

**Измерване на влажността на въздуха с
Глобалната система за позициониране –
приложение в швейцарската числена прогноза**

University of Bern

from

Гергана Герова

АВТОРЕФЕРАТ

за признаване на получена научна и образователна степен “Доктор”
по специалност “метеорология”, шифър 01.04.11

Научен ръководител:

Проф К. Метцлер
Институт по Приложна Физика

**Измерване на влажността на въздуха с
Глобалната система за позициониране –
приложение в швейцарската числена прогноза**

University of Bern

from

Гергана Герова

АВТОРЕФЕРАТ

за признаване на получена научна и образователна степен “Доктор”
по специалност “метеорология”, шифър 01.04.11

Научен ръководител:

Проф К. Метцлер
Институт по Приложна Физика

Bern, 18.12.2003

Декан Проф Г. Джегер

Резюме

Изследвана е приложимостта на влажността на въздуха определена с глобалната системата за позициониране (ГСП/GPS) в числената прогноза на времето (ЧПВ). Работата е осъществена в групата по “Радиометрични методи за наблюдение на атмосферата” на Института по приложна физика (ИПФ) към Университет Берн. Основната дейност на групата е разработване и използвана на радиометри за измерване на количеството водна пара и течна вода в тропосферата. Използването на измереното с ГСП количество водна пара в ЧПВ се прилага за първи път в Швейцария. ГСП позволява измерване на количеството водната пара във въздуха с високо времево и пространствено разрешение.

Първата стъпка в проучването на потенциала за използване на полученото от ГСП количество водна пара е (1) сравнение с измерванията получени от стандартите методи, и (2) сравнение резултатите от оперативния модел за ЧПВ на Швейцарската федерална служба по метеорология и климатология (МетеоСуис). Тази работа е описана в глава 2 на дисертацията. Чрез участието в Европейският проект КОСТ 716 и активното сътрудничество с МетеоСуис стана възможно данните за водната пара, получени от ГСП да бъдат директно асимилирани в модела за ЧПВ - т.нар. “алпийски Модел” (алМо). Бяха осъществени и анализирани четири асимилационни експеримента. Те са представени във глава 3.

ГСП данните за влажността представляват интегрирано по височината количество водна пара (ИВП). За сравняване със стандартните методи за измерване на влажността на въздуха бяха из-

ползвани само предварително обработени ГСП данни, които имат най-добра точност. През зимния сезон сравнението на ГСП данните с измерванията, получени от радиосондите, показва много добър резултат. В зимни условия, характеризиращи се с ниска слоеста облачност, беше констатирано завишаване на водната пара, измерена с радиосондите. Причината е забавената във времето реакция на датчика за влажността на радиосондата. Бяха установени разлики между ГСП и радиосондажите в измерванията в 00 и 12 UTC, което е възможно да се дължи на промени в обработката на ГСП данните. Сравнението на ИВП с резултатите от модела за ЧПВ показва сезонна зависимост на средната грешка и стандартното отклонение. През лятото аЛМо занижава количеството на водната пара. Това занижение е различно за различните години и има добре изразен денонощен ход. Занижението на водната пара в аЛМо вероятно е свързано с тенденцията за завишение на количеството валеж. Завишаването на количеството валеж е известен недостатък на модела, който може да се очаква да бъде подобрен чрез директно асимилиране на ГСП данните и подобрения в използваната параметризация.

ГСП ИВП, получена в реално-време, беше използвана в четири числени експеримента (ЧЕ) за директно асимилиране в аЛМо. Данните, обработни от центровете към проекта КОСТ 716, бяха предоставяни не по късно от 1 час и 45 минути след извършване на наблюденията съгласно изискванията на оперативната ЧПВ. Бяха асимилирани ГСП данни от 100 европейски станции в три различни сезона: лято, есен и зима. От направените ЧЕ може да се направи заключение, че асимиляцията на ГСП данни в аЛМо е успешна и коригира грешки на оперативния модел. Корекциите са съществени през лятото, умерени през есента и несъществени през зимата. Резултатите за приземните температура и точка на оросяване бяха подобрени като резултат от асимиляцията на ГСП ИВП. Обърнато беше голямо внимание на анализа и прогнозата на валежите. В първия ЧЕ беше констатирано подобряване на резултатите от анализа и прогнозата за количеството на валежа в Швейцария. Бяха

подобрили и резултатите за денонощния ход на валежите като резултат от подобрене на денонощен ход на ИВП в аЛМо. Качественото сравнение на разпределението на валежите получени с аЛМо и измерените с метеорологичен радар, показват нееднозначни резултати. Има подобрене в прогнозирания валеж, но то е ограничено до първите шест часа на прогнозата или в случаи на интензивен валеж. Положително въздействие има при реконструкция на област с интензивен валеж през лятото. Беше констатиран един случай на отрицателното въздействие върху анализа за валежа, дължащ се на нереално усилване а фазовият преход т.е. от водната пара в течна вода или валеж.

На базата на резултатите, представени в дисертацията, може да се направи заключение, че приложението в ЧПВ на ИВП, получена от ГСП, има бъдеще благодарение на доброто пространствено покритие, наличност и качество на данните. Потенциалът на ГСП ще бъде увеличен с влизането в експлоатация през 2008 на новата Европейската Сателитна Система за Навигация-ГАЛИЛЕО.

I. Водна пара в атмосферата

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 се колебае от 0 до 7% от обема на сухия въздух, като е средно около 4%. Тя е най-подвижната форма на водата в хидрологичния цикъл на Земята. 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 топлина (скрита/латентна топлина) в глобалното преразпределение на енергията. Наред с това тя е основният парников газ в атмосферата. Ето защо тя е от особено значение както за климата така и за прогнозата на времето. Едновременно с това обаче, поради нееднородностите в разпределението ѝ, дължащи се на динамиката на атмосферата и фазовите преходи, е много трудна за измерване.

Тук ще бъдат дискутирани три независими метода за измерването на водната пара характеристиките им са дадени в таблица 1 (Boima, 2002). Най-широко използваният метод е балонен сондаж или радиосонда. Радиосондите са оборудвани със сензори за измерване на температура, налягане и влажност. Сондажите се извършват два пъти денонощието (00 и 12 UTC); разстоянието между станциите е 250 km или по-голямо.

Таблица 1: Сравнителна таблица на методите за измерване на водна пара (Bouna 2002).

	Радиосонда	МВР	ГСП
времево разрешение	ниско	високо	високо
пространствено разрешение	ниско	ниско	високо
вертикално разрешение	високо	ниско	ниско
работа при облачност/дъжд	да	не	да
цена	висока	висока	ниска
период на базата данни	40 години	от 1990	от 1990

Другите два метода за измерване на количество на водна пара се базират на факта, че разпространението на електромагнитните вълни се влияе от състава на атмосферата. Единият от тях - микровълновата радиометрия - се базира на влиянието на водната пара, течната вода и кислорода върху микровълните. Микровълновите радиометри (МВР) измерват емисиите от атмосферата на честоти 21 и 31.4 GHz. Яркостната температура, съответстваща на интензивността на това излъчване, е директно свързана с количеството водна пара. Микровълновата апаратура дава високо времево разрешение, но не е приложима при валеж и поради високата ѝ цена се използва главно за научни изследвания.

Третият метод за измерване на количеството водна пара е Глобалната системата за позициониране. Използването ѝ е описано в следващата глава.

II. Глобална система за позициониране

Глобалната системата за позициониране (ГСП) е световна система за навигация работеща в радио честотния диапазон. Създадена е и се поддържа от Департамента за отбрана на САЩ. Системата има за цел предоставяне на информация с голяма точност в реално време, за позицията и скоростта на различни обекти. Системата работи денонощно, в глобален мащаб, при всякакви метеорологични

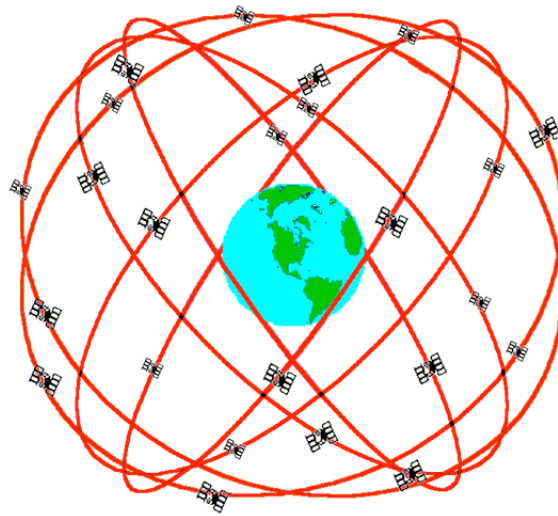


Рис. 1: Констелацията на ГСП сателитите: 24 сателита в 6 орбитални плоскости.

условия. ГСП е надеждна система с ниска цена която дава възможност за изключително точни геодезични измервания с точност до сантиметър.

ГСП има два основни сегмента: разположен в космоса сегмент от ГСП сателити и разположена на земята мрежа от референтни приемници. Космическият сегмент се състои от 24 сателита, които са разположени в шест орбитални плоскости с наклон 55° спрямо екватора и имат орбитален период около 12 часа. Констелацията от ГСП сателити, представена на фигура 1, осигурява глобално покритие от четири до осем сателита видими при ъгъл спрямо хоризонта по-голям от 15° . Ключова роля на ГСП сателита е изпращането на сигнал на две радио честоти от 1.57 и 1.22 GHz (L обхват). Този сигнал се изпраща от антенната система на сателита състояща се от 12 антени, подредени в два концентрични кръга. Излъченият от сателита радио честотен сигнал се приема от приемник на земната повърхност. Антената на наземния приемник може да получава едновременно сигнали от всички видими сателити. В световен мащаб гъсти мрежи от наземни приемници има в Япония (повече от 1000 станции), САЩ (близо 500) и Европа (повече от 500 станции).

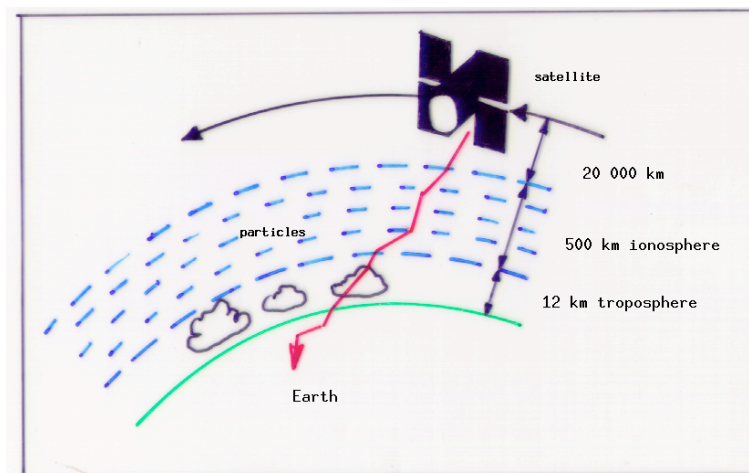


Рис. 2: Схематично представяне на пътя на сигнала от ГСП сателита до наземния приемник.

Автоматизираната наземна ГСП мрежа на Швейцария (АГНЕС), разработена от Швейцарския федерален служба за топография, се състои от 29 референтни станции, които се използват главно за геодезични проучвания.

II.1. Приложение на ГПС в метеорологията

Когато ГСП сигналът преминава през атмосферата от сателита до наземния приемника (фигура 2), той е подложен на различни въздействия. Големината на тези въздействия зависи от ъгъла на сателита 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. 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 йоносферата е максимално на височина между

200-400 km и може да има големи денонощни колебани. Рефракционният индекс на йоносферата зависи от честотата на сигнала и чрез използването на две ГСП честоти може да бъде отчетен.

Тропосферата може да се разглежда като съставена от сух въздух и водна пара. Основните газове в състава на сухия въздух са азот, кислород и аргон и въглероден диоксид. На работните честотите на ГСП, 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 ГСП. 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). ЗХЗ е около 2.1 m 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), 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. Пример за изменението във времето на ЗХЗ и ЗВЗ може да бъде намерен в първата част на глава 2. Интегрираната по височината Водна Пара (ИВП) се получава от ЗВЗ по формулата:

$$\text{ИВП} = \frac{10^6}{(k_3/T_m + k_2')R_v} \text{ЗВЗ} \quad (1)$$

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

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

където s е означено налягането на водната пара, T е приземната

температурата, а $\int_0 ds$ е интегриране по пътя на разпространение на сигнала.

Използването на ГСП в метеорология е предложено през 1992 г. от М. Бевис (Bevis et al. 1992). В голям брой изследвания са проучени точността на получената от ГСП ИВП и възможностите за нейното приложение в метеорологията. В Европа бяха финансирани два проекта от Европейския Съюз. Първият проект МАГИК, ("MAGIC") (Haase et al., 2002 and Vedel et al., 2003), изучава приложението на ИВП, получена от ГСП, в Западното Средиземноморие. Вторият проект КОСТ 716 (Elgered 2001) започва през 1999 г. и има за цел изследване на приложимостта на ГСП в числената прогноза на времето (ЧПВ) и климата в Европа.

II.2. Принос на Швейцария към КОСТ 716

Основна задача на Европейския проект КОСТ 716 "Използване на наземната ГСП в климата и числената прогноза на времето" е да оцени приложимостта на метеорологичната информация, получена чрез ГСП, в оперативната числена прогноза на времето и климата (Elgered et al., 2003). За тази цел бяха получавани данни от повече от 200 европейски ГСП станции, в реално времето, и бяха предоставени за проверка на точността на моделите за ЧВП, а също и за числени експерименти (ЧЕ) с тези модели.

В Швейцария работата по КОСТ 716 започна през март 2000 като сътрудничество между Швейцарската федерална служба по топографията (Суистопо/Swisstopo), Федералната служба по метеорология и климатология (Метеосуис) и Института по приложна физика (ИПФ) към Университет Берн. Суистопо поддържа и експлоатира ГСП мрежата на Швейцария, а също и един от оперативните центрове на КОСТ 716, предоставящи ГСП данни в реално време (Brockmann et al. 2001). Отделът за числена прогноза на времето на МетеоСуис разработва и използва оперативната система за ЧПВ модела аЛМо. Подробно описание на аЛМо и неговата асимилационна

система може да бъде намерено във втората част на глава 3. В ИПФ се разработват радиометри за водна пара, използвани за измервания в тропосферата (Martin, 2002 and Ingold et al., 2000) и стратосферата (Kämpfer et al., 2003). В ИПФ, първата работа свързана с ГСП, е сравняване на ИВП, получена от ГСП станция Берн, с измервания получени от радиометъра ТРОВАРА (TROWARA, Peter and Kämpfer, 1992). Резултатите от сравнението са представени в Rohrbach (1999). По нататък работата беше разширена чрез участието в КОСТ 716 и бяха направени сравнения (1) с измеравниата чрез радиосондиосонда в станцията Пайерн (резултатите са описани в първата част на глава 2) и (2) станцията по слънчева фотометрия в Берн (представено в Mätzler et al., 2002). Направено беше и сравнение на ИВП от 20 ГСП станции с резултатите от аЛМо (представено в третата част на глава 2). Приносът на Швейцария към КОСТ 716 не се ограничава само до тези сравнения. В тясно сътрудничество на ИПФ с МетеоСуис в края на 2001 г. беше осъществен първият числен експериментът (ЧЕ) за асимилация на ГСП данните. Резултатите от тази двуседмична асимилация са представени във втората част на глава 3. Въз основа на обещаващите резултати, получени от първия ЧЕ три нови експеримента бяха проведени през лятото на 2002. Резултатите от тях са представени в третата част на глава 3.

Кратък обзор на глави 2 и 3 е представен по-долу.

III. Глава 2: Приложение на ГСП за валидиране на моделите на МетеоСуис

Акцентът на глава 2 е валидиране на моделите за числена прогноза на времето като се използва ИВП, получена от ГСП. Валидацията на регионалните мезомащабни модели за ЧПВ е важна задача при определяне на тяхната точност и надеждност. Метеорологичните центрове отчитат ежемесечно точността на следните резултати на моделите: температура, налягане, скорост и посока на вятъра,

валеж и облачна покривка.

Първата част¹ на глава 2 описва валидацията на два регионални мезомащабни модела за ЧПВ с данни от ГСП мрежата на Швейцария (AGNES, АГНЕС). Тази работа беше първа стъпка в оценяване на потенциала на ГСП данните за ЧПВ в Швейцария. ГПС наблюденията на зенитното пълно закъснение от шест АГНЕС станции бяха преобразувани в ИВП съгласно *Bevis et al. (1992)*. Така получената ИВП беше сравнена с измерванията от радиосондата и с резултатите от Суис Модел (СМ) - Швейцарската версия на Локалният Модел (ЛМ). Сравнението на ИВП, получена от ГСП, с получената от радиосондажа в Пайерн показва средно месечно отклонение от 0.27 до 0.64 kg/m^2 за периода ноември 2000 - март 2001. В метеорологични условия, характеризиращи се с ниска слоеста облачност и температурна инверсия, беше установено завишаване на ИВП измерена с радиосондите. Възможна причина за тази грешка може да бъде забавената времева реакция на датчика за влажността след преминаване на радиосондата през облак. Верификацията на хидростатичния Суис Модел показва добри резултати през зимата и големи отклонения през лятото. Средната месечна ИВП от ГСП и ЛМ показва систематично отклонение в района на Швейцарското плато и добри резултати за високо алпийската станция Андермат. На високо-алпийската станция Юнгфрауиох (около 3600 m височина) в някои случаи бяха получени отрицателни стойности на ИВП от ГСП ИВП поради неправилно моделиране на фазовия център на антената. Високата чувствителност на ГСП към атмосферни процеси с бързо времево изменение беше демонстрирана чрез проследяване на преминаването на атмосферен фронт през територията на Швейцария.

Във втората част² на глава 2 се описва съвместния анализ на резултатите за ИВП от регионалния модел ЛМ в Германия и Швей-

¹Validation of NWP mesoscale models with Swiss GPS Network AGNES. G. Guerova et al. *J. Appl. Meteorol.*, 42, 1, 141-150, 2003.

²Monitoring IWV from GPS and limited - area forecast model. G. Guerova and M. Tomassini, *Research Report 03-15*, University of Bern, Switzerland, 2003.

цария. Сравнени бяха ИВП резултатите от 94 станции от наземните ГСП мрежи на Германия и Швейцария (Brockmann et al., 2001) за периода април - ноември 2001 г.. Резултатите за Германия и Швейцария се оказаха близки. Моделът показва тенденция за завишаване на водната пара в атмосферата и тази тенденция е много добре изразена през лятото от юни до септември. Беше направен анализ на денонощния ход на ИВП за лятото на 2001 г.. Установено беше, че в часовете от 06 до 21 UTC моделът систематично завишава ИВП.

В третата част³ на глава 2 представя анализ на аЛМо в Швейцария за периода януари 2001 г. - юни 2003 г.. Допълнително обработените АГНЕС данни с времево разрешение от един час бяха сравнени с ежечасните прогнози на аЛМо за интервал от 0 до 23 часа напред. Средномесечната грешка и стандартното отклонение показва добре изразена сезонна зависимост. През лятото на 2002 г. моделът занижава съществено ИВП в сравнение с получената от ГСП. Сравняването на валежите, получени от аЛМо с измервания от синоптичната мрежа на Швейцария, показва значително завишаване на слабите валежи в модела. Тези резултати подсказват наличие на взаимозависимост между занижаването на ИВП и завишаването на валежите.

Анализът на двата регионални модела, използвани за оперативна ЧПВ в МетеоСуис, с измерванията получени от ГСП представлява уникална възможност за оценка на точността на прогнозираната от модела атмосферна влажност. От лятото на 2003 г. ИВП получена от ГСП е включена в пакета за рутинен анализ на оперативния модел на МетеоСуис.

IV. Глава 3: Числени експерименти

Приносът на Швейцария към асимилационната работа на КОСТ 716 се състои в четири ЧЕ с аЛМо. В глава 3 са представени резултатите

³Verification of the aLpine Model with the GPS data in the period 2001-2003. G. Guerova et al., *Meteorol. Atmos. Phys.*, 44, 7, 1033-1044, 2005.

от асимилацията на ИВП от ГСП в аЛМо.

Първата част⁴ на глава 3 описва работата по време на Краткосрочната научно-изследователска мисия в Метеорологичната служба на Германия (Дойче Ветердинсте) през април 2001 г.. Мисията имаше за целта да провери и подобри програмите за асимилиране на ГСП данните в ЛМ. ЛМ е регионален нехидростатичен модел, разработен от Консорциум за мезомащабно моделиране (Doms et al., 2001). Резултатите от асимилационните тестове показаха, че ЛМ е чувствителен към асимилирането на ИВП. Използването на ИВП от ГСП доведе до корекция от 20% спрямо оперативния модел по време на преминаване на студен атмосферен фронт. Мониторингът на ЛМ с ГСП данни в реално време позволи и откриване на грешка в един от радиосондажите. Започнатата по време на мисията работа допринесе за успешното осъществяване на аналогични числени експерименти в Швейцария. Това беше възможност за размяна на опит и знания в областта на моделирането и асимилирането на данни. Освен това по време на мисията бяха обсъдени точността на ГСП данните и възможни проблеми при тяхното асимилиране.

Втората част⁵ на глава 3 обобщава резултатите от първия ЧЕ с аЛМо в Швейцария. Регионалният модел аЛМо се използва за оперативна ЧПВ в МетеоСуис от ноември 2001 г. Моделът се инициализира с асимилационна схема, базирана на нютонова релаксация (Schraff, 1997). Целта на този ЧЕ беше да се оцени ползата от асимилацията на ИВП, получена от ГСП и предоставена от КОСТ 716. За този експеримент беше избран двуседмичен период през септември 2001 г., характеризиращ се с адвективен режим на времето и интензивни валежи в Швейцария. В модела бяха асимилирани данни от около 80 ГСП станции в Европа. Беше установена тенденция за завишаване на ИВП през дневните часове в следствие на асими-

⁴GPS observing system experiment with the Local Model. Report from the COST 716 Short Term Scientific Mission. G. Guerova, *Research Report 03-16*, University of Bern, Switzerland, 2003.

⁵Assimilation of the GPS-derived Integrated Water Vapour (IWV) in the MeteoSwiss Numerical Weather Prediction model - a first experiment. G. Guerova et al., *Phys. Chem. Earth.*, 29, 2-3, 177-186, 2004.

лирането на данните от ГСП. Това завишение беше съществено в южната част от областта на модела, където относителното изменение достигаше до 30% в сравнение с оперативния модел. Резултатите от аЛМо за Швейцария показаха изразен положителен ефект върху денонощния ход на ИВП и валежите. Само в един случай използването на ГСП данните предизвика значително повишение на ИВП в модела. Беше установено, че причината е неадекватно разпределение на инкрементите на влажността. Може да се направи заключение, че добавянето на допълнителна информация от ГСП (такава може да бъде градиент на влажността или данни от сигнал, получен от наклонения път) ще спомогне за по-правилното изграждане на структурната функция на модела. Резултатите, получени от първия експеримент за асимилране наданни от ГСП, бяха обещаващи и бяха планирани три нови числени експеримента в различни режими на атмосферна циркулация.

Третата част⁶ на глава 3 описва трите следващи асимилационни експерименти с аЛМо, които бяха направени след намаляване на радиуса на влияние на ГСП наблюденията. Бяха пресметнати 17 дни анализ и две 30 часови прогнози за три избрани периода през есента на 2001 г. и лятото и зимата на 2002 г. Бяха използвани данни от около 100 европейски ГСП станции. Точността на обработените в реално време (van de Marel et al. 2003) ГСП наблюдения беше сравнена с тази на обработените със закъснение. Средната грешка на зенитното пълно закъснение е 3 mm (съответстващата средна грешка на ИВП е под 0.5 kg/m^2), а стандартното отклонение е 8 mm. Данните обработени в реално време бяха успешно асимилрани в модела и коригират неговите неточности. Беше установено, че въздействието на ИВП от ГСП върху аЛМо е съществено за юни 2002 г., умерено за септември 2001 г. и незначително за януари 2002 г. ЧЕ през юни показва съществени положителни резултати до края на

⁶Assimilation of COST 716 Near Real Time GPS data in the nonhydrostatic limited area model used at MeteoSwiss. G. Guerova et al. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 91, 1-4, 149-164, doi:10.1007/s00703-005-0110-6, 2006.

прогностичния период. Подобрения бяха получени в температурата и точката на оросяване на височина 2 m върху цялата област на модела. Субективният анализ на валежите даде нееднозначни резултати. Положителният ефект на ИВП от ГСП върху валежите е ограничен в първите шест часа на прогнозата и в случаите с интензивен валеж. В един случай от юни 2002 г., асимилацията на ГСП данните помогна за по-правилно прогнозиране на област с интензивен валеж. За същият период беше открит и обстойно анализиран един случай с отрицателен ефект върху резултатите за валежите.

Основавайки се на направените числени експерименти за асимилация на ИВП, получена от ГСП, може направим заключение, че използването на данни от ГСП в ЧПВ има бъдеще благодарение на доброто пространствено покритие, наличност и качество на данните. Потенциалът на ГСП за приложение в метеорологията ще бъде разширен с влизането в експлоатация през 2008 г. на новата Европейската сателитна система за навигация ГАЛИЛЕО. Получената от ГСП информация за градиента на водната пара се очаква да подобри резултатите от модела по време на метеорологични условия, характеризирани се с динамичност и силна нееднородност в полето на водната пара. По-нататъшен напредък може да бъде и получаването на профили на влажността (ГСП-томография). Оперативното използване на получената от ГСП количество водна пара в ЧПВ ще зависи от достъпността на данните, тъй като ГСП мрежите в по-голямата си част са собственост на геодезичната общност и не са интегрирани в системата за наблюдение на Световната метеорологична организация.

Основни приноси на дисертацията

За първи път данни за количеството на водната пара, получени от Глобалната Система за Позициониране (ГСП) са използвани в числената прогноза на времето в Швейцария.

1.) За първи път е анализирана точността на ГСП и е сравнена с измервания от радиосонда и микровълнов радиометър. За периода ноември 2000 г. - март 2001 г. година е открито средно месечно отклонение от 0.27 до 0.64 kg/m² в радиосондажните измервания в 00 и 12 UTC.

2.) Анализът на данните от ГСП станция Юнгфрауйох показва нереални стойности на ИВП, които се дължат на неправилно избран модел за фазовия център на антената.

3.) За първи път са сравнени ИВП от 14 ГСП станции, получени в близко до реалното време (1 час и 45 минути след наблюдението) и обработени допълнително данни (1 седмица след наблюдението). Качеството на двата вида ГСП данните е близко, но се наблюдава тенденция за изглаждане в данни получени в реално време.

4.) Два модела използвани за оперативна числена прогноза на времето в МетеоСуис “алпийският Модел” (аЛМо) (хоризонтална резолюция 7км) и “Суис Модел” (хоризонтална резолюция 15 км) са валидирани с данни от 14 ГСП станции. Резултатите показаха, че за периода от 2001 г. до 2003 г. моделите имат тенденция да занижават ИВП и това занижение е с добре изразен денонощен ход.

5.) За първи път данни от 100 Европейски ГСП станции са асимилирани в аЛМо.

6.) Бяха проведени и анализирани четири асимилационни експеримента в три сезона. Асимилацията на ГСП има съществено въздействие върху прогнозата на аЛМо през лятото и е главно изразена в подобрение на прогнозата на интензивните валежи. Подобрения са отчетени в температурата и точката на оросяване в аЛМо.

7.) Разработен е алгоритъм за пресмятане на Зенитното Пълно Закъснение, Зенитното Хидростатично Закъснение и Зенитното Водно Закъснение в аЛМо. Този алгоритъм се използва ежедневно в МетеоСуис и получените резултати се предоставят на Швейцарската федерална служба по топография.

Публикации на автора, свързани с дисертацията

Публикации в реферирани списания книги:

A.1) Guerova G., Bettems J.-M., Brockmann E., and Ch. Matzler, 2006. **Assimilation of COST 716 Near Real Time GPS data in the nonhydrostatic limited area model used at MeteoSwiss.** *Meteorol. Atmos. Phys.*, 91, 1-4, 149-164, doi:10.1007/s00703-005-0110-6.

A.2) Guerova G., E. Brockmann, F. Schubiger, J. Morland and Ch. Matzler, 2005. **An integrated assessment of measured and modeled IWV in Switzerland for the period 2001-2003.** *J. Appl. Meteorol.*, 44, 7, 1033-1044.

A.3) Guerova G., 2005: **Assimilation trial results: MeteoSwiss. in COST 716: Exploitation of ground-based GPS for operational numerical weather prediction and climate applications.** G. Elgered, P. Plag, H. van der Marel, S. Barlag, J. Nash (editor(s)), European Commission, Brussels (publisher), 2005, pp. 125-128, ISBN ISSN: 92-898-0012-7.

A.4) Guerova, G., J.-M. Bettems, E. Brockmann, and Ch. Matzler, 2004. **Assimilation of the GPS-derived Integrated Water Vapour (IWV) in the MeteoSwiss Numerical Weather Prediction model - a first experiment.** *Phys. Chem. Earth.*, 29, 2-3, 177-186.

A.5) Guerova, G., E. Brockmann, J. Quiby, F. Schubiger, and Ch. Matzler, 2003. **Validation of NWP mesoscale models with Swiss GPS Network AGNES.** *J. Appl. Meteorol.*, 42, 1, 141-150.

Публикации в конферентни материали и рапорти:

B.1) Brockmann E., D. Ineichen, G. Guerova, J.-M. Bettems, A. Somieski, M. Troller, M. Becker and P. Haefele: **Activities of Swisstopo in GPS Meteorology.** *Proceedings of the IGS Symposium*,

Berne, Switzerland, May 2004.

B.2) Guerova G., J.-M. Bettems, E. Brockmann and Ch. Matzler: **Assessment of the impact of the GPS data assimilation on the performance of MeteoSwiss NWP model.** *Proceedings of International Workshop on GPS-Meteorology, Tsukuba, Japan, 2003.*

B.3) Guerova G., 2003: **COST 716 Short Term Scientific Mission - report.** *IAP Research Report , No. 2003-16,2003, available from <http://www.iap.unibe.ch/publications/>.*

B.4) Guerova G., and M. Tomassini: **Monitoring IWV from GPS and limited - area forecast model.** *IAP Research Report, No. 2003-15, 2003, available from <http://www.iap.unibe.ch/publications/>.*

B.5) Guerova G.: **Derivation of Integrated Water Vapour (IWV) from the ground - based GPS estimates of Zenith Total Delay (ZTD).** *IAP Research Report, No. 2003-08, 2003 available from <http://www.iap.unibe.ch/publications/>.*

B.6) Brockmann E., G. Guerova, M. Troller: **Swiss activities in combining GPS with meteorology.** *Mitteilungen des Bundesamtes fuer Kartographie und Geodaesie, 2002, 23, 95-99.*

B.7) Guerova G., J.-M. Bettems, E. Brockmann, and Ch. Matzler: **Assimilation of GPS measurements in the aLpine Model: sensitivity experiment.** *2nd Workshop of COST Action 716, Exploitation of ground-based GPS for Meteorology, Potsdam, Germany, 2002.*

B.8) Maetzler Ch., L. Martin, G. Guerova, and Th. Ingold: **Assessment of integrated-water-vapour data at Bern from GPS, sun photometry, microwave radiometry and radiosonde.** *2nd Workshop of COST Action 716, Exploitation of ground-based GPS for Meteorology, Potsdam, Germany, 2002.*

B.9) E. Brockmann, G. Guerova, and M. Troller: **Swiss Activities in Combining GPS with Meteorology.** *Proceedings of EUREF Workshop, Dubrovnik, Croatia, 2001.*

Литература

Bouma, H., 2002: Ground-Based GPS in Climate Research. Technical Report 456L, Department of Radio and Space Science, Onsala Space Observatory, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

Bevis, M., S. Businger, T.A. Herring, C. Rocken, R.A. Anthes, and R.H. Ware, 1992: GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *J. Geophys. Res.*, **97**, 15 787-15 801.

Brockmann, E., G. Guerova, and M. Troller, 2001: Swiss activities in combining GPS with meteorology. *Subcommission for the European Reference Frame (EUREF), Publication 10*, J. A. Torres and H. Hornik, Eds., in press.

COST-716, 2000: GPS Meteorology. (<http://www.oso.chalmers.se/geo/cost716.html> | WG2 | Documents).

Doms G, and U. Schaettler, 2001: COSMO Newsletter No 1, 114 pp. [Available from Deutscher Wetterdienst, P.O.Box 100465, 63004 Offenbach, Germany.]

Elgered G., 2001: An overview of COST Action 716: Exploitation of ground-based GPS for climate and numerical weather prediction applications. *Phys. Chem. Earth. (A)* **26**, 399-404.

Elgered G., H.-P. Plag, H. van der Marel, S. Barlag, and J. Nash, 2003: Ground-Based GPS for Climate and Numerical Weather Prediction Applications. *The EGGS*, **4**, 22-24. Available online at: www.the-eggs.org/data/eggs_4.pdf

Guerova G., and M. Tomassini, 2003: Monitoring IWV from GPS and

limited - area forecast model. *Research Report 03-14*, University of Bern, Switzerland.

Haase J., M. Ge, H. Vedel, and E. Calais, 2002: Accuracy and variability of GPS Tropospheric Delay Measurements of Water Vapour in the Western Mediterranean. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, submitted Oct. 2002.

Ingold, T., B. Schmid, C. Matzler, P. Demoulin, and N. Kämpfer, 2000: Modeled and empirical approaches for retrieving columnar water vapour from solar transmittance measurements in the 0.72, 0.82, and 0.94 μm absorption band. *J. Geophys. Res.*, **105**, 24 327-24 343.

Kämpfer N., B. Deuber, D. Feist, D. Gerber, Ch. Mätzler, L. Martin, J. Morland, and V. Vasic, 2003: Microwave remote sensing of water vapor in the atmosphere. *Geographica Helvetica*, **58**, 2, 81-89.

Martin L., 2002: ASMUWARA - The All-Sky Multi Wavelength Radiometer. *Research Report 02-12*, University of Bern, Switzerland.

Mätzler Ch., L. Martin, G. Guerova, and Th. Ingold, 2002: Assessment of integrated-water-vapour data at Bern from GPS, sun photometry, microwave radiometry and radiosonde. 2nd Workshop of COST Action 716, Exploitation of ground-based GPS for Meteorology, Potsdam, Germany, 2002-01-28.

Ohtani R., I. Naito, 2000: Comparisons of GPS - derived precipitable water vapours with radiosonde observations in Japan. *J. Geophys. Res.*, **105**, 26 917-26 929.

Peter R., and N. Kämpfer, 1992: Radiometric determination of water vapour and liquid water and its validation with other techniques. *J. Geophys. Res.*, **97**, D16, 18 173-18 183.

Rohrbach A., 1999: Wasserdampfmessungen mit GPS. IAPMW ID: 143
Diplomarbeit, University of Bern.

Tomassini M., G. Gendt, G. Dick, M. Ramatschi, Ch. Schraff, 2002:
Monitoring of integrated Water Vapour from ground-based GPS
observations and their assimilation in a limited area model. *Phys. Chem.
Earth.*, **27**, 341-346.

Schraff, Ch., 1997: Mesoscale data assimilation and prediction of low
stratus in the Alpine region. *Meteor. Atmos. Phys.*, **64**, 21-50.

Van der Marel H., E. Brockmann, S. de Haan, J. Dousa, J. Johansson,
G. Gendt, O. Kristiansen, D. Offiler, R. Pacione, A. Rius, F. Vespe,
2003: COST-716 Near Real-Time Demonstration Project. *Jap. Meteor.
Soc. J.*, submitted March 2003.

Vedel H., X.Y. Huang, J.Haase, M. Ge, E. Calais, 2003: Impact of
GPS zenith tropospheric delay data on the precipitation forecasts
in Mediterranean France and Spain. *Geophys. Res. Lett.* submitted
February 2003.

