

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

Департамент Геодезия

инж. Мила Стоянова Атанасова-Златарева

**Трансформационни модели при съвременните
геодезически координатни системи**

АВТОРЕФЕРАТ

На дисертация за присъждане на научно-образователната
степен “доктор”

02.16.01 Обща, висша и приложна геодезия

София 2013г.

1. Увод

Един от важните проблеми, пред които са изправени науките за Земята, е количественото описание и динамиката на движението на литосферата, по специално на континенталните плочи и блокове, и очертаването на техните граници. Основното изискване при решаването на този фундаментален проблем е точното определяне на координатите на точки от земната повърхност, разположени върху различни континентални плочи и тяхното изменение във времето и въз основа на това да се установят техните относителни движения.

До началото на 80-те години моделите, описващи движението на литосферните плочи се базираха предимно на геоложки и сеизмични наблюдения. Определянето на преместването на плочите при геофизичните модели е въз основа на измененията, настъпили в скалите и земните структури през дълъг период геоложко време. Преместването на плочите може да се проследи, чрез спътникови геодезични измервания. От многократно измерени разстояния между определени точки, може да се определи наличието на активно преместване или изменения по границите между плочите. Големината и посоката на преместване на плочите, получени от спътникови геодезически наблюдения за кратък интервал от време (няколко години) са съпоставими, по големината и посоката на преместване на плочите, усреднени за милиони години по геоложки и геофизични данни. Моделите, описващи движението на литосферните плочи създадени на базата на геодезически данни в днешни дни все по-често заместват използваните геоложки модели описващи движението на литосферните плочи.

Глобалните навигационни спътникови системи (GNSS), GPS, ГЛОНАСС, Galileo, предлагат ефикасен подход за създаване на тримерни опорни геодезически мрежи и мрежи с многофункционално приложение. Интензивното развитие на геонауките в значителна степен се стимулира от повишаващата се точност на GPS технологията. В най-голяма степен това е валидно за тектониката, където геодезическите измервания с GPS дават възможност за определяне на кинематиката на земната кора.

Изучаването на активната тектоника са базира на комбинираното използване на геоложки, дистанционни и сеизмоложки методи. Чрез GPS космическата геодезия дава възможност за бързо и надеждно количествено определяне на параметрите на съвременните геодинамични движения.

Основен акцент е изборът на референтна система, спрямо която да се отчете движението на точките. Съществува връзка между ITRFuu реализациите и глобалното преместване на всяка точка, причинено от движението на литосферната плоча, на която е разположена точката.

Един начин да отчетем движението на плочите, когато няма многократни измервания, е да заменим индивидуалната скорост със скорост генерирана, от модела на движение на плочите.

1.1 Актуалност на проблема

С навлизането на космическите технологии в съвременната геодезия, се използват тримерните координатни системи с начало в геоцентъра. Международната служба за въртене на Земята (IERS) поддържа Международната земна референтна система ITRS, която по същество е съвкупност от предписания и общи условия, които заедно със съответните методи за моделиране, дефинират началото, мащаба, ориентацията и изменението във времето на земната координатна система. Тази система се реализира чрез т.нар. Международна земна референтна координатна система (ITRF), която представлява списък от координати и скорости на станции, получени чрез обработка на GPS, VLBI (Very Long Base Interferometri) Радиоинтерферометрия със свръх дълги бази, SLR Лазерна локация на ИСЗ (Satellite Laser Ranging SLR), Лазерна локация на Луната (Lunar Laser Ranging LLR) LLR и DORIS (Doppler Orbit Determinations and Radio positioning Intergraded on Satellite) наблюдения. ITRF се разпространява върху дадена територия, чрез съгъстващи мрежи, създадени с помощта главно на GPS измервания. На основата на ITRF89 за Европа е възприета координатна система ETRF89, която е материализирана с точност от 1 до 3 cm, чрез координатите от Европейската GPS-мрежа (EUREF). Положенията на станциите в ETRF89 са фиксирани към стабилната част на Евроазиатската плоча.

Измененията в положението на точките в резултат от движението на тектоничните плочи могат да се моделират. Движенията на литосферните плочи се описват, чрез геоцентрични ротационни вектори, зададени с географските координати на центъра на ротация и ротационна скорост или чрез скоростите на ротация, около осите на правоъгълна координатна система.

Трансформациите между Европейската координатна система (ETRF) и Международната земна референтна система (ITRF) са тясно свързани с модела описващ движението на литосферната плоча. В зависимост от избора на модел се получават различия в посоката и големината на релативните (относителните) скорости.

Земните координатни системи ITRF еволюират във времето под действието на глобалните геодинамични процеси. Заедно с това местата, в които са разположени наблюдателните станции, са подложени на въздействието на редица естествени или предизвикани от човека процеси, които променят координатите по начин, който не може да се моделира. Това налага използването на трансформационни модели

за преминаване от една епоха в друга и извеждането на трансформационни параметри.

Всичко това показва особената актуалност на проблема в световен и национален мащаб. Може да се направи извода, че изучаването на координатните системи и техните изменения във времето и пространството е въпрос, който е поставен сред приоритетите в геодезията. През последните 20 години има множество изследвания в областта на тази тематика, отразени в научни публикации, доклади на международни симпозиуми, научно изследователски проекти и дисертации и др.

1.2. Цел и задачи на изследванията

Целта е да се анализират координатните трансформации между земните геодезически референтни системи за да се изведе ротационен полюс за територията на България

Поставени са следните задачи за постигане на целта:

- Да се направи обобщение и систематизация на:
 - основните модели за трансформация на координати и скорости;
 - основните геодезически и геофизични модели, за движение на литосферните плочи.
- Да се установят разликите в оценяваните параметри при координатни 7 и 14 параметрични трансформации с различни ковариационни матрици.
- Да се изследва влиянието на движението на литосферните плочи върху изменението на координатите на точките от физичната земна повърхност и да се отчете тяхното влияние при определянето на скорости на EUREF точките за България.
- Да се изследват систематичните разлики в скоростите, определени от геофизичните и геодезически модели за движение на литосферната плоча Евразия и за територията на България.
- Да се определи полюс на ротация на базата на данни за територията на България. Изведеният модел да дава възможност при липса на скорости на точките, те да бъдат прогнозирани.

1.3. Научно-изследователски методи

Основните изследователски методи използвани в дисертацията са:

- Метода на Ойлер за движение на литосферни плочи по сфера;
- Метод на най-малките квадрати;

Разработена е програма за моделиране движенията на литосферните плочи и чрез нея може да се определят: ротационните параметри на литосферната плоча от координати на точки от различни

епохи (на базата на МНМК) и географските координати на ротационния полюс на плочата, т.нар. Ойлеров полюс.

1.4. Структура на дисертацията

С оглед решаване на дефинираните по-горе задачи, дисертационният труд е структуриран по следния начин.

В **увода** са представени актуалността и обосновката на темата, целта и задачите на изследванията.

Във **втората** част е анализирано съвременното състояние и реализациите на земните координатни системи. Извършена е систематизация на най-често прилаганите геофизични и геодезически модели за движение на литосферните плочи.

В **третата** част “Теоретична постановка” са разгледани накратко основните Земни координатни системи и тяхното приложение. Представени са математически модели за трансформиране на земни координатни системи в различни реализации и епохи, т.е приложение на седем и четиринадесет параметрични трансформации. Дефинирани са някои основни понятия, които са използвани при преобразуването на координатите на точки между различните координатни системи. Изложен е Методът на Ойлер за движение на литосферни плочи по сфера, за определяне на ротационен полюс и компоненти на ротация на плочи.

В **четвъртата** част са проведени експерименти за прилагане на 7- и 14-параметрична трансформация на реален модел от идентични точки за територията на Европа с използване на различни ковариационни матрици и са анализирани получените резултати. Установени са разликите в оценяваните параметри при 7- и 14-параметричната трансформация с различни ковариационни матрици.

Определени са скоростите на точките KAVA, VIDI и HARM на базата на трансформационни модели между две системи и епохи, като са използвани координати и скорости на EUREF точки, получени в резултат на измервания и обработка, за целите на два различни геодинимични проекта [Altiner and et. 1996], [Kotzev et al., 2001].

В **пета** глава е разгледано влиянието на движението на Евроазиатската литосферна плоча върху положението на точките от територията на България. Направено е сравнение между скорости, определени по геофизични и геодезически модели за движение на Евразия и са установени систематични разлики в абсолютните скорости за точките от BULREF. Изведен е полюс на ротация за територията на страната, въз основа на координатите на 15 точки, от приети за официална реализация на ETRS89 за България. Използваният метод се базира на определяне Ойлеровия полюс за движение на тектонски плочи. Географското местоположение на новоопределения полюс на ротация е изобразен съвместно с полюсите на ротация на най-често

прилаганите модели, за движение на Евразия. Определени са абсолютните скорости на точките от мрежата BULREF и са съпоставени с получените резултати от други автори.

В **заклучение** са обобщени основните резултати от проведените изследвания и са представени научните и научно-приложните приноси на дисертационния труд.

2. Съременно състояние на проблема

2.1. Анализ на съвременното състояние на изследванията, свързани с реализациите на земни координатни системи

Реализацията на Международната Земна координатна система ITRS под името ITRFyy, където yy е годината на публикуване, се осъществява от IERS. 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 IERS, които включват; LLR, SLR, GPS и DORIS координати, скорости и ковариационни матрици.

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 Initiatives Working Group on Science and Technology) решават през 1987 година да разработят и проектират нова Европейска геодезическа референтна система European Geodetic Reference Frame (EUREF)-ETRF, базирана на GPS измервания. Тя трябва да унифицира националните референтни системи за геодезически измервания, картография, GIS и навигация в Европа.

Най-важният резултат от реализацията на ITRS-ITRF2000, свързан с Европейската координатна система ETRF89 и нейните реализации (включително последната ETRF2000) е този, свързан с ротационния полюс на Евроазиатската континентална плоча, от своя страна неразделно 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-1A и получените ITRF2000 скорости са значителни, което означава, че моделът NUVEL-1A 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 mm/yr. По тази причина е

изведен нов ротационен полюс за Евроазиатската плоча, определен от ITRF2000 скоростите на 19 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 ITRS89 и ITRS.

За разлика от всички предишни реализации ITRFyy, ITRF2005 използва като входни данни времеви редове - седмични от спътниковите наблюдателни техники и 24 часови от свръхдългобазисната радиоинтерферометрия, на координатите на земните станции и параметрите на ориентация на Земята [Altamimi et al., 2007]. Предимството да се използват временни редове за координатите на земните станции е фактът, че това позволява мониторинг на нелинейните движения (и "скокове") на станциите, а така също възможността да се изследват времевите вариации на параметрите на координатната система и на първо място вариациите на геоцентъра и мащаба. Координатното начало на ITRF2005 се дефинира така, че трансляциите и измененията им във времето, спрямо масовия център на Земята да имат нулеви стойности. На практика това изискване се реализира чрез анализ на лазерни наблюдения на ИСЗ (времеви редове) от последните 13 години. Мащабът и изменението му във времето се определят чрез анализ на 26 годишни наблюдения от свръхдългобазисни радиоинтерферометрични наблюдения. Ориентацията на ITRF2005 и измененията ѝ във времето се задават същите като на ITRF2000 чрез използването на 70 високоточни земни станции.

Комбинацията за извеждане на ITRF2005 съдържа 84 колокирани станции (различни наблюдателни техники) и показва мащабно несъответствие (нехомогенност) от 1 ppb (6.3 mm на екватора) за епоха 2000.0 и 0.08 ppb несъответствие между "лазерното" и "свръхдългобазисното" решение. Възможните причини за това несъответствие са различната геометрия на лазерните и свръхдългобазисните станции и нехомогенност на използваните модели при анализа на наблюденията от двете техники.

Полето на скоростите на ITRF2005 съдържа 152 станции с грешка по-малка от 1.5 mm/yr. Резултатите са използвани за получаване на оценки за абсолютната "твърда" ротация (ротационните полюси) на 15 тектонични плочи, които дефинират нов тектонски модел, включително и на Евроазиатската плоча.

След EUREF симпозиума в Брюксел, 2008 година, ETRF2000 се разглежда като конвенционална земна координатна система за Европа, реализация на ETRS89. ITRF2005 (или ITRF2008) координатите са трансформирани в ETRF2000 съгласно процедурата, описана в [Boucher and Altamimi, 2011].

Тези промени се дължат главно на скока в Z- компонентата от порядъка на 1,8 mm/yr. между ITRF2000 и ITRF2005. Приемането на ETRF2000 като конвенционална система на реализацията ETRS89, ще сведе до минимум координатните промени за епохите след 1989,0 между различните реализации на ETRS89 в различни европейски страни.

2.2. Движение на литосферните плочи

Основа на теорията е схващането, че литосфера през геоложкото си развитие е била сегментирана на отделни блокове, тектонски или литосферни плочи. Границите на плочите са тесни сеизмично активни зони (фиг. 2.1). Литосферните плочи се движат като цели структурни единици. По тази причина, геодезическите координати на точките на повърхността на плочите променят своите стойности с течение на времето, което ги прави зависими от епохата, в която са извършени наблюденията.



Фигура 2.1 Карта на литосферните плочи

Тектониката на плочите е теория, която е била развита да обясни наблюдаваните движения на литосферата на Земята. Тя обхваща много старата теория на континенталният дрейф на Wegener, 1912 от първата половина на 20-тото столетие и е доразвита след 1960г., като се използват предимно геофизични модели, описващи движението на литосферните плочи.

Сравняването на геофизичните и геодезичните модели за Евроазиатската плоча показва, че скоростите на станциите имат систематични разлики, които може да достигнат 3 mm/yr. По тази

причина са необходими подобрения и в двата типа модели за движение на Евразия. Анализ на движенията на плочите е изготвян по много различни методи: от магнитни аномалии, сеизмология, “hotspots” т.нар. горещи точки [DeMets et al. , 1990], [Gripp and Gordon, 1990] и геодезически данни [Sella et al., 2002], [Drewes, 2006]. Литосферните премествания се описват едновременно в абсолютните земни референтни системи, например hotspot система [Morgan, 1972], [Wilson, 1973] или относителна релативна референтна система, например една плоча спрямо другата [Minster and Jordan 1978, DeMets et al. 1990, Gordon 1995]. За простота, движението на плочите може да е указано по аналитичен път, както въртене на твърдо тяло около Ойлеров полюс. Използването на Ойлеров полюс трябва да предскаже бъдещите премествания на плочите, както и да изясни къде те са били в по-ранна епоха.

Известни са редица геофизични модели описващи движението на глобалните литосферни плочи. Един от първите модели е **AMO2** [Minster, Jordan, 1978]. Той сега има само историческо значение. Основна характеристика на геофизичните модели е, че те отразяват скоростта на плочите усреднена за милиони години.

Моделът **NUVEL-1A** е най-прецизният геоложки модел за определяне на скорости. Моделът NNR-NUVEL-1A е предложен от De Mets [1994] и реализира концепцията за чистото въртене (NNR- no net rotation), което се базира на предпоставката, че в литосферата не съществува усукване, а само плъзгане на сферични елементи по земната повърхност. Този модел описва движенията на твърдите плочи за последните милиони години и не е детайлен за съвременните движения. Освен това, не включва зоните на разширена деформация на земната кората (например Средиземноморската зона).

Моделът **APKIM2000.0 (Actual Plate Kinematics Model)** е създаден в Deutsches Geodatisches Forschungs Institute (DGFI)[Drewes, 2006]. Той е разработен на основата на геодезически наблюдения VLBI, SLR и GPS. Тези наблюдения са обработени с програмата GAMIT/GLOBK и са използвани глобални GPS данни от Международната GPS служба. Най-новата реализация е APKIM2005. В този модел са получени оценки за ротационните вектори и координатите на полюсите на ротация. В зоните на деформация (например Анди, Средиземноморие, Калифорния, Източна Азия) е компилиран модел на непрекъснатата деформация.

Моделът **REVEL-2000** описва относителните скорости на 15 плочи и три континентални блока. Той е създаден от свободно достъпни геодезически данни (първоначално само GPS) за периода 1993-2000г. [Sella et al 2002]. Използвани са данни от 140 станции, като са изключени точките, разположени по границите на тектоничните плочи.

Включена е независима и точна оценка за грешките на скоростите на GPS станциите и за начина на предаване на тези грешки в скоростите на плочите. За някои части от плочите се наблюдават статистически значими разлики между геодезическите скорости и геоложките скорости, например NNR-NUVEL1A, които са усреднени за много дълъг период от време.

Моделът **GSRM (Global Strain Rate Map)** е глобален модел създаден в Държавния университет на Ню Йорк [Holt A . J.Haines, 2000]. Три различни типа данни са били използвани за получаването му: геодезически скорости, кватернерни показатели за вида на деформация и сеизмични тензори. Включени са 5170 геодезически скорости от 86 различни публикации, обхващащи както местни, така и глобални проекти. Оценените скорости са интерполирани, чрез би-кубичен Беселов сплайн. Едно от основните предимства на методологията, използвана за този модел, е неограниченият брой геодезически измервания, които могат да бъдат комбинирани. В модела GSRM са включени и оценки на скорости на 17 станции на територията на България и е изведен ротационния вектор (17BG POINTS,) на Евразия, като са използвани данни за скоростните вектори от публикации на [Kotzev V. et. at., 2001].

MORVEL (Mid-Ocean Ridge Velocity) е модел, описващ съвременните геоложки движения на 25 тектонични плочи, които обхващат 95 % от повърхността на Земята [De Mets et al., 2010]. “Spreading rates” и “fault azimuths” се използват за определяне на движението на 19 плочи, граничещи по средно-океанските хребети и включващи всички основни плочи. “Spreading rates” са скоростите на литосферните плочи, определени по границите им, където е имало многократни вулканични изригвания и земетресения, а азимутите т.е. посоките на векторите са определени по геофизични и геоложки дългогодишни наблюдения. Значителни различия се наблюдават между геоложките и GPS оценки на движението на плоча Nazca и Arabia–Eurasia. Движението между плочите India–Eurasia се намалява, но не се елиминират при използване на MORVEL вместо NUVEL-1A.

Моделът **GEODVEL (GEODesy VELocity)** е най-новият модел за движение на плочи, създаден на базата на космическата геодезия [Argus, et. al., 2010]. Неговите създатели определят скоростите на 11 плочи, като използват данни от четири космически геодезически техники. Използвани са данни за положението на станции с оценки от 24 годишни наблюдения с SLR, 24 годишни наблюдения от VLBI, 14 годишни GPS наблюдения, 12 годишни наблюдения с DORIS. На базата на геологията са избрани литосферните плочи. Модела GEODVEL се различава съществено от модела REVEL [Sella et. al., 2002]. 95% в доверителните граници на ъгловите скорости на GEODVEL изключват REVEL за 19 от 21 двойки плочи. Разликата в средната ъглова скорост е

0.26deg/Myr, което е 2.9 mm/yr. Според авторите, тази разлика се дължи отчасти в различните начини, чрез които са определени скоростта на движение на центъра на Земята. Авторите на модела REVEL [Sella et. al., 2002] приемат координатна реализация ITRF1997. ITRF2000 се различава от ITRF97 с 2mm/yr. Argus, et. al. [2010] приемат оценката на скоростта на Земяния център да е близка с ITRF2000. Относителните ъглови скорости на седем плочи са строго ограничени: Северна Америка, Евразия, Южна Америка, Нубия, Азия и Тихия океан, Австралия и Антарктида. Триизмерните стандартни елипси на грешката с доверителни граници 95% са от 0.6 до 1.8 mm/yr..

Ротационен полюс на Евразия

По дефиниция координатната система ETRS89 е привързана към стабилната част на Евразийската плоча. EUREF скоростите на точките се получават, като от абсолютните им скорости извадим стойностите на скоростите определени от моделът описващ движението на плочата. За стабилната част на Европа тези скорости са нулеви. Остатъчните скорости са точно EUREF скоростите на точките и те представят т. нар. вътрешно-плочови деформации и са различни от нула в активните тектонски райони.

Legrand, и Z. Altamimi [2006] поставят условието “No Net Rotation“ при интерполирането на ITRF2005 скорости, използвайки колокация по метода на най-малките квадрати. За да се приложи директно “No Net Rotation “ условието за ITRF2005, авторите изчисляват поле на скоростите и неговата ковариационна матрица. ITRF2005 точките са разположени на големи разстояния една от друга, затова е интерполирано ITRF2005 хоризонтално поле на скоростите по възлите на квадратна мрежа. Методът осигурява оценка на ковариационната матрица на интерполираните скорости. Използван е метод на колокация за сфера. Интерполацията е приложена за ъгловото скоростно поле, вместо за хоризонтално скоростно поле. Според авторите, това позволява да се запази сферичното движение, характерно за полето на скорости на плочите.

Модел на скоростите за Европа - проектът DEVF

По дефиниция ETRS89 и нейните реализации се движат със стабилната част на Евразийската плоча. Взимайки предвид, 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 Dense European Velocity Field (DEVF). Проектът се развива непрекъснато с подобряването, съгъстяването и разширяването на EUREF. [Altamimi and Legrand, 2004].

Първите стъпки на български учени в посока изследване на движение на литосферните плочи са направени от Георгиев и Коцев, (1992), Georgiev I., Kotzev V., (1995), Georgiev I., St. Shanov, J. Chaparov (2001) Оценката на глобални тектонски движения са на базата на лазерни наблюдения на спътника “ЛАГЕОС”. Обработката на наблюденията и процедурата на анализ е била изпълнена с програма SLRP3.2, създадена в Централната Лаборатория по Висша геодезия, Резултати по отношение на основните плочи са сравнени с геофизичния AMO2 и глобалния модел NUVEL1A. Сравнение на получените резултати е направено и с ITRF96 скоростите на Европа, определени чрез комбиниране на скорости от всички спътникови геодезически технологии (VLBI, GPS, SLR and DORIS).

3. Теоретична постановка

3.1. Координатни системи

3.2. Трансформационни модели на пространствени координати и скорости

Трансформационният модел е математически закон, по който се осъществява преобразуването на една геодезическа координатна система в друга. Двата основни аспекта при трансформирането, са извеждането на трансформационни формули и оценяването на трансформационните параметри. Оценката на наблюдаваните величини и извеждането на трансформационните параметри се извършва най-често по Метода на най-малките квадрати.

7-параметрична трансформация на координати

Взаимното положение на две правоъгълни пространствени декартови координатни системи, обозначени с **A** и **B** се определя от малка трансляция T_x, T_y, T_z , малки ротации R_x, R_y, R_z около осите X, Y, Z и малка деформация в мащаба D . Връзката между тях се получава чрез използване на така наречените идентични точки, т.е. точки с известни координати в двете координатни системи. Проблемът се усложнява, когато точки се преместват заедно с континенталните плочи [Dennis, D. and McCarthy (1996)][Soler, T. and Marshall, J. 2003], както и на местни премествания и поради други причини, които също са вземат под внимание. Следователно, за правилното прилагане на тази трансформация е необходимо да се определи положението на точките за един и същ момент (епоха). В миналото, а понякога и сега, в случай на стари координатни системи, трансформиране се прилага без да се вземат под внимание епохите.

Представя се 7-параметричната трансформация във векторна форма за точките ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) в момента t :

$$(3.13) \quad \bar{\mathbf{X}}^A_i(t) = \bar{\mathbf{X}}^B_i(t) + \bar{\mathbf{T}}(t) + \mathbf{P}(t) \cdot \bar{\mathbf{X}}^B_i(t),$$

където $\bar{\mathbf{X}}^A_i(t) = [X^A_i(t) \ Y^A_i(t) \ Z^A_i(t)]^T$ е вектор на положението за система A в епоха t , а $\bar{\mathbf{X}}^B_i(t) = [X^B_i(t) \ Y^B_i(t) \ Z^B_i(t)]^T$ е вектор на положението за система B и епоха t .

Матрицата на трансформационните параметри $\mathbf{P}(t) = D(t) \cdot \mathbf{I} + \mathbf{R}(t)$, включва мащабната деформация и матрицата на ротация.

$$(3.14) \quad \mathbf{P}(t) = \begin{bmatrix} D(t) & -R_z(t) & R_y(t) \\ R_z(t) & D(t) & -R_x(t) \\ -R_y(t) & R_x(t) & D(t) \end{bmatrix}.$$

Параметрите на трансформация се определят чрез изравнение по метода на най-малките квадрати (МНМК). Образува се функцията за условно изравнение с неизвестни F_i на базата на формула (3.3), от където се получава уравнението:

$$(3.15) \quad \mathbf{A}\mathbf{V} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{W} = 0,$$

където

$\mathbf{V} = [V^A \ V^B]$ са поправките към наблюдаваните величини $\bar{\mathbf{X}}^A(t)$, $\bar{\mathbf{X}}^B(t)$, а

$\mathbf{U} = [D \ T_x \ T_y \ T_z \ R_x \ R_y \ R_z]^T$ е матрицата на неизвестните,

$\mathbf{W} = [X^A - X^B, \ Y^A - Y^B, \ Z^A - Z^B]^T$ са свободните членове

Матрицата пред поправките има вида:

$$(3.16) \quad \mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial (\bar{\mathbf{X}}^A, \bar{\mathbf{X}}^B)} = [\mathbf{I} \quad -\mathbf{I}]$$

а матрицата пред неизвестните се формулира:

$$(3.17) \quad \mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}} = \begin{bmatrix} X_i & 1 & 0 & 0 & 0 & Z_i & -Y_i \\ Y_i & 0 & 1 & 0 & -Z_i & 0 & X_i \\ Z_i & 0 & 0 & 1 & Y_i & -X_i & 0 \end{bmatrix}$$

Може да се разгледат случаите за корелирани и некорелирани наблюдения. Ковариационната матрица е представена с ковариационните матрици на координатите в двете координатни системи при тяхното определяне. При разглежданите формули не се взима предвид корелацията между отделните точки в ковариационните матрици за

координатите. При положение, че двете координатни системи са некорелирани, то ковариационната матрица има вида:

$$(3.18) \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{xyz}^A & 0 \\ 0 & \mathbf{Q}_{xyz}^B \end{bmatrix}.$$

Следните варианти за прилагането на видовете ковариационни матрици са подробно разгледани [Mikhail 1976], [Маринов Г., 2007], [Daskalova, M. Zdravchev, I. 2005].

1 случай - двете ковариационни матрици $\mathbf{Q}_{xyz}^A$ и $\mathbf{Q}_{xyz}^B$ са единични;

2 случай - Координатите определени в координатна система A са равноточни и аналогично координатите в система B също са равноточни.

3 случай - двете ковариационни матрици са диагонални; определени са средните квадратни грешки на наблюдаваните величини.

4 случай - двете ковариационни матрици са пълни; Въвеждането на пълна ковариационна матрица води до строго изравнение, ако съществуват корелационни връзки между координатите на точките, взети в съответната им координатна система.

14-параметрична трансформация на координати и скорости

В практиката се прилагат и формули с 14 параметъра. Предполага се, че от момента t_k до момента $t > t_k$ положението на точките се е променило, дължащо се на движението на литосферните плочи. Някои от движенията, може да бъдат компенсирани със съответните корекции. Прието е, че координатите на идентични точки, записани в моменти t_k и t се различават, защото имат скорости. В същото време взаимното положение на координатните системи, като реализация от координати на точки за съответната епоха се променя. Координатите на точките и трансформационните параметри се променят линейно с времето. По този начин векторът $\bar{\mathbf{X}}^A(t)$ се представя за епохата t , както следва:

$$(3.19) \quad \bar{\mathbf{X}}^A(t) = \bar{\mathbf{X}}^A(t_k) + \dot{\bar{\mathbf{X}}}^A(t_k)(t - t_k),$$

Координатите и скоростите на точките в система A са изразени с помощта на трансформационните параметри и координатите и скоростите на точките от система B , където $\dot{\bar{\mathbf{X}}}^A(t_k) = [\dot{X}^A(t_k) \ \dot{Y}^A(t_k) \ \dot{Z}^A(t_k)]^T$ е вектор на скоростта за епоха t_k .

След диференциране на уравнението

$$(3.20) \quad \bar{\mathbf{X}}^A(t_k) = \bar{\mathbf{X}}^B(t_k) + \bar{\mathbf{T}}(t_k) + \mathbf{P}(t_k) \cdot \bar{\mathbf{X}}^B(t_k) \text{ се получава:}$$

$$(3.21) \quad \dot{\bar{\mathbf{X}}}^A(t_k) = (1 + \mathbf{P}(t_k)) \cdot \dot{\bar{\mathbf{X}}}^B(t_k) + \dot{\bar{\mathbf{T}}}(t_k) + \dot{\mathbf{P}}(t_k) \bar{\mathbf{X}}^B(t_k),$$

където $\dot{\mathbf{P}}(t_k) = \dot{D}(t_k) \cdot \mathbf{I} + \dot{\mathbf{R}}(t_k)$, включва изменението на компонентите на мащаба и ротационните параметри за дадената епоха.

Разглеждаме тридименсионалния вектор $\bar{\mathbf{X}}_t^A$, за епохата t в координатна система $\mathbf{A}$. Той може да се представи чрез развитие в Тейлоров ред като функция на времето (3.22)

$$\bar{\mathbf{X}}^A(t) = \bar{\mathbf{X}}^B(t_k) + \bar{\mathbf{T}}(t_k) + \mathbf{P}(t_k) \cdot \bar{\mathbf{X}}^B(t_k) + \left[(1 + \mathbf{P}(t_k)) \cdot \dot{\bar{\mathbf{X}}}^B(t_k) + \dot{\bar{\mathbf{T}}}(t_k) + \dot{\mathbf{P}}(t_k) \bar{\mathbf{X}}^B(t_k) \right] (t - t_k)$$

Формула (3.22) може да се запише в интерполационен вид:

$$(3.23) \quad \bar{\mathbf{X}}^A(t) = \bar{\mathbf{T}}(t_k) + \dot{\bar{\mathbf{T}}}(t_k)(t - t_k) + [1 + \mathbf{P}(t_k) + \dot{\mathbf{P}}(t_k)(t - t_k)] \bar{\mathbf{X}}^B(t_k)$$

Произведенията на скоростите на координатите с 14-те параметъра са пренебрежимо малки стойности и се изпускат при изчисленията.

14-те трансформационни параметъра се получават от съвместното прилагане на формулите (3.20) и (3.21), т.е. от едновременното изравнение на координатите и скоростите на идентични точки. За едновременно трансформиране на координати и скорости, е необходимо да се определят стойностите на 14 неизвестни параметъра: компонентите на векторите $\bar{\mathbf{T}}$, $\dot{\bar{\mathbf{T}}}$ и матриците $\mathbf{P}$, $\dot{\mathbf{P}}$ (мащаб, 3 ротационни ъгъла, 3 транслагационни параметъра и техните първи производни).

$$(3.24) \quad \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{X}}^A \\ \dot{\bar{\mathbf{X}}}^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{T}} \\ \dot{\bar{\mathbf{T}}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 + \mathbf{P} & 0 \\ \dot{\mathbf{P}} & 1 + \mathbf{P} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{X}}^B \\ \dot{\bar{\mathbf{X}}}^B \end{bmatrix}$$

Приема се, че координатите и скоростите за всички идентични точки са известни и свободните членове са:

$$(3.25) \quad \mathbf{W}_i = [X_i^A - X_i^B \quad Y_i^A - Y_i^B \quad Z_i^A - Z_i^B \quad \dot{X}_i^A - \dot{X}_i^B \quad \dot{Y}_i^A - \dot{Y}_i^B \quad \dot{Z}_i^A - \dot{Z}_i^B]^T$$

При 14-параметричната трансформация параметрите за трансляция, ротация и мащабната деформация имат линейно изменение във времето, каквито са и измененията в координатите.

При изравнение по МНМК те са неизвестните величини и са записват в матричен вид:

$$(3.26) \quad \mathbf{U} = [D \quad T_x \quad T_y \quad T_z \quad R_x \quad R_y \quad R_z \quad \dot{D} \quad \dot{T}_x \quad \dot{T}_y \quad \dot{T}_z \quad \dot{R}_x \quad \dot{R}_y \quad \dot{R}_z]^T$$

$$(3.27) \quad \mathbf{V}_i = [V_{X_i}^A \quad V_{Y_i}^A \quad V_{Z_i}^A \quad V_{X_i}^B \quad V_{Y_i}^B \quad V_{Z_i}^B \quad \dot{V}_{X_i}^A \quad \dot{V}_{Y_i}^A \quad \dot{V}_{Z_i}^A \quad \dot{V}_{X_i}^B \quad \dot{V}_{Y_i}^B \quad \dot{V}_{Z_i}^B]^T$$

е матрицата на поправките.

Матрицата $\mathbf{A}$ е матрицата на коефициентите пред поправките към наблюденията и се определя за всяка точка i :

$$(3.28) \quad \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & -\mathbf{I} \end{bmatrix}$$

При изравнението по МНМК нормалната система се разделя на две отделни нормални системи, което доказва, че липсва зависимост между параметрите и следователно трансформационните параметри на скоростите могат да се изведат чрез самостоятелни седем параметрични трансформации, уравнение (3.21).

7 параметрична трансформация на скорости

Пренебрегвайки произведенията на скоростите с трансформационните параметри както бе споменато по-горе уравнението за определяне на скорости от една система в друга придобива вида:

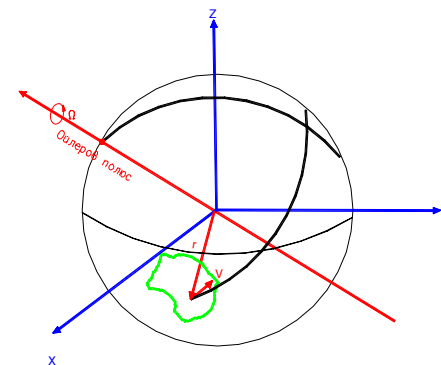
$$(3.29) \quad \dot{\bar{\mathbf{X}}}^A(t_k) = \dot{\bar{\mathbf{X}}}^B(t_k) + \dot{\bar{\mathbf{T}}}(t_k) + \dot{\mathbf{P}}(t_k) \bar{\mathbf{X}}^B(t_k),$$

където $\mathbf{U} = [\dot{D} \quad \dot{T}_x \quad \dot{T}_y \quad \dot{T}_z \quad \dot{R}_x \quad \dot{R}_y \quad \dot{R}_z]^T$ е матрицата на неизвестните,

$\mathbf{W} = [\dot{X}^A - \dot{X}^B, \quad \dot{Y}^A - \dot{Y}^B, \quad \dot{Z}^A - \dot{Z}^B]^T$ са свободните членове

3.3. Ойлеров полюс на ротация на литосферните плочи по сфера

Движението на литосферната плоча може да бъде описано от въртене относно виртуална (условна) ос, която минава през центъра на сферата и свързва полюса на въртене, т.нар. Ойлеров полюс.



Фигура 3.3 Ротация на литосферна плоча по сфера

В терминологията се подразбира, че движенията на плочите по сфера може да бъдат описани, чрез ъглов скоростен вектор (angular velocity vector) с начало в центъра на земното кълбо. Най-широко разпространената параметризация на такъв вектор, използва географската ширина и дължина, за описване на местоположението, където ротационната ос пробжда повърхността на Земята, и скоростта на въртене отговаряща на величината на ъгловата скорост.

Движението на отделни тектонични плочи може да е указано от абсолютната ъглова скорост (absolute motion angular velocity). Движението между две плочи, които имат полюси на различно абсолютно движение, може да е изразено чрез ъгловата скорост на относително движение (angular velocity of relative motion). Тектониката на плочите е създадена въз основа определянето на относителното движение между плочите, защото в началото на развитието на теорията е било възможно по-лесно да се определи относителното преместване, отколкото техните абсолютни движения.

Близко до полюсите въртенето е бавно, но при отдалечаване от полюса, въртенето се ускорява. Ротационната скорост нараства от полюса на въртене. Ойлеровият полюс има тенденция да остане фиксиран за дълги периоди.

Движенията на литосферните плочи се описват чрез геоцентрични ротационни вектори, зададени с географските координати на центъра на ротация с дължина λ и ширина φ и ротационна скорост Ω или чрез компонентите на ротационните скорости по осите на правоъгълна координатна система. Местоположението на полюса на ротация се определя от формули:

$$(3.41) \quad \lambda = \arctan g \frac{\dot{\Omega}_y}{\dot{\Omega}_x}; \quad 0 \leq \lambda \leq 2\pi$$

$$\varphi = \arctan g \frac{\dot{\Omega}_z}{\sqrt{\dot{\Omega}_x^2 + \dot{\Omega}_y^2}}; \quad -\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$$

В случая осите на референтната координатна система остават фиксирани-неподвижни, докато позиционните вектори са завъртени обратно на часовниковата стрелка относно фиксираната линия, минаваща през полюса на ротация и началото на координатната система. Това въртене на тялото относно условна линия е наречено “Ойлерово завъртане” от някои автори или “активно въртене” от други [Soler T., 1998] Тези ротации са изразени от компонентите на ъгловия вектор на скоростта, а именно $\dot{\Omega}_x, \dot{\Omega}_y, \dot{\Omega}_z$ отнесени към фиксираната декартова система.

$$(3.42) \quad [\Omega] = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\Omega}_z & \dot{\Omega}_y \\ \dot{\Omega}_z & 0 & -\dot{\Omega}_x \\ -\dot{\Omega}_y & \dot{\Omega}_x & 0 \end{bmatrix}$$

Скоростта на станцията може да се представи чрез:

$$(3.43) \quad \mathbf{V} = [\Omega] \mathbf{X}, \quad \text{където}$$

$$(3.43a) \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_t - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{t_0} (t - t_0).$$

Компонентите на ротация Ω са представени чрез:

$$(3.44) \quad \Omega = \Omega \mathbf{I}_x = \Omega \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \lambda \\ \cos \varphi \sin \lambda \\ \sin \varphi \end{bmatrix},$$

където векторът стълб $\{\mathbf{I}_x\}$ съдържа посочните косинуси на така наречената “Ойлерова ротационна ос”.

Посредством ротационния вектор Ω на тектонската плоча и пространствените координати x, y, z на станцията се определят компонентите на вектора на скоростта: v_x, v_y, v_z , в потвърждение на (3.43) и (3.42):

$$(3.45) \quad \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \Omega \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad \Omega = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ \Omega_y & -\Omega_x & 0 \end{bmatrix}.$$

Пространственият вектор на скоростта се трансформира в топоцентрична координатна система чрез връзката:

$$(3.46) \quad \begin{bmatrix} v_n \\ v_e \\ v_u \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda & -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \varphi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ \cos \varphi \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda & \sin \varphi \end{bmatrix},$$

където φ, λ са елипсоидните координати на точката, а v_n, v_e, v_u са компонентите на вектора на скоростта в топоцентричната координатна система (с посоки север, изток и нагоре).

Скоростта на наблюдаваната станция $\vec{v}_{abs}$ се определя по формулата:

$$(3.47) \quad \vec{v}_{abs} = \vec{v}_{plate} + \vec{v}_r,$$

където $\vec{v}_{plate}$ е хоризонталната скорост на литосферната плоча, изчислена по глобалния модел, а $\vec{v}_r$ е относителната (relative) скорост относно литосферната плоча.

4. Експериментални изследвания

4.1. Приложение и анализ на трансформационни модели за пространствени земни координатни системи

Целта на това изследване е да се установяват разликите в оценяваните параметри при 7 и 14 параметрични трансформации с различни ковариационни матрици.

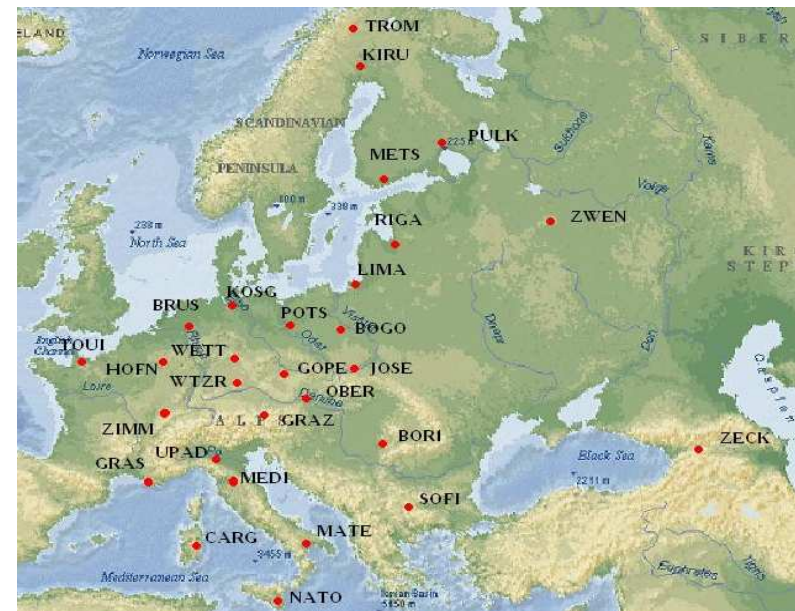
Въвеждането на единна координатна система за цялата Земя (ITRS) или за един континент (напр. ETRS) е необходимо за решаването на много практически и научни проблеми. Това е възможно благодарение на високата точност на съвременните технологии за позициониране, както и прилагането на съвременни математически методи за обработка на тези наблюдения. Съвременните координатни системи са реализирани с помощта на координатите на определен брой точки на повърхността на Земята. Нарасналият брой на тези точки и необходимостта да се знаят техните премествания, т.е. скоростта на техните координатни промени наложи за определени координатни системи да се използват техните реализации - референтни рамки, за даден фиксиран момент от време (епоха). Следователно, става необходимо да се промени референтната епоха на реализацията на координатната система и стойности на координатите на точките след определен интервал от време, тъй като точките се движат заедно с континенталните плочи. Разработена е методика за използването на представените координатни системи ITRS, ETRS и др. [Boucher et al., 1996] и връзката между тях, както и между съответните реализации със съответните модели и числени стойности

Ще бъдат разгледани някои особености, свързани с преобразуването на координати и скорости между две правоъгълни пространствени декартови координатни системи.

Така наречената "7-параметрична трансформация" е непрекъснато използвана в практиката. През последните години много често в публикации, изследвания и практически приложения се разглеждат проблемите свързани с т.нар. 14 параметрична трансформация [Soler, T. 1998] [Soler, T. et al. 2002.] Soler, T. and Marshall, J. 2003].

Исходните данни за трансформацията са пространствени декартови координати на точки с известни координати и скорости в различни координатни системи, приведени към една и съща епоха.

Координатите в системата от която се трансформира са означени **B**, а в която се трансформират с **A**.



Фигура 4.1. Схема на използваните идентични точки

Исходните данни са координати и скорости на идентични точки от реализацията на ITRF2000 за епоха 1997 и ITRF1997 за епоха 1997 [http://liger.ensg.ign.fr/pub/itrf/ITRF.TP]. Използвани са 33 точки на територията на Европа (фиг 4.1).

Прилагат се варианти за оценяване на трансформационните параметри и техните производни чрез изравнение по МНМК. Съставена е програма на програмен език Фортран

Оценяване параметри при 7 и 14 параметрични трансформации с единични ковариационни матрици.

Параметрично изравнение на посредствени наблюдения с тежест единица е най-често използвания начин за определяне на трансформационните параметри в практиката. Приема се, че координатите и скоростите в двете координатни системи са определени с еднаква точност.

А) Прилага се параметрично изравнение на посредствени наблюдения на координати използвайки формула (3.8) за

определяне на седемте неизвестни трансформационни параметри: параметрите на трансляция T_x, T_y, T_z , ротация R_x, R_y, R_z и деформацията в мащаба D (таблица 4.1).

Б) Аналогично, като се включат в изравнението и стойностите на скоростите на идентичните точки, чрез съвместното прилагане на формули (3.24), едновременно се определят параметрите на трансформация $T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z, D$ и техните производни $\dot{T}_x, \dot{T}_y, \dot{T}_z, \dot{R}_x, \dot{R}_y, \dot{R}_z, \dot{D}$

В) При 14 параметричната трансформация нормалната система при изравнението по МНМК се разпада на две отделни нормални системи, което доказва, че липсва зависимост между параметрите и следователно трансформационните параметри на скоростите могат да се извеждат чрез самостоятелна седем параметрична трансформация. Прилага се параметрично изравнение на скорости по формула (3.21), за да се определят седемте неизвестни трансформационни параметри производни на времето $\dot{T}_x, \dot{T}_y, \dot{T}_z, \dot{R}_x, \dot{R}_y, \dot{R}_z, \dot{D}$ за тествания модел

Г) Определените от 7 параметричната трансформация по координати стойности на трансформационните параметри $T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z$ и D (случай точка А) са заместени в уравнението на поправките на 14 параметричната трансформация. Техните стойности са добавени към свободните членове на условните уравнения. След тази стъпка се получава редуцирана 7 параметрична трансформация и се определят параметрите на трансформация $\dot{T}_x, \dot{T}_y, \dot{T}_z, \dot{R}_x, \dot{R}_y, \dot{R}_z, \dot{D}$.

Оценяване параметри при 7 и 14 параметрични трансформации с диагонални ковариационни матрици.

Въвеждането на пълна ковариационна матрица води до строго изравнение, ако съществуват корелационни връзки между координатите на точките, взети в съответната им координатна система. При това изследване не разполагаме с пълната ковариационна матрица. В този случай се включват в изравнението само средните квадратни грешки на наблюдаваните величини т.е двете диагонални ковариационни матрици, като се въвеждат средните квадратни грешки на координатите и скоростите. Използваме същите четири модела за трансформация и определяне на неизвестните трансформационни параметри.

А) Прилага се параметрично изравнение на посредствени наблюдения на координати използвайки формула (3.8) за

определяне на седемте неизвестни трансформационни параметри: параметрите на трансляция T_x, T_y, T_z , ротация R_x, R_y, R_z и деформацията в мащаба D (таблица 4.1).

Б) Едновременно се определят параметрите на трансформация $T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z, D$ и техните производни $\dot{T}_x, \dot{T}_y, \dot{T}_z, \dot{R}_x, \dot{R}_y, \dot{R}_z, \dot{D}$ от 14 параметрична трансформация на координати и скорости.

В) Прилага се параметрично изравнение на скорости, за да се определят седемте неизвестни трансформационни параметри, производни на времето $\dot{T}_x, \dot{T}_y, \dot{T}_z, \dot{R}_x, \dot{R}_y, \dot{R}_z, \dot{D}$.

Г) Определените от 7 параметричната трансформация по координати, стойности на трансформационните параметри $T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z$ и D (случай точка А), са заместени в уравнението на поправките на 14 параметричната трансформация. Определят се параметрите на трансформация $\dot{T}_x, \dot{T}_y, \dot{T}_z, \dot{R}_x, \dot{R}_y, \dot{R}_z, \dot{D}$ -редуцираната 7 параметрична трансформация. От получените резултати се установява, че няма разлика в параметрите от втора степен.

Формулите с 14 параметри са интерполационни формули, които се прилагат в рамките на определен интервал от време. Точността на получените параметри трябва да осигури необходимата точност на трансформиране, която да съответства на точността на началните координати на идентичните точки. Точността на трансформацията, както е известно зависи от броя на идентичните точки, от тяхната конфигурация и от големината на областта, за която се прилага.

Получените резултати дават възможност да се съпоставят оценяваните трансформации параметри при 7 и 14 параметрични трансформации с различни ковариационни матрици.

Параметрите на трансформация определени чрез параметрично изравнение на равноточни наблюдения от 7 и 14 параметрична трансформация имат еднакви стойности. Точността на определяне на параметрите е различна. От таблица 4.1 се вижда, че средните квадратни грешки с които са получени $T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z, D$ са по-малки по стойност при едновременното изравнение на координатите и скоростите на идентични точки от средните квадратни грешки, получени при изравнението само на координати.

Точността, с която са определят седемте трансформационни параметри за координатите на точките се повишава с включване в математичния модел при изравнението по МНМК и на уравнения за скоростите с техните средни квадратни грешки.

Параметрично изравнение на посредствени наблюдения равноточни								
Вид Транс-формация	D	T_X	T_Y	T_Z	R_X	R_Y	R_Z	Ср.кв. гр. m_e [cm]
	m_D	m_{T_X}	m_{T_Y}	m_{T_Z}	m_{R_X}	m_{R_Y}	m_{R_Z}	
	$\dot{D}$	$\dot{T}_X$	$\dot{T}_Y$	$\dot{T}_Z$	$\dot{R}_X$	$\dot{R}_Y$	$\dot{R}_Z$	
	$m_{\dot{D}}$	$m_{\dot{T}_X}$	$m_{\dot{T}_Y}$	$m_{\dot{T}_Z}$	$m_{\dot{R}_X}$	$m_{\dot{R}_Y}$	$m_{\dot{R}_Z}$	
Трансформационни параметри	[ppb]	[cm]	[cm]	[cm]	[msec]	[msec]	[msec]	
Трансформация на координати 7 параметъра	1.2428 0.2912	1.2608 0.2059	0.7383 0.3330	-2.2412 0.2060	0.0835 0.0986	-0.2310 0.0714	0.0003 0.0787	0,1987
Трансформация на скорости 7 параметъра								0,1340
	0,2053 0,1964	0,4836 0,1389	-0,2038 0,2246	-0,5381 0,1389	0,0055 0,0665	-0,1912 0,0481	0,0951 0,0530	
Трансформация на координати и скорости 14 параметъра	1.2427 0.2484	1.2608 0.1756	0.7383 0.2840	-2.2412 0.1757	0.0835 0.0841	-0.2310 0.0608	0.0003 0.0671	0,1695
	0,2053 0,2484 \\	0,4836 0,1756	-0,2038 0,2840	-0,5381 0,1757	0,0056 0,0841	-0,1912 0,0601	0,0952 0,0671	
Редуцирана 14 параметрична трансформация на скорости								0,1340
	0,2053 0,1964	0,4836 0,1389	-0,2038 0,2246	-0,5381 0,1389	0,0055 0,0665	-0,1912 0,0481	0,0951 0,0530	

m_e - средна квадратна грешка на измерване с тежест единица

Таблица 4.1. Параметри на трансформация и средните им квадратни грешка при параметрично изравнение на посредствени наблюдения равноточни

Параметрично изравнение на посредствени наблюдения с въвеждане на ср квадратни грешки на координатите и скоростите								
Вид Транс-формация	D	T_X	T_Y	T_Z	R_X	R_Y	R_Z	Ср.кв. гр. m_e [cm]
	m_D	m_{T_X}	m_{T_Y}	m_{T_Z}	m_{R_X}	m_{R_Y}	m_{R_Z}	
	$\dot{D}$	$\dot{T}_X$	$\dot{T}_Y$	$\dot{T}_Z$	$\dot{R}_X$	$\dot{R}_Y$	$\dot{R}_Z$	
	$m_{\dot{D}}$	$m_{\dot{T}_X}$	$m_{\dot{T}_Y}$	$m_{\dot{T}_Z}$	$m_{\dot{R}_X}$	$m_{\dot{R}_Y}$	$m_{\dot{R}_Z}$	
Трансформационни параметри	[ppb]	[cm]	[cm]	[cm]	[msec]	[msec]	[msec]	
Трансформация на координати 7 параметъра	1.5848 0.2268	0.9867 0.2267	0.6691 0.3608	-2.2062 0.1609	0.0676 0.1033	-0.1494 0.0706	0.0032 0.0695	0,3241
Трансформация на скорости 7 параметъра								0,2043
	0,4261 0,4763	0,5905 0,1334	0,1249 0,3101	-0,9126 0,3641	0,0832 0,0521	-0,2998 0,0722	0,0059 0,1384	
Трансформация на координати и скорости 14 параметъра	1.5848 0.2418	0.9867 0.2418	0.6691 0.3848	-2.2062 0.1717	0.0676 0.1101	-0.1493 0.0809	0.0032 0.0742	0,3241
	0,4261 0,4499	0,5905 0,1260	0,1249 0,2928	-0,9126 0,3439	0,0832 0,0492	-0,2998 0,0682	0,0059 0,1307	
Редуцирана 14 параметрична трансформация на скорости								0,1915
	0,4261 0,4763	0,5905 0,1334	0,1249 0,3101	-0,9126 0,3641	0,0832 0,0521	-0,2998 0,0722	0,0059 0,1384	

m_e - средна квадратна грешка на измерване с тежест единица

Таблица 4.1. Параметри на трансформация и средните им квадратни грешка при параметрично изравнение на посредствени наблюдения с въвеждане на ср квадратни грешки на координатите и скоростите

Параметрично изравнение на посредствени наблюдения равноточни								
	7- параметрична трансформация координати [m]		7- параметрична трансформация скорости [m]		14 параметрична трансформация координати и скорости [m]		Редуцирана 14- параметрична трансформация [m]	
T	V	m	V	m	V	m	V	m
GRAZ								
X	-0.061	0.046			-0.061	0.039		
Y	0.030	0.044			0.030	0.038		
Z	-0.060	0.048			-0.060	0.040		
$\dot{X}$			0.015	0.031	0.015	0.039	0.015	0.031
$\dot{Y}$			0.047	0.030	0.047	0.038	0.047	0.030
$\dot{Z}$			0.088	0.032	0.088	0.040	0.088	0.032
TOUL								
X	0.146	0.055			0.146	0.047		
Y	-0.074	0.050			-0.074	0.043		
Z	-0.060	0.059			-0.060	0.051		
$\dot{X}$			-0.232	0.037	-0.232	0.047	-0.232	0.037
$\dot{Y}$			0.090	0.034	0.090	0.043	0.090	0.034
$\dot{Z}$			0.001	0.032	0.001	0.051	0.001	0.032
TROM								
X	-0.045	0.074			-0.045	0.063		
Y	0.087	0.071			0.087	0.060		
Z	-0.036	0.079			-0.035	0.067		
$\dot{X}$			0.041	0.050	0.041	0.063	0.041	0.050
$\dot{Y}$			0.032	0.048	0.032	0.060	0.032	0.048
$\dot{Z}$			0.031	0.053	0.031	0.068	0.031	0.053

V- поправки m - ср. кв. грешки на изравнените величини.

Таблица 4.2. Поправки към координатите и скоростите на идентичните точки, средни квадратни грешки на изравнените величини при параметрично изравнение на посредствени наблюдения равноточни

В таблица 4.2 е представена извадка за 3 от идентичните точки, участващи в изравнението – Грас, Тулуза, Тромсо. Дадени са поправките в координатите и скоростите на точките от система А, както и средните грешки, получени при параметрично изравнение на равноточни величини при първия вариант и включването на средните квадратни грешки на координатите и скоростите, като оценки при втория вариант.

Параметрично изравнение на посредствени наблюдения с въвеждане на ср квадратни грешки на координатите и скоростите								
	7- араметрична трансформация координати [m]		7- параметрична трансформация скорости [m]		14 параметрична трансформация координати и скорости [m]		Редуцирана 14- параметрична трансформация [m]	
T	V	m	V	m	V	m	V	m
GRAZ								
X	-0.006	0.041			-0.006	0.044		
Y	0.020	0.024			0.020	0.026		
Z	-0.060	0.048			-0.060	0.052		
$\dot{X}$			0.016	0.101	0.016	0.100	0.016	0.101
$\dot{Y}$			0.025	0.063	0.025	0.079	0.025	0.063
$\dot{Z}$			0.073	0.016	0.073	0.015	0.073	0.016
TOUL								
X	0.203	0.048			0.203	0.052		
Y	-0.048	0.029			-0.048	0.031		
Z	-0.074	0.061			-0.074	0.064		
$\dot{X}$			-0.248	0.116	-0.248	0.110	-0.248	0.116
$\dot{Y}$			0.057	0.091	0.057	0.087	0.057	0.091
$\dot{Z}$			-0.029	0.023	-0.029	0.022	-0.029	0.023
TROM								
X	-0.013	0.046			-0.013	0.050		
Y	0.091	0.039			0.091	0.042		
Z	-0.114	0.090			-0.114	0.096		
$\dot{X}$			-0.088	0.146	-0.088	0.138	-0.088	0.146
$\dot{Y}$			0.061	0.130	0.061	0.123	0.061	0.130
$\dot{Z}$			-0.074	0.032	-0.074	0.030	-0.074	0.032

V- поправки m - ср. кв. грешки на изравнените величини.

Таблица 4.2. Поправки към координатите и скоростите на идентичните точки, средни квадратни грешки на изравнените величини при параметрично изравнение на посредствени наблюдения с въвеждане на ср квадратни грешки на координатите и скоростите

От резултатите, представени в таблица 4.2 се вижда, че поправките към координатите и скоростите на точка при 7 и 14 параметричните трансформации са почти идентични. Средните квадратни грешки в координатите при 14 параметричната трансформация са по-малки, спрямо тези от 7 параметричната трансформация при изравнението на равноточни величини.

В това изследване се потвърждава и твърдението на някои автори [Daskalova M, 2008], че трансформационните параметри може да се получат от две 7-параметрични трансформации. При изравнението по МНМК нормалната система се разделя на две отделни нормални системи, което доказва, че липсва зависимост между параметрите и следователно трансформационните параметри на скоростите могат да се изведат чрез самостоятелна седем параметрична трансформация. Въз основа на експерименталните изследвания за прилагане на 7- и 14-параметрични трансформации на идентичните точки за територията на Европа и анализирани резултати се препоръчва използването на параметрично изравнение по МНМК с диагонална ковариационна матрица.

Определяне на скорости на 3 станции от EUREF мрежата за България на базата на трансформационни параметри между две системи и епохи

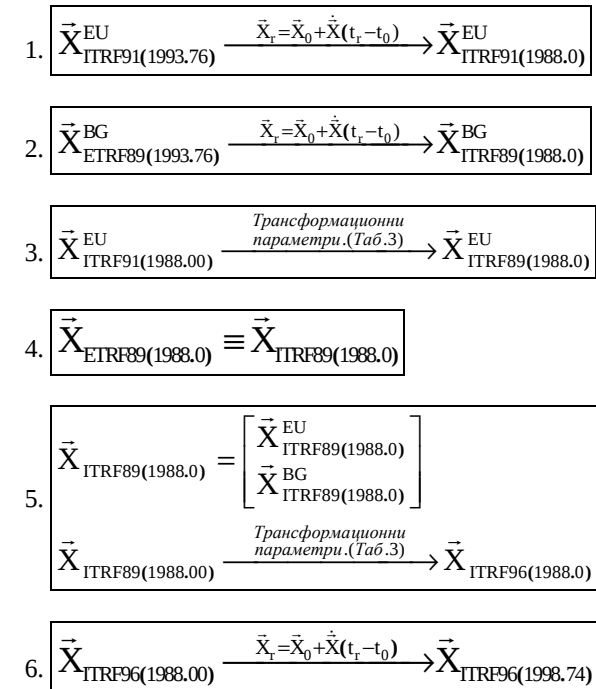
Изходните данни, с които разполагаме, са координатите и скоростите на точки, получени в резултат на измервания и обработка, за целите на два различни проекта [Altiner and et. 1996],[Kotzev et. al., 2001]. Те се отнасят за различни епохи и са в различни координатни системи.

Условно да наречем “Модел А” данните, получени по време на проведените през 1992г. и 1993г. GPS-кампании за включване на страната към EUREF [Altiner and et. 1996]. Разполагаме с координати и средни квадратни грешки за седем точки от територията на страната PECH, SOFI, BURG, GABR, VIDI, HARM и KAVA. Те са определени в система ETRF89 съответно за епохи 1992.76 и 1993.76. При обработката на GPS измерванията за изходни са използвани Европейските станции GRAZ, MATE, WETT и ZIMM, за които разполагаме с координати, средни квадратни грешки и скорости за същата епоха, но в системата ITRF91. “Модел В” съдържа данни от проекта “Активни напрежения в България”, за целите на който е създадена регионална геодинамична мрежа от 15 точки, покриваща цялата територия на страната [Kotzev et. al., 2001]. Мрежата включва 4 точки от EUREF мрежата: PECH, SOFI, BURG и GABR. Техните координати и скорости са определени в системата ITRF96 за епоха 1998.74

Целта е да получим скоростите на еднократно определените точки: VIDI, HARM, KAVA в “Модел А” и да трансформиране координатите и скоростите на всички точки в системата ITRF96, като отстраним неизбежните систематични разлики между “Модел А” и “Модел В”. Трансформационните параметри между различните реализации на световните (ITRF, WGS84) и европейските (EUREF, ETRF) координатни системи са публикувани в [Boucher C., Z. Altamimi 1996]. За преходът ITRF96-ETRF89 параметрите се отнасят за епоха

1988.0 .С помощта на формула (3.19) координатите от “модел А” се трансформират в епоха 1988.0, като се използват скоростите на преместване и интервала от време между епохите.

В “Модел А” разполагаме с координатите и скоростите на европейските точки в системата ITRF91, а координатите на точките на територията на страната са дадени за система ETRF89. За да преминем към системата ITRF89 използваме публикуваните трансформационни параметри [Boucher C., Z. Altamimi 1996] и 14-параметричната трансформация (3.21). Тъй като реализацията на Европейската координатна система ETRF89 за епоха 1988.0, съвпада с реализацията на Световната земна координатна система ITRF-89 за епоха 1988.0, при този преход не се използват никакви трансформационни параметри. Преходът от система ITRF89 към ITRF96 се осъществява по формула (3.19) и публикуваните трансформационни параметри. По формула (3.21) преминаваме от референтната епоха 1988.0 в епоха 1998.74 на “модел В”. На фигура 4.2. е представен алгоритъмът за трансформация на координати и скорости от “Модел А” в “Модел В”.



Фигура 4.2 Алгоритъм за трансформация на координати и скорости от “Модел А” в “Модел В”. EU-Европейски станции. BG-Български станции

При 14-параметричната трансформация за всяка идентична точка се съставят по шест уравнения на поправките; 3 координатни и 3 за скоростите, като се изхожда от (3.24), след което чрез изравнение по метода на най-малките квадрати се определят параметрите $D, \dot{D}, \bar{T}, \dot{\bar{T}}, \bar{R}, \dot{\bar{R}}$. Резултатите са представени в таблица 4.4. Средната квадратна грешка на трансформацията е $m^2 = 1,27$ cm

	T_x, cm	T_y, cm	T_z, cm	$D \cdot 10^{-8}$	$R_x \cdot 0,001''$	$R_y \cdot 0,001''$	$R_z \cdot 0,001''$
ITRF96	1,565	2,175	-2,011	-0,584	1,398	-0,483	0,559
	$\dot{T}_x, \text{cm}$	$\dot{T}_y, \text{cm}$	$\dot{T}_z, \text{cm}$	$\dot{D} \cdot 10^{-8}$	$\dot{R}_x \cdot 0,001''$	$\dot{R}_y \cdot 0,001''$	$\dot{R}_z \cdot 0,001''$
1998,746	0,954	2,959	3,012	-0,503	0,635	0,712	-0,697

Таблица 4.4. Изведени трансформационни параметри между двата модела

С помощта на така определените трансформационни параметри извършваме окончателно трансформиране на координатите и скоростите на точките VIDI, HARM и KAVA в “Модел В” и получаваме стойности за скоростите на преместване на точки VIDI, HARM, KAVA (табл. 4.5 и 4.6)

Таблица 4.5. Пространствени координати и скорости в система ITRF96 (1998, 74)

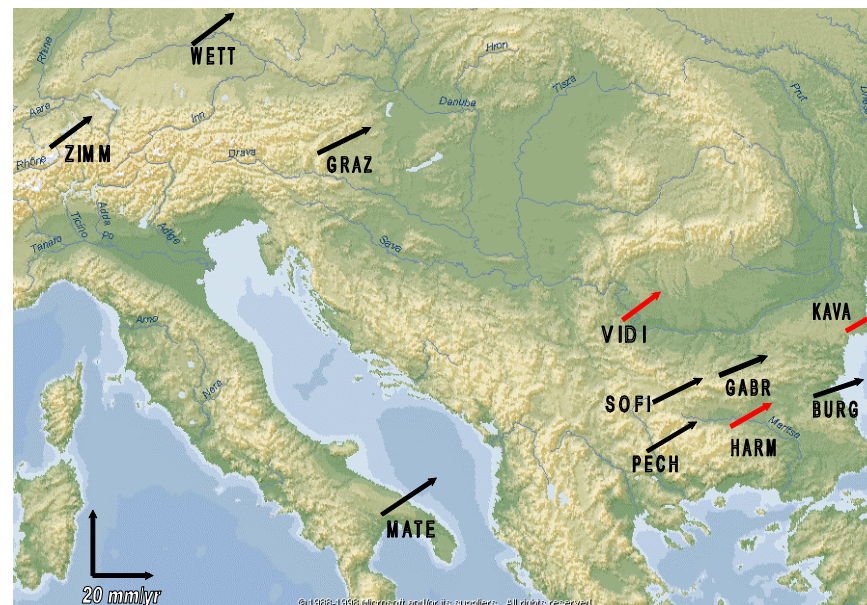
ITRF96 1998,75	X, m	Y, m	Z, m	$\dot{X}, \text{mm/yr}$	$\dot{Y}, \text{mm/yr}$	$\dot{Z}, \text{mm/yr}$
GRAZ	4194423,9380	1162702,5484	4647245,3502	-15,71	18,73	9,11
MATE	4641949,6636	1393045,2502	4133287,3556	-14,75	19,24	10,32
WETT	4075578,5376	931852,6587	4801570,0502	-14,19	18,66	9,13
ZIMM	4331297,1558	567555,7344	4633133,8812	-13,85	18,67	10,6
PECH	4402939,0301	1880254,9305	4201276,2318	-16,31	18,19	9,08
SOFI	4319372,2607	1868687,5937	4292063,7967	-16,27	18,61	9,97
BURG	4168849,7335	2164800,8557	4300556,4456	-17,92	17,92	8,39
GABR	4227589,9738	1996278,3001	4324909,6832	-17,18	18,29	8,12
VIDI	4233068,4930	1773729,9372	4414410,3892	-16,12	19,08	8,20
HARM	4280050,0038	2073328,2599	4236244,7998	-15,69	19,35	7,92
KAVA	4083131,4945	2205288,7824	4361084,1904	-16,03	17,87	10,02

Определянето на 14-те трансформационни параметри между двата модела и трансформирането им в една и съща координатна система, в случая ITRF96 ни дава възможността да сравним и анализираме получените оценки от двата проекта. Приложеният метод води до подобряване на оценките на скоростта за точки VIDI, KAVA и HARM изобразени на фигура 4.3. Техните скорости са определени еднократно от GPS-кампанията за включване на страната към EUREF [Altiner and et.

1996], а от проекта “Активни напрежения в България” са включени само с техните координати.

Таблица 4.6. ITRF96 скорости и средни квадратни грешки в топоцентрична координатна система

Точки	$\dot{n}, \text{mm/yr}$	m^2, mm	$\dot{e}, \text{mm/yr}$	m^2, mm	$\dot{u}, \text{mm/yr}$	m^2, mm
GRAZ	13,05	$\pm 0,6$	18,32	$\pm 0,3$	7,39	$\pm 0,6$
MATE	12,93	$\pm 0,6$	19,86	$\pm 0,5$	8,21	$\pm 0,6$
WETT	13,86	$\pm 0,5$	17,34	$\pm 0,4$	7,35	$\pm 0,5$
ZIMM	13,68	$\pm 0,6$	17,13	$\pm 0,4$	6,85	$\pm 0,6$
PECH	12,49	$\pm 1,3$	19,54	$\pm 1,0$	6,62	$\pm 1,3$
SOFI	12,58	$\pm 1,0$	19,35	$\pm 0,7$	7,21	$\pm 1,0$
BURG	12,70	$\pm 1,4$	20,69	$\pm 1,1$	7,64	$\pm 1,4$
GABR	12,13	$\pm 1,3$	20,33	$\pm 1,0$	8,19	$\pm 1,3$
VIDI	12,12	$\pm 1,3$	20,25	$\pm 1,1$	7,12	$\pm 1,2$
HARM	12,48	$\pm 1,3$	21,58	$\pm 1,1$	8,08	$\pm 1,3$
KAVA	11,09	$\pm 1,6$	21,19	$\pm 2,1$	7,11	$\pm 1,4$



Фигура 4.3 Абсолютни скорости на точки от EUREF в система TRF96

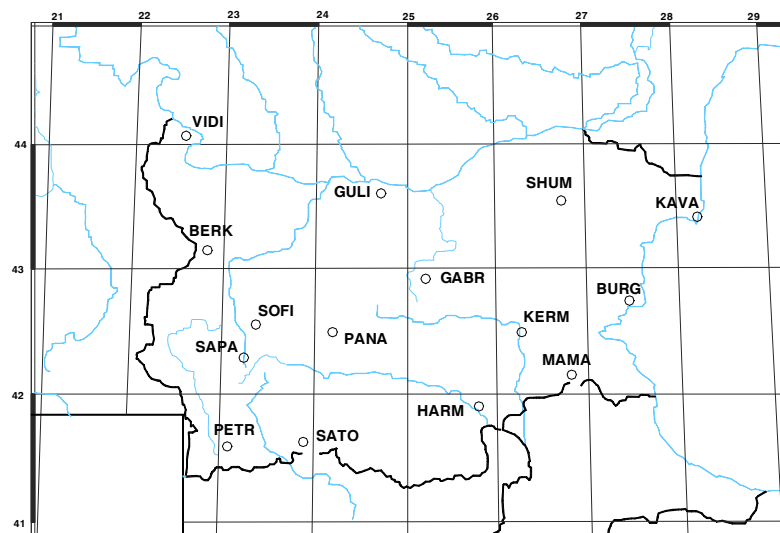
5. Извеждане на ротационен полюс от EUREF точки за територията на България

5.1 Сравнение на моделите за движение на литосферните плочи за точки на територията на България

Направени са сравнения на геодезически и геофизични модели за скоростите на 15 GPS станции от мрежа BULREF (фигура 5.1). В изследването се включва определянето на скорости от всички съществуващи модели, описващи движението на литосферни плочи, представени в глава втора на дисертацията. Приложен е стандартният алгоритъм за изчисляване на абсолютни скорости от модели за движение на плочите.

Използва се UNAVCO-електронен калкулатор за движение на плочи [[http://sps.unavco.org/crustal_motion/dxdt/model/.](http://sps.unavco.org/crustal_motion/dxdt/model/)] Пространствените вектори на скоростта са трансформирани в топоцентрична система.

Фигура 5.1. Схема на точките от мрежа BULREF



UNAVCO - калкулатор за движение на плочи Този проект (http://sps.unavco.org/crustal_motion/dxdt/model/) е предназначен за изчисляване на скоростта на тектонски плочи за всяко място на Земята, с помощта на един или повече модели за движение на литосферни плочи. Прилага се метода на Ойлер. Моделите включени в калкулатора за определяне на скоростите на точки от литосферни плочи са представени в таблица 5.1. със своите наименования, автори и година на създаване. За всеки модел са зададени ротационните компоненти на скоростното поле или Ойлеровия ротационен полюс и векторът на скоростта. Могът да бъдат избрани следните възможности:

- Входни данни на станция в географски или WGS-84 координатите XYZ
- Избор на тектонска плоча (по подразбиране е Auto Selection)
- Избор на модел за движение на плоча (по подразбиране е GSRM v1.2)
- Движение, посочено за фиксирана плоча или NNR-система на избрания модел
- Вход за по-голям брой точки в географски или XYZ координатите
- Изходен файл във формат, таблица с координати в локална координатна система (север и изток) или WGS-84 координатите XYZ или [GMT](#) формат

Име на модела	Автор, година на създаване
GEODVEL (2010)	Argus, Gordon, Heflin, Ma, Eanes, Willis, Peltier, and Owen [2010]
MORVEL (2010)	DeMets, Gordon, and Argus [2010]
APKIM2005	Drewes [2009]: ITRF2005 site solutions by DGFI or IGN
GSRM v1.2 (2004)	Kreemer, Holt, and Haines [2003] + updates
CGPS (2004)	Prawirodirdjo and Bock [2004] + monthly updates
REVEL 2000	Sella, Dixon, and Mao [2002]
ITRF2000 (AS&B [2002])	Altamimi, Sillard, and Boucher [2002]
HS3-NUVEL 1A	Gripp and Gordon [2002]
APKIM2000	Drewes [1998], Drewes and Angermann [2001]
ITRF2000 (D&A [2001])	Drewes and Angermann [2001]
HS2-NUVEL 1A	Gripp and Gordon [1990], DeMets, Gordon, Argus, and Stein [1994]
NUVEL 1A	DeMets, Gordon, Argus, and Stein [1994]
NUVEL 1	Argus and Gordon [1991]

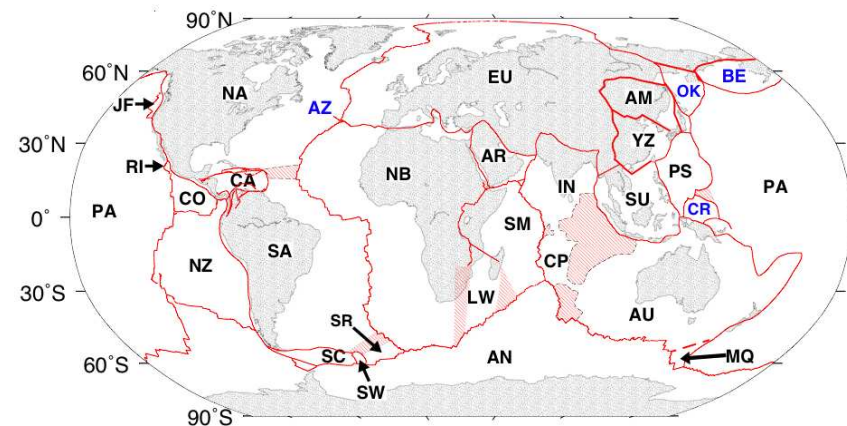
Таблица 5.1. Модели на литосферните плочи, включени в калкулатора UNAVCO

Site Name SOFI							
Latitude 42° 33' 21.94" N Longitude 23° 23' 41.04" E							
Model	Speed mm/yr	x vel. mm/yr	y vel. mm/yr	z vel. mm/yr	Azimuth (cw from N)	N Vel. mm/yr	E Vel. mm/yr
GEODVEL 2010	26.58	-17.23	17.83	9.58	60.82°	12.96	23.20
MORVEL 2010	24.28	-15.99	15.76	9.23	59.02°	12.50	20.82
APKIM2005-DGFI	27.07	-17.99	17.22	10.60	57.98°	14.35	22.95
APKIM2005-IGN	27.21	-18.29	16.82	11.08	56.55°	15.00	22.70
GSRM v1.2	28.56	-18.73	18.71	10.70	59.52°	14.49	24.61
CGPS 2004	27.09	-17.52	18.26	9.68	61.08°	13.10	23.71
REVEL 2000	26.84	-17.05	18.65	9.04	62.88°	12.24	23.89
ITRF2000 AS&B	26.98	-17.38	18.30	9.53	61.45°	12.89	23.70
HS3-NUVEL1A	25.52	-16.17	17.82	8.51	63.17°	11.52	22.78
APKIM2000.0	26.70	-17.37	17.80	9.73	60.46°	13.17	23.23
ITRF2000 D&A	26.60	-17.19	17.93	9.49	61.11°	12.85	23.29
HS2-NUVEL1A	25.13	-15.93	17.52	8.40	63.10°	11.37	22.41
NUVEL 1A	25.53	-16.17	17.83	8.51	63.18°	11.52	22.78
NUVEL 1	26.22	-16.60	18.33	8.72	63.24°	11.81	23.41

Таблица 5.2. Абсолютни скорости на точка **SOFI** от мрежа **BULREF** определени от геодезически и геофизични модели на плочи

Възниква въпросът, на какво се дължат различията в стойностите на абсолютните скорости, определени от различните модели за движение на плочите за една и съща GPS станция. Разликите в скоростите на станциите, представени в таблица 5.2 и приложение 1, получени от различните модели надвишават 2.5-3 mm/yr за някои точки. Такъв е и порядъка на стойностите на релативните скорости в Югозападна България. Възниква въпроса за съпоставимостта на тези стойности. Тези различия могат да се обяснят със следните фактори: Моделите описващи движенията на литосферните плочи биват геофизични и геодезически. Геофизичните модели не описват адекватно деформациите в границата на плочите. Поради значителната деформация в тези зони преместванията на точките, разположени на

твърдата част от плочата, се различават по стойност от преместванията на тези станции, разположени по границите. Например моделът NNR-NUVEL-1A [DeMets 1994], не включва зоните на разширена деформация на земната кора, каквато е Средиземноморската. Моделите за движение на плочите се прилагат само за онези места на плочата, подложени на въртене на твърдо тяло. Разликите в оценките на скоростите може да се дължат на различията на входните данни и времеви интервал, за които са извършени наблюденията, които са използвани при създаване на моделите. Например моделът REVEL-2000 включва геодезически данни само от GPS наблюдения за периода 1993-2000г., а моделът APKIM2005 е разработен на основата на три вида геодезически наблюдения VLBI, SLR и GPS от DGFI. Най-новият модел GEODVEL [Argus, et. al. 2010] използва данни за положението на станции с оценки от 24 годишни наблюдения с SLR, 24 годишни наблюдения от VLBI, 14 годишни GPS наблюдения, 12 годишни наблюдения с DORISB някои модели, са включени едни или други помалки плочи, а са изключени или обединени други тектонски плочи. Авторите на всеки модел определят границите между различните плочи на базата на свои проучвания и виждания.



Фигура 5.2. Изобразяване на литосферните плочи за модела NUVEL и плочите, включени в модела MORVEL [De Mets et al., 2010].

Промяната в геометрията на плочите от модела NUVEL-1A се осъществява с разпадането на бившата плоча Africa на плочите: Nubia, Lwandle и Somalia; бившата плоча Australia се разделя на плочите Capricorn, Australia и Macquarie; плочите Sur и South America формират новата плоча South America за модела MORVEL. В него се включват

Amur, Philippine Sea, Sundaland и Yangtze плочите, което го прави по-полезен, отколкото NUVEL-1A за проучвания на деформация в Азия и западната част на Тихия океан Фиг. 5.2

Всеки модел се дефинира в различна реализация на световната земна координатна система. В система ITRF2000 са моделите: REVEL2000 [Sella, et. 2002], ITRF2000 (EUREF [2002]) [Altamimi, et. et., 2002], HS3-NUVEL1A [Gripp and Gordon2002], APKIM2000.0 [Drewes, et. et 2001], ITRF2000(D&A [2001]) [Drewes and Angermann 2001], в система ITRF2005 са определени GEODVEL (2010) [Argus et. et., 2010], MORVEL [De Mets et al., 2010], APKIM2005 [Drewes, 2009].

Седем коефициента са необходими за да се дефинира референтна система в тримеренното пространство; три за да се определи трансляцията, три за да се определи ротацията и едем мащабен фактор. В пространствената геодезия трансляцията на земната референтна система се дефинира от центъра на Земята, [Argus 1996 Dong et al. 2002]. Ротацията на Земята референтна система може да бъде дефинирана чрез фиксиране на литосферните плочи. В модела на плочите, скоростта на станцията е равна на скоростта на местоположението на тази точка на плочата минус скоростта на центъра на Земята.

Центърът на Земята е дефиниран по различен начин в различните реализации на ITRF. Оценката на ъгловата скорост на плочата зависи от оценката на скоростта на центъра на Земята. Повечето геодезически оценки на ъгловите скорости на плочите се определят, като се приема, че центъра на Земята се фиксира в Международната земна референтна система (ITRF) и следователно се натоварва с грешки при оценката на скоростта на центъра на Земята. При реализации ITRF2005 и ITRF2000 центърът на Земята е дефиниран в центъра на масата на Земята, океаните и атмосферата (CM). Скоростта на CM се оценява от SLR наблюдение от LAGEOS орбити. В някои модели, като GEODVEL, авторите [Argus et. et., 2010] определят центъра на Земята да бъде в центъра на масата на твърдата Земя (CE). Като се има предвид, че скоростта на MC се различава с 1.8 mm/yr между ITRF2005 и ITRF2000, скоростта на CM определена от SLR не е оценена достатъчно добре, за да направи надеждна оценка на ъгловата скорост на плочата. Скоростта на CE, определена от скоростите на станции на повърхността на Земята, вероятно е по-близо до истинската скорост на MC от скоростта, изчислена въз основа на SLR. В система ITRF1997 скоростта на центъра на Земята е средна скорост от повърхността на Земята (CF). Скоростта на CF се оценява от геоложкия модел на плочите NUVEL-1A [DeMets

et. et., 1994], описващ движението на земната повърхност. Промяна в скоростта на центъра на Земята от 1mm/yr, обикновено води до промяна в ъгловата скорост на плочата с 0,012°/Myr. Загубата на ледената покривка, колебанията на нивото на океаните и атмосферата и други явления, пораждаят скорост между CM и CE, със стойност по-малка от няколко десети mm/yr [Argus et. et., 2007]. Местата по границите на бившите ледникови полета са със стойности на хоризонталните движения в размер до 1.5mm/yr, отдалечавайки се от ледниковия център към крайщата. Местата които не са били до края на Плейстоцена покрити с лед са с хоризонтални движения по-малко от $\approx 0.5\text{mm/yr}$.

В GEODVEL едновременно са изчислени скоростта на CE и ъгловата скорост на плочите [Argus et. et., 2010]. Ако се предположи, че станциите не са в близост до места с ледниково покритие до късния Плейстоцен се приема, че се движат със съответните си плочи, свързани с CE. Непостоянството в ъгловите скорости на плочите, включва и неточността в определяне скоростта на CE. GEODVEL се различава от другите геодезически оценки на ъгловата скорост на плочите, отчасти защото скоростта на центъра на Земята, се различава между различните проучвания. GEODVEL се различава съществено от REVEL [Sella et. et, 2002] с 0,028 ° /Myr, главно поради това, че скоростта на центъра на Земята, се различава значително между двата модела. В по умерени граници т.е с 0.015 °/Myr, GEODVEL се различава от модела [Altamimi et. et, 2007], защото [Altamimi et. et, 2007] приемат скоростта на центъра на Земята да бъде CMin ITRF2005. Различията в оценките на скоростите, може да се обяснят и с използването на станции върху плочите на различно местоположение за различните модели. Ротационния вектор за Евразия за модела EURASIA е с отстранени стойности от пост ледниковото издигане, това е причината за различието му с двата NUVEL-A1 и EUREF вектори. Разликата между EUREF и EURASIA вектори е породена от подбора на станциите.

5.2 Апроксимиране на скорости чрез линейна регресия

Използвани са данни за 15 точки, приети за официална реализация на ETRS89 за България - BULREF. В таблица 5.4 са представени епохите на наблюдения и обработката. Координатите на тези точки са получени в резултат на измервания и обработка през периода 1992-2005г. за целите на различни проекти и кампании от няколко авторски колектива [Altiner et al., 1996, Kotzev et. al. 2001, Vasileva K. et.al. 2004, I Georgiev et al. 2009]. Седем точки от тях са официално приети като разширение на EUREF с клас "B"- точност 1cm. и са публикувани в система ETRF89 [Altiner, et al., 1996] Координатите на точките от GPS кампанията EUREF BG 93 са получени по време на

проведените през 1993г. кампания GPS-измервания, за включване на станата към EUREF.

През 1997г. и 1998г. са извършени нови измервания за някои от точките от мрежа BULREF, като са преизмерени в създадената регионална геодинамична мрежа по проекта “Активни напрежения в България”, покриваща цялата територия на България (Kotzev et. al. 2001). ITRF96 е координатната система, в която са били обработени и представени техните координати.

Таблица 5.4. Епохи в които са определени координатите на точки от мрежа BULREF

ст.	BULREF'92 ETRF89 епоха 1992.7 [Altiner...]	BULREF'93 ETRF89 епоха 1993.4 [Altiner...]	ITRF96 1997.746 [Kotzev at]	ITRF96 1998.7461 [Kotzev at]	BULREF'03 ITRF2000, 2003.46 [Vasileva K.]	Държавна GPS мрежа ETRF2000 епоха 2005.0
PETR	X	X	X	X	X	X
HARM	X	X			X	X
GABR	X	X	X	X	X	X
VIDI	X	X			X	X
KAVA	X	X		X	X	X
SOFI	X	X	X	X	X	X
BURG	X	X	X	X	X	X
SAPA		X			X	X
SATO		X			X	X
GULI		X			X	X
SHUM		X	X		X	X
KERM		X			X	X
MAMA		X			X	X
BERK		X	X		X	X
PANA		X			X	X

В изследването са използват и публикуваните координати на точките от GPS кампанията през 2003 година в система ITRF2000 [Vasileva K. and et. 2004]. За епоха 2005.0 се използват координатите на 15-те точки, определени при обработката на Държавната GPS мрежа-основен клас в система ETRF2000, епоха 2005.0.

Координатите се отнасят за различни епохи и са в различни координатни системи. За получаване на скоростите на преместване е необходимо изходните координати да са приведат към единна система, за целта е избрана ITRF2000. В [Soler T. Marshall 2003] и [Атанасова 2003, Атанасова 2006] е разгледана спецификата на трансформиране на координати и скорости, между различни земни координатни системи и епохи.

Моделът за апроксимиране на скорости чрез линейна регресия ни дава възможност предварително да определим средни стойности на скоростите и да ги сравним с получените резултати. Може да преценим

дали всички измервания от всички епохи да участват в по нататъшните изчисления или да бъдат отстранени тези със силно отклонение.

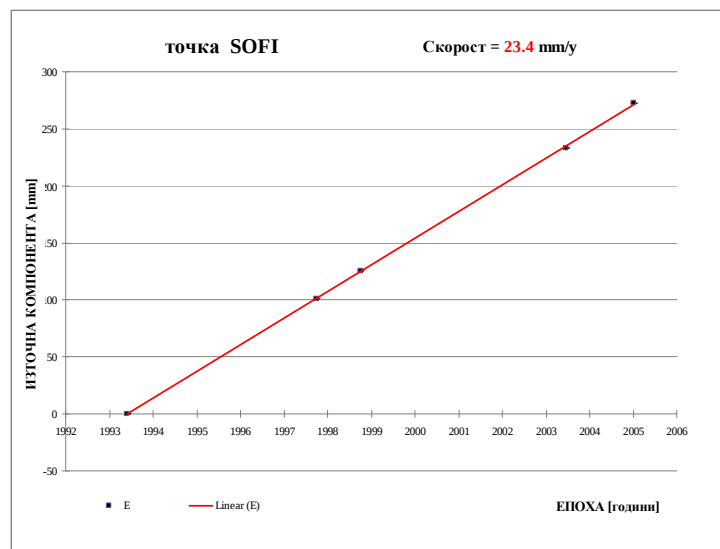
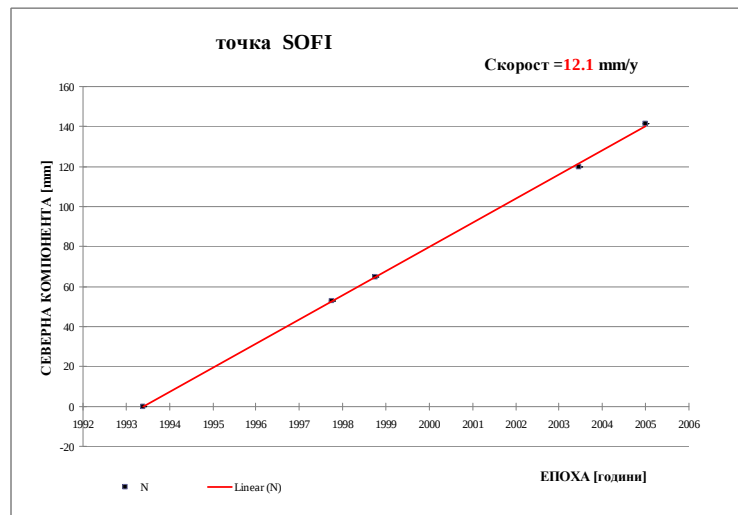
Пространствените координати X,Y,Z, в система ITRF2000 за всяка една епоха t_i се трансформират в локални координати с компоненти север n , изток e и нагоре u посредством формули (3.50).

Епоха 1993.4 се приема за нулева. Определя се нарастването по северната (по източната) компонента, като координатите на точката за всяка следваща епоха се редуцират със стойностите на координатите в нулевата епоха. По абсцисата графично се нанася нарастването по северната (източната) компонента, а по ординатата времевите интервали. Апроксимира се стойността на скоростта, като линейна функция (линейна регресия) На фигури 5.4 е представена апроксимацията на стойностите на скоростта по северната и източната компонента за точка SOFI, а в приложение 2 на дисертацията са представени диаграмите за останалите 14 точки от мрежа BULREF.

станция	Vn [mm/y]	Ve [mm/y]
PETR	10.9	23.4
HARM	12.5	24.2
GABR	12.5	24.1
VIDI	12.0	22.2
KAVA	12.1	24.0
SOFI	12.1	23.4
BURG	10.7	24.7
SAPA	12.2	22.9
SATO	11.3	23.8
GULI	12.2	23.3
SHUM	12.2	23.6
KERM	12.3	23.9
MAMA	12.0	23.9
BERK	12.2	23.6
PANA	12.2	23.5

Таблица 5.5 Абсолютни скорости в система ITRF2000 определени чрез линейна регресия

Фигура 5.4 Определяне на скоростта, чрез линейна функция по северната и източната компонента за точки SOFI



Координатите от кампания EUREF BG92 са отстранени и не са включени в изследването, поради съществени отклонения по източната компонента, спрямо координатите в другите епохи.

5.3. Определяне на Ойлеров полюс и скорост на ротация от данни за територията на България

Разработена е методика за определяне полюса и скоростите на ротация на литосферните движения за територията на България на базата на определените GPS координати за 15-те точки от мрежата BULREF (фиг. 5.1) в няколко епохи наблюдения (табл. 5.4). Приложен е методът на Ойлер, подробно описан в част трета на дисертацията.

Обикновено са известни компонентите на ротация на плочата за модела, описващ нейното движение и на базата на декартовите координати на точката се определят скоростите на преместване на тази точка или нейните нови координати за новата епоха.

Авторът на дисертацията предлага да се приложи обратния подход, т.е. на базата на определените в няколко епохи координати на точки от мрежата BULREF да се изведат компонентите на ротация на литосферните движения за локален район.

Изхождайки от уравнение (3.43), което може да бъде записано и във вида :

$$(5.1) \quad \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{t_0} \\ Y_{t_0} \\ Z_{t_0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\Omega}_z & \dot{\Omega}_y \\ \dot{\Omega}_z & 0 & -\dot{\Omega}_x \\ -\dot{\Omega}_y & \dot{\Omega}_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{t_0} \\ Y_{t_0} \\ Z_{t_0} \end{bmatrix} (t - t_0),$$

където, координатите на станциите са определени в епохи t_0 и t и са преведени към една координатна система – ITRF2000.

Посредством параметрично изравнение по МНМК могат да се определят компонентите на ротационния вектор за плочата. Съставят се по три условни уравнения за всяка точка с известни координати в две епохи. Ако точката е определена в три епохи се съставят условни уравнения, като се правят комбинации между всеки две епохи например 1-2, 1-3, и 2-3, например за точка **KERM** 1993.4-2003.46; 1993.4-2005; 2003.46-2005. Когато координатите на точките са определени с по-голям брой кампании нараства и броят на съставените условни уравнения. Неизвестните са трите компоненти на вектора на ротация. Коефициентите пред неизвестните са съответно:

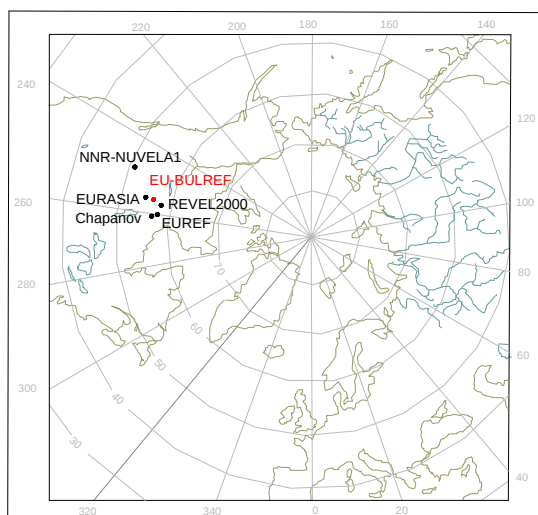
$$(5.2) \quad \begin{aligned} a_{x1} &= 0; & a_{x2} &= Z_{t_0} (t - t_0); & a_{x3} &= -Y_{t_0} (t - t_0); & f_x &= X_{t_0} - X_t \\ a_{y1} &= -Z_{t_0} (t - t_0); & a_{y2} &= 0; & a_{y3} &= -X_{t_0} (t - t_0); & f_y &= Y_{t_0} - Y_t \\ a_{z1} &= Y_{t_0} (t - t_0); & a_{z2} &= -X_{t_0} (t - t_0); & a_{z3} &= 0; & f_z &= Z_{t_0} - Z_t \end{aligned}$$

Условно е прието, че координатите на точките, определени в различните кампании са равноточни и параметричното изравнение е равнотежесто. Изведените компоненти на ротационния са представени в таблица 5.6. Моделът е наречен от автора на

дисертацията **EU-BULREF(2000)**. Определени са географското положение на Ойлеровият полюс и големината на ротационния вектор посредством формули (3.41)

Име на модела на литосферни плочи	Компоненти на ротационния вектор на Евразия			Географско положение на полюса на ротация		Големината на вектора на скоростта
	$\dot{\Omega}_x$	$\dot{\Omega}_y$	$\dot{\Omega}_z$	ϕ	λ	Ω
	Mas/yr	Mas/yr	Mas/yr	ширина	дължина	Mas/yr
REVEL2000	-0.103	-0.476	0.788	58.27	257.79	0.926677
NUVELA	-0.202	-0.494	0.650	50.63	247.73	0.841339
EU-BULREF	-0.194	-0.431	0.730	57.08	255.75	0.869653
EURASIA	-0.129	-0.494	0.732	55.10	255.36	0.892469
EUREF	-0.081	-0.489	0.792	57.96	260.59	0.934316
Chapanov	-0.064	-0.458	0.6626	57.21	261.30	0.786944

Таблица 5.6. Компоненти на вектора на ротация на литосферната плоча Евразия, географското положение на полюса на ротация и големината на ротационния вектор



Фигура 5.6. Географско местоположение на полюсите на ротация за модели: NNR-NUVEL-A1, EUREF, EURASIA, RIVEL2000, EU-BULREF (2000), Chapanov 2009

Направени са сравнения с два от публикуваните модели, описващи движенията на “твърдата” Евразия NUVEL-1A [Mc Carthny 1996] и EUREF [Altamimi & Boucher 2002]. Таблица 5.6 съдържа съответните компоненти на моделите NNR-NUVEL-1A, EURASIA, EUREF (ITRF2000), REVEL2000. Местоположението на ротационните полюси на тези модели е показано на фигура 5.6. Видимо е, че полюс

EU-BULREF(2000) добре се вписва в съвкупността, получена при изобразяването на местоположението на полюсите на моделите.

Моделите EUREF, EURASIA, RIVEL2000, EU-BULREF(2000), Chapanov 2009 са базирани само на геодезически измервания, докато моделът NNR-NUVEL-A1 е определен въз основа на геофизични данни. Полюсите на Евразия от моделите EUREF, EURASIA, RIVEL2000, EU-BULREF образуват една съвкупност, а полюсът на модела NNR-NUVEL-A1 отстои от тях на 5-8° в ширина ϕ и до 14° по дължина λ .

При извеждане на модела EU-BULREF(2000) са използвани данни за точки, само от територията на България. EU-BULREF характеризира не само движението на “твърдата” Евразия, както е в случая с модели NNR-NUVEL-A1 и EURASIA, но включва и локалните вътрешно-плочови премествания.

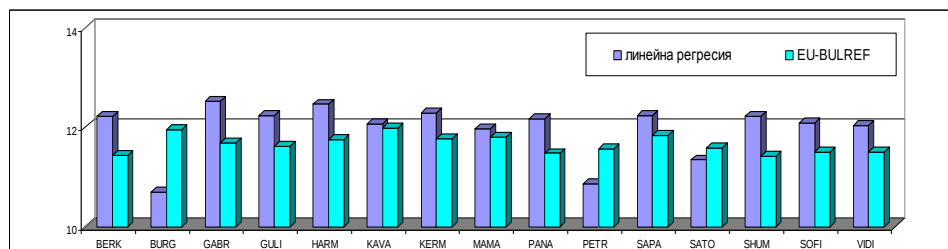
Абсолютни скорости определени от модела EU-BULREF(2000)

За определяне абсолютните скорости на преместване на 15-те точки от BULREF се използват техните координати и изведените ротационни параметри за модел EU-BULREF(2000)

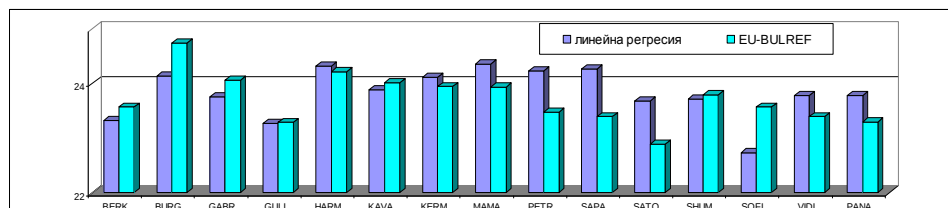
Таблица 5.7. Абсолютни скорости в системата ITRF2000 определени от модел EU-BULREF(2000)

станция	Абсолютни скорости в координатна система ITRF2000 x y z			Абсолютни скорости в локална система (e, n)	
	Vx [mm/yr]	Vy [mm/yr]	Vz [mm/yr]	Vn [mm/yr]	Ve [mm/yr]
BERK	-16.3	18.4	8.4	11.43	23.32
BURG	-18.3	17.7	8.8	10.94	24.14
GABR	-17.3	18.1	8.6	12.08	23.75
GULI	-17.0	17.8	8.4	12.01	23.27
HARM	-17.6	18.5	8.8	11.74	24.32
KAVA	-18.6	17.1	8.7	11.98	23.88
KERM	-17.8	18.1	8.7	11.77	24.11
MAMA	-18.0	18.2	8.8	11.87	24.35
PETR	-16.5	19.3	8.6	10.87	24.22
SAPA	-16.5	18.8	8.5	11.49	23.78
SATO	-16.8	19.1	8.7	11.56	24.27
SHUM	-17.9	17.5	8.6	11.82	23.68
SOFI	-16.5	18.7	8.5	11.48	23.71
PANA	-17.0	18.8	8.4	11.81	23.31
VIDI	-16.1	17.9	8.2	11.49	22.73

На фигури 5.7., 5.8. са сравнени оценките на скоростите получени от модела EU-BULREF (светло синьо) и скоростите определени от линейната регресия (лилаво).



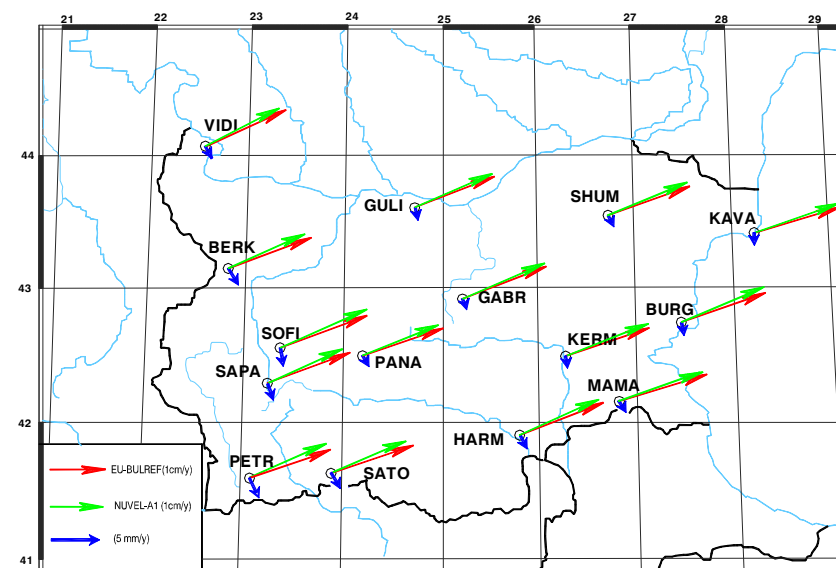
Фигура 5.7. Сравнителна диаграма на абсолютните скорости определени от модела EU-BULREF(2000) и скоростите апроксимирани от линейната регресия северна компонента



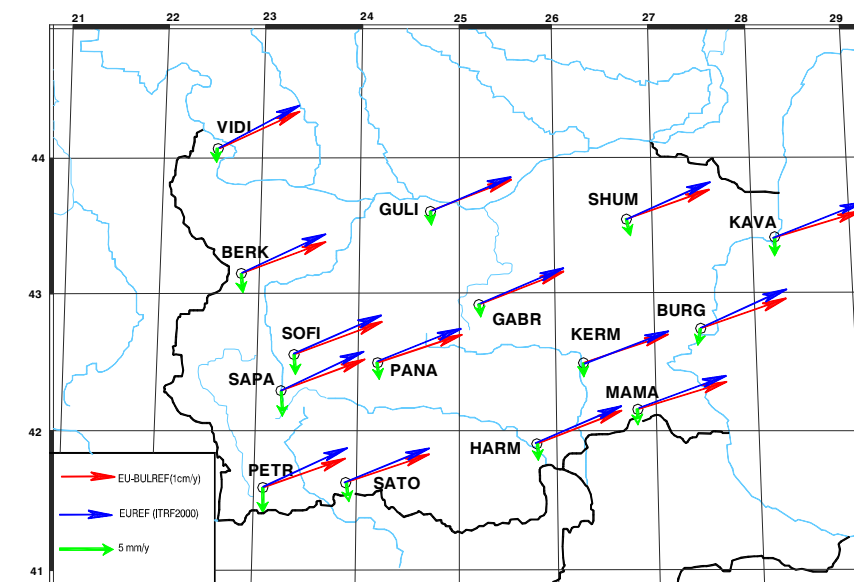
Фигура 5.8. Сравнителна диаграма на абсолютните скорости определени от модела EU-BULREF(2000) и скорости апроксимирани от линейната регресия източна компонента

Относителни скорости на точките от мрежа BULREF

Относителните (релативните) скорости на 15-те точки от мрежа BULREF в системата ITRF2000 са получени като абсолютните скорости на станциите се редуцират със скоростта на преместване на твърдата Евразия от моделите EUREF [Altamini и Boucher 2002] (фиг. 5.9.) и NNR-NUVEL-1A (фиг. 5.10.)



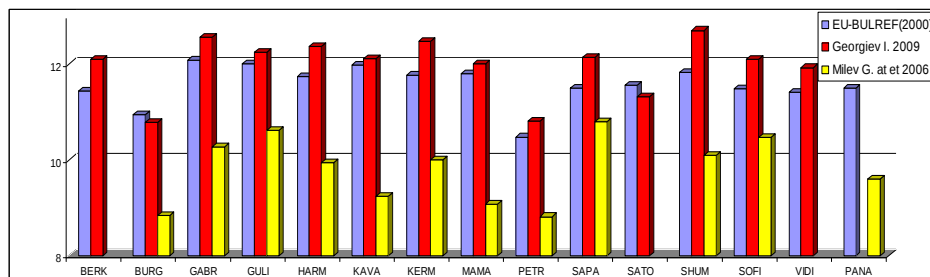
Фигура 5.9. Абсолютни скорости от модели EU-BULREF и NNR-NUVEL -1R и релативни скорости, спрямо Eurasia



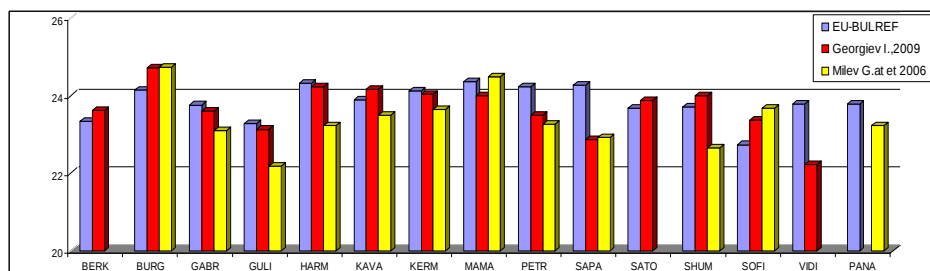
Фигура 5.10. Абсолютни скорости от модели EU-BULREF и EUREF, релативни скорости, спрямо Eurasia

Сравнение на получените скорости с други резултати

Изведените от автора абсолютни скорости за 15-те точки от мрежата BULREF са сравнени с резултатите, получени от други автори. Моделните скорости на EU-BULREF(2000) са нанесени със син цвят на фигури 5.11. и 5.12. Официално приети на международния симпозиум на EUREF в Рига 2006г., скорости на тези идентични точки от Държавната GPS мрежа са нанесени на графика 5.11. и 5.12. в червен цвят. Обработката и анализа на тези резултатите е извършена с програмата Bernese 5.0 от Георгиев И. [2009]. Абсолютните скорости, определени от модела EU-BULREF са сравнени и с публикуваните скорости в [Milev G. et. al., 2006], получени също след обработка със софтуера Bernese, изобразени на фигура 5.11. и 5.12. с жълт цвят.



Фигура 5.11. Сравнителна диаграма на абсолютните скорости на точки от мрежа BULREF по северна компонента



Фигура 5.12. Сравнителна диаграма на абсолютните скорости на точки от мрежа BULREF по източна компонента

Извършеният анализ и съответните сравнения на скоростите на BULREF станциите показват, че няма установени съществени различия на резултатите, получени от различните автори. Разликите между скоростите, определени от различните автори не надвишават 3 пъти средните квадратни грешки, с която са определени абсолютните

скорости. Това потвърждава верността на получените резултати в настоящето изследване.

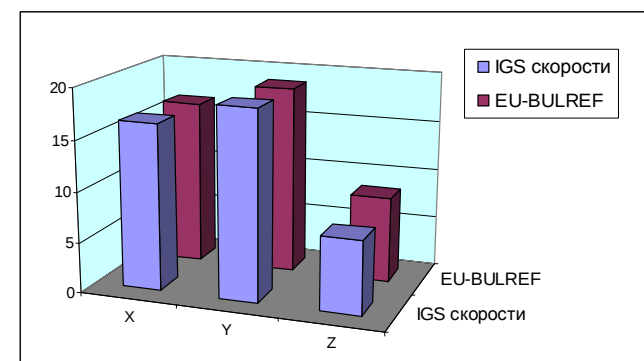
Перманентна станция SOFI - сравнение на резултати

Получените абсолютни скорости на точка SOFI (Таблица 5.7.) са сравнени с публикуваните скорости на перманентната станция SOFI в ITRF2000 (<http://itrf.ensg.ign.>) Фигура 5.13.

ITRF2000 STATION POSITIONS AT EPOCH 1997.0 AND VELOCITIES EUROPEAN PERMANENT GPS STATIONS							
DOMES NB.	SITE NAME	TECH.	ID.	X/Vx	Y/Vy	Z/Vz	Sigmatas SOLN---
11101M002	SOFIA	4319372.228	1868687.631	4292063.865	0.005	0.002	0.004
11101M002		-	16.5	18.7	7.3	2.6	1.3
							2.5

Фигура 5.13. Данни за перманентна станция SOFI [<http://itrf.ensg.ign.>]

На графиката с червено са изобразени абсолютните скорости, получени от модела EU-BULREF(2000). IGS скоростите са нанесени със син цвят на графиката. Разликите не надвишават 2 пъти средната квадратна грешка, с която е определена скоростта на перманентната станция SOFI. Това потвърждава верността на получените резултати.



Фигура 5.14. Сравнителна диаграма на абсолютните скорости на станция SOFI [mm/yr]

Ново определеният модел EU-BULREF(2000), дава възможност при липса на измерени скорости на точките, те да бъдат определени като за целта е необходимо да са известни координатите на станцията и чрез компонентите на ротация на модела се определя абсолютната скорост на преместване.

Когато абсолютните скорости, определени от модел EU-BULREF са редуцирани чрез скоростите от геофизичния модел NNR-NUVEL-1A, големината на относителните скорости е от порядъка на 2.1 mm/ут и имат посока югоизток (Фигура 5.9). Абсолютните скорости на точките от мрежата BULREF, редуцирани със скоростите от геодезическия модел EUREF, имат посока на преместване юг и максимални относителни скорости от порядъка на 2.0 mm/ут, както се вижда от Фигура 5.10.

EUREF скоростите на точките, т.е скоростите спрямо стабилната част на Евразия в района на България, варират до 2 mm/ут и имат посока юг – югоизток, което се потвърждава и от изследванията за целия район [Lagrand J., et. al. 2006]. Посоката на преместване север-юг доказва, че екстензията с посока север-юг е преобладаваща. Скоростите за България са значително по-ниски от тези в южната част на Егейската екстензионна зона (южно от Северноанадолския разлом – в Анадола и Егейско море), но определено показват наличието на активна тектонска деформация

Съвременната геодинамика на Източното Средиземноморие и в частност Южните Балкани се определя основно от субдукцията на Африканската плоча в зоната на Егейската дъга. Диференцираните тектонски движения в Егейския регион и Анадола мотивират отделянето на относително хомогенни геодинамични области, някои с характер на микроплочи. Територията на България заема най-северната част на системата, дефинирана като Южно балканска екстензионна зона. Тук деформацията протича със значително по-ниски стойности.[Kotzev, et al 2006]

Получените резултати и извършените сравнения по недвусмислен начин доказват възможността GNSS технология да бъде успешно използвана за описание на литосферните движения на плочи и блокове. Очевидно е, че тези движения ще се определят толкова по-стабилно и с по-голяма достоверност, колкото по-дълъг е наблюдателния период. Високите качества на решенията на координатите на GPS станциите и тяхната стабилност, дават основание в бъдеще да се определят тектонските блокови структури на територията на България и да се изведат техните ротационни полюси и да се получат оценки на съвременните им движения.

6. Обобщение и заключение

В дисертационния труд са анализирани и систематизирани основните модели за трансформация на пространствени координати и скорости.

В изследването се установяват разликите в оценяваните параметри при 7 и 14 параметрични трансформации при използване на

различни ковариационни матрици. Проведени са няколко експеримента на реален модел от идентични точки за територията на Европа и България и са анализирани получените резултати. Показано е, че формулите с 14 параметри са интерполационни формули, които се прилагат в рамките на определен интервал от време. Точността на получените параметри трябва да осигури необходимата точност на трансформиране, която да съответства на точността на първоначалните координати на идентичните точки. Точността на трансформацията, както е известно зависи от броя на идентичните точки, от тяхната конфигурация и от големината на областта, за която се прилага трансформирането.

Чрез проведените изследвания се потвърди и твърдението, че оценки на трансформационните параметри може да се получат от две последователни 7-параметрични трансформации. При изравнението по МНМК нормалната система се разделя на две отделни нормални системи, което доказва, че липсва зависимост между параметрите и следователно трансформационните параметри на скоростите могат да се изведат чрез самостоятелна седем параметрична трансформация.

Трансформационните параметри, определени чрез параметрично изравнение на равноточни наблюдения от 7 и 14 параметрична трансформация имат еднакви стойности. Точността на оценяваните параметри е различна. Средните квадратни грешки с които са получени $T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z, D$ са по-малки по стойност при едновременното изравнение на координатите и скорости от средните квадратни грешки, получени при изравнението само на координати.

Средните квадратни грешки на наблюденията са диагоналните елементи на ковариационната матрица. Тъй като разликите в средните квадратни грешки на координатите на идентичните точки са от порядъка на няколко милиметра, може да се приемат и за равноточни и в някои случаи да се изпуснат.

Определянето на 14-те трансформационни параметри между два модела и трансформирането им в една и съща координатна система (ITRF96) ни дава възможността да сравним и анализираме получените оценки от двата проекта. Приложеният метод води до получаване на оценките на скоростта за точки VIDI, KAVA и HARM

Систематизирани са съществуващите геофизични и геодезически модели описващи движенията на литосферните плочи.

Направени са сравнения на геодезически и геофизични модели за скорости на 15 GPS станции от мрежата BULREF. В изследването са включени определянето на скорости от съществуващите модели описващи движението на литосферни плочи. Използва се UNAVCO-електронен калкулатор за движение на плочи. Разликите в скоростите на една станция, получени от различните модели са в диапазона 2.5-

3mm/ут. Различията в стойностите на скоростите са обяснени със следните фактори:

Всеки модел, описващ движението на плочи, се дефинира в различна реализация на Международната земна референтна система. Седем коефициента са необходими, за да се дефинира референтна система в тримерното пространство, три за да се определи трансляцията и три, за да се определи ротацията. В космическата геодезия трансляцията на земната референтна система се дефинира от центъра на Земята. Центърът на Земята е определен по различен начин в различни ITRF. Оценката на ъгловата скорост на плочата зависи от оценката на скоростта на центъра на Земята. Повечето геодезически оценки на ъгловите скорости на плочите се определят, като се приема, че центърът на Земята се фиксира в Международната земна референтна система (ITRF) и следователно се натоварва с грешки при оценката на скоростта на център на Земята. За системи ITRF2005 и ITRF2000 центъра на Земята е фиксиран в центъра на масите на Земята, океаните и атмосферата (CM). Скоростта на CM се оценява от SLR наблюдение от LAGEOS орбити. В някои модели да движение на плочите, определят центъра на Земята, да бъде в центъра на масата на твърдата Земя (CE). В ITRF1997 скоростта на центъра на Земята е средна скорост от повърхността на Земята (CF), скоростта на CF се оценява от геоложки модел на плочи NUVEL-1A, точно описващ движението на земната повърхност.

Различията в оценките на скоростите се дължат и на факта, че се използват станции с различно местоположение за различните модели описващи движенията на плочите. Поради значителната деформация в граничните зони, преместванията на точките, разположени на твърдата част от плочата, се различават по стойност от преместванията на тези станции, разположени по границите. Разликите в оценките на скоростите се обясняват и с различията на входните данни и периода от време, в който са натрупани наблюденията.

В някои модели, описващи литосферните движения са включени едни или други, по-малки тектонични плочи и са изключени или обединени други плочи. Авторите на всеки модел определят границите между различните плочи на базата на свои проучвания и виждания.

Методът на линейна регресия, чрез който са апроксимирани скоростите, ни дава възможност предварително да определим, едни средни стойности и да ги сравним с получени резултати. Координатите от кампания EUREF-BG92 са отстранени и не се включат в изследването, поради големи отклонения по източната компонента.

При извеждане на модела EU-BULREF(2000) са използвани данни, само за точки на територията на България и са определени

компонентите и полюса на ротация, по този начин е моделът локализиран за района.

Изведените от автора абсолютни скоростите за 15-те точки от мрежа BULREF са сравнени с официално приетите на международен симпозиум на EUREF в Рига 2006г., скорости на тези идентични точки от Държавната GPS мрежа [Георгиев И. 2009]. Абсолютните скорости, определени от модела EU-BULREF са съпоставими и с публикуваните скорости в [Milev G. et al., 2006]. Извършеният анализ и съответните сравнения на скоростите на BULREF станции показват, че няма установени съществени различия на резултатите, получени от различните автори.

Новоопределеният модел EU-BULREF(2000) дава възможност при липса на измерени скорости на точки, те да бъдат прогнозирани като за целта е необходимо да са известни координатите на станцията и чрез компонентите на модела се определят абсолютните скорости на преместване.

При абсолютните скорости определени от модел EU-BULREF, редуцирани чрез геофизичния модел NNR-NUVEL-1A, големината на относителните скорости е от порядъка на 2.1 mm/ут и имат посока югоизток. Скоростите на точките от мрежата BULREF, редуцирани със скоростите от модела EUREF, имат локални премествания в посока юг и средна относителна скорост от порядъка на 2.0 mm/ут. Относителните скорости за движение спрямо Евразия, получени след отстраняването на скоростите от геофизичния модела NNR-NUVEL-1A и геодезическия модел EUREF се различават по стойност и посока на преместването. Наблюдаваното завъртане може да се обясни с различия при определяне и дефиниране на моделите за движение на Евразия. Изборът на модел за движение на Евроазиатската плоча оказва влияние при определяне на стойностите и посоката на относителните скорости на точки от мрежата BULREF.

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

Приноси

Съгласно изложените резултати и анализи, претенциите за основни приноси на дисертационния труд са:

1. Направено е обобщение и анализ на основните модели за трансформация на координати и скорости, както и на съвременните геофизични и геодезически модели за движение на литосферните плочи
2. Направеният анализ на 7- и 14-параметрични трансформации с различни ковариационни матрици, потвърждава, че точността, с която са определят седемте трансформационни параметри за координатите на точките се повишава с включване в математичния модел на изравнение и на уравнения за скоростите.
3. Предложен е модел за определяне на скорости на точки, посредством изведени трансформационни параметри, между две системите и две епохи.
4. Установени са систематични разлики в абсолютните скорости на точки от територията на България, при използване на геодезически и геофизични модели за движение на Евроазиатската тектонична плоча, дължащи се на: различните геофизични хипотези за движението на центъра на Земята; различните реализации на световната координатна система; различните епохи; различните изходни геодезически данни; различното местоположение на станциите по границите и твърдата част на плочата.
5. Изведен е полюс на ротация за територията на страната, въз основа на координатите на точки, приети за официална реализация на ETRS89 за България. Създаденият модел е наречен EU-BULREF и позволява да се определят абсолютните скорости на точки.

Списък на научните публикации, свързани с дисертацията

1. **Атанасова, М., (2003)** Трансформационни модели на GPS координати и скорости, Висша геодезия, №16, София, 28-42
2. **Атанасова М., (2004)** Геодезически и геоложки модели за движение на литосферните плочи. Ефект за територията на България., 6-ти международен симпозиум "Техномат & Инфотел '2004, 6-10 септември, Слънчев бряг
3. **Атанасова М. (2006)** Влияние на движението на Евроазиатската литосферна плоча върху положението на точките от територията на България, Научна конференция с

международно участие, ВСУ'2006, 22-23 май 2006, София, том II, VII-65-69

4. **Атанасова М. (2007)** EUREF точки на територията на България в ITRF2005 Научна конференция с международно участие, ВСУ'2007, 15-16 май 2007, София, том II, VII-68-73
5. **Атанасова М. (2007)** Приложение на метода на Ойлер за определяне скоростите на преместване въз основа на GPS данни, списание ГЕОМЕДИЯ, брой 1, септември 2007, 16-22
6. **Atanasova M. (2008)** Velocities of Displacement of Stations in the BULREF Network Geodesy 19, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia 2008, 85-96
7. **Atanasova M. (2010)** Transformation models in contemporary terrestrial coordinate system, Proceedings of the International symposium on modern technologies, education and professional practice in geodesy and related fields, Albena, 23-24 September, 2010, p 163
8. **Атанасова М. (2011)** Трансформационни модели при съвременните земни координатни системи. Геодезия, картография, замеустройство, 3-4 брой 2011, 7-12

Използвана литература

Георгиев Ив., В. Коцев (1992) Оценка на глобални тектонични движения от лазерни наблюдения на спътника " ЛАГЕОС", Геодезия Картография Земеустройство, 5-6, 1992, 25-26

Господинов Сл. (2011) Монография, Определяне на блоково обусловени равнинни деформации на земната кора посредством измерени пространствени хорди, София, Военно-топографска служба

Даскалова М, И. Здравчев, (2005) Висша геодезия, София

Наков Р., В. Коцев, К. Бърчфийлд, Р. Кинг (2006) Активната тектоника на България по данни на космическата геодезия (GPS) - 10 години изследвания, обзор и резултати BULGERIA GEOLOGICAL SOCIETY www.clmc.bas.bg/bgd.bg/CONFERENCES/80_godini_BGD/pdf_files/nakov.pdf

Ценков Ц. (2004) Моделиране на геодинамични процеси по резултати от геодезически измервания, хабилитационен труд, ВСУ „Л. Каравелов”, 230стр

Altamimi, Z., P. Sillard and C. Boucher (2001), ITRF2000: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Applications, submitted to *J. Geophys. Res.*, 2001.

Altamimi, Z., P. Sillard, and C. Boucher, (2002), ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science

applications, *J. Geophys. Res.*, 107(B10), 2214, doi:10.1029/2001JB000561, 2002; see also [tn31_270.pdf](#).

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, 84-88.

Altamimi Z. (2005), Reference Systems: Definition and Realization, Associated IAG Services IAG Reference Frame Sub-commission for Europe (EUREF), lecture of "IAG-IASPEI Joint Capacity Building Workshop on Deformation Measurements and Understanding Natural Hazards", Trieste-Italy, 17-23 January 2005

Altamimi Z., Collilieux X. Legrand J. Garayt B. Boucher C., (2007), ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. *Journal of Geophysical Research*. VOL. 112, B09401, doi:10.1029/2007JB004949/.

Altiner, J., P. Gabenski, K. Habrich, G. Milev, M. Minchev, H. Seeger, K. Vassileva. (1996) EUREF Bulgaria GPS Campagns Final Results. EUREF-Symposium, Ankara, Turkey, 22-25 May 1996, DGK. Muenchen. AGA. 1996, Heft 57, 86-97

Argus, D.F. and R.G. Gordon, (1991) No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 2039-2042, 1991

Argus, D.F., R.G. Gordon, M.B. Heflin, C. Ma, R.J. Eanes, P. Willis, W.R. Peltier, and S.E. Owen, (2010), The angular velocities of the plates and the velocity of the Earth's centre from space geodesy, *Geophys. J. Int.*, 18, 1-48.

Botev E., Bourmakov Y., Vinnik L., Treousov A., (1987) Tree dimensional velocity model of the litosphere of the central part of Balkan Region., *Bulg. Geophys. J.*, XIII(I), 43-52

Boucher C., Z. Alfamimi (1996) - International Terrestrial Reference Frame - GPS-world, september 1996, 71-74.

Boucher, C. & Altamimi Z., (2011), Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign, Unpublished memo available at <http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF/>.

Burchfiel B.C., R. Nakov, N. Dumurdzanov, D. Papanikolaou, T. Tzankov, T. Serafi movski , R.W. King, V. Kotzev, A. Todosov, B. Nurce (2008), Evolution and dynamics of the Cenozoic tectonics of the South Balkan extensional system, *Geosphere*; December 2008; v. 4; no. 6; p. 919–938; doi: 10.1130/GES00169.1.

Daskalova M, (2008), On some coordinate transformations in geodesy *Geodesy (Sofia)*, 21,19-29

DeMets C., R. Gordon, D. Argus, S. Stein (1990), Current plate motions. *Geophys. J. Int.*, 101, 25–478, 1990.

DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., & Stein, S., (1994), Effect of

recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2191–2194.

DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., (2010) Geologically current plate motions, *Geophys. J. Int.* (2010) **181**, 1–80 doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x

Dennis, D. and Me Carthy (1996). IERS Technical Note 21, Chapter 3. Conventional Terrestrial Reference System, 10- 17.

Drewes H., (1999), Geodetic Datum Constraints on Plate Tectonic and Crustal Deformation Models (APKIM), DGFI-Poster 1998/991

Drewes H. (2006) Implementation of the kinematical NNR condition for the terrestrial reference frame, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 05014, 2006 European Geosciences Union 2006, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-05014

Georgiev I, Kotzev V (1994) Tectonic plate motion from satellite laser ranging to Lageos1 Proceedings of the 1-st Turkish international symposium on Deformations. September 5-9 Turkey 1994

Georgiev I., S. Shanov, J. Chapanov (2001) - A contribution in the estimation of tectonic plate motion from the CLG98 SLR solution – *Geologica Balcanica*, 30, 3-4, Sofia, 89-100

Georgiev, I., L. Pashova, G. Nikolov, E. Botev, D. Dimitrov, Sl. Gospodinov, I. Sdravchev, B. Aleksandrov (2002). Regional geodynamic GPS network in SW Bulgaria geological and geophysical background status and perspectives - *Bulgarian Geophysical Journal*, V. 28, 1-4.

Georgiev I., (2009). National and Permanent GPS networks of Bulgaria processing of the observation, analysis and application in Geodynamic - dissertation for doctor of science.

Georgiev, I. (ed.) (2011). Geodesy Activity in Bulgaria. National Report 2007 – 2011. Prepared for the International Union of Geodesy and Geophysics XXVth General Assembly, Melbourne, Australia, June 28 – July 7, 2011, Geodesy, Cartography and Cadastre Agency, Bulgarian Academy of Science, National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Military Geographic Service, 32 pages.

Gripp, A.E., and R.G. Gordon, (1990), Current plate velocities relative to the hotspots incorporating the NUVEL-1 global plate motion model, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 1109-1112, 1990.

Global Strain Rate Map Project, <http://gsrm.unavco.org/model/>
http://gsrm.unavco.org/model/files/1.2/rotation_vector_studies_PA.dat
http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/ITRF2005.php

Kenyeres A., T Jambor, A Caporali, B Drosčák, B Garayt, I Georgiev, I Jumare, J Nagl, P Pihlak, M Rychywolski, G Stangl, (2012) Integration of the EPN and the dense national weekly SINEX solutions. towards the dense European velocity field, EUREF, 2012 Symposium, 6-8 June 2012, Paris, France

Kreemer, C., W.E. Holt, and A.J. Haines (2003), An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation, *Geophys. J. Int.*, 154, 8-34, 2003.

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

Kotzev, V., Nakov, R., Burchfiel, B.C., King, R.W., (2001b). GPS constraints on the kinematics of southwestern Bulgaria. *C. R. Acad. Bulg. Sci.* 54 (7), 51-54.

Kraszewska K., Rutkowska M., Chapantsov Ya (2009) Comparison of the plate motion parameters estimated from two SLR solutions, Proceedings of the International symposium on modern technologies, education and professional practice in geodesy and related fields, Sofia 5-6 November 2009

Legrand, J. Z. Altamimi, O. Jamet, (2006) Interpolation of the European velocity field using least squares collocation method, Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) held in Riga, Latvia, 14 - 17 June 2006

Milev, G., K. Vassileva, M. Becker, M. Kirchner. Analysis of the EUREF (2006) Stations Stability on the Territory of Bulgaria. EUREF Symposium, Vienna, Austria, June 01-04, 2005. *Mitteilungen des Bundesamtes fuer Kartographie und Geodäsie*. Frankfurt am Main, EUREF Publikation, 10 p.

McCarthy D. (1996) IERS Technical note 21, IERS Conventions (1996), Observatoire de Paris. 1996, 10-16

McKenzie, D (1972), Active tectonics of the Mediterranean region, *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, 30(2), 109-185.

Mukhail, Ed. (1976). Observations and least squares. New York, p. 497.

Nakov R., V. Kotzev, B. C. Burchfiel, R. W. King, (2006) Crustal motion in Bulgaria based on geological and GPS data, "Geodynamics of the Balkan peninsula", monograph, Reports on Geodesy, Warsaw University of Technology, № 5(80) 2006, 205-211

Sella G., T. Dixon, A. Mao, (2002), REVEL: A model from Recent plate velocities from space geodesy *J. Geophys. Res.*, 107 (B4), ETG 11,10.1029/2001JB000033

Soler T. (1998), A compendium of transformation formulas useful in GPS work, *Journal of Geodesy* 72 (7-8)

Soler T., J. Marshall (2002), Rigorous transformation of variance-covariance matrices of GPS-derived coordinates and velocities. *GPS Solutions*, 6 (1-2), 76-90

Soler T., J. Marshall (2003), A note on frame transformations with applications to geodetic datums, *GPS Solutions*, 7, 23-32

Rothacher M., (2005) GPS & IGS, lecture of "IAG-IASPEI Joint Capacity Building Workshop on Deformation Measurements and Understanding Natural Hazards", 17-23 January, Trieste-Italy

Съдържание

1. Увод	2
1.1 Актуалност на проблема	3
1.2. Цел и задачи	4
1.3. Изследователски методи	4
1.4. Структура на дисертацията.....	5
2. Съвременно състояние на проблема	6
2.1. Анализ и съвременно състояние на изследванията свързани с реализациите на земните координатни системи	6
2.2. Движение на литосферните плочи.....	8
3. Теоретична постановка	12
3.1. Координатни системи	12
3.2. Трансформационни модели на пространствени координати и скорости.....	12
3.3. Ойлеров полюс на ротация на литосферни плочи по сфера..	16
4. Експериментални изследвания	19
4.1. Приложение и анализ на трансформационни модели за пространствени земни координатни системи.....	19
5. Извеждане на ротационен полюс от точки за територията на България	31
5.1. Сравнение на моделите за движение на литосферните плочи за точки на територията на България.....	31
5.2. Апроксимиране на скорости чрез линейна регресия.....	36
5.3. Определяне на Ойлеров полюс и скорост на ротация от данни за територията на България.....	40
6. Обобщение, заключение и приноси	47