



СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ
„СВ. КЛ. ОХРИДСКИ“
ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА „МЕТЕОРОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА“

**Приложение на наземните
измервания с глобалните
навигационни спътникови
системи в метеорологията в
България**

БАКАЛАВЪРСКА ДИПЛОМНА РАБОТА

на

Цветан Симеонов Симеонов

ф.н. 80042

Научен ръководител:

/ас. д-р Г. Герова/

Ръководител катедра:

/доц. д-р Р. Мицева/

София юли 2011

Съдържание

1	Методи за измерване на водната пара в атмосферата	5
1.1	Аерологичен сондаж	5
1.2	Глобални Навигационни Спътникови Системи (ГНСС)	7
1.3	ГНСС метеорология	13
2	Приложение на ГНСС метеорология в Европа	16
2.1	ГНСС метеорология в Европа	16
2.2	ГНСС метеорология в България	18
3	ГНСС метеорология в България - първи резултати	21
3.1	ГНСС станция София (SOFI)	21
3.2	Демонстрация на ГНСС метеорология	22
3.3	Сравнение на ИВП: ГНСС метеорология и аерологичния сондаж	22

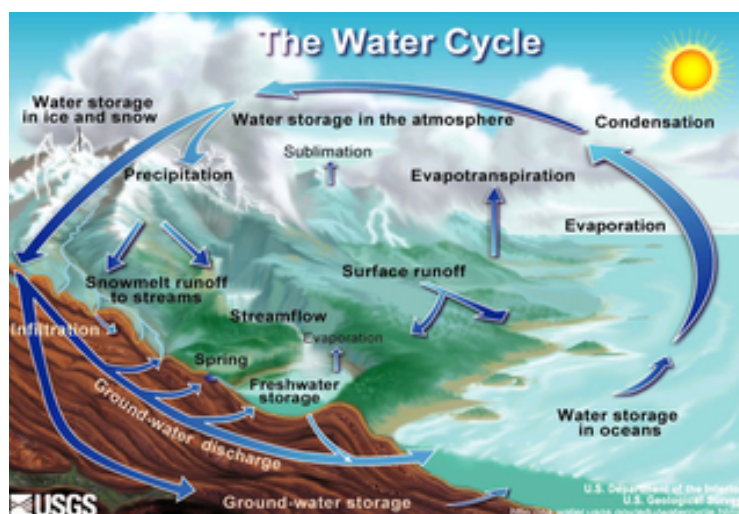
Списък на фигурите

1	Хидрологичен цикъл на Земята	4
1.1	Радиосонда VAISALA RS92	6
1.2	GPS конфигурация	8
1.3	ГЛОНАСС конфигурация	9
1.4	GALILEO конфигурация	10
1.5	Позициониране чрез ГНСС	13
1.6	Въздействия върху сигнала от ГНСС	14
2.1	EGVAP network	18
2.2	EGVAP карта на водната пара в Европа	19
2.3	Мрежа от наземни ГНСС станции - „Зенит-Гео“	20
2.4	Мрежа от наземни ГНСС станции - „БУЛиПОС“	20
3.1	ЗПЗ, ЗХЗ и ИВП в станция София (SOFI)	23
3.2	Графично сравнение на методите ГНСС метеорология и ае- рологичен сондаж	24

Въведение

Водата е единствената субстанция на Земята, която в естествени условия съществува в значителни количества в три фази: твърда фаза – лед, течна фаза – вода и газ – водна пара. Водната пара е един от основните газове в тропосферата (долните 12 km от земната атмосфера). Количеството ѝ е в интервала от 0 до 7% от обема на сухия въздух, като средната и стойност е около 4%. Тя е най-подвижната форма на водата в хидрологичния цикъл на Земята (Фигура 1). Водната пара постъпва в атмосферата чрез: изпарение от водните басейни (океани, морета, езера, реки); от ледената/снежната покривка и от почвата, както и чрез евапотранспирация от растителността. Кондензацията на водната пара в атмосферата води до образуване на облаци, от които падат валежи, т.е. водата се връща отново на земната повърхност. Водната пара в атмосферата има относително кратък живот – 7-10 дни, т.е. водата в атмосферата се възобновява напълно около 45 пъти в годината. Благодарение на голямата си подвижност, която включва вертикален и хоризонтален пренос, и непрекъснатите фазови преходи (изпарение/кондензация) водната пара пренася огромни количества скрита/латентна топлина, която е от особена важност в глобалното преразпределение на енергията в атмосферата. Наред с това тя е и основният парников газ в атмосферата. Ето защо тя е от особено значение както за климата, така и за прогнозата на времето. Едновременно с това, поради пространствените и времевите нееднородности в разпределението, тя е много трудна за измерване.

Обект на тази дипломна работа е проучване на потенциала на глобалните навигационни спътникови системи (ГНСС) като нов метод за из-



Фигура 1: Хидрологичен цикъл на Земята.

мерване на Интегрираната по височина Водна Пара (ИВП) в атмосферата в България. В сравнение с традиционно използвания метод на аерологичния сондаж (описан в Глава 1.1), ГНСС предоставя информация с голямо времево (на всеки 1 час/15 минути) и пространствено (на всеки 50км) покритие. В Глава 1 е направен обзор на двата метода за измерване на водната пара.

Глава 1

Методи за измерване на водната пара в атмосферата

1.1 Аерологичен сондаж

Исторически аерологичният сондаж е първият тип измервателна система, чрез която дистанционно може да се мерят параметрите в атмосферата над дадена точка. Методът е одобрен от Световната метеорологична организация (WMO) и се използва широко за изследване на вертикалното разпределение на температурата, налягането и влажността на атмосферата, както и скоростта и посоката на вятъра. Различни модели сонди могат да имат допълнително датчици за измерване на концентрации на различни химични съединения или йонизация на атмосферата.

В станция София на Националния Институт по Метеорология и Хидрология при Българската Академия на Науките (НИМХ-БАН) се извършват ежедневни аерологични сондирания в 12 UTC. От 2005 година се използва сонда RS92KL (показана на Фигура 1.1) на финландската фирма VAISALA. Сензорът за измерване на относителна влажност е тънък кондензаторен хигрометър тип H-HUMICAP(R). Относителната грешка на измерването е 5% в интервала от +60 до -30 °C и между 0 и 100% относителна влажност (RH) с резолюция 1% (RH) [9]. Принципът на ра-

бота на кондензаторните хигрометри се основава на зависимостта на диелектричната проницаемост на въздуха от съдържанието на водни пари в него. Измерителният въздушен кондензатор променя своя капацитет пропорционално на промените на диелектричната си проницаемост. Изходен параметър на кондензаторните хигрометри се явява честотата f , която е функция на влажността, температурата и налягането [2] .



Фигура 1.1: Радиосонда VAISALA RS92.

За целта на тази дипломна работа е използвана Интегрираната по височина Водна Паря в атмосферата (ИВП - IWV). Пресмятането на ИВП в атмосферния слой над станцията се извършва чрез интегриране във височина на профила на плътността на водната пара използвайки следната формула:

$$IWV = \frac{1}{\rho_w} \int_{h_0}^{h_{top}} \rho_{wv}(h) dh \quad (1.1)$$

където h_0 е надморската височина, на която се намира измервателната станция, h_{top} е височината, до която достига сондата, ρ_w е плътността на течната вода, а ρ_{wv} е плътността на водната пара, ИВП се получава с размерност в милиметри [5].

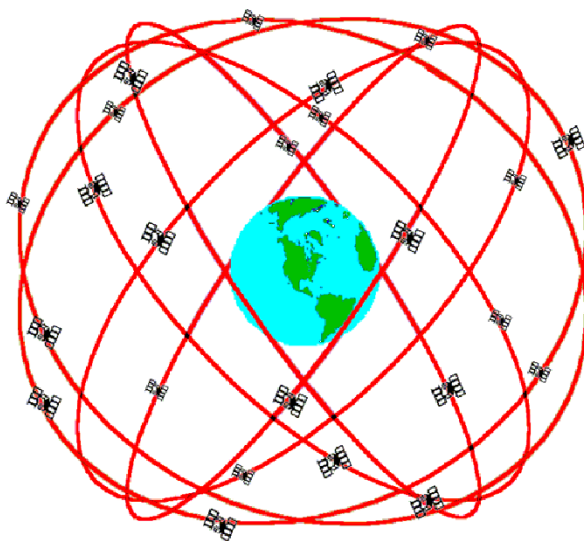
1.2 Глобални Навигационни Спътникови Системи (ГНСС)

ГНСС са съставени от три основни сегмента: космически сегмент, наземна мрежа от референтни приемници и наземни контролни станции.

В таблица 1.1 са описани основните технически параметри на космическия сегмент на четири ГНСС: GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, COMPASS.

Разработването на американската ГНСС - GPS (Global Positioning System - Глобална спътникова система за определяне на местоположение) започва през 1971 година, като първият GPS спътник е изстрелян през 1978. През 1993 конфигурацията (Фигура 1.2) за първи път достига 24 действащи спътника - това е минималният брой спътници, необходим за осигуряване на покритие във всяка точка от земното кълбо. Спътниците са разположени в 6 орбитални равнини с наклон спрямо земният екватор 55° . Във всеки един момент от всяка точка на земното кълбо могат да се наблюдават между 8 и 12 спътника при ъгъл спрямо хоризонта над 15° . GPS използва две основни честоти на сигнала - L1 на 1,57 GHz и L2 на 1,22 GHz. Водещата честота L1 се пречупва в йоносферата и с помощта на честотата L2 се оценява коефициента на йоносферното пречупване на сигнала. Това е необходимо за увеличаването на точността на позиционирането [16].

Разработването на руската ГНСС - ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАви-



Фигура 1.2: Конфигурацията на GPS.

гационная Спутниковая Система) започва през 1976 година, като първият ГЛОНАСС спътник е изстрелян през 1982. През 1995 конфигурацията (Фигура 1.3) за първи път достига 24 действащи спътника, необходими за осигуряване на покритие във всяка точка от земно кълбо. Във всеки един момент от всяка точка на земното кълбо могат да се наблюдават между 6 и 10 спътника. Средният експлоатационен период на първото поколение ГЛОНАСС спътници е бил 3 години, на второто поколение - 7 години, а на третото - 10 години. В момента в експлоатация се намират само спътници от второ и трето поколения, като се извършва подмяна на спътниците от второ със спътници от трето поколение. ГЛОНАСС е най-бързо развиващата се ГНСС [15].

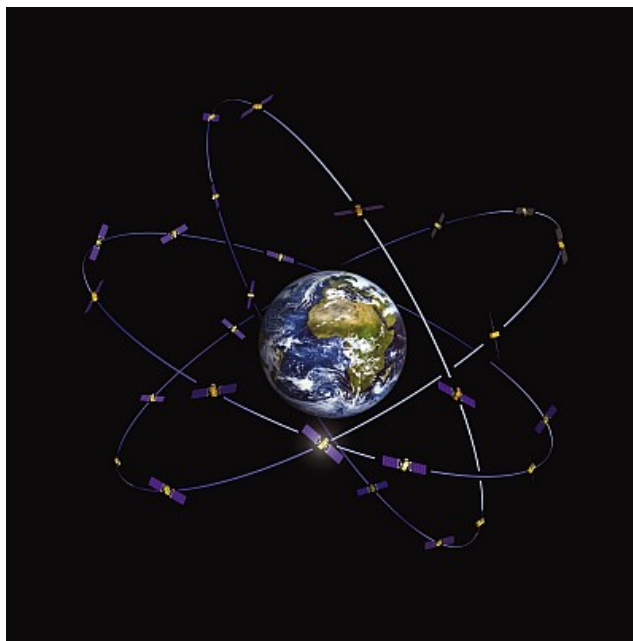
ГЛОНАСС е по-точна при използване както за позициониране, така и за нуждите на метеорологията в крайните северни и крайните южни ширини на земното кълбо, защото наклонът на орбиталните равнини на спътниците в тази система спрямо екваториалната равнина на Земята е по-голям ($64,8^\circ$) от съответните ъгли при другите глобални навигационни спътникови системи. Това позволява по-точно събиране на данни както за по-големи наклони спрямо зенита към земната повърхност в крайните северни и южни райони на планетата, така и от по-малките.



Фигура 1.3: Конфигурацията на ГЛОНАСС.

Разработването на европейската ГНСС - GALILEO започва през 1994 година, като първите два спътника са изстреляни през 2011. Пълна конфигурация от 30 спътника, разположени в три кръгови орбити (Фигура 1.4) е планирана за 2015 година. GALILEO, за разлика от GPS и ГЛОНАСС е предвидена за използване само за граждански цели на страните членки на Европейския Съюз. Задачите и са разпределени в пет основни групи: позициониране за граждански цели; платено позициониране със завишена точност; приемане/изпращане на сигнали за бедствие; превенция на катастрофи, предимно насочен към въздухоплаването и мореплаването, както и модул, предвиден за използване от правителствата на страните членки, спомагащ опазването на реда [14] [3].

Последната ГНСС, представена в таблица 1.1 е системата COMPASS, която е в процес на въвеждане в експлоатация от Китайската Народна Република. Системата се явява продължение на Beidou 1 и 2, които използват геостационарни орбити и покриват територията на Китай и на близките до нея държави. COMPASS е първата позиционна система, която ще използва геостационарни, високи елиптични и средни околоземни орбити, като до сега в експлоатация се намират 5 спътника, 4 от които са



Фигура 1.4: Конфигурацията на GALILEO.

спътниците от системите Beidou.

Съществуват и няколко локални спътникови системи за позициониране, подобни на Beidou, но нито една от тях в близко бъдеще няма да покрива територията на България, и затова те не са обект на това разглеждане.

Прави впечатление, че параметрите на космическите сегменти на различните ГНСС са доста сходни. Това се дължи на следните причини:

- Разстоянието от порядъка на 20 000 километра (средна околоземна орбита) е избрано така, че от една страна всеки един от спътниците да "вижда" цялата обзрима от неговата точка повърхност на Земята през неголям обемен ъгъл. От друга страна спътникът трябва да е достатъчно близо до земната повърхност, за да не се получава прекалено голямо забавяне при позиционирането. Също така при по-ниска орбита земният наблюдател ще вижда по-малко спътници, отколкото когато орбитата е по-висока.

Таблица 1.1: Сравнение на глобалните навигационни спътникови системи

Име	Държава	Конфигурация	Експлоатация	Моментно състояние
GPS	САЩ	6 елиптични орбити по минимум 4 спътника на орбита на височина 20 200 km и инклинация 55°	Контролира се от US Department of Defense за научни цели точността достига сантиметри работи с 2 различни честоти, за да се пренебрегнат неточности в атмосферата	В експлоатация 30 спътника от II поколение очаква се подмяна на 10 от спътниците с III поколение
ГЛОНАСС	Русия	3 кръгови орбити по минимум 6 спътника на орбита на височина 19 100 km и инклинация 64.8°	Контролира се от РОСКОСМОС работи с 2 различни честоти	В експлоатация се намират 25 спътника II поколение и 2 спътника III поколение
GALILEO	ЕС	3 кръгови орбити по минимум 7 спътника на орбита на височина 23 222 km и инклинация 56°	Контролира се от ЕК и ESA работи с 6 честоти, всяка с конкретни задачи	В процес на изграждане: първите два спътника изстреляни 2011 година в експлоатация - след 2015
COMPASS	Китай	35 спътника на три типа орбити: - високи околоземни орбити на височина 36 000 km - геостационарни (6 бр) - средни околоземни с височина 21 155 km и инклинация 55.5°	Контролира се от Китайското Национално Космическо Управление	В процес на изграждане: явява се продължение на системите Beidou 1 и 2 в експлоатация 5 спътника

- Водещите сигнали за позициониране са избрани в интервала между 1 и 2 GHz, защото по-малки честоти (по-дълги вълни) не биха могли да преминат през йоносферата при по-големи ъгли, докато по-големи честоти (по-къси вълни) биха затихвали прекалено бързо в атмосферата и близкото околоземно пространство.

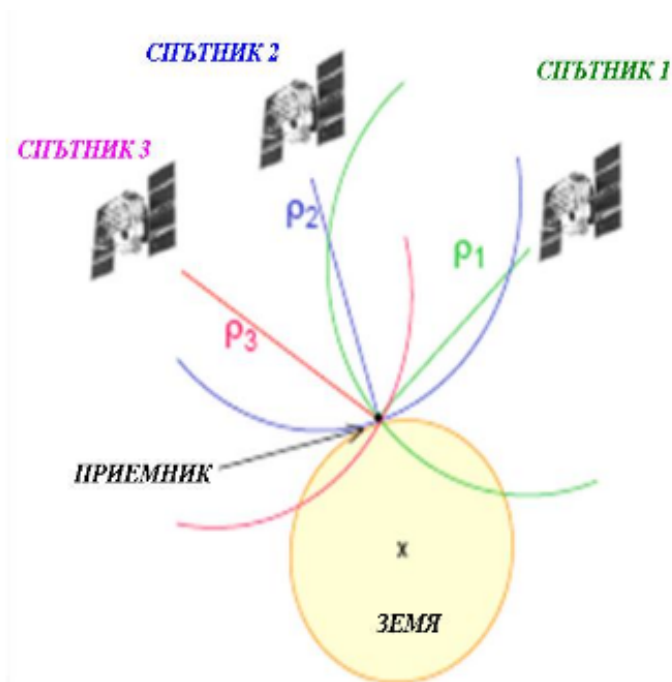
До тук разгледахме само спътниковата част на всяка една от глобалните навигационни спътникови системи. Също така съществуват и наземно разположени контролни центрове. Те постоянно локализируют спътниците в орбита, изчисляват техните траектории и височина за да предават корекции, които се вписват в съобщението на сигнала, изпращано от спътниците до всички наземни ГНСС приемници.

Третият сегмент на ГНСС са мрежи от референтни наземни приемници по целия свят. В Европа броят на референтните приемници е над 1400, като информацията от тях се използва за целите на науката и стопанството. В България съществуват три мрежи от референтни приемници, описани подробно в Глава 2.2.

При всяка една от навигационните системи процесът на позициониране протича по сходен начин. Приемникът приема сигнал от един спътник. Сигналът носи в себе си информация за точния момент на изпращането му - t_{01} . Приемникът отчита точния момент на получаване на сигнала - t_r . Знаейки времената t_{01} и t_r , можем да изчислим разстоянието ρ_1 от първия спътник до приемника по следната формула:

$$\rho_1 = (t_r - t_{01}) \cdot c \quad (1.2)$$

За да може да се извърши точно позициониране теоритично е необходимо да се повтори същата процедура за минимум още два спътника. Наблюдателят, който измерва постоянно разстоянията до тези три или повече спътници, се намира в пресечната точка на сферични повърхнини, които съответстват на измерените разстояния (Фигура 1.5). При един видим спътник ще се получи само окръжност върху земното кълбо, на която се намира наблюдателят. При два видими спътника ще се получат



Фигура 1.5: Позициониране чрез ГНСС.

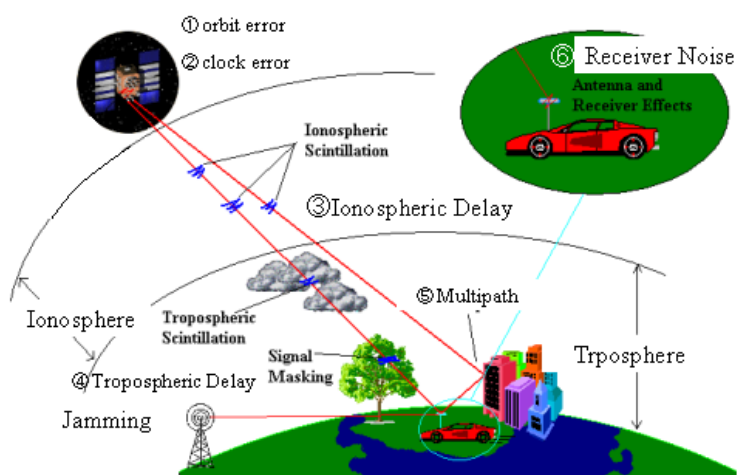
две точки, в едната от които се намира ГНСС приемникът. За да се определи точно в коя от двете точки се намира уредът е необходим и трети спътник. На практика е необходим и четвърти спътник, чрез който да се изчисли грешката от неточността на отчетането на времето от назимният приемник. Групата от спътници в околоземното пространство е разположена по такъв начин, че във всеки момент от всяка една точка на земното кълбо са видими минимум 4 спътника.

1.3 ГНСС метеорология

Когато сигналът от глобалните навигационни спътникови системи преминава през атмосферата от спътника до наземния приемник (Фигура 1.6), той е подложен на различни въздействия. Големината на тези въздействия зависи от ъгъла на спътника над хоризонта и от атмосферните условия. Атмосферата причинява малки, но непренебрежими ефекти които

включват: (1) йоносферно групово закъснение и йоносферени разряди; (2) групово закъснение в тропосферата и стратосферата и (3) атмосферно отслабване на сигнала [8].

Йоносферата е частта на високата атмосфера между 100 и 500 km, съставена от йонизирани газове. Съдържанието на йоносферата се променя съществено в зависимост от слънчевата активност и се характеризира със съществено денонощно изменение. Съдържанието на йонизирани газове е максимално на височина между 200-400 km и може да има големи денонощни колебания. Рефракционният индекс на йоносферата зависи от честотата на сигнала и чрез използването на две честоти от конкретната глобална спътникова система за позициониране може да бъде отчетен.



Фигура 1.6: Въздействия върху сигнала от ГНСС.

Тропосферата може да се разглежда като съставена от сух въздух и водна пара. Основните газове в състава на сухия въздух са азот, кислород, аргон и въглероден диоксид. На работните честоти на глобалните навигационни спътникови системи, кислородът е основната причина за затихване на сигнала, но този ефект е незначителен. Тропосферното групово закъснение е следствие от рефракцията и е основен източник на грешката в глобалните навигационни спътникови системи. Има два източника на групово закъснение. Първото и по-голямо закъснение се дължи на сухия въздух, главно на азота и кислорода, и се нарича Зенитно Хидростатично

Закъснение (ЗХЗ - ZHD). ЗХЗ е около 2.1m на морското равнище и се изменя с температурата и атмосферното налягане по лесен за оценка начин. Изменението с времето на ЗХЗ е по-малко от 1% от средната стойност за няколко часа. Второто закъснение е причинено от водната пара. То се нарича Зенитно Водно Закъснение (ЗВЗ - ZWD), по-малко е от ЗХЗ и е от 1 до 80 cm в посока зенит, но има значително изменение във времето. Времето изменение на ЗВЗ може да превиши 10-20% от средната стойност в рамките на няколко часа и е трудно за оценяване. Интегрираната по височината Водна Пара (ИВП - IWV) се получава от ЗВЗ по формулата:

$$IWV = \frac{10^6}{(k_3/T_m + k'_2)R_v} ZWD \quad (1.3)$$

където k_3 , k_2 и R_v са константи а T_m [5] е средната по вертикалната температура на атмосферата. Промяната на атмосферната рефракция поради присъствието на водна пара се дефинира с

$$ZWD = 10^{-6} \int_0^s (k_2' \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2}) ds \quad (1.4)$$

където e е означено налягането на водната пара, T е приземната температурата, а $\int_0^s ds$ е интегриране по пътя на разпространение на сигнала. Използването на глобалните навигационни спътникови системи в метеорология е предложено през 1992 г. от М. Бевис [1]. В голям брой изследвания са проучени точността на получената от ГНСС ИВП и възможностите за нейното приложение в метеорологията.

Глава 2

Приложение на ГНСС метеорология в Европа

2.1 ГНСС метеорология в Европа

Първият проект, финансиран в Европа, изучаващ приложението на ИВП, получена от глобалните навигационни спътникови системи в Западното Средиземноморие е МАГИК ("MAGIC" Meteorological Applications of GPS Integrated Column Water Vapor Measurements in the Western Mediterranean). МАГИК стартира през 1998 като използва и обработва данни от геодезични ГНСС станции в Испания, Франция и Италия. В продължение на три години проектът се занимава с валидация на ГНСС данни за целите на оперативната прогноза на времето [6] [10].

Втория проект е проектът за сътрудничество КОСТ 716 „Използване на наземната ГСП в климата и числената прогноза на времето“, който е проведен от септември 1998 до март 2004. Неговата основна задача е оценка на приложимостта на водната пара, получена чрез ГНСС, в оперативната Числена Прогноза на Времето (ЧПВ) и климата. За тази цел ГНСС данни в реално време са предоставяни за проверка на точността на моделите за ЧПВ, използвани в пет Национални метеорологични служби (Германската метеорологична служба - DWD; Швейцарската

метеорологична служба MeteoSwiss; Британската метеорологична служба Metoffice; Шведската метеорологична служба SMHI; Датската метеорологична служба DMI), а също и за Числени Експерименти (ЧЕ) [4] [12].

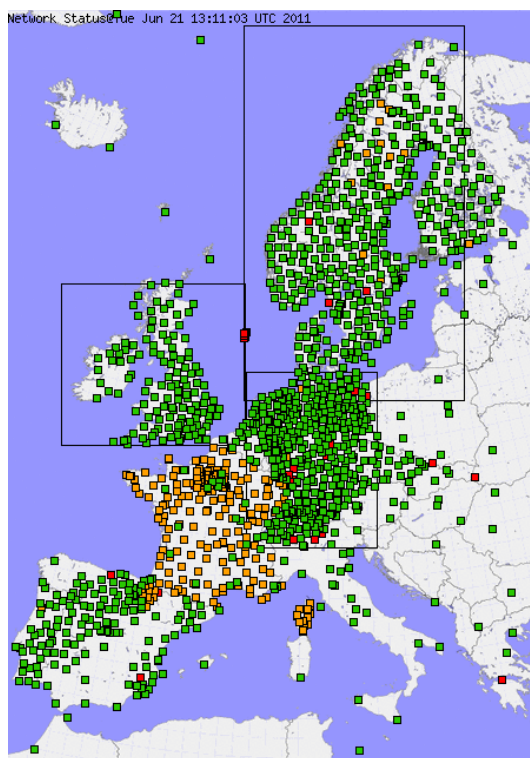
През 2003 година започва проектът TOUGH. TOUGH е продължение на КОСТ 716. В проекта активно е работено върху въпроса за грешките в ГНСС измерванията, както и върху създаването и усъвършенстването на асимилационните техники, използвани в числените модели. Също се работи върху приложение в ЧПВ на атмосферното забавяне на сигнала от всеки един спътник поотделно (slant delays) [7].

През 2007 година е подписан меморандум за партньорство между EUREF и EUMETNET, чрез който се инициира сътрудничеството между Европейския геодезичен съюз и Националните метеорологични служби.

EGVAR проектът стартира през април 2005 година като продължение на предишните програми – КОСТ 716 и TOUGH и е с планиран период от 4 години. Целта му е да предостави на партньорите си от EUMETNET ИВП в реално време за целите на оперативната синоптичната метеорология. Това се извършва благодарение на сътрудничеството между EGVAR и геодезичните дружества в Европа.

Събирането и обработката на данни в реално време в Европа от множество източници едновременно започва в началото на 2001. С времето системата от станции се разширява, като в момента всеки час се приемат и обработват данни от 1446 наземни станции (Фигура 2.1), ползващи ГНСС сигнал. Цялата информация се предава на Британската метеорологична служба, където се прави първоначална обработка [13].

За да се използват за нуждите на синоптичната метеорология, данните събирани от тези станции трябва да отговарят на условия за качество, като трябва да са хомогенни, стабилни и да имат предсказуеми грешки. Системата като цяло трябва да може да се разширява, за да се получи по-добра картина на водната пара над Европа. Основната заслуга на проекта се състои именно в това, че успява да покрие всички тези критерии. На фигура 2.2 е показано полето на водната пара в реално време, нанесено

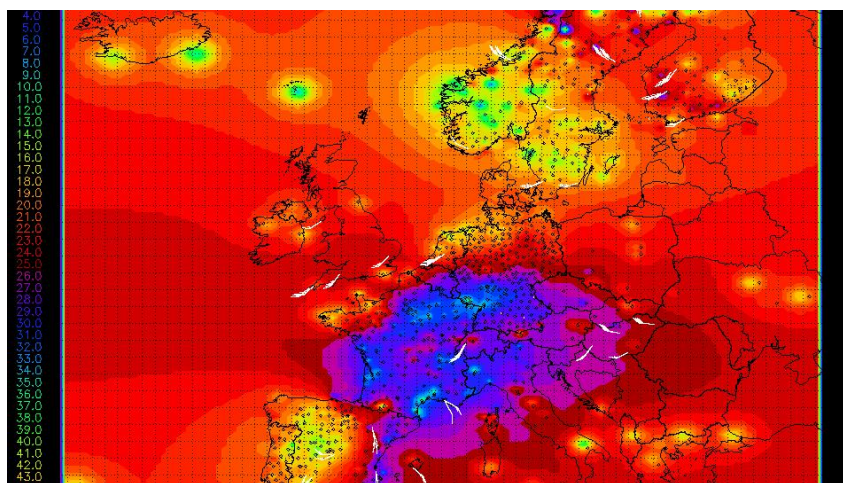


Фигура 2.1: ГНСС наземни станции, предоставящи данни в реално време за проекта EGVAP към юни 2011.

на картата на Европа на 22 юни 2011, 10UTC. Това поле се актуализира всеки час [13].

2.2 ГНСС метеорология в България

На фигура 2.2 правят впечатление хомогенността на полето на водната пара над Балканския полуостров и отделните петна, които се отличават на фона на това хомогенно поле. Причината е в това, че на Балканския полуостров са разположени много малко станции, предоставящи данни на EGVAP за ИВП в атмосферата. В България ГНСС метеорология не е разработена и тази работа е първа стъпка в тази посока. Следва кратък обзор на наличните ГНСС мрежи с потенциал за работа по направлението ГНСС метеорология в България.



Фигура 2.2: EGVAP поле на ИВП в реално време на 22 юни 2011 година.

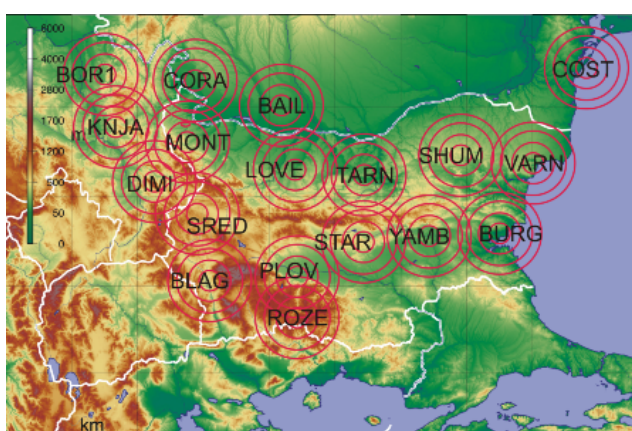
В България има четири референтни мрежи (на BULiPOS, GeoNet, Naviteq и Leica), използвани в геодезията, за съставяне на диференциални поправки за ГНСС и за други приложения на системите за позициониране. Те общо оперират над 114 наземни ГНСС станции, чрез които те събират на данни за реализацията на собствените си продукти. Всички тези станции без никакви хардуерни изменения и чрез допълнения към софтуера им могат да генерират и данни за ИВП без това да въпрепятства използването на станциите по тяхното първоначално комерсиално предназначение.

Мрежата „Зенит-Гео“ (GeoNet) е изградена през 2009. Състои се от 30 наземни „TRIMBLE“ ГНСС приемника (на фигура 2.3), осигуряващи пълно покритие на територията на страната и приемащи и обработващи сигналите от американската спътникова система GPS и от руската ГЛОНАСС [17].

Мрежата „БУЛиПОС“ (BULiPOS е реализация на EUPOS от Института по водни проблеми към БАН) предоставя диференциални поправки на сигналите на ГНСС, необходими за корекция при позиционирането. Тя разполага с 12 референтни станции на територията на България (на фигура 2.4 може да се види тяхното разположение), както и с по 3 станции, намиращи се на териториите на Сърбия и Румъния [11].



Фигура 2.3: Мрежа от наземни ГНСС станции - „Зенит-Гео“.



Фигура 2.4: Мрежа от наземни ГНСС станции - „БУЛиПОС“.

Мрежата Naviteq е първата, изградена в България ГНСС мрежа и предоставя диференциални поправки на сигналите на ГНСС. Тя разполага с 24 референтни станции на територията на България.

„Лайка“ (Leica) поддържа мрежа от 42 референтни ГНСС станции на територията на България, както и станции на териториите на Гърция, Италия, Германия, Холандия, Словакия, Латвия, Скандинавските страни и Испания, както и на Британските острови.

Глава 3

ГНСС метеорология в България - първи резултати

3.1 ГНСС станция София (SOFI)

В България функционира станция SOFI, която е част от перманентната референтна мрежа на EUREF от 1997. Станцията е разположена на 1120м надморска височина в Плана планина. Оборудвана е с AR25 антена на фирмата Leica и предоставя данни на обработващите центрове на IGS (International Geodetic Service), EUREF (EUropean REference Frame) и EGVAP. Данните за ЗПЗ, използвани в тази дипломна работа са обработени от д-р К. Василева.

За обработката на данните от ГНСС станцията SOFI са използвани приземна температура и налягане от синоптична станция София, разположена на 586м надморска височина и на над 20км разстояние от ГНСС станция SOFI. Поради разликата в надморските височини на двете станции са използвани приведени температура и налягане към височината на ГНСС антената.

3.2 Демонстрация на ГНСС метеорология

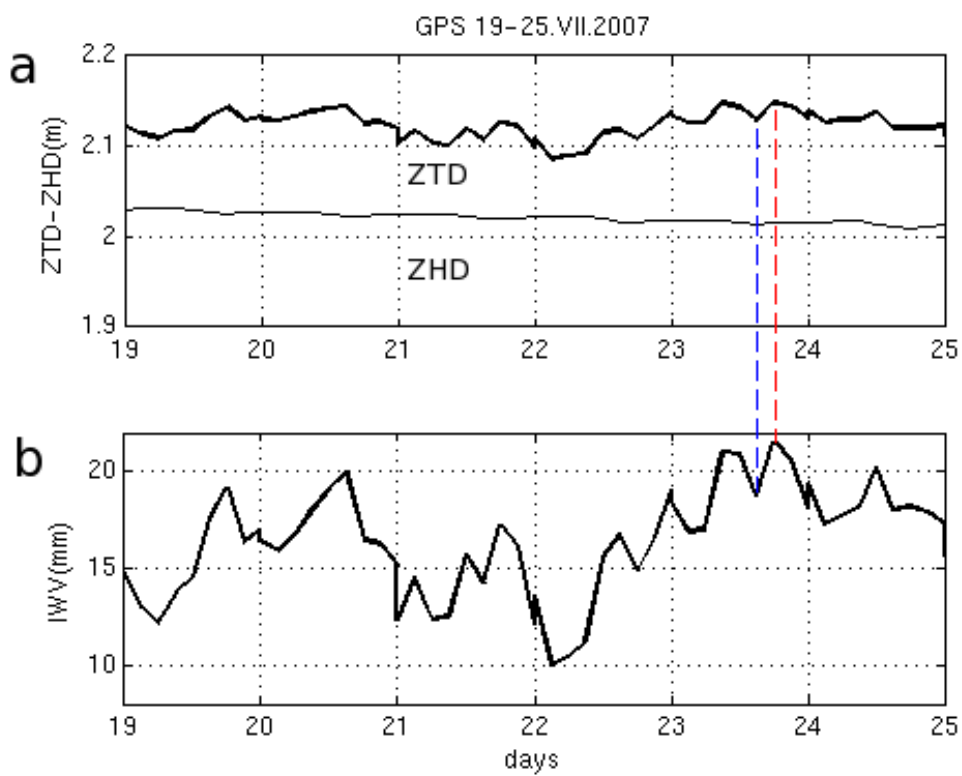
На фигура 3.1 е демонстрирана концепцията на работата на метода ГНСС метеорология за станция София (SOFI).

На фигура 3.1a е представено Зенитното Пълно атмосферно Закъснение (ЗПЗ - ZTD) на сигнала от ГНСС и Зенитното Хидростатично Закъснение (ЗХЗ - ZHD) в метри за периода от 19-ти до 25-ти Юли 2007 година. От графиката се вижда, че ЗПЗ на сигнала би довело до грешка в позиционирането от порядъка на 2,1 метра, като грешката, причинена от ЗХЗ е около 2 метра. Добре изразено е плавното намаляване на ЗХЗ за разглеждания период, както и слабата му времева изменчивост. Разликата между ЗПЗ и ЗХЗ е причинена от пречупването на сигналите във водните пари или Зенитното Водно Закъснение (ЗВЗ - ZWD). Както се вижда от фигура 3.1a, това закъснение е с порядък по-малко (около 0,1 метра) от закъснението на сухата атмосфера (ЗХЗ).

На фигура 3.1b е представено времевото изменение на ИВП, получена в ГНСС станция София. За пресмятане на ИВП (IWV) по метода ГНСС метеорология е използвана формулата 1.3. Както се вижда на фигурата, ИВП има значително изменение във времето, като например в 03UTC на 22 юли тя е 10mm и нараства до 19mm в 00UTC на 23 юли.

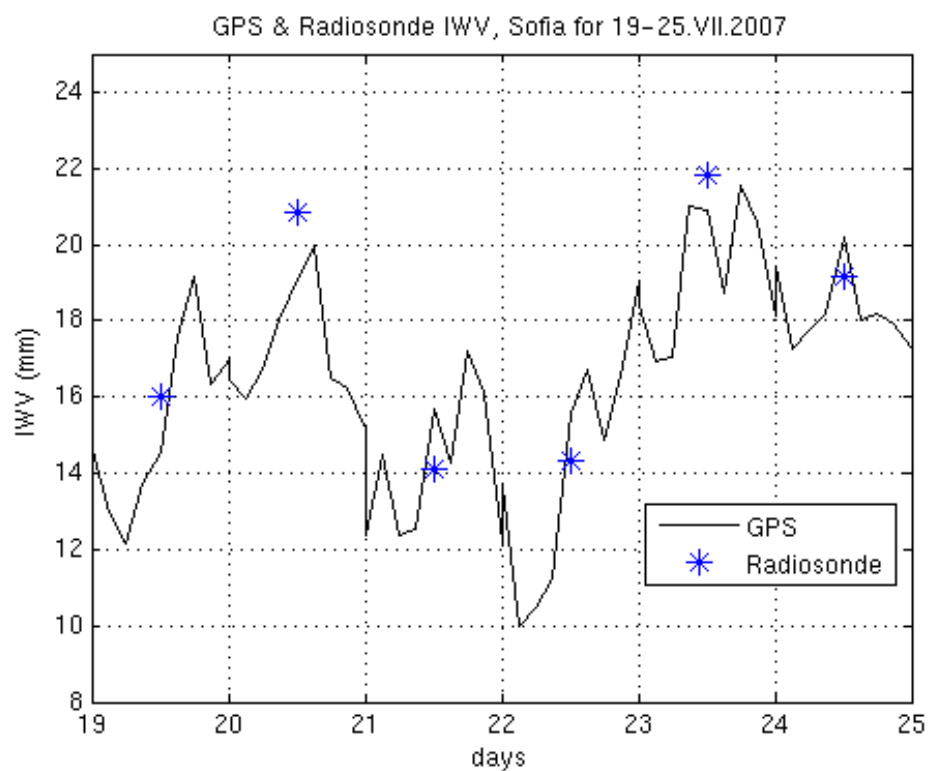
3.3 Сравнение на ИВП: ГНСС метеорология и аерологичния сондаж

На фигура 3.2 е представено сравнение на ИВП в атмосферата, измерени по метода ГНСС метеорология (на графиката показан с непрекъснатата линия, подписан като GPS) и чрез аерологичен сондаж (на графиката обозначен със звезда, подписан като Radiosonde). Графиката показва видимата връзка между резултатите, получени по двата метода, като най-голямата отчетена разлика е около 1mm. Също се вижда, че описание на денонощния ход на ИВП не може да се направи само с едно наблюдение в 12UTC.



Фигура 3.1: Времево изменение на: а) ЗПЗ (ZTD) и ЗХЗ (ZHD) б) ИВП (IWV) в станция София (SOFI) за периода 19-25.VII.2007.

Това е и предимството на метода ГНСС метеорология - високата времева разделителна способност, в конкретния случай - 3 часа. Друго предимство на ГНСС метода е ниската себестойност на единица информация, както и възможността за получаване на ИВП информация от над 114 ГНСС станции в България, покриващи цялата територия на страната. От друга страна в България само в станция София се извършва аерологично сондиране.



Фигура 3.2: Графично сравнение на времевото изменение на ИВП (IWV) по методите ГНСС метеорология (непрекъснатата линия) и аерологичен сондаж (звезда) за периода 19-25.VII.2007 .

Заклучение и бъдещи изследвания

Настоящата дипломна работа е първа стъпка в приложението на метода ГНСС метеорология в България. Методът е демонстриран чрез резултати от първите изчисления на Интегрираната във височина Водна Пара за станция София (SOFI) за периода от 19 до 25 юли 2007 година. Направено е качествено графично сравнение на резултатите, получени по двата описани метода (аерологичен сондаж и ГНСС метеорология). Метода ГНСС метеорология има следните предимства:

- висока времева разделителна способност - 3 часа
- висока пространствена разделителна способност - над 114 наземни ГНСС станции в България, покриващи цялата територия
- ниската себестойност на единица информация.

Тези предимства са от особено значение както за прогнозата на времето, така и за климата и показват потенциала на този метод за бъдещо използване в България. ГНСС метеорология е важен компонент на интегралната система за наблюдение на времето и климата, разработвана от Световната метеорологична организация.

Тази работа ще бъде продължена с количествено сравнение на ИВП, получена от ГНСС и по метода на аерологичния сондаж. Периодът, дискутиран в тази работа е повлиян от топлинна вълна, установила се над

Балканския полуостров през юли 2007 година. Необходимо е да се анализира в детайли поведението на ИВП по време на тази топлинна вълна и да се сравни с топлинната вълна в Европа през август 2003 година.

Консултант по въпросите на ГНСС е доц. д-р Керанка Василева от Висша лаборатория по геодезия при Българска академия на науките.

Искам да благодаря на:

- д-р Керанка Василева за възможността да използвам данни от ГНСС станция София (SOFI)
- проф. Евгени Донеv за предоставените данни от автоматичната метеорологична станция Плана, които се надявам да използваме в най-близко бъдеще, и за това, че ме насочи да напиша тази бакалавърска теза по тематиката "ГНСС метеорология" при д-р Гергана Герова
- д-р Стоян Писов за осигуряването на достъп до факултетния клъстер RHYSON и за техническата помощ при осигуряване на връзката до клъстера

Библиография

- [1] Bevis, M., S. Businger, T. Herring, C. Rocken, R. Anthes, and R. Ware, Gps meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system, *JGR*, 97, 15 787–15 801, 1992.
- [2] Donev, E., Measuring methods in meteorology, 1983.
- [3] Dowa, J., R. Neilanb, R. Weberc, and G. Gendt, Galileo and the igs: Taking advantage of multiple gnss constellations, *Advances in Space Research*, 39, 1545–1551, 2007.
- [4] G. Elgered, H. v. d. M. S. B. J. N., P. Plag (Ed.), *COST 716: Exploitation of ground-based GPS for operational numerical weather prediction and climate applications*, 125-128 pp., 2005.
- [5] Guerova, G., E. Brockmann, J. Quiby, F. Schubiger, and C. Matzler, Validation of nwp mesoscale models with swiss gps network agnes, *Journal of Applied Meteorology*, 42, 141–150, 2003.
- [6] Haase, J., M. Ge, H. Vedel, and E. Calais, Accuracy and variability of gps tropospheric delay measurements of water vapor in the western mediterranean, *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 2002.
- [7] Huang, X., and H. Vedel, Targeting optimal use of gps humidity measurements in meteorology.
- [8] Parkinson, B. W., J. J. Spilker, P. Axelrad, and P. Enge (Eds.), *Global Positioning System: Theory and Applications*, vol. I, 517-546 pp., American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.

- [9] VAISALA, Vaisala rs92-kl radiosonde technical data.
- [10] <http://www.acri-st.fr/magic/gps/gpsdata.html>.
- [11] <http://www.bulipos.eu/products.html>.
- [12] <http://www.oso.chalmers.se/kge/cost716.html/>.
- [13] <http://egvap.dmi.dk/>.
- [14] <http://www.esa.int/esana/galileo.html>.
- [15] <http://www.glonassgsm.ru/>.
- [16] <http://www.gpsworld.com/>.
- [17] <http://zenitgeo.com/>.