRF перманентните станции получават средни квадратни грешки по трите координати 0.01 м. Това дневно решение се нарича свободно от ограничения¹ (loosely constrained solution) и по него може да се съди за качеството на наблюденията и получените оценки на параметрите. Нормалните уравнения на свободното от ограничения решения, съдържащи координатите на станциите и тропосферните параметри се записват за по-късното им използване.

Получените дневни решения след това се комбинират за получаване на окончателното решение за кампанията, като предварително се елиминират тропосферните параметри. Софтуерът Bernese 5.0 притежава възможност за комбиниране на дневните решения в окончателно решение за кампанията и за комбиниране на решенията от различни кампании за определяне скоростите на точките (вж. по-долу в текста).

5.5.1. Контрол и качество на дневните решения

На Фигурите в Приложение 1 са показани средните квадратни грешки (r.m.s) в положението – север, изток, нагоре/радиално на Хелмертовите трансформации между ITRF2000 и свободните от ограничения (loosely constrained solution) дневни решения по GPS седмици. Тук участват само станциите с известни в ITRF координати.

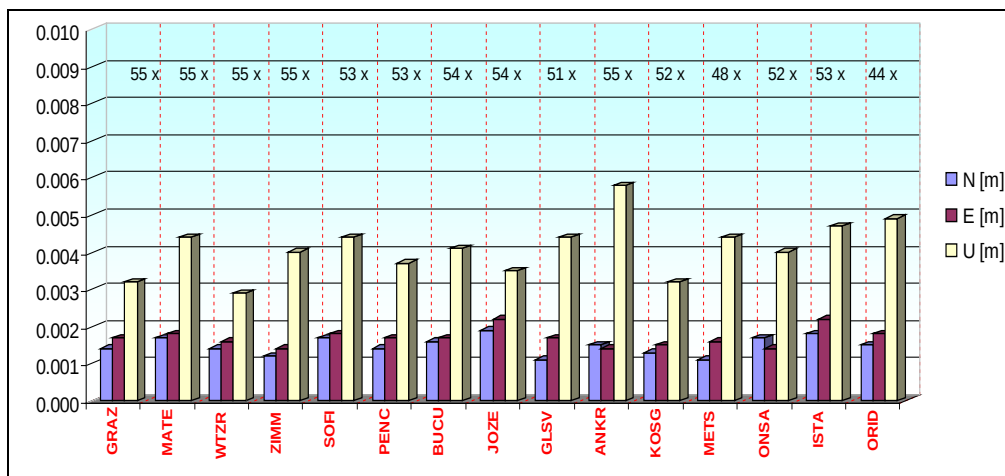
На Фигурите в Приложение 2 са показани Хелмертовите трансформации на всички 24-ри часови дневни решения (loosely constrained) едно спрямо друго.

На Фигура 11 са показани средно квадратичните отклонения, получени от повторемостта (repeatabilities) на перманентните EUREF/IGS станции, участващи в обработката.

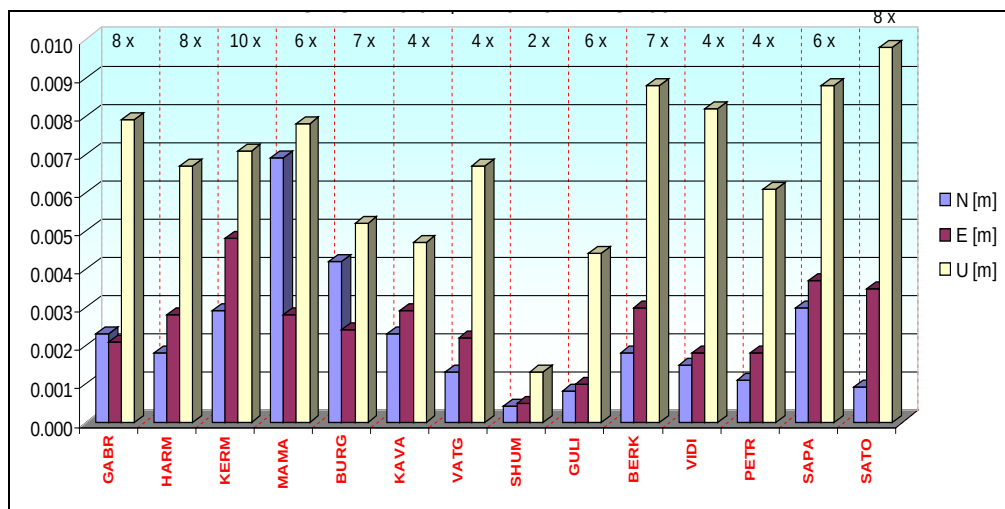
На Фигура 12 са показани средно квадратичните отклонения, получени от повторемостта на българските EUREF станции (точки), като в горната част на графиката е показано колко пъти са получени координатите на всяка станция.

На Фигура 13 са показани средно квадратичните отклонения, получени от повторемостта (repeatabilities) на българските станции (точки), като са представени станциите с повторемост над четири пъти.

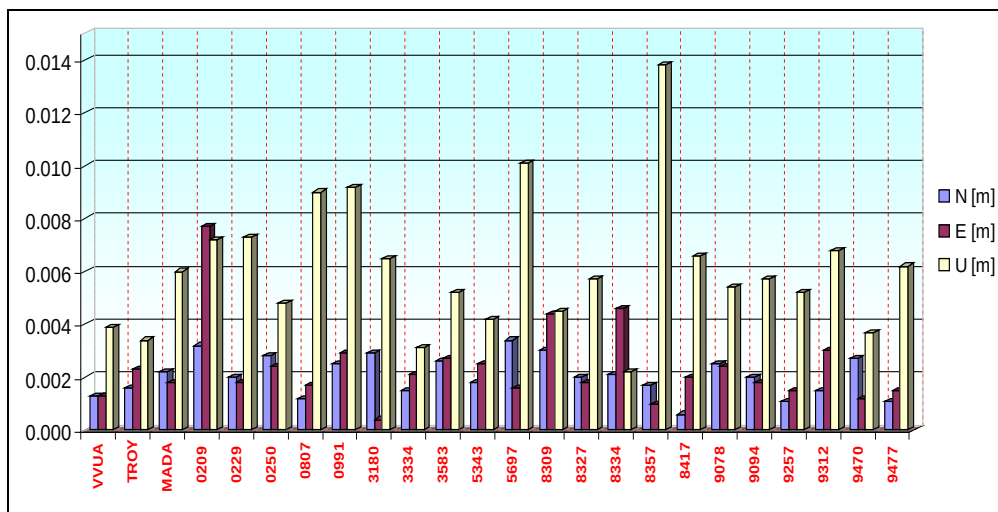
¹ Това е най-близкия до българския език еквивалент на английското loosely constrained solution. На практика това означава, че априорните средни квадратни грешки на точките не влияят върху резултатите, а по тях може да се съди директно за качеството на наблюденията и изобщо за качеството на полученото решение.



Фиг. 11. Средно квадратични отклонения, получени от повторемостта (repeatabilities) на перманентните EUREF/IGS станции, участващи в обработката.



Фиг. 12. Средно квадратичните отклонения, получени от повторемостта на българските EUREF точки (БУЛРЕФ) от кампанията BG 2004, като в горната част на графиката е показано колко пъти са получени координатите на всяка станция.



Фиг. 13. Средно квадратични отклонения, получени от повторемостта (repeatabilities) на българските станции (точки) от кампания BG 2004, като са представени точките с повторемост над четири пъти.

5.6. Решение за кампанията 2004 година (BG 2004)

Окончателното решение за кампанията 2004 година е получено чрез комбиниране на дневните решения. Диаграмата на Фигура 14 показва принципа на комбиниране на дневните решения с Bernese 5.0 – комбинация на нормалните уравнения на индивидуалните дневни решения. Опорните станции (т.нар. fiducial или anchor sites) са Golosiiv (GLSV), Graz (GRAZ), Jozegoslav (JOZE), Kootwijk (KOSG), Matera (MATE), Metsahovi (METS), Onsala (ONSA), Sofia (SOFI) Wettzell (WTZR), Zimmerwald (ZIMM). Координатите на тези точки получават в изравнението априорни средни квадратни грешки от 0.0001 м (0.1 мм). Координатите на точките Ankara (ANKR), Bucarest (BUCU), Istanbul (ISTA), Ohrid (ORID), Penc (PENC) се оценяват, тъй като повечето от тях (първите четири) нямат координати в ITRF2000, а така също, за да бъде направен контрол на решението за получените скорости.

5.6.1 Резултати

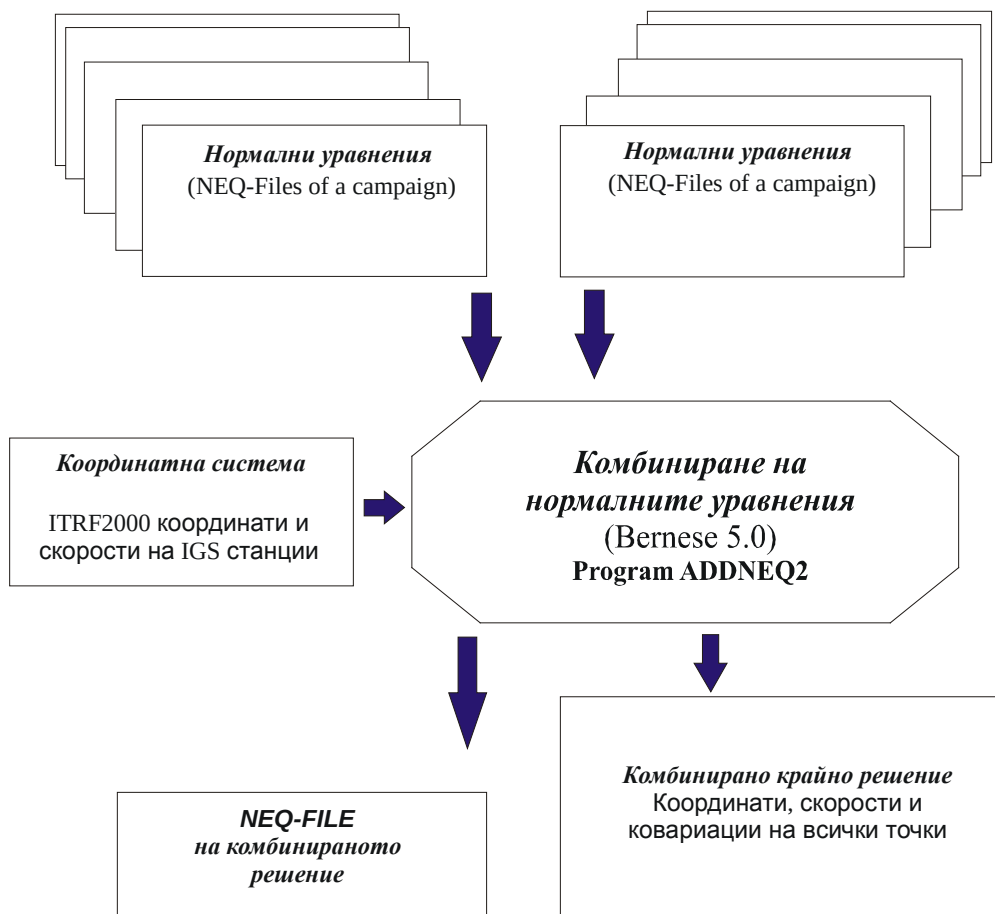
Средната квадратна грешка за единица тежест от комбинираното изравнение на мрежата е 1.2 мм.

5.6.1.1. Хелмертови трансформации и оценка качеството на решението

Една оценка за точността на полученото комбинирано решение може да бъде получена чрез прилагане на Хелмертова трансформация между координатите на опорните станции (anchor sites) в ITRF2000 и получените в свободните от ограничения (loosely constrained solutions) дневни решения. На Фигурите в Приложение 1 са показани средните квадратни грешки на тези трансформации по GPS седмици и дни от годината, съответно по компоненти – север, изток и радиално/нагоре (вж. 5.5.1). Отчитайки факта,

че стойности на средните грешки на трансформациите (хоризонтално и вертикално) за перманентните EPN станции са от порядъка на 5 мм и 10 мм съответно, получените в настоящето решение резултати са повече от задоволителни.

Сравнение между дневните решения (за всички пълни 24 часови наблюдателни денонощия) е направено чрез Хелмертови трансформации на дневните решения едно спрямо друго. Средните квадратни грешки по компоненти на трансформациите са показани на фигурите в Приложение 2 (вж. 5.5.1). Сравнението между дневните решения показва и доколко резултатите са повлияни от систематични грешки. Показаните в Приложение 2 фигури дават основание да се твърди, че качеството на полученото решение е високо.



Фиг.14. Комбиниране на нормалните уравнения в Bernese 5.0

5.6.1.2. Повтаряемост (repeatabilities) на координатите на станциите

На Фигури 11, 12 и 13 са дадени графики с повтаряемостта на координатите (средните грешки) на перманентните EUREF/IGS станции, EUREF станциите в България и точките, които имат наблюдения повече от едно денонощие по време на кампанията

2004 (вж. 5.5.1). Получените средни квадратни грешки, по компоненти север, изток и вертикално нагоре, са много ценен индикатор за качеството и точността на дневните, съответно окончателното решение¹. Трябва да се отбележат много добрите резултати на настоящето решение.

5.6.1.3. Проблемни станции

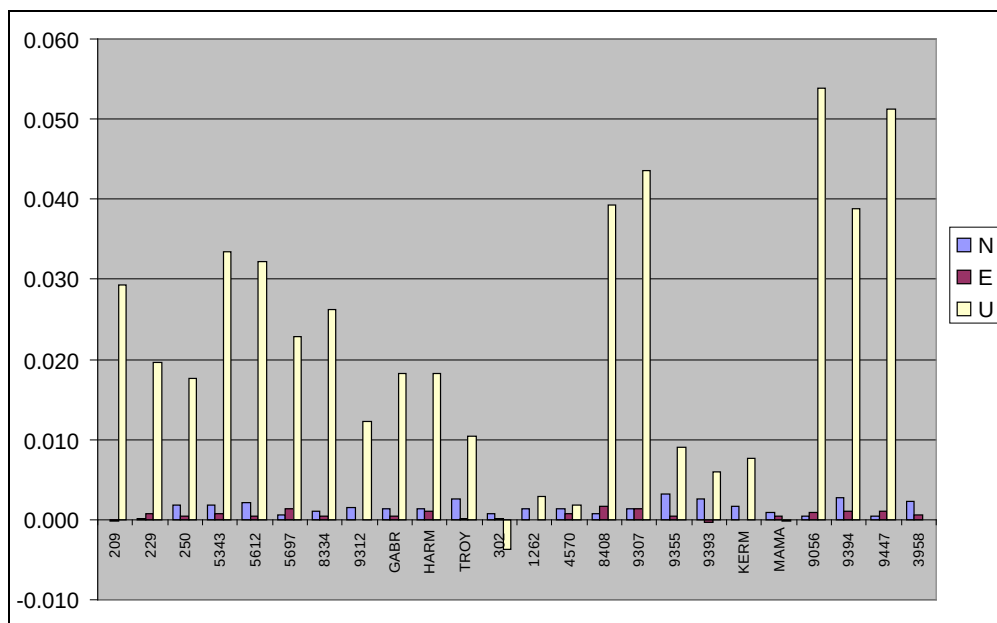
В хода на оценката качеството на полученото решение, от измерените 112 основни точки, се откриха само две проблемни – 0991 и 5612. Специално за тези две станции (наречени проблемни) несъвпадението във височините им, сравнено от повтаряемостта на дневните решения, варира в границите на 20-30 мм. Проблемите най-вероятно се дължат на грешки при измерване на височините на антените.

5.6.1.4. Десет и петнадесет градусови решения

Получени са две решения – едното при използване на маска на височината 10, а другото - 15 градуса над хоризонта. Резултатът от сравнението на двете решения, получени чрез Хелмертова трансформация, е даден в Приложение 3.

За илюстрация, резултатът от сравнението на двете решение е даден на Фигура 15. Приетото окончателно решение за кампанията 2004 година (а и на всички останали кампании, използвани за получаване скоростите на точките) е “петнайсетградусовото”. Основание за това са по-добрите резултати във височинно отношение, сравнени с десетградусовото.

На фигурите в Приложение 3 двете решения са сравнени чрез Хелмертова трансформация. Станциите със значителни разлики във височините са в голямата си част от допълнителните точки, с шест часови наблюдения.



¹ Това е една от основните причини да се търси максимална продължителност на наблюдателния интервал при GPS кампании с изисквания за висока точност на получените резултати.

Фиг. 15. Сравнение между 10 и 15 градусовите решения – Хелмертова трансформация

5.6.2. Координати на точките в координатна система ITRF2000, епоха 2004.8

Получени са координатите на точките в координатна система ITRF2000, епоха 2004.8 (средата на наблюдателната кампания).

5.6.3. Координати на точките в координатна система ETRS89 – ETRF2000, епоха 2004.8

Получени са окончателните координатите на точките, като са трансформирани от ITRF2000 в координатна система ETRS89 – ETRF2000, епоха 2004.8, използвайки стойностите от Таблици 6 и 7.

6. Обработка на GPS кампанията EUREF BG 1993

6.1. Измервания

Кампанията EUREF BG 1993 е проведена през октомври 1993 година с цел определяне на 15/7 точки на територията на България в координатната система ETRS89.

Съгласно споразумения между Bundesamtes fur Kartographie und Geodasie (BKG, бившият IfAG), Военнотопографската служба на БА и бившата Лаборатория по геотехника (чиито състав от 1995 година премина в ЦЛБГ), през периода 12.10. – 16.10.1993 година е проведена GPS кампанията EUREF BG 93. Измерени са 15 точки в четири сесии по 24 часа всяка. Използвани са GPS приемници Trimble 4000SSE.

За четири от точките: Видин (VIDI), Берковица (BERK), Каварна (KAVA) и Сатовча (SATO) наблюденията от 1993 година липсват. За определяне на техните скороски са използвани измервания от 1994 и 1996 година (вж. по-долу в текста).

6.2. Обработка и анализ

Обработката и анализът на наблюденията от кампанията EUREF BG 93 са извършени по същата схема и последователност, както и GPS кампанията 2004, в координатната система ITRF2000. Особеностите при обработката са само две. Първата е, че са използвани прецизни ефемериди и координати на полюса, получени в CODE¹. Ефемеридите и координатите на полюса са трансформирани от координатната система ITRF91, в която оригинално са получени, в ITRF2000. Втората особеност е, че не са използвани йоносферни модели, тъй като мрежата в Европа по това време, не е достатъчно сгъстена, за да бъдат получени надеждни модели.

6.3. Резултати

Резултат от обработката на наблюденията са получените нормални уравнения, които са запазени за последваща обработка.

6.3.1. Сравнение на новополученото решение за GPS кампанията EUREF BG 93 и официалното решение

Извършено е сравнение на новополученото решение за кампания EUREF BG 1993 и решението, получено при обработката през 1995 година в BKG (Milev et al., 1996). Стойностите на средните квадратни отклонения на 11-те точки в северна и източна посоки, и по височина са съответно 6 mm, 3 mm и 7 mm. По-големи остатъчни стойности са получени за точките BURG и PETR – Таблица 9:

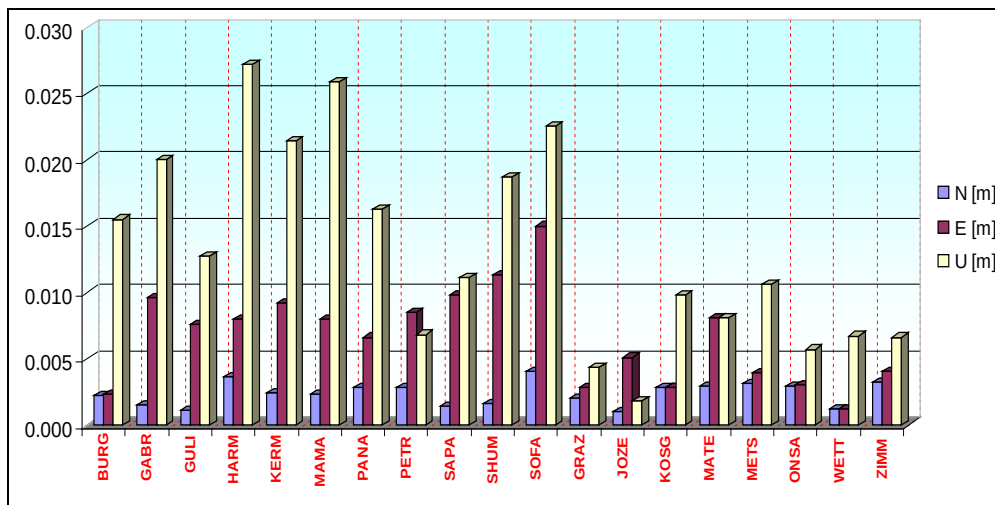
Т а б л и ц а 9. Остатъчни стойности на точките BURG и PETR

Точка	N [mm]	E [mm]	U [mm]
BURG 8144	13.8	-8.9	-41.6
PETR 8146	18.0	8.7	9.0

¹ IGS ефемериди през 1993 година не са извеждани.

Получените по-големи отклонения по височина за точка Бургас (BURG) се дължат, най-вероятно, на грешка при измерване на височината на антената.

На Фигура 16 са показани средно квадратичните отклонения, получени от повтаряемостта за EUREF точките от новото решение в координатна система ITRF2000.



Фиг. 16. Средно квадратични отклонения, поучени от повтаряемостта за EUREF точките от новото решение за кампанията BG 1993, в координатна система ITRF2000.

6.3.2. Сравнение на официалното решение за кампанията EUREF BG 93 и решението от кампанията от 2004 година (BG 2004)

За сравнението е използвана седем параметрична Хелмертова трансформация, като средните квадратни грешки на остатъчните отклонения на петнадесетте точки в северна и източна посоки, и по височина са съответно 4 мм, 3 мм и 3 мм. Точките с по-големи остатъчни отклонения са дадени в Таблица 10.

Т а б л и ц а 10. Точки с по-големи остатъчни отклонения

Точка	N [mm]	E [mm]	U [mm]
BURG	13.5	-9.8	-52.9
BERK	-17.9	-17.3	-5.5
PETR	1.3	5.8	37.8
SAPA	-10.9	3.0	39.6
SATO	-15.0	-12.0	2.4
PANA	-44.7	11.1	-26.7

Сравнението на крайните резултати между двете кампании EUREF-BG-93 и GPS-BG-2004 е дадено по-долу в Таблицы 11, 12 и 13. Координатната система е ETRS89, реализация ETRF2000, епоха 1989.0, референтен елипсoid GRS80.

Т а б л и ц а 11. *Остатъчни отклонения между резултатите от кампаниите EUREF-BG-93 и GPS-BG-2004*

Остатъчни отклонения	N [m]	E [m]	U [m]
SOFI	-0.0009	0.0035	-0.0015
GABR	0.0045	-0.0015	0.0044
HARM	0.0051	0.0027	-0.0017
KERM	-0.0055	0.0019	0.0017
MAMA	-0.0007	0.0005	-0.0008
BURG	0.0135	-0.0098	-0.0529
KAVA	-0.0008	-0.0004	-0.0019
SHUM	-0.0021	-0.0007	-0.0009
GULI	-0.0035	-0.0044	0.0032
BERK	-0.0179	-0.0173	-0.0055
VIDI	0.0038	-0.0016	-0.0026
PETR	0.0013	0.0058	0.0378
SAPA	-0.0109	0.0030	0.0396
SATO	-0.0150	-0.0120	0.0024
PANA	-0.0447	0.0111	-0.0267

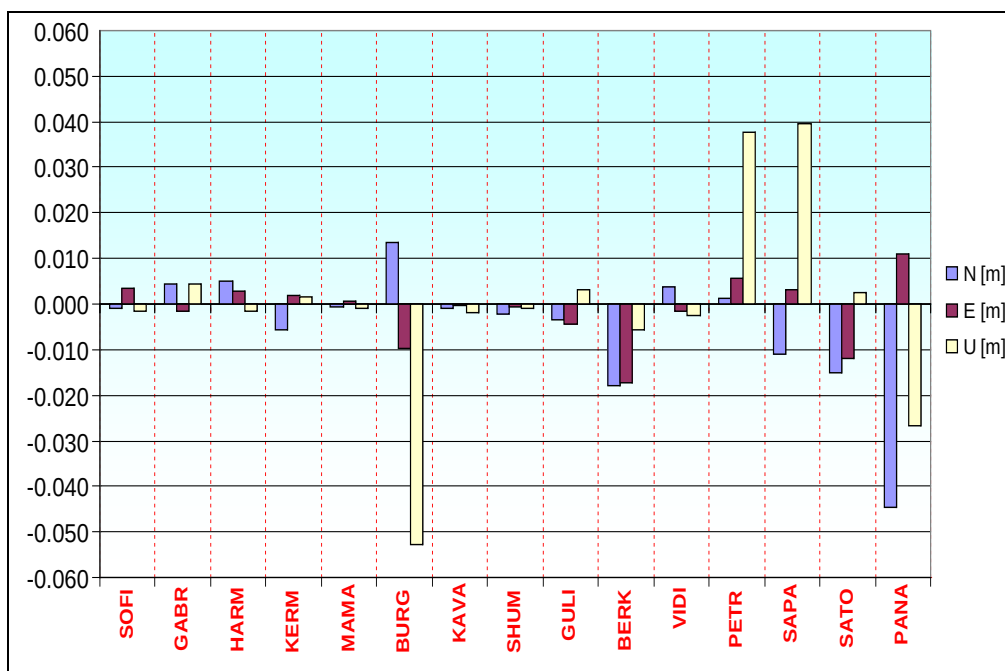
Т а б л и ц а 12. *Трансформационни параметри между координатите, получени от кампаниите EUREF-BG-93 и GPS-BG-2004*

Параметри	Стойности	Ср.кв. грешки
Транслация по ос X [m]	-0.0185	+/- 0.0011
Транслация по ос Y [m]	-0.0463	+/- 0.0011
Транслация по ос Z [m]	0.0010	+/- 0.0012
Ротация по ос X ["]	0.01212	+/- 0.00169 "
Ротация по ос Y ["]	0.02366	+/- 0.00292 "
Ротация по ос Z ["]	0.00757	+/- 0.00142 "
Мащаб мм/км	-0.0403	+/- 0.0069

Т а б л и ц а 13. *Брой на оценяваните параметри и средна квадратна грешка на трансформацията между EUREF-BG-93 и GPS-BG-2004*

Брой на параметрите	7	
Брой на координатите	27	
Ср.кв.гр. за единица тежест [m]		0.0032

На Фигура 17 е показана Хелмертовата трансформация между двете решения за кампанията EUREF BG 93 – официалното от 1995 година, и кампанията BG 2004 от 2005 година.



Фиг. 17. Хелмертова трансформация между решенията за кампанията EUREF BG 93 (от 1995 година) и Държавната GPS мрежа BG 2004 (от 2005 година)

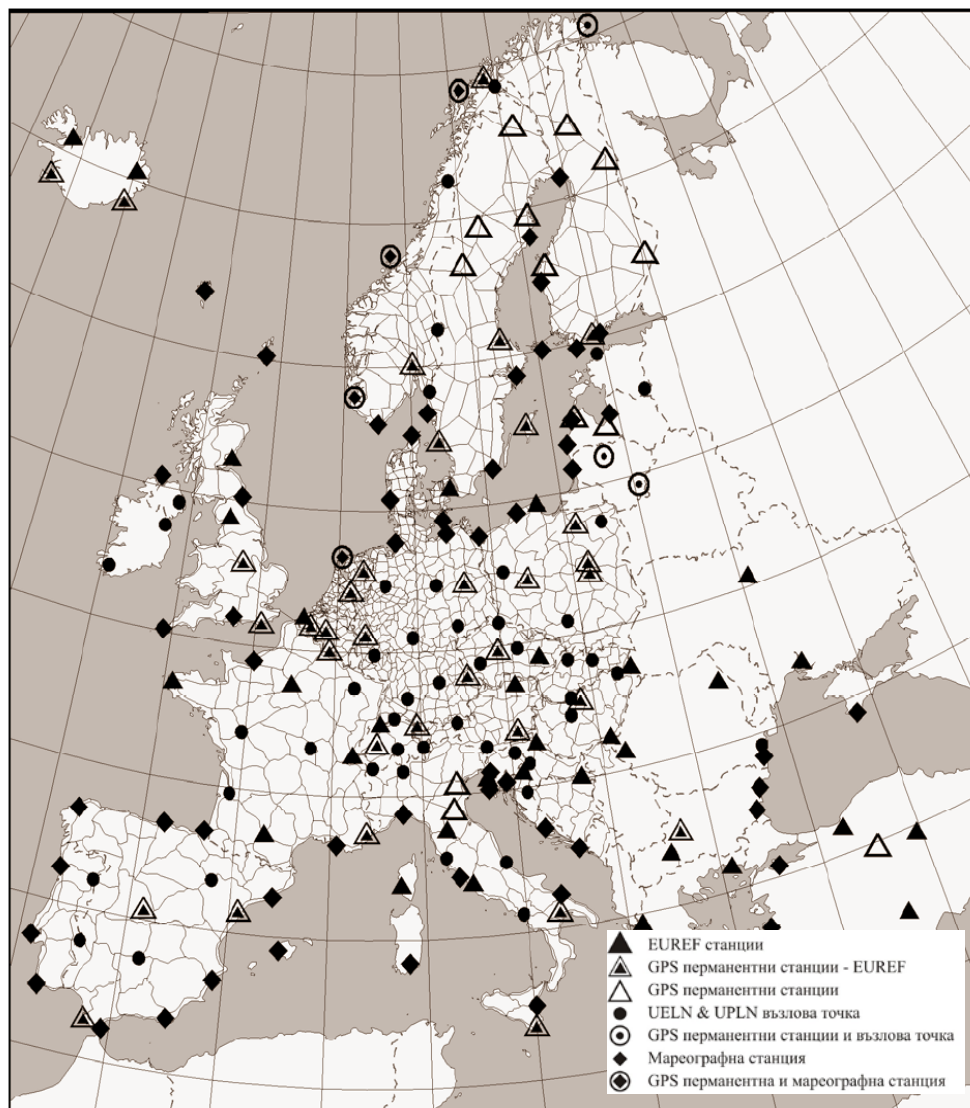
При анализа на показаните по-горе сравнения би следвало да се отчитат следните разлики:

- използването на различни версии на софтуера за обработка;
- различните реализации на ITRFyy;
- различната геометрия на наблюдаваните спътници и условия на наблюдение;
- невъзможността за използване на йоносферни модели при решението от 1995 г.;
- използвани са оценки за скоростите на точките от EUREF, при обработката през 1995 година, съгласно модела NUVEL-1A.

Въпреки показаните разлики в условията за наблюдения и обработка, малките остатъчни отклонения още веднъж доказват много добрата реализация на EUREF за територията на Република България от кампаниите 1993 и особено 2004 година.

7. Сравнение между резултатите от GPS кампаниите EUVN-97 и BG-2004

За създаване на Европейската височинна мрежа EUVN през май 1997 година се проведе широкомащабна GPS кампания.



Фиг. 18. Станции, участващи в EUVN 97

Мрежата EUVN включва 196 точки, разположени на територията на цяла Европа, някои, от които участват с измервания от два или три GPS приемника едновременно, инсталирани на различни маркери. От тях 79 са точки от мрежата EUREF, 53 - възлови точки от националните нивелачни мрежи на страните от Източна и Западна Европа, а 63 - мареографни станции – Фигура 18.

На територията на Република България са измерени 3 точки – SOFI, EUREF перманентна станция в околностите на гр. София, BG04 (VATG) и BG01 (BUTG).

Точките VATG и BUTG са стабилизиращи чрез стълбове за наблюдение с принудително центриране и се намират в близост до мареографните станции във Варна и Бургас. Чрез прецизна геометрична нивелация те са привързани към Държавната нивелачна мрежа, а по-късно са извършени относителни измервания на ускорението на силата на тежестта и точките са привързани към гравиметричната мрежа.

Обработката на GPS измерванията от кампанията EUVN е извършена в 10 регионални центъра за анализ, като разпределението по блокове се определя от броя на изходните и наблюдаваните точки, а така също и от типовете антени, използвани за наблюдение. Изравнението на цялата мрежа EUVN'97 е извършено в Лайпциг, със софтуера Bernese, версия 4.0, като са използвани получените нормални уравнения от регионалните центрове. В обработката са включени 219 точки, като 36 от тях се използват за изходни и имат известни координати и скорости в координатната система ITRF96.

Направено е сравнение (Таблицы 14,15 и 16) на получените резултати от GPS кампаниите BG 2004 и EUVN'97 за идентичните точки от двете кампании - SOFI (София), BG04 (VATG) и BG01 (BUTG). За да се извърши коректно сравнението, координатите на тези три точки, получени в координатна система ITRF2000, епоха 2004.8, са екстраполирани в ITRF2000, епоха 1997.4, като са използвани скоростите на точките според Европейския ротационен полюс (за точката SOFI са използвани определените от наблюденията скорости). Получените координати са трансформирани от ITRF2000 в ETRS89 (ETRF2000) за същата епоха - 1997.4, която е епохата на решението на кампанията EUVN'97. В тази епоха са публикувани официалните координати от решението за кампания EUVN'97. По-долу в табличен вид е дадено сравнение между решенията.

Получените минимални разлики от сравнението по трите оси потвърждават високата точност, получена при обработката на кампания BG 2004. Сравнително по-големите разлики за точките BUTG и VATG, спрямо разликите за точка SOFI, се дължат най-вероятно на използвания модел на скоростите (Европейския ротационен полюс).

При сравнението трябва да се имат предвид и още две важни обстоятелства:

- при обработката на кампанията EUVN'97 е използвана реализацията на координатната система ITRF96, докато обработката на наблюденията от Държавната мрежа е извършена в реализацията ITRF2000;
- характерното местоположение на точките VATG и BUTG. И двете точки се намират на кейовете на пристанища и са подложени на непрекъснатото влияние на различни природни и техногенни фактори.

Т а б л и ц а 14. Крайни резултати от кампанията EUVN'97 координатна система ETRF96, епоха 1997.4

Точка № в EUVN'97 DOMES №	Пространствени Декартови координати [m]		Географски координати Елипсoid GRS80	
BUTG BG01	X	4 179 321.660	B	42°29'00.62331"
	Y	2 173 955.655	L	27°28'55.47220"
	Z	4 285 391.943	H	41.743
SOFI BG03 11101M002	X	4 319 372.417	B	42°33'21.93149"
	Y	1 868 687.544	L	23°23'41.02232"
	Z	4 292 063.745	H	1119.557
VATG BG04	X	4 115 657.895	B	43°11'33.68566"
	Y	2 179 981.604	L	27°54'33.38345"
	Z	4 343 159.351	H	38.243

Т а б л и ц а 15. Крайни резултати от кампанията BG –2004 за точките от EUVN, координатна система ETRF2000, епоха 1997.4

Точка № в EUVN'97 DOMES №	Пространствени Декартови координати [m]		Географски координати Елипсоид GRS80	
BUTG BG01	X	4 179 321.675	B	42°29'00.62253"
	Y	2 173 955.659	L	27°28'55.47204"
	Z	4 285 391.924	H	41.741
SOFI BG03 11101M002	X	4 319 372.419	B	42°33'21.93144"
	Y	1 868 687.537	L	23°23'41.02202"
	Z	4 292 063.743	H	1119.555
VATG BG04	X	4 115 657.921	B	43°11'33.68495"
	Y	2 179 981.598	L	27°54'33.38269"
	Z	4 343 159.340	H	38.251

Т а б л и ц а 16. Разлики получени от сравнението на решенията от двете кампании

Точка	dX (BG04 - EUVN'97) [m]	dY (BG04 – EUVN'97) [m]	dZ (BG04 – EUVN'97) [m]	dS [m]
BUTG BG01	0.015	0.004	-0.019	0.024
SOFI BG03 11101M002	0.002	-0.007	-0.002	0.007
VATG BG04	0.026	-0.006	-0.011	0.029

8. Получаване скоростите на EUREF точките (БУЛРЕФ) в България

Диаграмата от Фигура 14 показва принципа за получаване на хомогенно решение за координатите и скоростите от двете кампании за периода 1993 – 2004 година. То се базира на комбинацията на нормалните уравнения, получени във всяка индивидуална кампания. Комбинацията следва по принцип препоръките за съгъстяване на EUREF с регионални мрежи (вж. например Rothacher et al., 1997). Опорни станции, т.нар. fiducial или anchor станции са Golosiiv (GLSV), Graz (GRAZ), Jozegoslav (JOZE), Kootwijk (KOSG), Matera (MATE), Metsahovi (METS), Onsala (ONSA), Sofia (SOFI), Wettzell (WTZR), Zimmerwald (ZIMM). Координатите на тези станции получават в изравнението средни квадратни грешки 0.0001 м, а на скоростите (без Matera) – 0.0001м/год. Скоростите на IGS станциите Penc (PENC), Ankara (ANKR), Istanbul (ISTA) и Ohrid (ORID) се оценяват, за да бъде направен контрол на полученото решение (вж. по-долу). Използваните скорости на опорните точки са дадени в Таблица 17.

Т а б л и ц а 17. Използвани скорости на основните EUREF/IGS станции в ITRF2000.

IGS sites		Vx ±σ [mm]	Vy ±σ [mm]	Vz ±σ [mm]
GLSV	12356M001	-17.5 1.9	15.1 1.2	7.6 2.5
GRAZ	11001M002	-17.6 0.3	18.1 0.1	8.2 0.4
JOZE	12204M001	-18.1 0.6	16.2 0.3	7.4 0.8
KOSG	13504M003	-13.4 0.4	16.5 0.1	9.9 0.5
MATE	12734M008	-18.8 0.3	19.1 0.1	13.1 0.4
METS	10503S011	-16.0 0.3	14.9 0.2	8.8 0.6
ONSA	10402M004	-13.4 0.2	14.8 0.1	9.5 0.4
PENC	11206M006	-16.6 1.2	18.1 0.5	8.2 1.4
SOFI	11101M002	-16.5 2.6	18.7 1.3	7.3 2.5
WETT	14201M009	-15.7 0.2	17.2 0.1	8.7 0.4
WTZR	14201M010	-15.7 0.2	17.2 0.1	8.7 0.4
ZIMM	14001M004	-13.8 0.4	18.5 0.2	10.0 0.5
ANKR	20805M002	-8.8 0.8	-2.3 0.6	6.4 0.8
BUCU	11401M001	-10.8 4.8	27.2 3.4	11.3 4.7
ISTA	20807M001			
ORID	15601M001			

8.1. Скорости на EUREF точките Видин, Каварна, Сапарева баня и Сатовча

Тъй като наблюденията на четири точки от EUREF BG 93 кампанията липсват, за получаване скоростите на тези точки се наложи да бъдат обработени допълнително техни наблюдения от 1994 година (Видин и Каварна) и 1996 година (Сапарева баня и Сатовча) – Таблица 18. Обработката на двете GPS кампании е извършена по аналогичен начин. Накрая всички нормални уравнения са комбинирани за получаване скоростите.

Т а б л и ц а 18. Липсващи точки от кампанията EUREF BG 93 и наблюдения, използвани за получаване на скоростите им

Точка/ Година	VIDI 8149	KAVA 8142	SATO 8147	PETR 8146
	[часа]	[часа]	[часа]	[часа]
1994	72	72	72	72
1996	72	72	72	72

8.2. Резултати

8.2.1. Абсолютни и релативни скорости

По принцип движенията на земната кора в глобален мащаб се изразяват в абсолютен смисъл – абсолютни движения на индивидуалните континентални плочи по отношение на фиксирана координатна система, т.нар. hotspot reference frame или като движения на една плоча спрямо съседната. Получените ITRF2000 скорости на точките в този смисъл са абсолютни скорости.

По дефиниция координатната система ETRS89 е привързана към Евроазиатската плоча и по-точно към стабилната ѝ част. EUREF скоростите на точките се получават като от абсолютните им скорости (в случая ITRF2000) се извади ротацията на плочата (т.нар. rigid plate motion). За стабилната част на Европа тези скорости са нули. Остатъчните скорости са точно EUREF скоростите на точките. Те всъщност представляват точно т.нар. вътрешно-плочови деформации и са отлични от нула в тектонски активните райони.

До 2001 година “твърдата” ротация на Евразия се отчиташе чрез движенията на точките, изчислени по модела NUVEL-1A-NNR (DeMets et al., 1994). С последната реализация на ITRS – ITRF2000 (Altamimi and Boucher, 2002) е определен нов ротационен полюс за Евразия, значително по-различен от този на NUVEL-1A-NNR. Altamimi и Boucher са използвали 19 ITRS станции на стабилната част на Евразия с дълги наблюдателни редове и висока точност за определяне на Европейския ротационен вектор.

8.2.2. Скорости на EUREF точките в България

В Таблица 19 са дадени получените ITRF2000 скорости на EUREF точките, а в Таблица 20 EUREF (ETRS89) скоростите. На Фигури 19, 20 и 21 тези скорости са показани едновременно с 3 σ елипсите на грешките им.

За точката Панагюрище – PANA 31 II получените скорости очевидно са ненадеждни, което се дължи най-вероятно на две причини – човешка намеса между

двете епохи измервания и/или наличието на антена на мобилен оператор в непосредствена близост до точката по време на кампанията 2004 година.

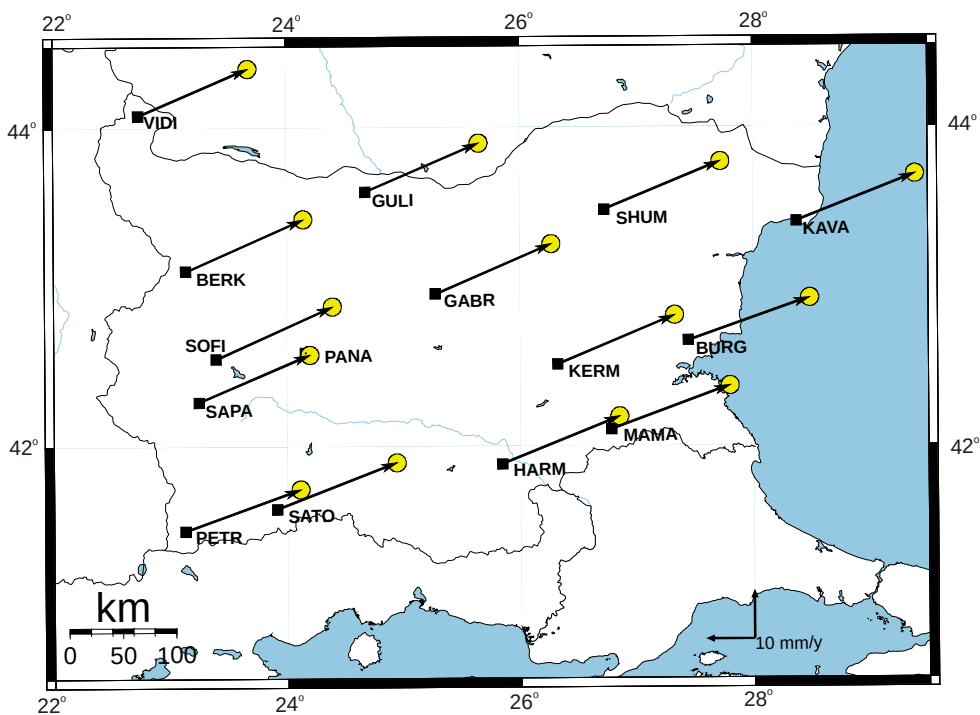
Това, което прави впечатление на пръв поглед е, че EUREF скоростите на точките, или скоростите им спрямо стабилна Евразия, не могат да бъдат приети за незначителни (или нула). Те варират от 2 до 4 мм/год и имат посока приблизително на юг (както и трябва да се очаква според тектонските особености на целия регион). Точките в Южна България показват по-големи движения от тези в Северна.

Т а б л и ц а 19. *ITRF2000* скорости на EUREF точките (БУЛРЕФ)

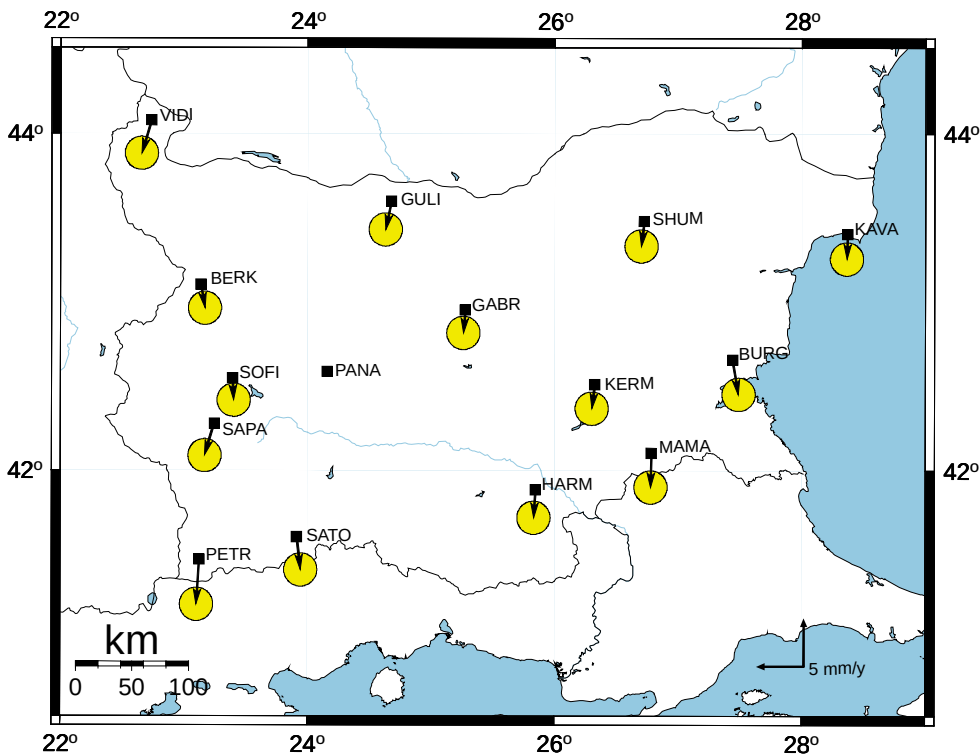
N	Точка	V_x [mm]	V_y [mm]	V_z [mm]	V_N [mm]	V_E [mm]
1	GABR 8140	-17.6	17.8	6.1	10.1	23.6
2	HARM 8143	-16.7	18.5	6.7	9.6	23.9
3	KERM 8171	-16.8	18.2	7.0	9.9	23.8
4	MAMA 8172	-17.1	18.4	5.6	8.8	24.1
5	BURG 8144	-16.3	19.5	6.7	8.6	24.8
6	KAVA 8142	-19.6	16.9	4.4	9.5	24.2
7	SHUM 8141	-18.0	17.5	5.6	9.7	23.7
8	GULI 8150	-16.1	18.0	6.7	9.8	23.1
9	BERK 8148	-15.8	19.2	7.8	10.5	23.9
10	VIDI 8149	-15.6	17.6	5.9	9.5	22.3
11	PETR 8146	-15.5	18.9	5.1	8.4	23.5
12	SAPA 8145	-15.9	17.8	6.1	9.6	22.6
13	SATO 8147	-14.3	20.3	8.2	9.4	24.4
14	PANA 31 II	-27.2	13.8	-5.6		
15	SOFI 11101	16.5	18.7	7.3	10.6	23.7

Т а б л и ц а 20. *ETRS89 (ETRF2000)* скорости на EUREF точките (БУЛРЕФ)

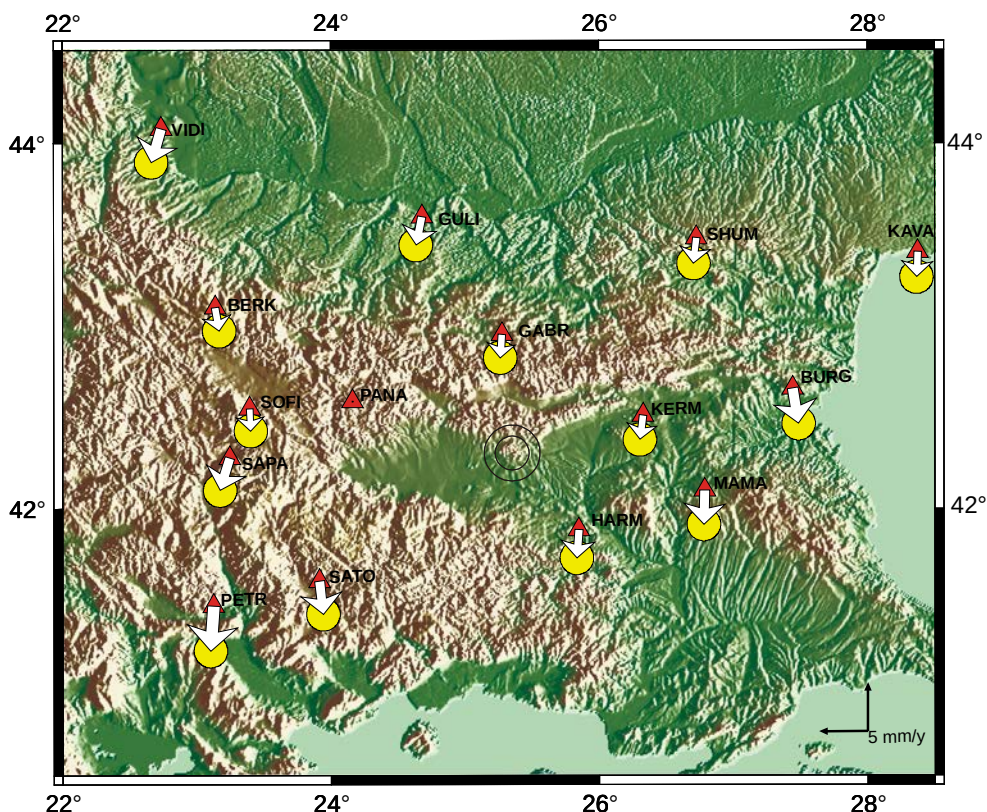
N	Точка	V_x [mm]	V_y [mm]	V_z [mm]	V_N [mm]	V_E [mm]
1	GABR 8140	0.3	-0.1	-3.1	-2.4	-0.2
2	HARM 8143	1.3	0.4	-2.6	-2.9	-0.2
3	KERM 8171	1.4	0.3	-2.2	-2.5	-0.3
4	MAMA 8172	1.2	0.5	-3.6	-3.5	-0.1
5	BURG 8144	2.2	1.8	-2.3	-3.6	0.6
6	KAVA 8142	-0.8	-0.5	-4.4	-2.6	-0.1
7	SHUM 8141	0.4	-0.1	-3.4	-2.6	-0.3
8	GULI 8150	1.7	0.1	-2.5	-2.9	-0.6
9	BERK 8148	1.5	1.0	-1.6	-2.4	0.4
10	VIDI 8149	1.7	-0.4	-3.4	-3.4	-1.0
11	PETR 8146	1.7	0.3	-4.6	-4.6	-0.3
12	SAPA 8145	1.4	-0.6	-3.5	-3.3	-1.0
13	SATO 8147	3.1	1.9	-1.4	-3.4	0.4
14	PANA 31 II	-9.6	-4.4	-15.0		
15	SOFI 11101	0.8	0.4	-2.2	-2.3	0.1



Фиг.19. Абсолютни (ITRF2000) скорости на EUREF точките



Фиг.20. ETRS89 скорости на EUREF точките в България



Фиг.21. ETRS89 скорости на EUREF точките изобразени върху релефа

8.2.3. Проверка, контрол и надеждност на решението

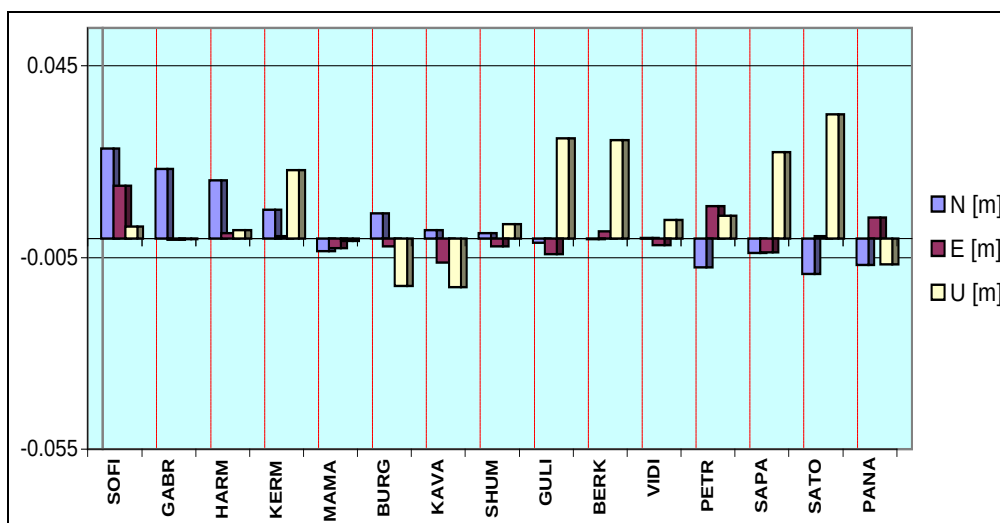
С цел да бъде контролирано полученото решение¹ са направени редица експерименти, по-важните от които са:

1. Хелмертова трансформация между решенията за кампаниите BG 2004 и новополученото решение за EUREF BG 93 за EUREF точките.

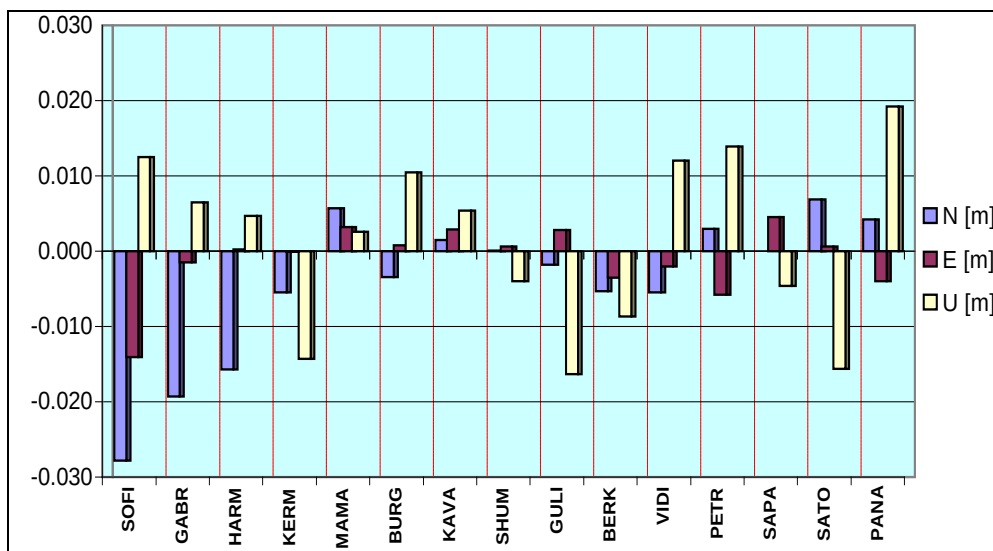
1а. Използвани са получените ITRF2000 скорости на точките. Координатите на EUREF точките от епоха 2004.8 са трансформирани в епоха 1993.8 и е направена Хелмертова трансформация. Остатъчните разлики са показани на графиката на Фигура 16 (вж. 6.3.1).

1б. Направена е Хелмертова трансформация и като са използвани скоростите на точките според модела NUVEL-1A-NNR и Европейския ротационен полюс, определен от Altamimi и Boucher 2002. Резултатите са представени съответно на Фигури 22 и 23.

¹ Проверката и контролът на полученото решение не могат да бъдат изложени изцяло в един параграф. Започвайки от Хелмертовите трансформации, изложени по-горе, така и по-нататък в изложението ще бъдат привеждани нови сравнения и проверки.



Фиг.22. Сравнение между решенията за кампаниите EUREF-BG-93 и BG-2004, Хелмертова трансформация, с използване на модела NUVEL1A



Фиг.23. Сравнение между решенията за кампаниите EUREF-BG-93 и BG-2004, Хелмертова трансформация, с използване на ротационния полюс ETRF2000

2. Сравнение на скоростите на точките Петрич, Сапарева баня, Сатовча, Габрово, Харманли, Бургас, Шумен и Берковица, получени за различни периоди от време.

За значителен брой от EUREF точките се разполага освен с измерванията от 1993 (94,96) и 2004 година, още и с измервания, извършени през 1998, 2001, 2002 и 2003 година. Това позволява да се сравнят скоростите на тези точки, получени за различни интервали от време – Таблица 21. За тази цел са обработени и GPS кампании, проведени през 1998, 2001, 2002 и 2003 година по начин, аналогичен на описания по-горе за кампанията BG 2004.

Т а б л и ц а 21. Сравнение на скоростите на EUREF точки, получени за различни периоди от време

№	Точка/Период	Vx [mm]	Vy [mm]	Vz [mm]	VN [mm]	VE [mm]
1	GABR 8140					
	93-04	-17.5	17.8	6.0	10.1	23.6
	93-96-04	-17.6	17.8	6.1	10.1	23.6
	93-96-98-04	-17.2	16.7	5.9	10.1	22.5
2	HARM 8143					
	93-04	-16.6	18.7	6.9	9.7	24.1
	93-96-04	-16.7	18.5	6.7	9.6	23.9
	93-96-98-04	-16.4	17.4	6.4	9.6	22.8
3	BURG 8144					
	93-04	-16.2	19.1	6.4	8.4	24.4
	93-96-04	-16.3	19.5	6.7	8.6	24.8
	93-96-98-04	-15.9	18.5	6.5	8.6	23.7
4	SHUM 8141					
	93-04	-17.7	17.6	5.8	9.6	23.7
	93-96-04	-18.0	17.5	5.6	9.7	23.7
	93-96-98-04	-17.7	16.3	5.3	9.7	22.5
5	BERK 8148					
	96-04	-15.8	19.2	7.8	10.5	23.9
	96-98-04	-15.0	18.4	7.7	10.2	22.8
6	PETR 8146					
	94-04	-15.7	18.6	5.1	8.5	23.3
	94-96-04	-15.5	18.9	5.1	8.4	23.5
	94-96-98-04	-15.1	17.8	4.9	8.3	22.3
	94-96-98-01-04	-14.9	18.4	4.9	7.9	22.8
	94-96-98-01-02-04	-15.1	18.6	4.7	7.8	23.1
	94-96-98-01-02-03-04	-15.1	18.8	4.9	8.0	23.2
7	SAPA 8145					
	93-04	-15.9	18.1	6.3	9.7	22.6
	93-97-04	-15.7	16.8	5.8	9.6	21.6
	93-97-02-04	-15.7	17.6	5.6	9.2	22.3
	93-97-02-03-04	-15.8	17.8	5.7	9.3	22.5
8	SATO 8147					
	96-04	-14.3	20.3	8.2	9.4	24.4
	96-98-04	-13.8	19.1	8.1	9.3	23.1
	96-98-01-04	-13.8	19.6	7.9	9.0	23.6
	96-98-01-02-04	-13.9	19.9	7.8	8.9	23.8
	96-98-01-02-03-04	-14.0	20.0	7.8	8.9	24.0

3. Сравнение на скоростите на точки, получени от различни източници. По-долу в табличен вид са дадени сравнения на получените в настоящето решение скорости на някои от точките и независими решения на други автори за същите точки. Доброто съгласуване между различните независими резултати показва още веднъж много добрите качества на настоящето решение.

Т а б л и ц а 22. Скорости, в координатна система ITRF2000, на точките определени в различни независими решения

Станция	X [мм/г]	Y [мм/г]	Z [мм/г]	N [мм/г]	E [мм/г]	Решение
SOFI	-17.8	19.3	7.7	12.2	25.2	ЦЈБГ_04
	-15.5	18.6	6.0	9.0	23.3	BG 2004
				10.3	27.0	OLG
	-16.5	18.7	7.3	10.6	23.7	ITRF2000
PENC						ЦЈБГ_04
	-17.5	17.4	6.5	12.3	22.2	BG 2004
	-16.6	18.1	8.2			ITRF2000
BUCU	-18.6	16.6	8.4	12.5	23.1	ЦЈБГ_04
	-16.0	17.0	7.8	10.4	22.3	BG 2004
				10.2	27.2	OLG
	-18.1	16.2	7.4	6.5	29.2	ITRF2000
ANKR	-6.8	-5.4	10.1	13.3	-0.9	ЦЈБГ_04
	-4.6	5.1	8.6	10.8	-1.8	BG 2004
				11.3	1.6	OLG
	-8.8	-2.3	6.4	10.5	2.8	ITRF2000
ORID	-17.3	19.4	8.2	12.3	24.3	ЦЈБГ_04
	-13.3	20.0	7.9	9.4	23.4	BG 2004
						ITRF2000

В Таблица 22 съкращенията означават:

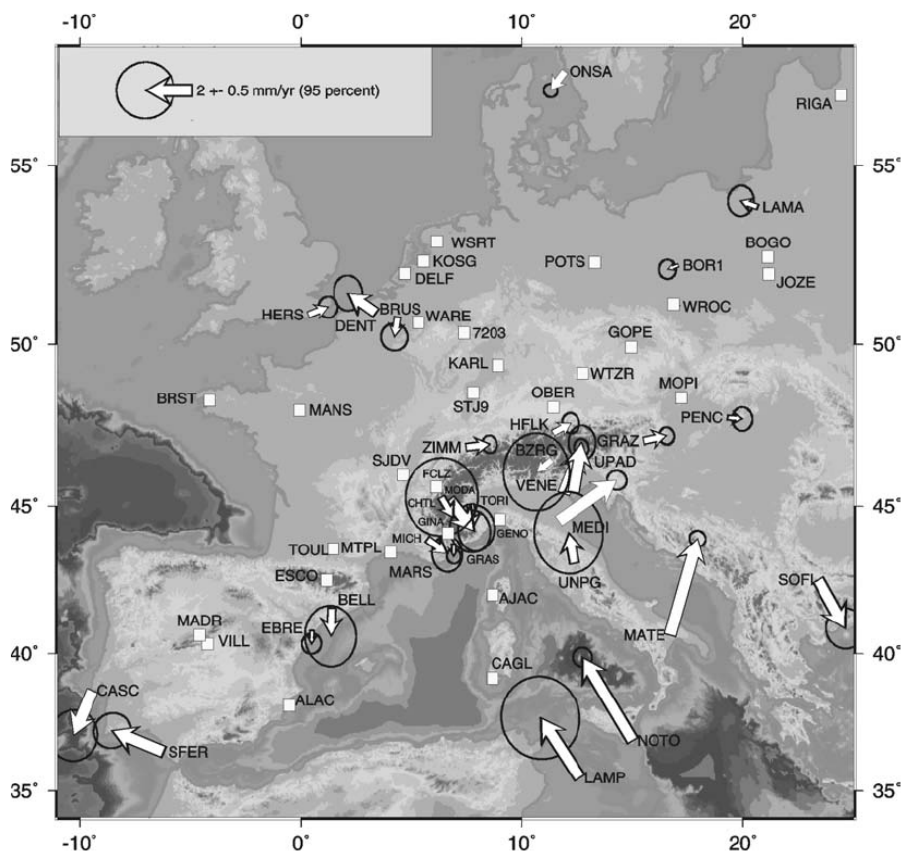
- ЦЈБГ_04 – решение получено 2004 година в ЦЈБГ от обработка на наблюденията на геодинимичната мрежа на ЦЈБГ в Югозападна България за периода 2001 – 2004 година, софтуер Bernese 4.2;

- BG 2004 – настоящето решение;

- OLG – Federal Office of Metrology and Surveying, Institute of Space Research of the Austrian Academy of Sciences, Department of Satellite Geodesy (Analysis Centre).

С ITRF2000 са означени скоростите в координатна система 2000, а цитираните скорости BG 2004 са от общото решение от всички анализирани GPS кампании за периода 1993 – 2004 година.

4. Скорост на точката SOFI. На Фигура 24 са показани релативните скорости, получени в (Nocquet et al., 2003), включително и тези на перманентната EUREF/IGS станция SOFI. Сравнението с получената в настоящето решение релативна скорост (Фигура 20) показва едно много добро съвпадение.



Фиг. 24. Релативни скорости на перманентните EUREF/IGS станции в Европа по (Nocquet et al., 2003)

9. Получаване координатите на точките от Държавната GPS мрежа за епоха 1989.0

Получаването на координатите на точките от Държавната мрежа в координатната система ETRS89, епоха 1989.0, предполага да се познават или техните ITRF2000 скорости или EUREF скоростите им.

Тъй като на разположение са оценки на скоростите само на EUREF точките, то трансформирането на всички точки от мрежата в епоха 1989.0 може да стане само с използването на модел на скоростите. По препоръката на EUREF от 2001 година е използван определеният от Altamimi и Boucher ротационен полюс на Евразия (Altamimi and Boucher, 2002).

За трансформирането на точките от мрежата, първо координатите са екстраполирани от ITRF2000, епоха 2004.8, в епоха 1989.0. Използвани са изведените скорости на EUREF точките, а за всички останали точки - изчислените според ротационния полюс скорости. След това координатите от ITRF2000 епоха 1989.0 са трансформирани в ETRS89 епоха 1989.0. Тук трябва да се подчертае, че получените координати са в Европейската координатна система ETRS89, реализация ETRF2000, епоха 1989.0.

10. Сравнение и контрол на резултатите от обработката на Държавната мрежа с измервания от Второстепенната GPS мрежа

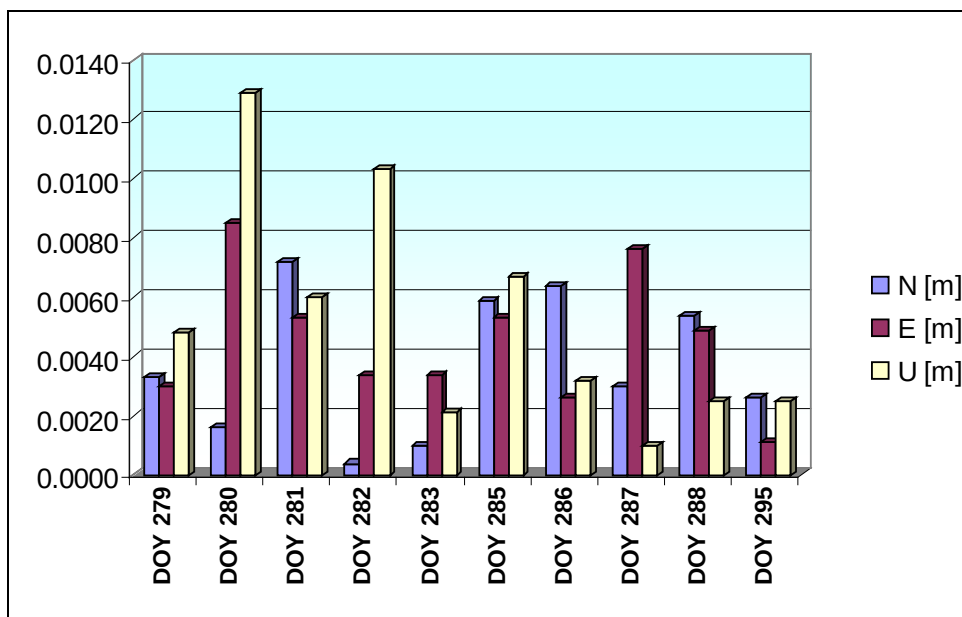
За проверка и оценка на полученото окончателно решение за Първостепенната държавна GPS мрежа и за определяне на концепция (стратегия) за обработка на Второстепенната GPS мрежа е извършен анализ на фрагмент от наличните наблюдения на тази мрежа, проведени в края на 2004 година. Обработени са GPS измервания от дните 279-ти до 295-ти.

Наблюденията от Второстепенната мрежа са извършени съгласно приетата програма и са с продължителност 8 часа (вж. Програма за наблюдение на второстепенната мрежа), като са наблюдавани едновременно минимум 3 точки от Първостепенната.

Основните моменти от стратегията, при която са обработени наблюденията от Второкласната GPS мрежа, са:

- за изходни точки с известни координати и скорости в ITRF2000, епоха 2004.8, са използвани точките от Първостепенната мрежа. Скоростите на точките от Първостепенната мрежа са получени в съответствие с въведения Европейски полюс;
- използвайки получените скорости на изходните точки, координатите им са екстраполирани за епохата на наблюдение;
- по-нататъшната обработка е извършена съгласно стратегията за обработка на Първостепенната GPS мрежа.

Чрез Хелмертова трансформация са сравнени получените дневни решения, като средно квадратичните стойности на остатъчните отклонения за изходните точки са от порядъка до 10 мм по трите оси. На Фигура 25 са дадени в графичен вид средно квадратичните стойности на остатъчните отклонения по денонощия.



Фиг. 25. Средно квадратични стойности на остатъчните отклонения за съответните дни на наблюдения между изходните точки

Анализирайки получените резултати могат да се направят следните изводи:

- избрания начин за обработка за второстепенната GPS мрежа е удачен и може да се използва при цялостната ѝ обработка;
- получените при сравнението малки остатъчни отклонения дават убедително доказателство за високата точност на извършената обработка на Първостепенната държавна GPS мрежа и това е гаранция, че резултатите от обработката могат да бъдат основа за практическа реализация на Българската геодезическа система.

11. Сравнение на координатите от окончателното решение с резултатите от експресната обработка

Окончателно решение от кампания BG 2004 е сравнено и с експресното решение на Военнотопографската служба. Експресното решение е извършено със софтуера GPSurvey, версия 2.35. То е получено, като са фиксирани координатите на всичките 14 EUREF точки, в координатна система ETRS89, реализация ETRF93, епоха 1989.0.

Сравнението е извършено чрез Хелмертова трансформация, като са сравнени 120 идентични точки. Средните квадратни стойности на остатъчните отклонения на 120-те точки в северна и източна посоки, и по височина са съответно 4 mm, 4 mm и 8 mm. По-големи остатъчни стойности, при критерии 10 mm, са получени за точките – Таблица 23:

Т а б л и ц а 23. Остатъчни разлики между окончателното решение и резултатите от експресната обработка по-големи от 10 mm

Точка	N [mm]	E [mm]	U [mm]
807	-10.7	2.3	-10.6
933	-4.4	13.1	3.9
1432	2.3	7.8	-22.7
1683	2.0	4.4	-21.7
3072	-0.6	-0.4	22.5
3753	-2.5	-6.0	-21.4
4938	11.1	-1.8	3.9
5343	11.8	-2.3	-8.4
5612	-0.9	-11.4	32.9
8386	-0.3	-12.2	-5.5
8400	-12.3	-3.1	6.0
8423	-13.9	-3.1	-9.5
9257	-6.0	9.7	20.7
9307	1.5	-11.7	43.1
9391	1.6	1.7	37.8

По-долу в табличен вид (Таблица 24) са показани остатъчните отклонения за всички сравнени точки, трансформационните параметри между двете решения и средната квадратна грешка за единица тежест от трансформацията,

Т а б л и ц а 24. *Остатъчни отклонения между окончателното решение и резултатите от експерсната обработка*

Остатъчни отклонения	N [m]	E [m]	U [m]
209	0.0020	0.0019	-0.0053
229	0.0097	-0.0013	0.0101
250	0.0068	-0.0016	-0.0084
302	0.0087	-0.0009	0.0064
807	-0.0107	0.0023	-0.0106
933	-0.0044	0.0131	0.0039
991	-0.0074	-0.0028	-0.0040
1173	-0.0035	0.0035	0.0067
1262	0.0047	0.0035	0.0016
1432	0.0023	0.0078	-0.0227
1576	-0.0001	-0.0015	0.0085
1683	0.0020	0.0044	-0.0217
1914	0.0017	0.0084	-0.0112
1965	-0.0029	0.0033	-0.0161
2290	0.0036	-0.0054	-0.0041
3012	0.0019	0.0057	0.0041
3072	-0.0006	-0.0004	0.0225
3180	-0.0024	-0.0031	-0.0119
3220	0.0019	0.0014	0.0010
3334	-0.0027	-0.0017	0.0045
3416	0.0030	0.0075	0.0014
3523	0.0000	0.0033	0.0006
3583	0.0067	0.0036	-0.0050
3753	-0.0025	-0.0060	-0.0214
3810	0.0024	0.0057	0.0050
3958	-0.0013	-0.0043	0.0055
4038	-0.0005	0.0050	-0.0022
4248	-0.0063	-0.0017	0.0088
4570	0.0038	-0.0048	0.0069
4704	-0.0060	0.0039	0.0073
4808	0.0014	-0.0080	0.0042
4938	0.0111	-0.0018	0.0039
5121	0.0028	0.0044	0.0034
5173	0.0020	0.0058	-0.0080
5285	0.0008	0.0021	-0.0106
5343	0.0118	-0.0023	-0.0084
5612	-0.0009	-0.0114	0.0329
5697	0.0026	-0.0025	0.0023
6424	-0.0012	-0.0005	-0.0101
6676	-0.0008	-0.0075	-0.0125
7470	-0.0019	-0.0015	-0.0030
7744	-0.0004	-0.0061	-0.0068
7901	0.0027	0.0006	0.0162
7999	-0.0016	0.0009	-0.0004
8112	-0.0098	-0.0060	0.0002
8304	-0.0004	-0.0037	-0.0064

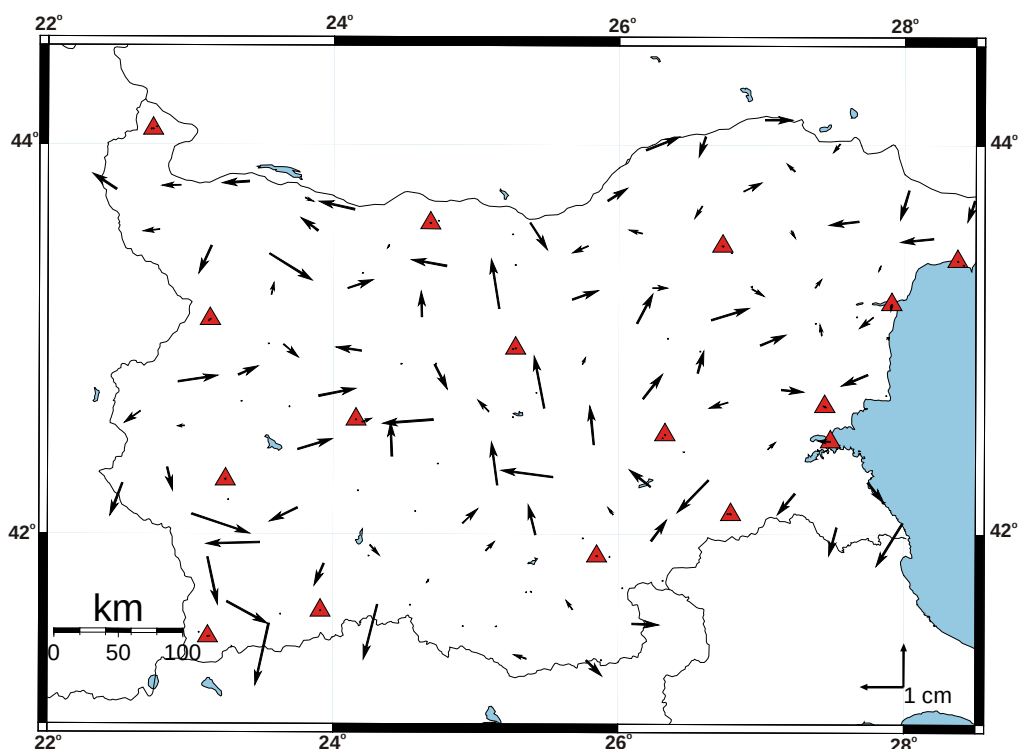
Таблица 24. (Продължение)

8309	0.0027	0.0085	0.0107
8317	0.0058	-0.0002	0.0164
8327	0.0015	0.0007	-0.0011
8332	-0.0002	0.0060	0.0111
8333	0.0020	-0.0015	-0.0085
8334	0.0045	0.0059	-0.0056
8337	0.0009	-0.0028	0.0009
8342	0.0029	-0.0038	-0.0023
8349	0.0008	-0.0057	0.0012
8354	0.0025	-0.0004	-0.0177
8357	0.0050	0.0013	0.0051
8362	0.0056	0.0044	0.0062
8371	-0.0045	0.0036	0.0042
8375	-0.0048	-0.0040	0.0030
8384	-0.0031	-0.0063	0.0002
8385	-0.0024	0.0021	0.0089
8386	-0.0003	-0.0122	-0.0055
8398	-0.0005	-0.0003	-0.0055
8400	-0.0123	-0.0031	0.0060
8417	-0.0049	-0.0022	0.0073
8418	-0.0026	-0.0036	0.0000
8423	-0.0139	-0.0031	-0.0095
9011	0.0014	0.0090	-0.0082
9012	-0.0052	0.0012	0.0098
9030	0.0077	-0.0003	-0.0117
9076	-0.0046	-0.0015	0.0015
9078	0.0000	0.0062	0.0090
9080	0.0017	-0.0018	0.0080
9090	-0.0047	-0.0016	0.0005
9094	-0.0008	-0.0067	0.0059
9257	-0.0060	0.0097	0.0207
9259	-0.0062	-0.0029	-0.0109
9265	0.0018	-0.0080	0.0131
9307	0.0015	-0.0117	0.0431
9312	0.0032	0.0033	0.0035
9355	0.0016	-0.0011	-0.0096
9373	-0.0015	-0.0035	-0.0003
9375	0.0008	-0.0030	0.0052
9391	0.0016	0.0017	0.0378
9393	-0.0073	-0.0071	-0.0053
9403	0.0019	0.0040	0.0050
9470	-0.0066	-0.0020	0.0061
9475	-0.0001	-0.0043	-0.0069
9477	-0.0008	0.0018	0.0082
9482	-0.0050	0.0092	0.0018
BUTG	0.0002	-0.0029	-0.0105
TROY	-0.0056	0.0028	-0.0098
VATG	-0.0014	-0.0002	-0.0153
VVUA	-0.0016	0.0027	-0.0024

Т а б л и ц а 25. Сравнение на крайните резултати от експресното решение и окончателното решение, координатна система ETRS89, епоха 1989.0, Референтен елипсоид GRS80

Параметри	Стойности	Ср.кв. грешки
Транслация по ос N [m]	-0.0458	+/- 0.0006
Транслация по ос E [m]	-0.0379	+/- 0.0006
Транслация по ос U [m]	-0.0138	+/- 0.0006
Ротация по ос N [“]	0.01033	+/- 0.00099 "
Ротация по ос E [“]	0.00216	+/- 0.00161 "
Ротация по ос U [“]	0.00269	+/- 0.00083 "
Мащаб мм/км	-0.0127	+/- 0.0040
Брой на параметрите	7	
Брой на координатите	240	
Ср.кв.гр. за единица тежест [m]		0.0057

На Фигура 26 разликите в хоризонталните положения на точките между експресното и окончателното решение са показани като вектори на всяка от сравняваните точки.



Фиг.26. Разлики между експресното и окончателното решение

Анализирайки получените трансформационни параметри могат да се направят следните заключения:

- наличие на големи стойности за транслациите, особено в северна посока – около 5 см;
- ротацията в северна посока е от порядъка на една стотна от дъговата секунда;
- мащабния фактор е значителен по стойност.

Тези относително големи стойности най-вероятно се дължат на няколко причини:

- в експресното решение за изходни са приети координати, получени в реализация на ETRS89 – ETRF93, за епоха 1989.0. Фиксирането на тези координати при експресното решение пренася всички недостатъци на ETRF93 в полученото решение;
- използвания софтуер GPSurvey 2.35 при експресната обработка притежава редица съществени недостатъци, между които: не е ясен използваният модел за вариации на фазовите центрове на антените (абсолютни или релативни); невъзможност за надеждно оценяване влиянието на тропосферната рефракция; не се използват йоносферни модели при фиксиране на нееднозначностите; използваните прецизни ефемериди са в различна координатна система от изходните точки; не се използват координати на полюса; не се използват тежести на наблюденията в зависимост от височината им над хоризонта; влошаване качеството на базовите линии при увеличаване на разстоянията, главно поради малкия процент разрешени нееднозначности.

Анализирайки направеното сравнение и отчитайки казаното по-горе можем да направим заключението, че софтуерът GPSurvey 2.35 не може да бъде използван за обработка при изискванията за точност, които се налагат на национални GPS мрежи (вж. Проект за измерване на Държавната GPS мрежа). Този софтуер успешно може да бъде използван при съгъстяване на Държавната GPS мрежа – при обработка на наблюдения за целите на ГММП и РГО.

12. Как да бъде обработена Второкласната GPS мрежа – изводи и препоръки от обработката на Държавната мрежа основен клас

Отчитайки всички казано до тук се налага очевидната стратегия за обработка на Второстепенната GPS мрежа на Република България:

- използва се софтуер Bernese 5.0;
- обработката се извършва в координатна система ITRF2000;
- за изходни се използват точките от Първостепенната GPS мрежа, като координатите им се екстраполират със скоростите, получени съгласно EUREF полюса за епохата на наблюдение. За БУЛРЕФ точките се използват изведените от кампаниите EUREF BG 93 и BG 2004 скорости;
- използват се прецизни ефемериди и координати на полюса от IGS;
- използва се йоносферен модел за Европа при определяне и фиксиране на нееднозначностите;
- във всички останали стъпки се следва стратегията при обработка на Основната GPS мрежа;
- получените координати се трансформират за епохата на Основната GPS мрежа (за епохата на решението 2004.8) и след това се трансформират в ETRS89, реализация ETRF2000, епоха 2004.8;
- за контрол на получените резултати се използват инструментите, описани по-горе – Хелмертови трансформации, повтораемост на координатите и сравнение на координати, получени от други надеждни източници - създадените точки от ГММП и измерени в предходните години по съдебни райони. По този начин може да бъде осъществена обратна връзка и да се направят изводи за качеството и точността на създадените мрежи.

13. Кои координати да бъдат приети за използване в практиката?

За практическите приложения, като създаване на ГММП, РГО и други инженерни дейности на територията на Република България, би трябвало да се използват координатите от Държавната GPS мрежа (Първостепенна и Второстепенна), получени в координатна система ETRS89, реализация ETRF2000, епоха 2004.8.

За да се избегне използването на дробна част от годината, е целесъобразно координатите да бъдат трансформирани за епоха 2005.0. Още повече, координатите от Второстепенната Държавна GPS мрежа, извършени през 2006 г., ще бъдат трансформирани за кръглата епоха 2005.0 (01.01.2005 г.).

Вземайки предвид определените скорости на EUREF точките в България може да се направи изводът, че за десет годишен период координатите им ще се променят със стойности от порядъка на 2-4 см. Това е напълно задоволително за всички практически приложения в геодезическата практика.

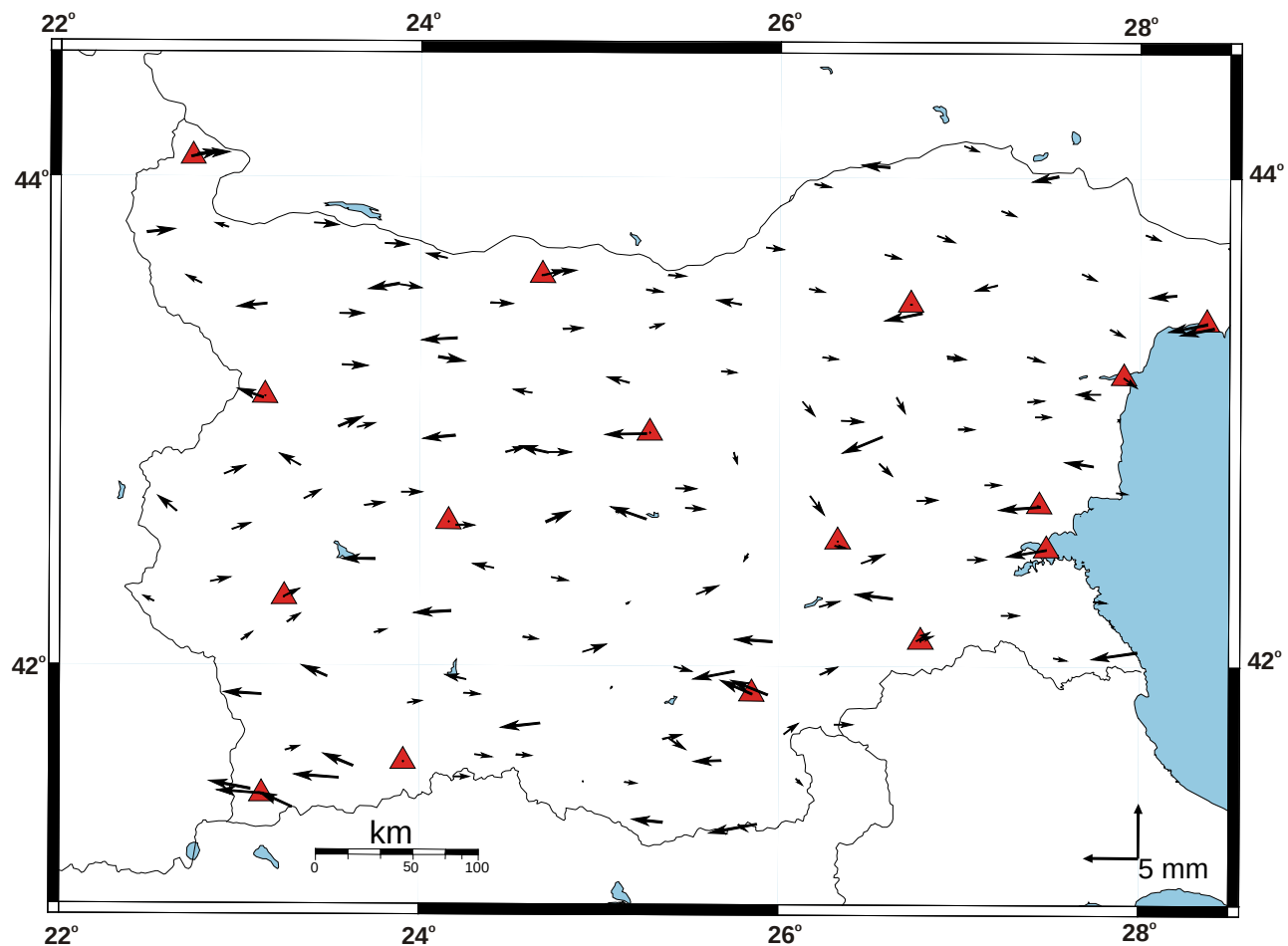
Това обаче не означава, че не трябва да бъдат правени усилия за определяне и мониторинг на скоростите на точките от Държавната GPS мрежа. Това може да бъде извършвано в специални кампании, а също така и при редовната поддръжка на Държавната GPS мрежа. Само когато бъдат определени надеждно скорости на точките бихме могли да твърдим, че разполагаме с една съвременна Национална GPS мрежа, отчитайки регионалните и локални тектонични особености на територията на страната.

14. Грешка, която се прави при използване на ETRS89 координатите като изходни

Използването на ETRS89 координатите като изходни при обработката на GPS измервания за различни приложения неизбежно води до грешка. Две са основните причини за това.

Първата, за която беше споменато и по-горе, е разликата в координатните системи на изходните координати и ефемеридите на спътниците, които са в координатна система ITRS. За да се направи една приблизителна оценка на влиянието ѝ, основния клас на Държавната GPS мрежа бе изравнена с изходни, координатите на EUREF точките в координатна система ETRS89 (реализация ETRF2000, епоха 2004.8). Разликите между това решение и окончателно са показани като вектори (с компоненти север и изток) на Фигура 27.

Средните EUREF скорости на точките от мрежата са около 3 мм/г, което е втората причина за допускането на грешка. Приблизителна оценка на грешката може да се направи като се вземе предвид епохата, в която се обработват наблюденията от съответната GPS кампания.



Фиг.27. Разлики между окончателното решение и решението с фиксирани ETRS89 координати

15. Българската геодезическа система и резултатите от обработката на Държавната GPS мрежа на България

На практика получаването на координатите на точките от Държавната GPS мрежа в координатната система ETRS89 представлява съгъстяване на EUREF на територията на България.

Резултатите от обработката – координатите на точките в координатна система ETRS89, реализация ETRF2000, епоха 2005.0, заедно с техните скорости, са едновременно с това и реализация на Българската геодезическа система, така както е описана в ПМС 140, на територията на страната. След официалното приемане на БГС, нейното практическо използване ще се осъществява чрез координатите на точките от Държавната GPS мрежа.

Заклучение

Изграждането на Държавната GPS мрежа, наблюденията и обработката на основния клас през 2005 година съвпада със 75 –та годишнина от завършване работата на Държавния Географски институт по главната триангулация на България, прецизната нивелация и астрономическото ориентиране на мрежата.

През 1930 година е определена разликата в географските дължини на София и Потсдам, с което по думите на академик Вл. Христов България е „закачена „ за картата на Европа. Завършено е изравнението на мрежата I клас, установена е Гаус-Крюгерова проекция и координатна система 1930 година.

В този смисъл получените окончателни координати на точките от основния клас на Държавната GPS мрежа имат и своето историческо значение – определят новата Българска координатна система и дават възможност за въвеждане на нова картографска проекция – единна основа за всички геодезически, картографски и кадастрални работи в България.

Това има и символично значение - в началото на новия, 21 – ви век, България навлиза с качествено нова геодезическа мрежа и координатна система, както е станало в началото на миналото столетие.

Литература

- Държавна GPS мрежа. Идеен проект за Държавна GPS мрежа (2002). Министерство на отбраната, Военнотопографска служба, София, 2002.
- Държавна GPS мрежа. Резултати от полевото разузнаване и изграждането на Държавната GPS мрежа (2003). Министерство на отбраната, Военнотопографска служба, София, 2003.
- Държавна GPS мрежа. Проект на мрежата и програма за измерване (2004). Министерство на отбраната, Военнотопографска служба, София, май 2004.
- Държавна GPS мрежа. Резултати от определянето на точките от основния клас – експресна обработка (2005). Българска геоинформационна компания, София, април 2005.
- Altamimi Z. (2004). Towards a Dense European Velocity Field. EUREF Publication No. 13, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Toledo, 4-7 June 2003, Mitteilungen des Bundesamtes fur Kartographie und Geodasie, p. 84-88.
- Altamimi Z. (2003). Discussion on How to Express a Regional GPS Solution in the ITRF. EUREF Publication No. 12, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Ponta Delgada, 5-8 June, 2002, Mitteilungen des Bundesamtes fur Kartographie und Geodasie, p. 162-167.
- Altamimi, Z., C. Boucher (2002). The ITRS and ETRS89 Relationship: New Results from ITRF2000. EUREF Publication No. 11, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Dubrovnik, 16-18 May, 2001, Mitteilungen des Bundesamtes fur Kartographie und Geodasie, p. 49-52.
- Altamimi Z., J. Legrand (2005). European Velocity Field and EPN ETRS89 positions and velocities. Paper presented at the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe EUREF in Bratislava, Slovakia, 2-5 June, 2004.
- Altiner Y., P. Gabenski, H. Habrich, G. Milev, M. Minchev, H. Seeger, K. Vassileva (1996). EUREF Bulgaria GPS Campaign Final Results. EUREF Publication No. 5, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Ankara, 22-25 May 1996, Bayerischen Akademie der Wissenschaften, p. 86-97.
- Becker M., S. Zerbin, T. Baker, B. Burki, J. Galanis, J. Garate, I. Georgiev, H.-G. Kahle, V. Kotzev, V. Lobazov, I. Marson, M. Negusini, B. Richter, G. Veis, P. Yuzefovich (2002). Assessment of height variations by GPS at Mediterranean and Black Sea coast tide gauges from SELF projects. Global and Planetary Change Volume 34, Issue 1-2, p. 5-35.
- Boucher C., Z. Altamimi (2001). Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS Campaign. Version 5: 12-04-2001.
- Brockman E., R. Hug. T. Signer (2003). Geotectonics of the Swiss Alps using GPS.). EUREF Publication No. 12, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Ponta Delgada, 5-8 June, 2002, Mitteilungen des Bundesamtes fur Kartographie und Geodasie, p. 109-117.
- Cristea E., G. Stangl (2003). OLG Monitoring of the Balkan mountains and the Eastern Mediterranean area – Report 2002.). EUREF Publication No. 12, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Ponta Delgada, 5-8 June, 2002, Mitteilungen des Bundesamtes fur Kartographie und Geodasie, p. 73-75.
- DeMets C., G. Gordon, D.F. Argus, S. Stein (1990). Current plate motion. Geophys. J. Int., 101, p. 425-478.

- DeMets C., G. Gordon, D.F. Argus, S. Stain (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys. Res. Lett.* 21, p. 2191-2194.
- Ferland R., Z. Altamimi, C. Bruyninx, M. Craymer, H. Habrih, J. Kouba (2002). Regional Network Densification. 2002 IGS Workshop „Towards Real-Time, April 8-11, 2002, Ottawa, Canada.
- Fridez P., R. Dach, U. Hugentobler, D. Ineichen, S. Schaer (2002). The Bernese GPS Software – A Processing Tool in EUREF. . EUREF Publication No. 11, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Dubrovnik, 16-18 May, 2001, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, p. 278-280.
- Gurtner W., C. Boucher, C. Bruyninx. H.v.d. Marel (1997). The Use of the IGS/EUREF Permanent Network for EUREF Densification Campaigns. EUREF Publications N 6, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Sofia 4-7 June, 1997, Bayerischen Akademie der Wissenschaften, p. 50-51.
- Hugentobler U., R. Dach, P. Fridez (eds) (2004). Bernese GPS Software Version 5.0 (draft). Printing Office of the University of Bern, September 2004.
- Ihde J., J. Adam, C. Bruyninx, A. Kenyeres, J. Simek (2003). Proposal for the Development of an European Combined Geodetic Network (ECGN). EUREF Publication No. 12, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Ponta Delgada, 5-8 June, 2002, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, p. 49-67.
- Ihde J., J. Adam, E. Gubler, B.G. Harsson, J. Luthardt, J. Torres (2002). European Coordinate Reference System. EUREF Publication No. 11, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Dubrovnik, 16-18 May, 2001, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, p. 162-170.
- Ihde J., J. Adam, W. Gurtner, B.G. Harsson, W. Schluter, G. Woppelmann (2002). The Concept of the European Vertical GPS Reference Network (EUVN). EUREF Publication N 11/I, European Vertical Reference Network (EUVN) Final Documentation. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, p. 11-22.
- Ihde J., W. Augath (2000). The Vertical Reference System for Europe. . EUREF Publication No. 9, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Tromsø, 22-24 June, 2000, Bayerischen Akademie der Wissenschaften, p. 99-100.
- Ineichen D., W. Gurtner, T. Springer, G. Engelhardt, J. Luthardt, J. Ihde (2002). EUVN97 Combined GPS Solution. EUREF Publication N 11/I, European Vertical Reference Network (EUVN) Final Documentation. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, p. 23-46.
- Kierulf H.P., H.-P. Plag, O. Kristiansen, T. Norbeck (2003). Towards the true rotation of a rigid Eurasia. EUREF Publication No. 12, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Ponta Delgada, 5-8 June, 2002, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, p. 118-124.
- Leonard J. (2002). EuroGeographics – The new generation of CERCO and MEGRIN. EUREF Publication No. 11, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Dubrovnik, 16-18 May, 2001, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, p. 160-161.
- McCarthy D.D. (1996). IERS Conventions 1996. IERS Technical Note 21, Observatoire de Paris, 95 pages.
- Nocquet J.-M., E. Calais, Z. Altamimi, P. Sillard, C. Boucher (2001). Intraplate deformation in western Europe deduced from an analysis of the International Terrestrial Reference Frame 1997 velocity field. *J. Geophys. Res.*, 106, p. 11239-11257.

- Nocquet J.-M., E. Calais, P. Nicolon (2003). Reference frame activity: Combination of National (RGP) and Regional (REGAL) Permanent Networks Solutions with EUREF-EPN and ITRF2000. EUREF Publication No. 12, Proceedings of the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Ponta Delgada, 5-8 June, 2002, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, p. 398-403.
- Peter Y. (2001). Present-day crustal dynamics in the Adriatic-Aegean plate boundary zone inferred from continuous GPS measurements. Dissertation ETH No. 13700, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- Rothacher M., T.A. Springer, S. Schaer, G. Beutler (1997). Processing Strategies for Regional Networks. Paper presented at the IAG General Assembly, 1997, Rio, Brazil, September 3-9, 1997.
- Soler T., J. Marshall (2003). A note on frame transformations with applications to geodetic datums. GPS Solutions, 7. p. 23-32.
- Zielinski J. (2001). Unified European Geodetic Reference Frame EUREF Applied for Poland and other Central and East European Countries – Design and Practice. Proceedings of the Regional Workshop on the Use and Application of Global Navigation Satellite Systems, Vienna, 26-30 November 2001.

Използвани съкращения

БА	Българска армия
БАН	Българска академия на науките
БУЛРЕФ	понякога БУЛРЕФ се използва като сининим на EUREF точките в България
ВТС	Военнотопографска служба
ГММП	Геодезическа мрежа с местно предназначение
ДГМ	Държавна геодезическа мрежа
РЗКС	Реализация на Земна координатна система
РГО	Работна геодезическа основа
СКО	(средно квадратично отклонение) средна квадратна грешка на разлики в координатите, получени чрез седем-параметрична Хелмертова трансформация
ЦЛВГ	Централна лаборатория по висша геодезия
ВН	Bureau International de l'Heure
ВКС	Bundesamt fur Kartographie und Geodasie
СЕРГО	Central European Initiative Working Group on Science and Technology
СНО	Celestial International Origin
СОДЕ	Center for Orbit Determination in Europe
СТРС	Conventional Terrestrial Reference System
ДЕВФ	Dense European Velocity Field
ДОРИС	Doppler Orbit determination and Radiopositioning Integrated on Satellite
ЕСГН	European Combined Geodetic Network
ЕПН	EUREF Permanent Network
ЕТРФ	European Terrestrial Reference Frame
ЕТРС	European Terrestrial Reference System
ЕУРЕФ	European Reference Frame, the IAG Reference Frame Subcommittee for Europe
ЕуроGeographics	the consortium of the National Mapping Agencies (NMA) in Europe.
ЕУВН	European United Vertical Network
ЕВРС	European Vertical Reference System
ЕВРФ	European Vertical Reference Frame
ГЛОНАСС	Global Navigation Satellite System
ГНС	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
ГРС80	Geodetic Reference System 80
ИАС	International Association of Geodesy
ИЕРС	International Earth Rotation Service
ИГГ	International Gravity and Geoid Commission
ИГГОС	Integrated Global Geodetic Observing System
ИГН	Institut Geographique National
ИГС	International GNSS Service
иТРС идеал	Terrestrial Reference Frame
ИТРФ	International Terrestrial Reference Frame
ИТРС	International Terrestrial Reference System
ИУГГ	International Union of Geodesy and Geophysics
ННР	No-net-rotation
НУВЕЛ	Northwestern University Velocity Model
РИНEX	Receiver Independent Exchange Format
Rms	Root Mean Square
SLR	Satellite Laser Ranging
ТРФ	Terrestrial Reference Frame

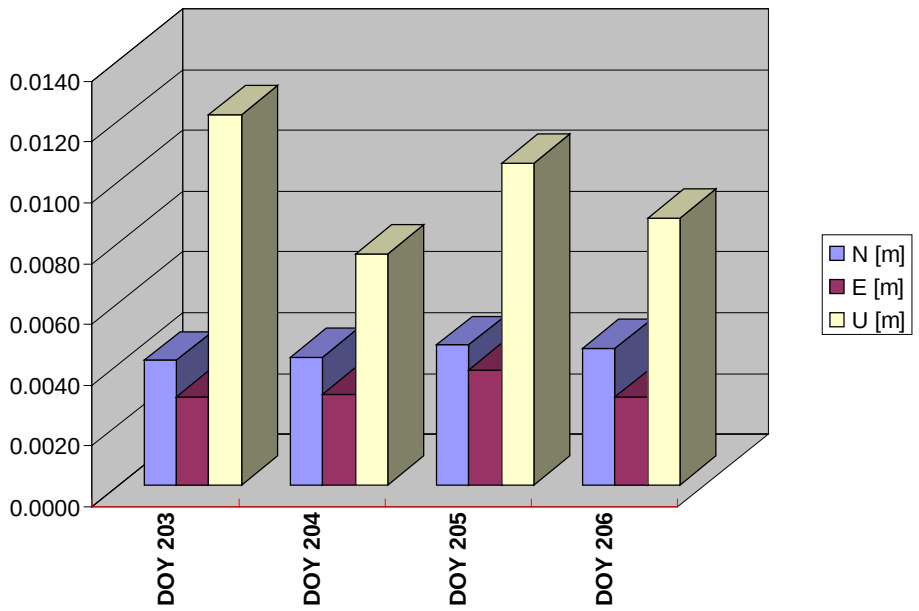
TWG	Technical Working Group (of the EUREF)
UELN	Unified European Levelling Network
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
WGS84	World Geodetic System 84

П Р И Л О Ж Е Н И Я

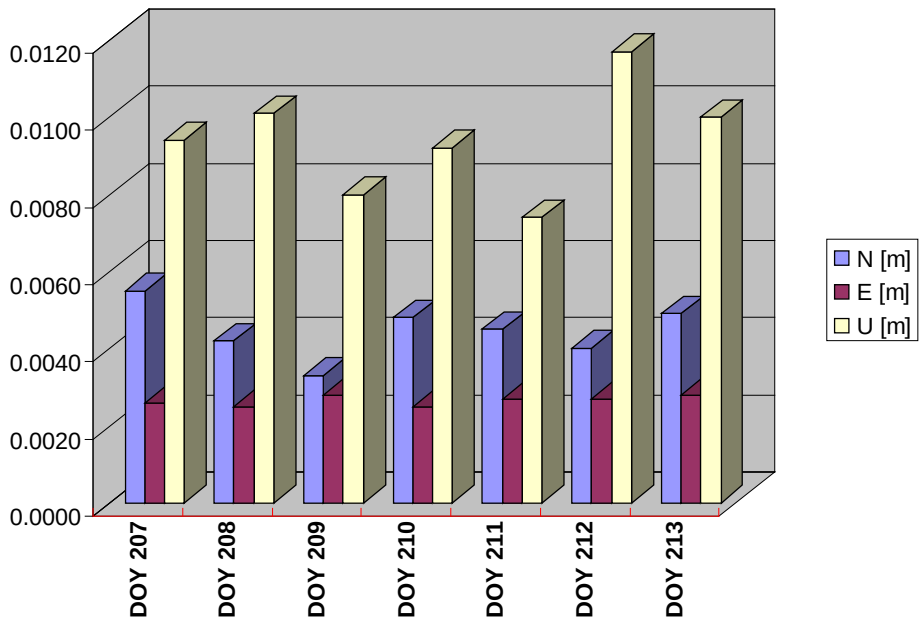
ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Средно квадратични отклонения на IGS станциите между
ITRF2000 и дневните решения получени от Хелмертова
трансформация

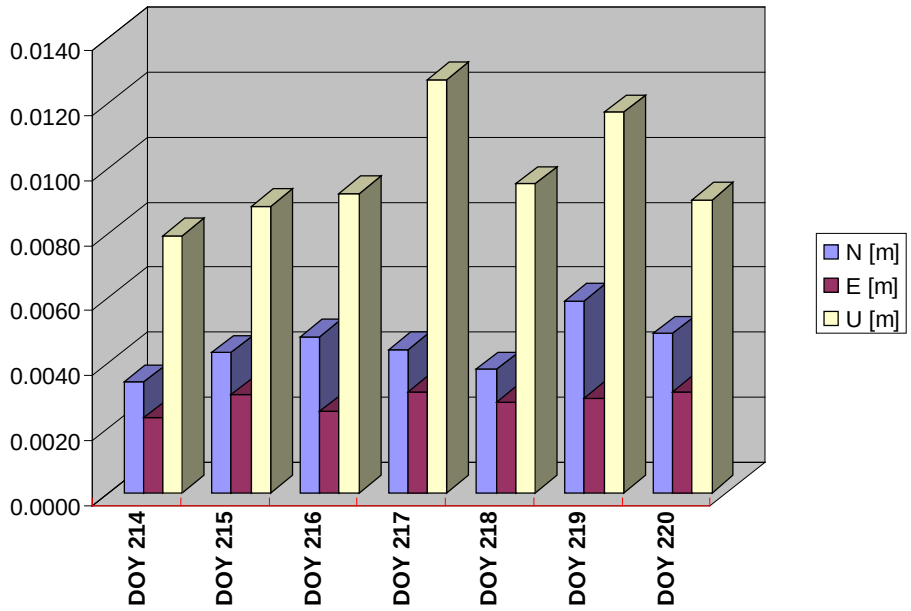
GPS Week 1280



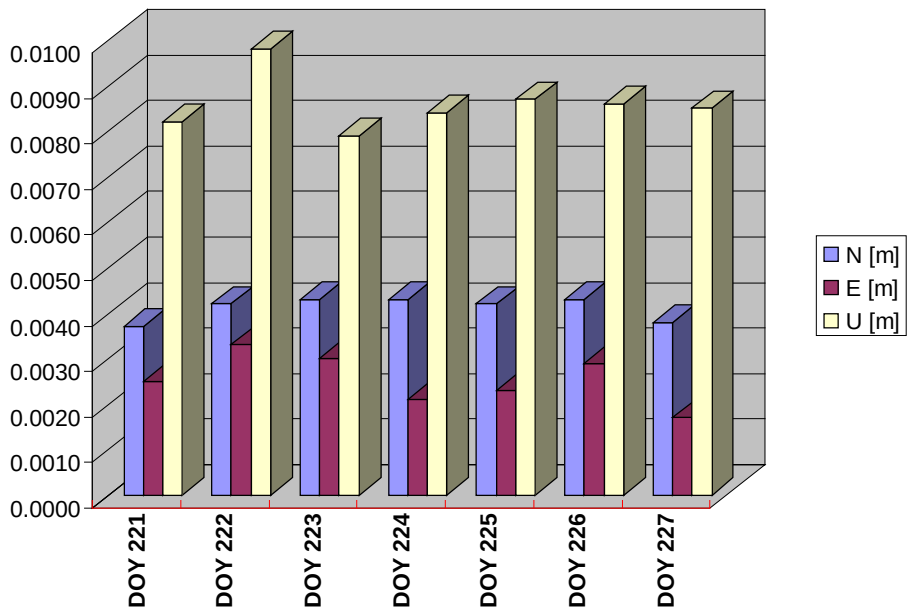
GPS Week 1281



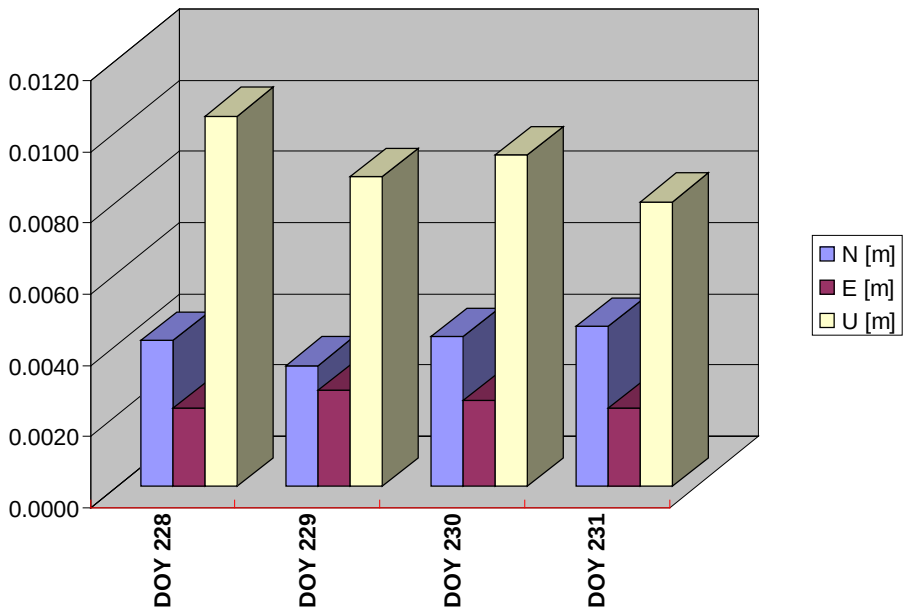
GPS Week 1282



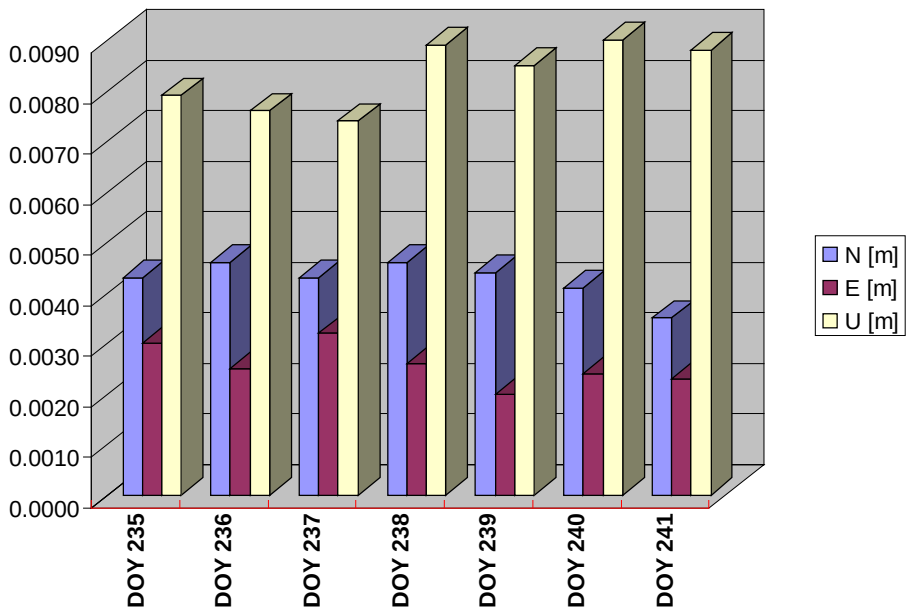
GPS Week 1283



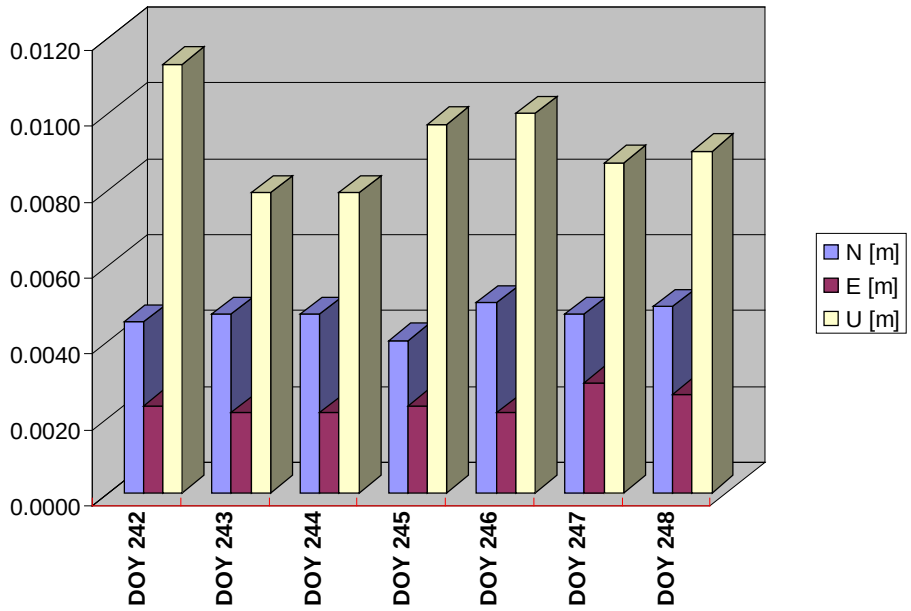
GPS Week 1284



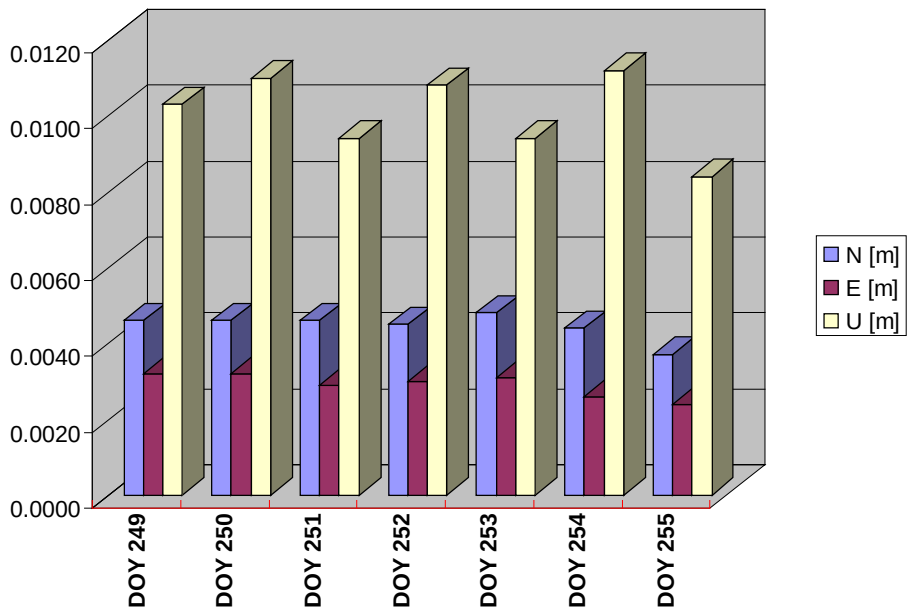
GPS Week 1285



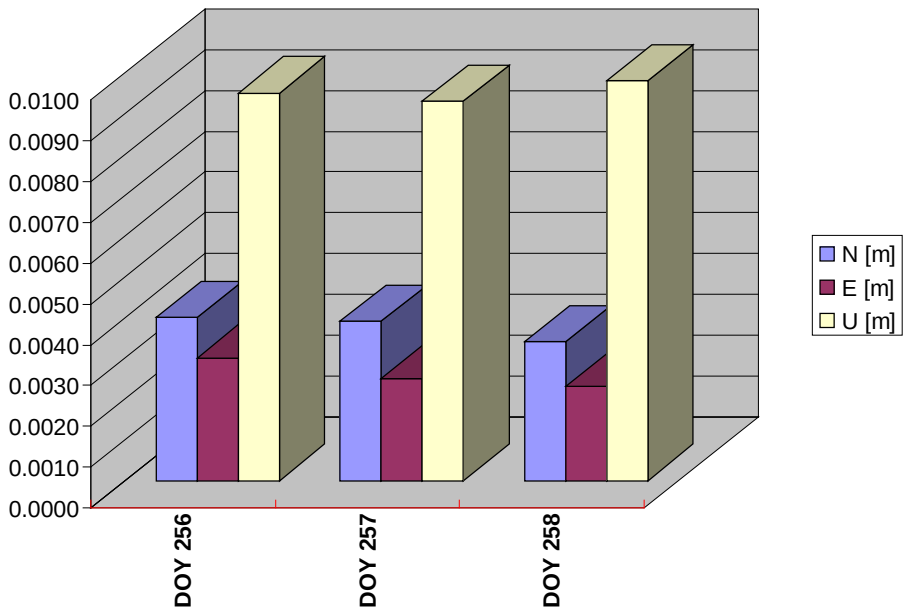
GPS Week 1286



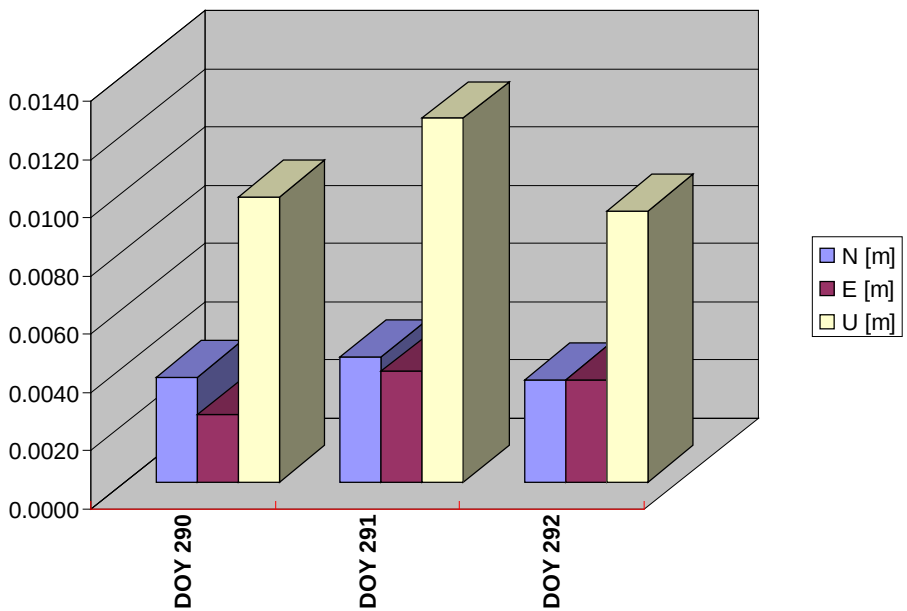
GPS Week 1287



GPS Week 1288

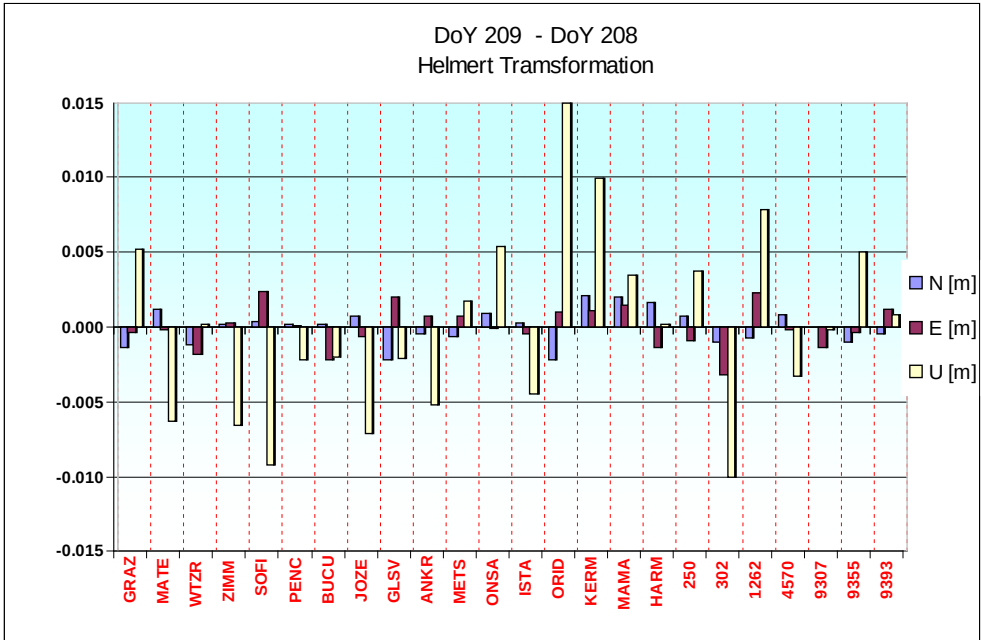
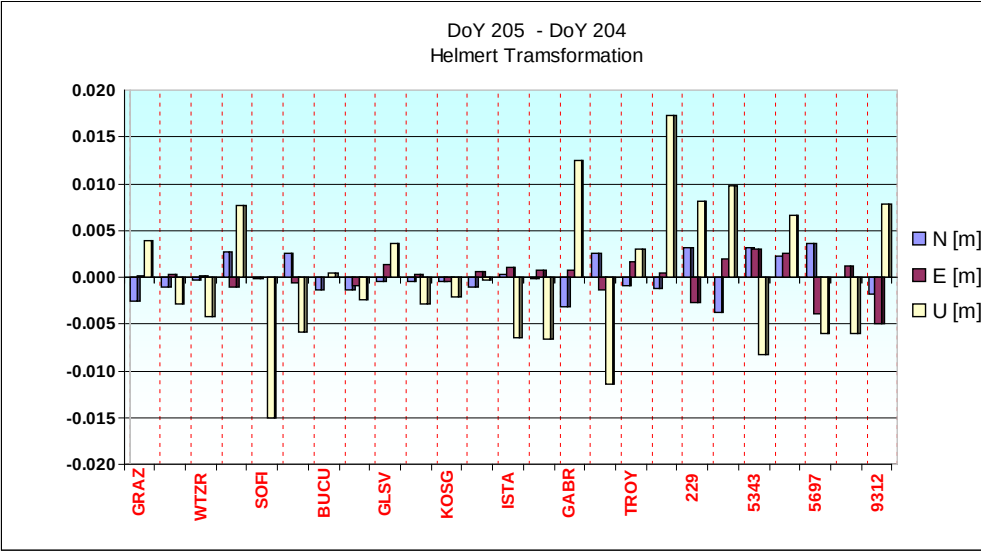


GPS Week 1293

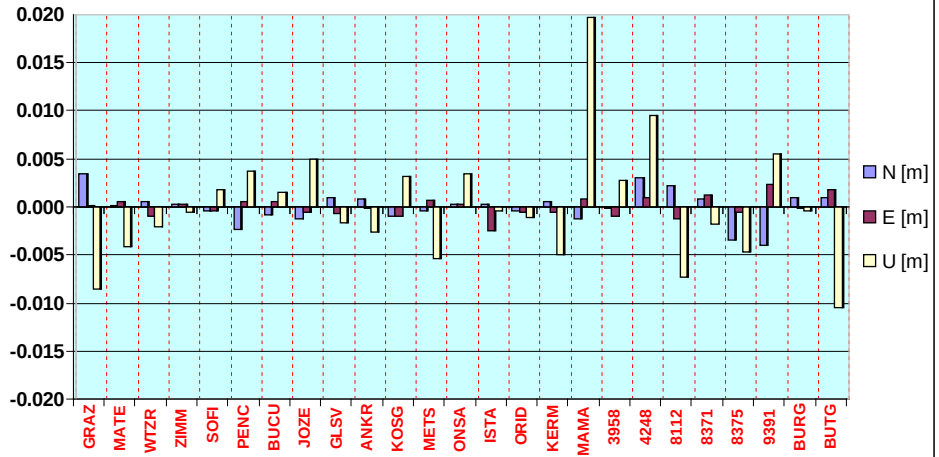


ПРИЛОЖЕНИЕ 2

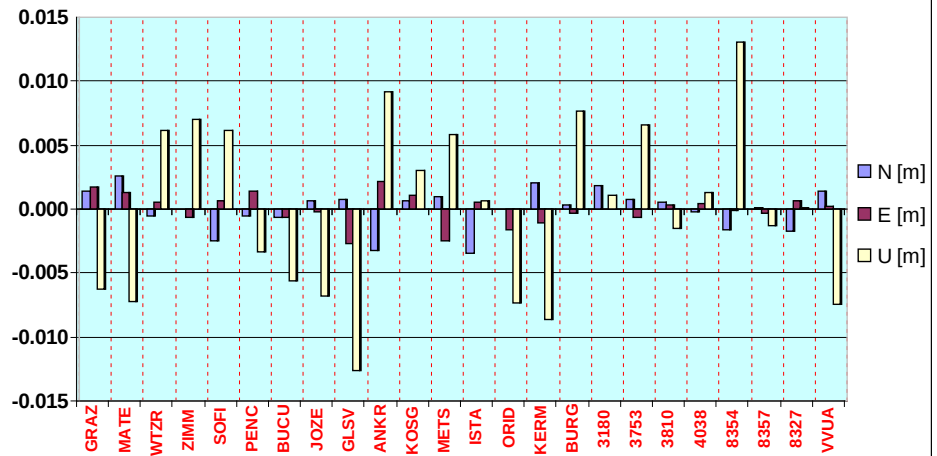
Сравнение на дневните решения от ВГ 2004 едно спрямо
друго



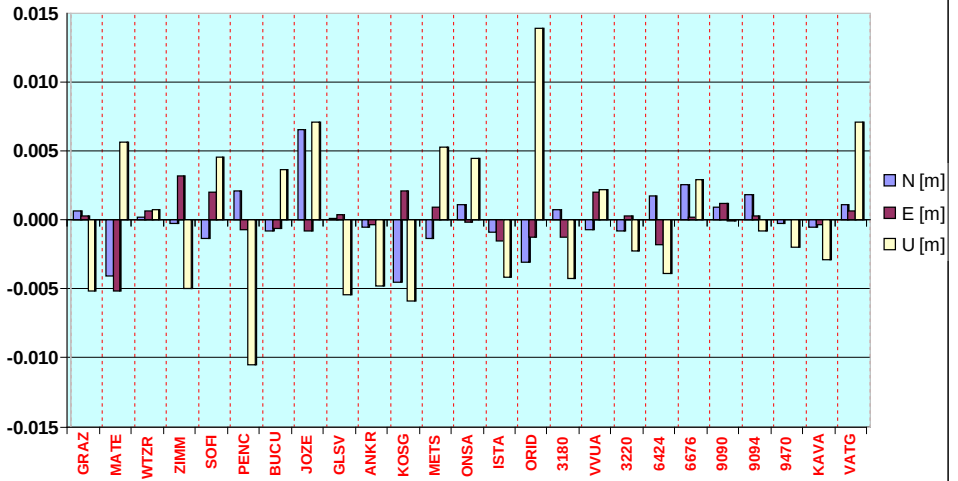
DoY 209 - DoY 208
Helmert Transformation



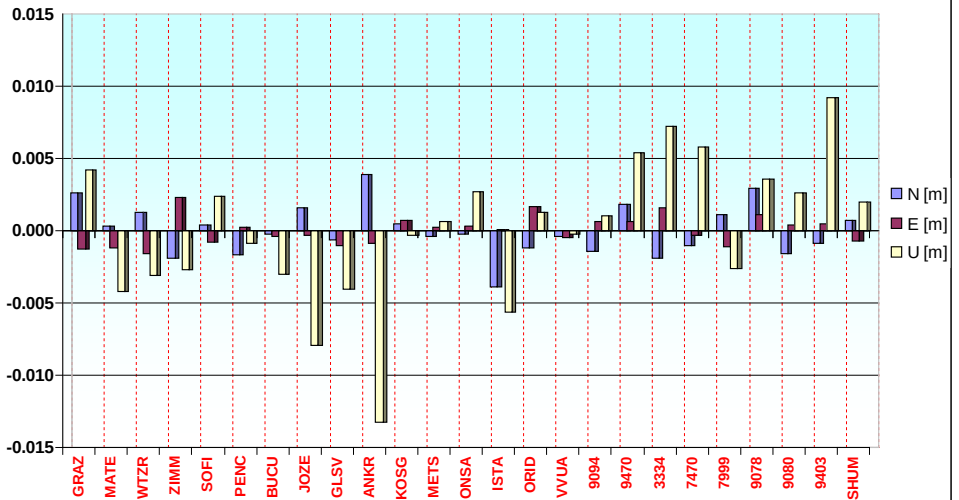
DoY 216 - DoY 215
Helmert Transformation



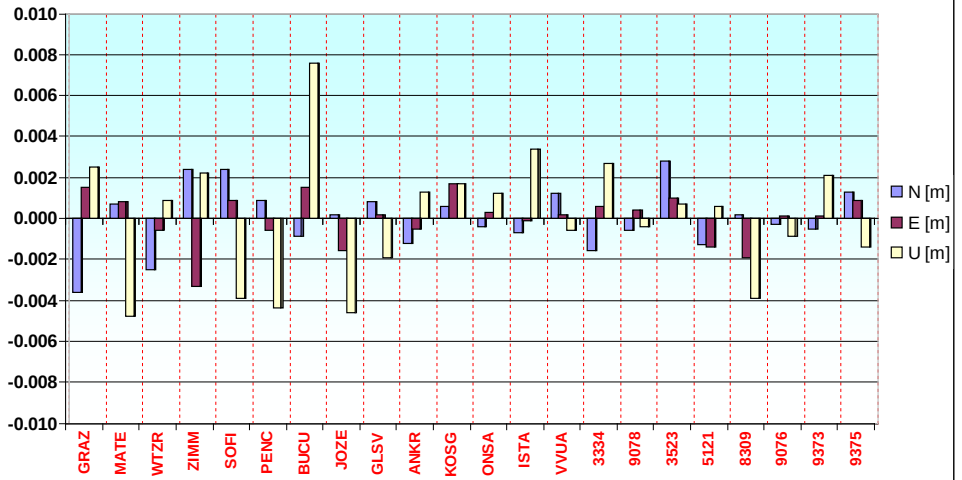
DoY 219 - DoY 218
Helmert Transformation



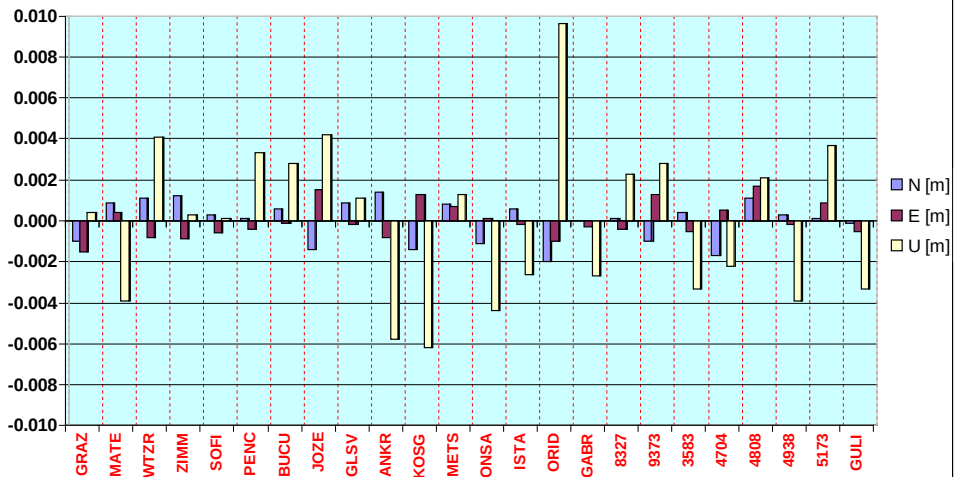
DoY 223 - DoY 222
Helmert Transformation



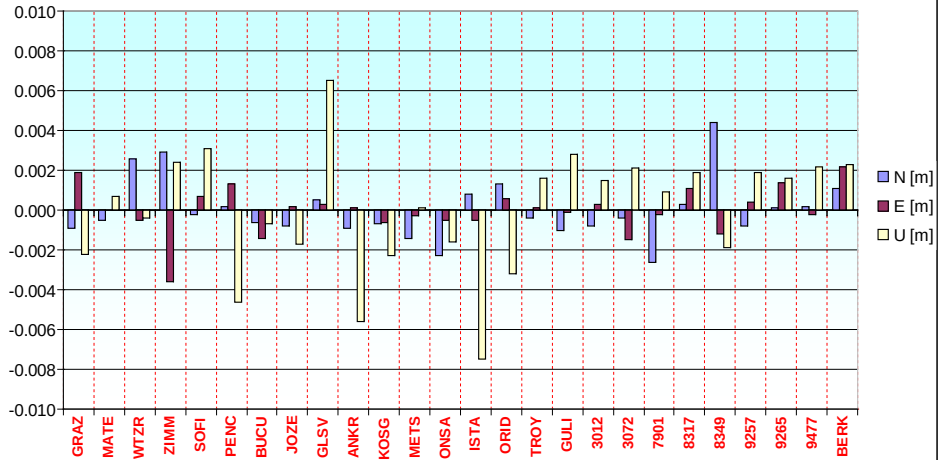
DoY 226 - DoY 225
Helmert Transformation



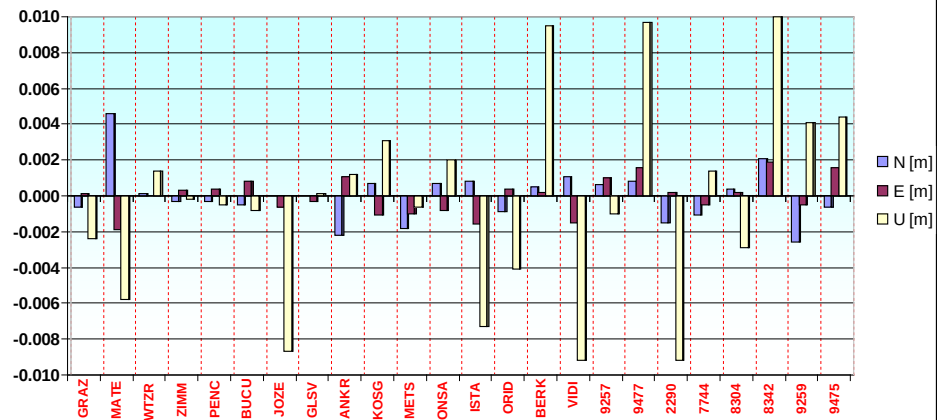
DoY 230 - DoY 229
Helmert Transformation



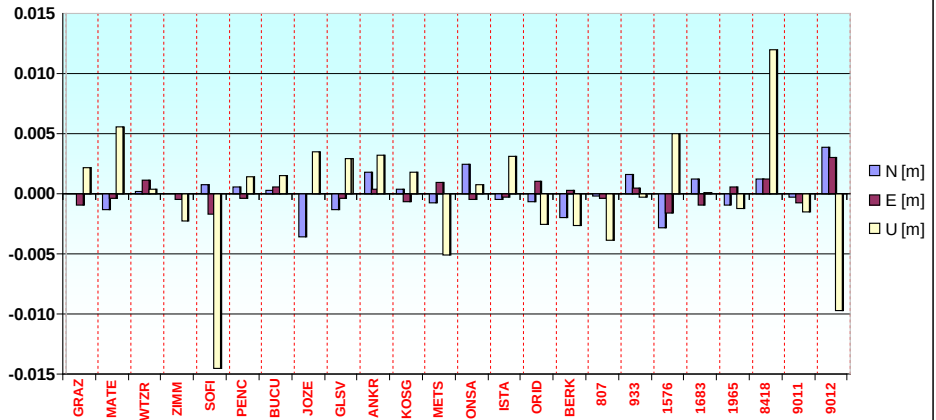
DoY 237 - DoY 236
Helmert Transformation



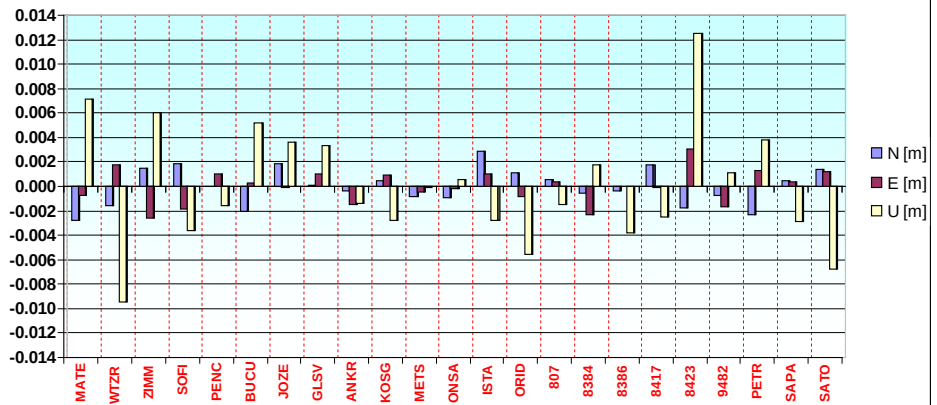
DoY 240 - DoY 239
Helmert Transformation



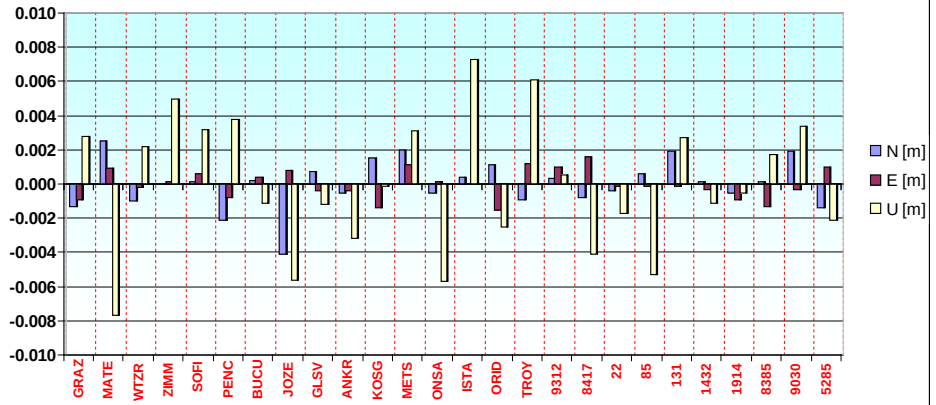
DoY 244 - DoY 243
Helmert Transformation



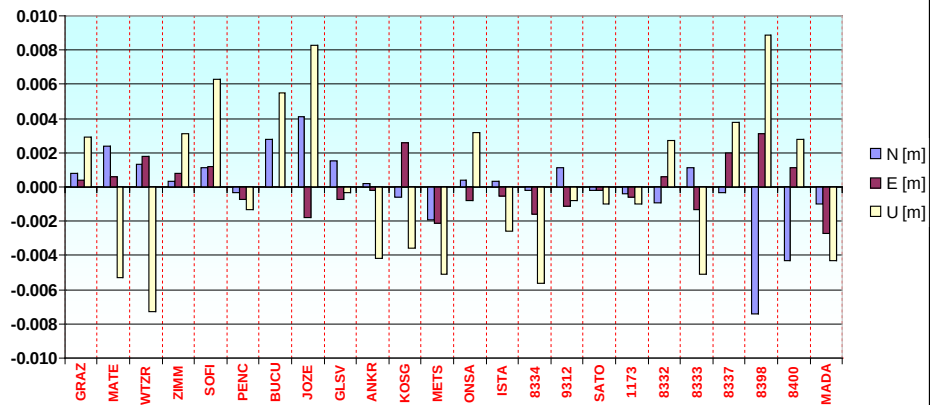
DoY 247 - DoY 246
Helmert Transformation



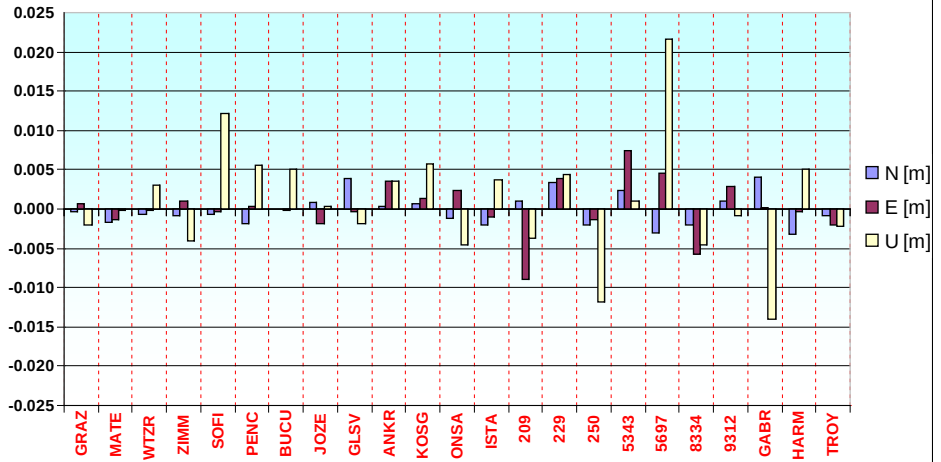
DoY 251 - DoY 250
Helmert Transformation



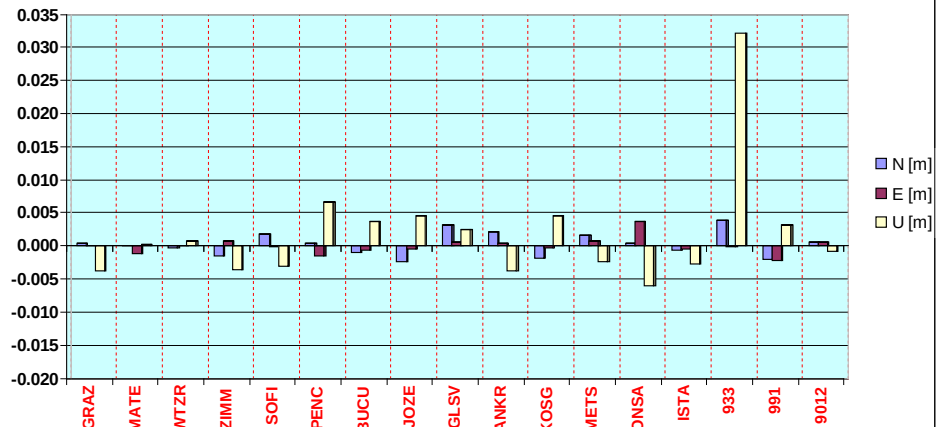
DoY 254 - DoY 253
Helmert Transformation



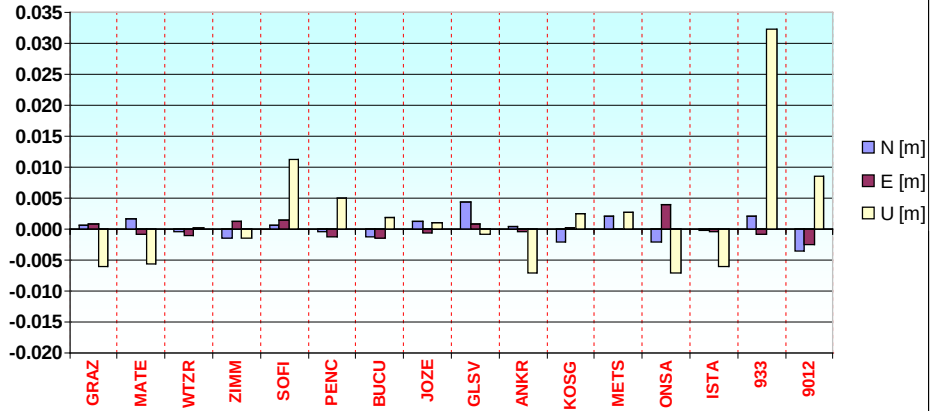
DoY 256 - DoY 205
Helmert Transformation



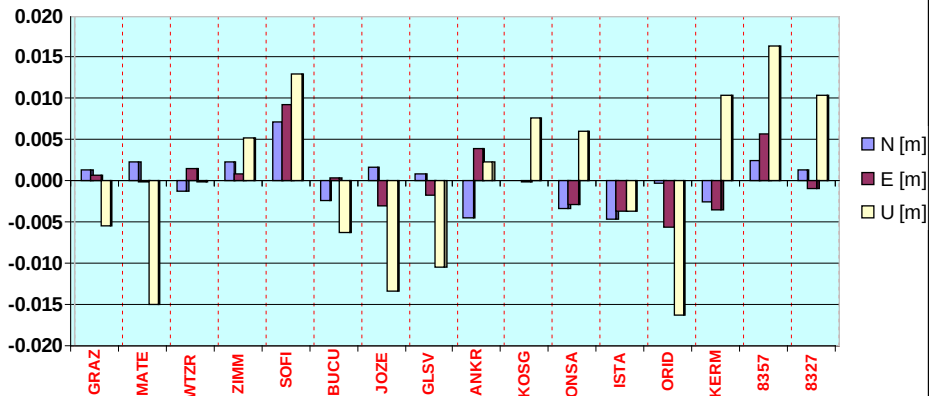
DoY 258 - DoY 243
Helmert Transformation



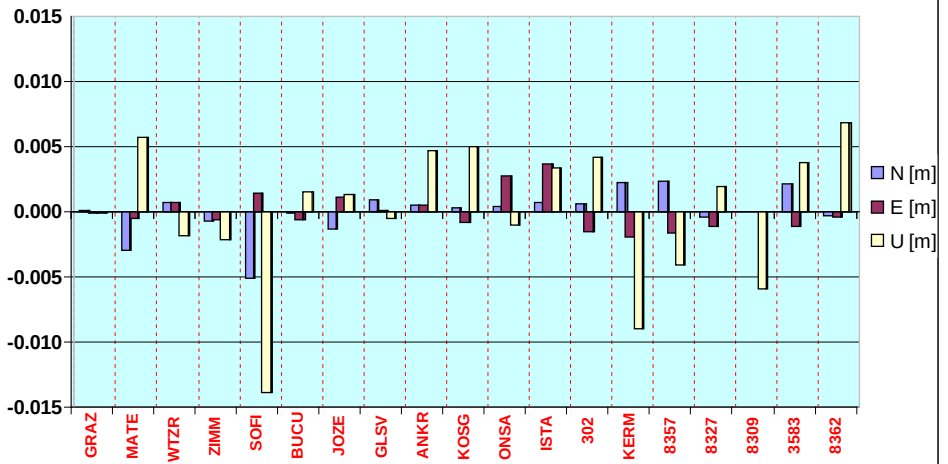
DoY 258 - DoY 244
Helmert Transformation



DoY 291 - DoY 215
Helmert Transformation

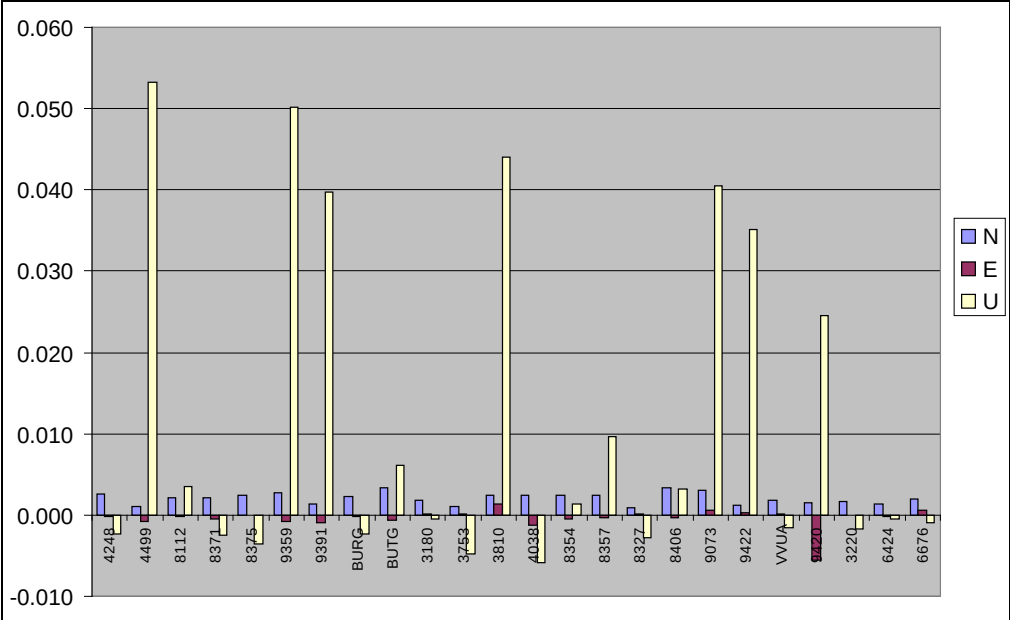
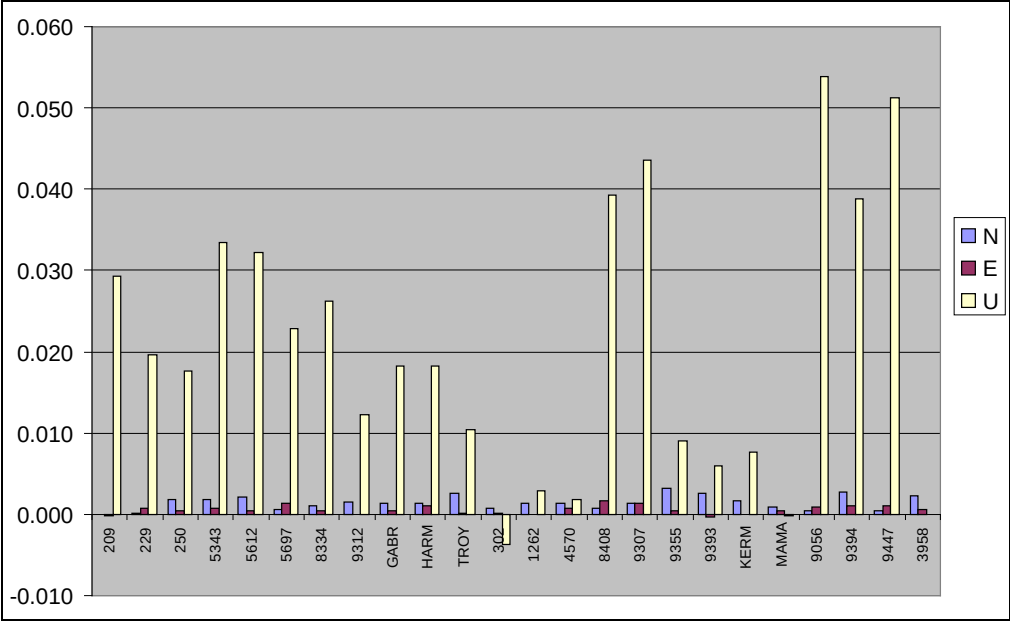


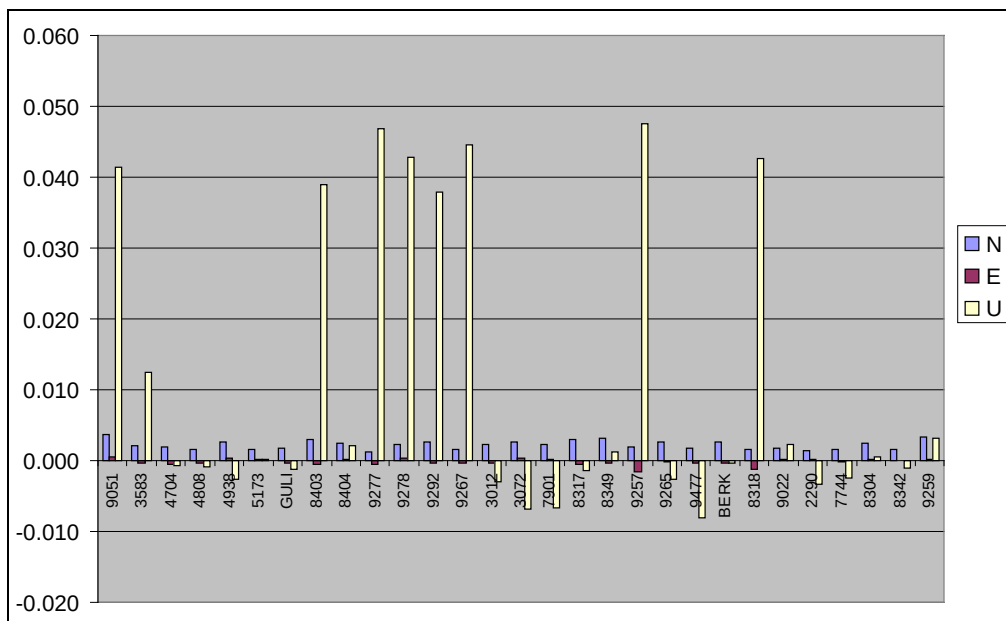
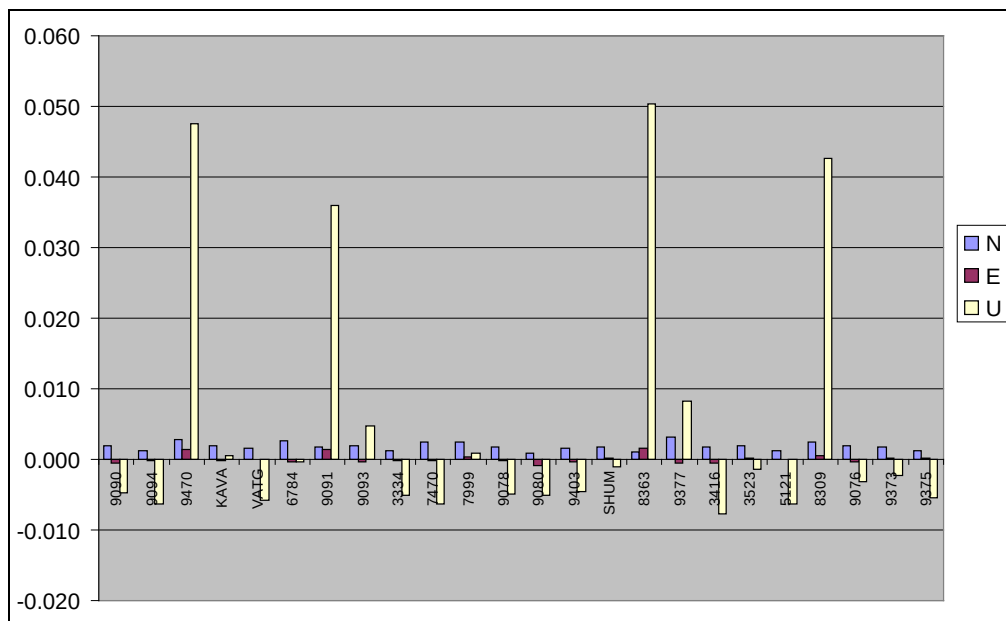
DoY 292 - DoY 291
Helmert Transformation

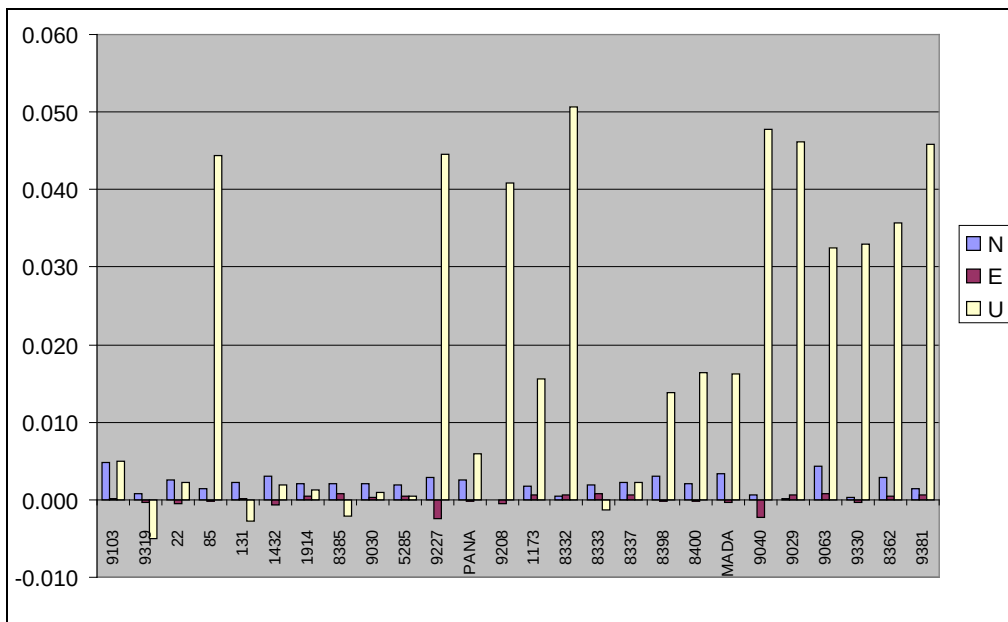
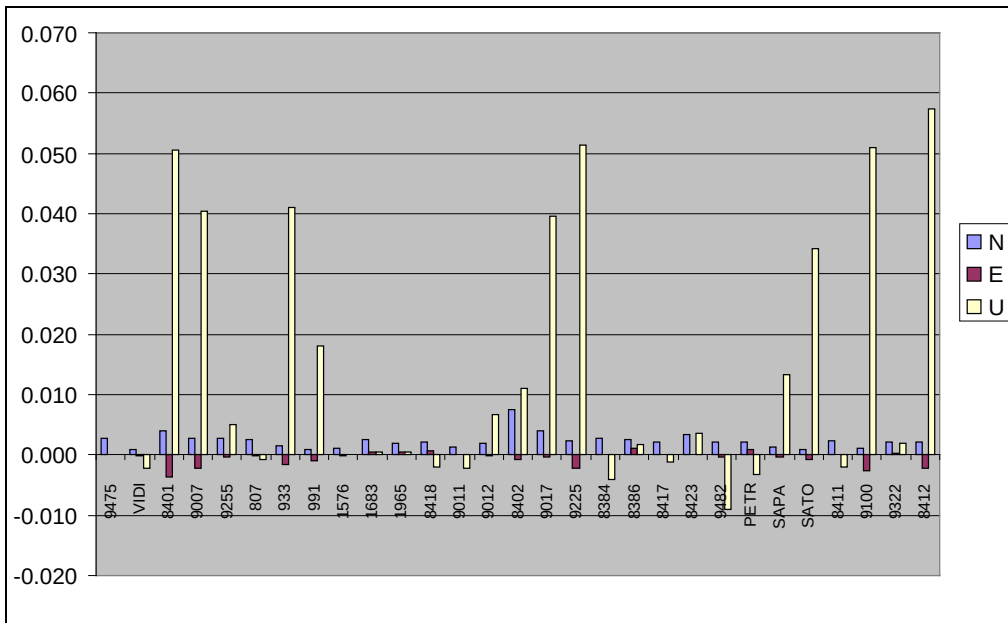


ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Сравнение между десет и петнадесет градусовите решения за
кампанията 2004 година – средноквадратични отклонения
получени от Хелмертова трансформация







ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Годишникъ на ДГИ, 1930-1931

Handwritten:
10,330
218
1999

ГОДИШНИКЪ

НА

ДЪРЖАВНИЯ ГЕОГРАФСКИ ИНСТИТУТЪ

ПРИ

МИНИСТЕРСТВОТО НА ВОЙНАТА

ЗА

1930 и 1931 год.

СОФИЯ

Печатница на Географския Институтъ

1932.

ПРЕДГОВОРЪ

Въз тази книга се излага дейността на Държавния Географски Институтъ при Министерството на Войната презъ 1930 и 1931 год. Презъ този периодъ отъ време принципални промѣни въ дейността на Института не сж направени. Работитѣ се развиваха въ рамкитѣ на очертаната отъ по-рано програма.

Къмъ 1 априлъ 1931 год., персонала на Института е билъ, както следва:

Висшъ персоналъ	23
Технически персоналъ и пр.	129
Канцеларски	8

Всичко: 160

Единъ крупенъ фактъ презъ това време, който заслужава да се отбележи, е завършването на измѣрителнитѣ работи по главната триангулация I и II редъ, прецизната нивелация и астрономичното ориентиране на мрежата.

Презъ това време се опредѣли и разликата въ географскитѣ дължини между София и Потсдамъ, при което опредѣление, Пруския Геодетенъ Институтъ ни указа ценно съдействие, както по организирането, така и при изпълнението на работитѣ. Това опредѣление се извърши въ два периода съвмѣстно, като отъ Германска страна се опредѣли за наблюдателъ д-ръ Мюлигъ и единъ техникъ, а отъ наша страна — д-ръ Владимиръ К. Христовъ. За това много ценно съдействие дължа да изкажа благодарностъ на уважаемия Директоръ на Пруския Геодетенъ Институтъ г-нъ професоръ д-ръ Колшютеръ.

Въ този интервалъ отъ време се завърши и численното изравнение на I кл. мрежа по теорията на най-малкитѣ квадрати. Изчислиха се окончателнитѣ географски координати и сфероиднитѣ дължини на сжщата мрежа.

Установи се окончателно и проекцията, която ще служи, както за кадастъра, така сжщо и за бъдещата карта на страната. Възприе се, като най-подходяща, Гаусъ—Крюгеровата система, споредъ която страната се раздѣля на две ивици (резена) съ начални меридиани 24° и 27°. Дветѣ ивици се простиратъ на лѣво и дѣсно отъ началнитѣ меридиани по на 1 $\frac{3}{4}$ ° и по такъвъ начинъ всички точки, които се намиратъ отъ границата между дветѣ системи на протежение $\pm \frac{1}{4}$ ° ще иматъ двойни координати — къмъ едната и къмъ другата система.

Абсиситѣ на точкитѣ, вмѣсто отъ екуатора, ще се смѣтатъ отъ единъ началенъ паралелъ. За такъвъ се приема 41°, а ординатитѣ ще се смѣтатъ на западъ отъ началнитѣ меридиани за отрицателни, а на изтокъ за положителни.

При се още проекционната плоскостъ да се намали съ $\frac{1}{10,000}$; т. е. $m_0 = 1 - 0.0001$.

Все по това време се завърши и изравнението на цѣлата прецизна нивелация и се получиха окончателнитѣ височини на всички точки въ тази мрежа. По такъвъ начинъ се подготви топографското снимане на страната, въ мѣрка 1:25,000. За цѣльта се опредѣлиха и размѣритѣ на мензулния листъ, които сж 3' и 45" по меридиана и 7' и 30" по паралела съ площъ около 71 кв. клм.