

УДК 528.3

Н. І. Каблак¹, С. Г. Савчук²

¹Ужгородський національний університет, Ужгород

²Національний університет «Львівська політехніка», Львів

ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ АТМОСФЕРИ

Система дистанційного моніторингу атмосфери призначена для отримання інформації про стан атмосфери. Принцип роботи дистанційного моніторингу атмосфери базується на реєстрації і обробці радіосигналів GNSS. Сучасні мережі активних референціальних станцій дають змогу розв'язувати не тільки практичні задачі з геодезії та навігації, але й суто наукові задачі, що мають важливе значення у науках про Землю.

ВСТУП

Атмосфера Землі переважно поділяється на дві основні оболонки — тропосферу та іоносферу, оскільки умови поширення супутникових сигналів в цих двох частинах різні:

- тропосфера (нейтральна атмосфера) є більшою низькою частиною атмосфери і простягається від поверхні Землі до висоти 20 км. Поширення сигналу залежить головним чином від температури, тиску та вмісту водяного пару в атмосферних шарах. Для мікрохвильової довжини хвилі нейтральна атмосфера не є дисперсною.

- іоносфера — верхня частина атмосфери. Розташована між 70 та 1000 км над поверхнею Землі. Поширення сигналу переважно затримують вільно заряджені частинки. Іоносфера є дисперсним середовищем для мікрохвильових сигналів. Тому є можливість виключення впливу іоносфери на поширення радіосигналу, проводячи спостереження на двох частотах.

Виникнення затримки сигналу у тропосфері пов'язано з наявністю в тропосфері молекул азоту, кисню, вуглекислого газу і водяної пари. Під дією зовнішньої радіохвилі ці молекули поляризуються і створюють додаткові електричні струми в тропосфері. В результаті сумарні струми вже відрізняються від струмів у вакуумі, що призводить до зменшення фазової швидкості радіохвилі, яка

безпосередньо залежить від концентрації молекул. Отже, виміри додаткової затримки радіосигналу при поширенні в тропосфері дають інформацію про інтегральні властивості атмосфери уздовж траєкторії поширення радіосигналу. При обробці даних спостережень із космічних апаратів отримують додаткову інформацію у вигляді файлів тропосферних затримок радіосигналів, що реєструються GNSS-приймачами. Через сильну кореляцію між вмістом водяної пари в атмосфері і тропосферною затримкою поширення GNSS-сигналу, можна оцінити інтегровану осаджену водяну пару (IPWV — Integrated Precipitable Water Vapor) в атмосфері із GNSS-вимірювань. Як відомо, цей параметр має вирішальне значення для синоптиків (метеорологів), оскільки вміст водяної пари в атмосфері є ключовим параметром у моделі погоди.

Сучасні GNSS-мережі забезпечують істотне доповнення до інших геофізичних мереж (наприклад сейсмічних, геодинамічних, гравіметричних), оскільки мають високу точність, чутливість до тривалості періоду спостереження, простоту розгортання, а також здатність виконувати вимірювання змішень від місцевих до глобальних масштабів.

В даний час дослідження тропосфери із використанням GNSS-спостережень спрямовані у бік глибшого розуміння погодних і кліматичних процесів, і в кінцевому рахунку — поліпшення прогнозування погоди [2–6]. На сьогодні най-

більшим проектом у Центральній Європі, у рамках якого визначаються у майже реальному часі зенітні тропосферні затримки на регіональній мережі GNSS-станцій, є E-GVAP, а основний обчислювальний центр розміщується у Королівській обсерваторії Бельгії (ROB, <http://egvar.dmi.dk>). Мережа охоплює близько 160 станцій, більшість з яких належать перманентній мережі EPN від EUREF та Міжнародній GNSS-службі IGS. Розвинута інфраструктура даних мереж дозволяє використовувати GNSS-вимірювання для потреб метеорології. Неперервність визначення водяної пари на значних територіях дає інформацію про динаміку зміни водяної пари в атмосфері та опадів в реальному часі.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Ми передбачаємо використовувати діючу інфраструктуру національних мереж активних референціальних GNSS-станцій для дистанційного зондування атмосфери з метою визначення вмісту водяної пари в атмосфері як одного із основних погодуотворювальних факторів.

Небезпечні та стихійні гідрометеорологічні явища (зливи, шквали, річкові повені, різкі зміни погоди, снігопади, град, снігові лавини, селі тощо) завдають значної шкоди економіці та населенню України. Зростання господарського освоєння прибережних і підвладних повеням районів, нераціональна господарська діяльність людини призводять до того, що дедалі більша кількість господарських об'єктів та населення наражається на ризик негативного впливу несприятливих гідрометеорологічних явищ.

За оцінкою експертів Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО) за період з 1991 по 2010 рр. понад 70 % матеріальних втрат і до 90 % випадків уражень людей на земній кулі від природних лих, спричинених метеорологічними та гідрологічними чинниками. Україна є членом ВМО. Виконання зобов'язань щодо участі України у міжнародних організаціях та договорах неможливе без даних гідрометеорологічних спостережень і прогнозів, а також спостережень за забрудненням навколишнього природного середовища, які здійснює національна гідрометеорологічна служба.

Основою діяльності гідрометеорологічної служби є функціонування цілісної державної системи спостережень і прогнозування. Це комплексна багаторівнева спостережно-інформаційна система, призначена для систематичних інструментальних спостережень гідрометеорологічних явищ, стану атмосфери, забруднення довкілля під впливом природних і антропогенних факторів.

На жаль, за рівнем технічного та технологічного оснащення гідрометеорологічна служба України відстає від потреб сьогодення і значно поступається гідрометеорологічним службам не тільки розвинутих країн світу, а й своїх сусідів Польщі, Румунії, Словаччини.

Переважна більшість з 25 тисяч засобів вимірювальної техніки, що використовується у гідрометеорологічній службі, розроблена 30—40 років тому, морально застаріла і наразі не відповідає сучасним міжнародним стандартам, зокрема вимогам ВМО та Міжнародної організації цивільної авіації. Більш ніж 90 % засобів вимірювальної техніки працюють з продовженим строком експлуатації, а близько 50 % потребують термінові заміни [www.mns.gov.ua/laws/regulations/pub.../conception_gidromet.doc].

Такий стан технічного і технологічного оснащення гідрометеорологічної служби викликає особливе занепокоєння у зв'язку з посиленням в Україні повторюваності та інтенсивності стихійних гідрометеорологічних явищ, таких, наприклад, як катастрофічні паводки на річках Закарпаття.

Проте недостатньо застосовуються в гідрометеорологічній службі сучасні супутникові технології отримання інформації. Потребують істотного розвитку теоретично-прикладні аспекти гідрометеорологічного прогнозування на основі сучасних числових моделей з використанням комп'ютерно-інформаційних технологій.

Наявність мережі активних референціальних GNSS-станцій, яка базується на найсучаснішій RTK-технології і є централізованою та максимально автоматизованою, та високотехнологічної інфраструктури допомагає розв'язувати не тільки практичні задачі з забезпечення координатною основою, але й суто наукові задачі, що

мають важливе значення у всіх науках про Землю. Основною метою нашої роботи є аналізування можливостей використання потенціалу мережі активних референцних GNSS-станцій для розв'язання задач метеорології.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для вивчення атмосферних явищ та для прогнозу погоди необхідно одночасно і систематично провадити різні спостереження у багатьох пунктах на значних територіях. На території США кожної години, в Україні кожні три години провадяться спостереження погоди. Характеризується хмарність (щільність, висота і вид); знімаються покази барометрів, до яких вводяться поправки для приведення отриманих величин до рівня моря; фіксуються напрям і швидкість вітру; вимірюються кількість рідких або твердих опадів, температура повітря і ґрунту; визначається вологість повітря; ретельно фіксуються умови видимості та інші атмосферні явища (гроза, туман і т. п.).

Атмосферні процеси розвиваються хаотично. Це означає, що для прогнозу різних явищ у різному просторово-часовому масштабі потрібні і різні підходи, зокрема для прогнозу поведінки великих циклонів помірних широт і локальних сильних дощів, а також для довгострокових прогнозів.

Оперативний прогноз погоди зазвичай базується на спостереженнях відносної вологості поряд з тиском і температурою, що визначаються за допомогою радіозондів і наземних метеорологічних приладів. Радіозонди запускаються два рази на добу і визначають профілі зміни атмосферного тиску, температури повітря та відносної вологості повітря в атмосфері. Один з головних недоліків радіозондів — це відносно низька точність датчиків в результаті їхнього забруднення під час запуску.

З іншого боку, кількість водяної пари може бути визначена радіометрами. Радіометри забезпечують зазвичай дуже точні дані, але прилад є надто дорогим, а його виміри ненадійні під час опадів. Крім того, радіозонди та наземні або космічні радіометри водяної пари розташовані на значних відстанях, і дискретність їхніх вимі-

рювань низька. Отже, просторова і часова роздільна здатність методів вимірювань дуже мала і залежить від погодних умов.

Таким чином, є необхідність подальшого розвитку методів і засобів дистанційного зондування атмосфери, які, з одного боку, давали б високу точність вимірювання вологості повітря, а з іншого боку, були б доступними, надійними, простими і економічними в експлуатації.

Перевагою дистанційного методу зондування атмосфери є можливість його реалізації на сучасній GNSS-інфраструктурі (мережі активних референцних станцій з єдиним центром управління), а також те, що дані вимірювання не залежать від погодних умов: падіння дощу та наявності хмар. Розвинута інфраструктура мереж референцних станцій на територіях України дозволяє визначати та прогнозувати динаміку змін водяної пари та опадів у реальному часі для вирішення проблеми своєчасного прогнозування стихійних явищ, екологічного та кліматичного моніторингу.

Використання оперативної інформації про вміст водяної пари в атмосфері в числових моделях прогнозу погоди дозволить поліпшити деталізацію даних і точність регіональних короткострокових прогнозів погоди. Адже можна вважати, що радіосигнал при GPS-спостереженнях проходить крізь атмосферу Землі миттєво. Тобто, враховується реальний стан нестабільної атмосфери. Завдяки щосекундним (неперервним) GPS-вимірюванням слід очікувати високу точність визначення осадженої водяної пари.

Закарпатська служба визначення положення — ZAKPOS (Transcarpathian Positioning Service) є місцевою ініціативою та проектом встановлення однорідної базової інфраструктури диференційного GNSS (DGNSS) на території Закарпатської області. За своєю суттю це регіональна GNSS-система наземного базування, що працює за європейськими стандартами, і забезпечує GNSS-даними спостережень та поправками до них в реальному часі (RTK) для високоточного визначення місцеположення. Така фундаментальна інфраструктура технічно базується на мережі активних референцних GNSS-станцій та відповідних лініях зв'язку. Реально робота

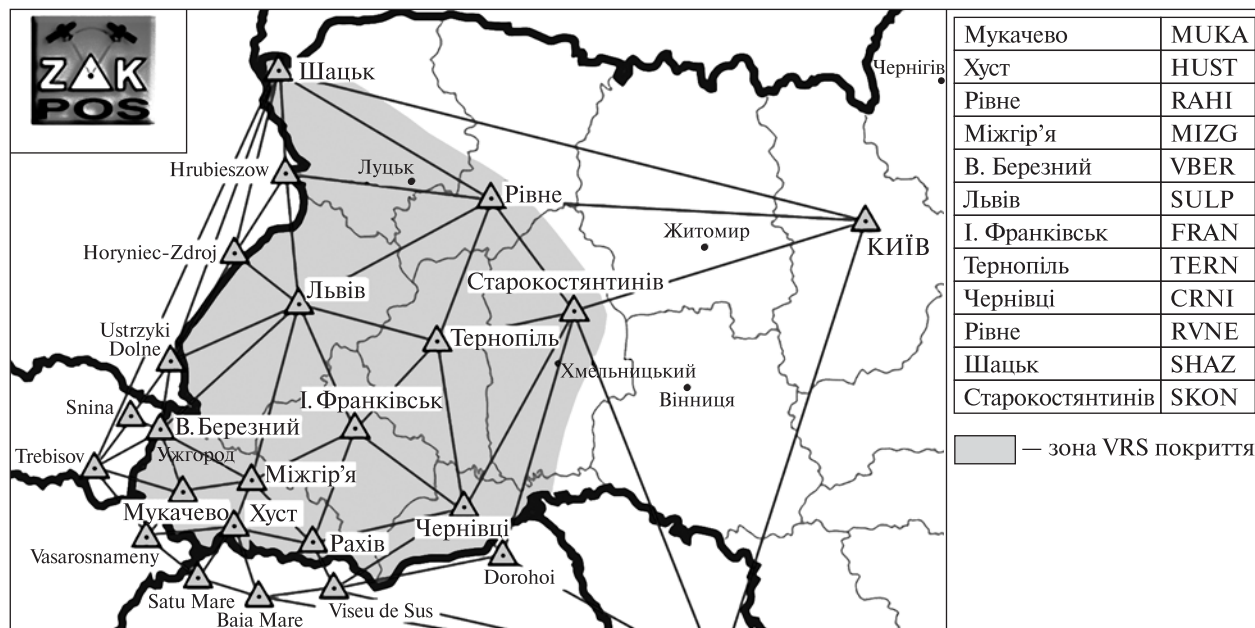


Рис. 1. Загальна схема GNSS мережі UA-EUPOS/ZAKPOS станом на травень 2011 р.

над створенням проекту мережі референсних станцій ZAKPOS на території Закарпаття розпочалася ще під час виконання госпдоговору № 0116/055-Н з Державним комітетом України із земельних ресурсів у 2006 р. На початку лютого 2009 р. було введено в дію мережу GNSS-станцій ZAKPOS, що складалася на той час із п'яти референсних станцій. На середину 2010 р. дана мережа об'єднувала 17 станцій, на кінець 2010 р. — 28 станцій, і в результаті вона стала мережею національного масштабу під новою назвою UA-EUPOS [1, 7]. На рис. 1 подано схему мережі активних референсних GNSS-станцій UA-EUPOS/ZAKPOS на травень 2011 р. (www.zakpos.zakgeo.com.ua).

Аналогічні мережі діють у багатьох країнах світу, найближчими до нас є активні мережі референсних станцій SKPOS (Словаччина), CZEPOS (Чехія), APOS (Австрія), SAPOS (Німеччина), ASG-EUPOS (Польща) тощо.

Розвинута інфраструктура мереж референсних станцій на територіях даних країн дозволяє визначати та прогнозувати динаміку зміни водяної пари в атмосфері, а отже опадів в реальному часі.

В результаті первинної обробки результатів GNSS вимірювань визначають відстані від стан-

ції спостережень до GNSS-супутників. Вторинна обробка GNSS-вимірювань полягає у вирішенні навігаційної задачі і дає інформацію про місцезнаходження станції. Для отримання метеорологічної інформації необхідна розробка спеціальних методів вторинної обробки даних, що базуються на розв'язуванні обернених задач.

Обробка отриманих даних методами розв'язку оберненої задачі моделювання стану атмосфери дозволить визначити висотні залежності температури та вміст водяної пари в атмосфері.

Сукупне об'єднання даних первинної та вторинної обробки разом із додатковою метеорологічною інформацією дозволить отримати глобальну модель атмосфери практично в режимі реального часу, що дасть можливість провадити:

- високоточний метеорологічний моніторинг розподілу температури, вологості і тиску, розподілу водних парів;
- спостереження розподілу турбулентних потоків різної природи в атмосфері;
- моніторинг стану атмосфери.

Подальше використання отриманих даних сприяє ефективнішим метеорологічним і кліматичним дослідженням, вивченню впливу сонячної активності та антропогенних чинників на

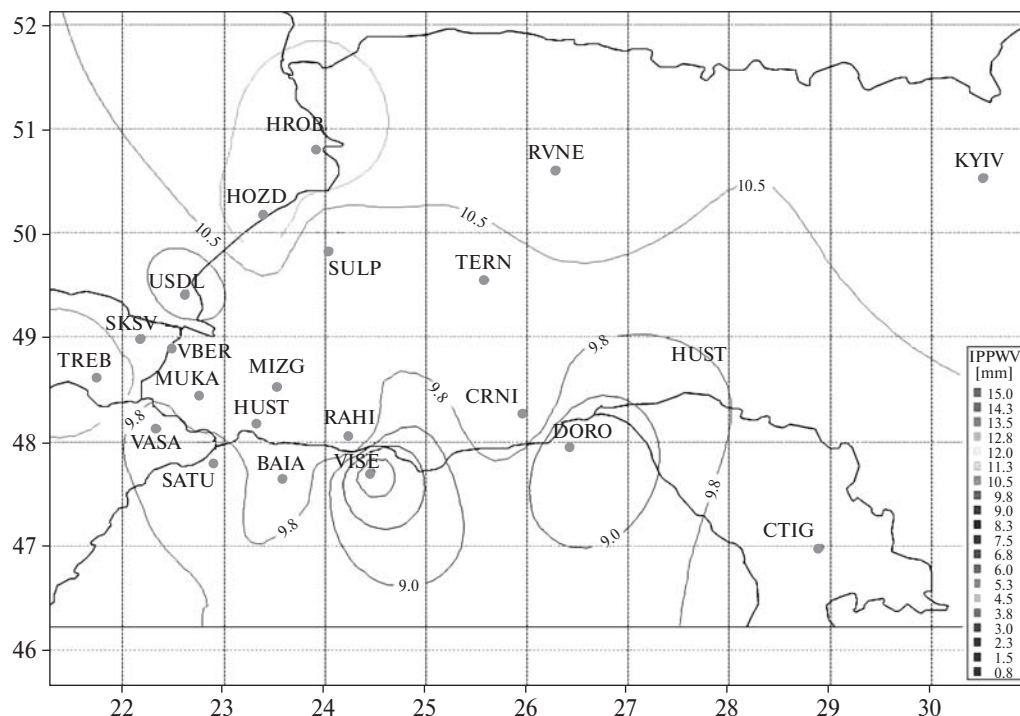


Рис. 2. Інтегрована осаджена водяна пара (IPWV) у Trimble Atmosphere App

стан атмосфери, аналізу зв'язків сейсмічної активності зі станом атмосфери. Сукупним результатом даної роботи є перехід на якісно вищий рівень розуміння фізичних процесів, досліджуваних багатьма областями знань, особливо метеорології.

В обчислювальному центрі мережі UA-EUPOS/ZAKPOS використовується мережеве програмне забезпечення від фірми Trimble (США), одного із світових лідерів у галузі GNSS-технологій.

GNSS інфраструктура від фірми Trimble на даний час має два нові програмні додатки:

- Trimble VRS³Net™ App
- Trimble Atmosphere App

Trimble VRS³Net™ App є останньою версією Trimble VRS³Net. Програмний продукт VRS³Net™ App забезпечує операторів активної мережі базових GNSS-станцій високо інтегрованим набором інструментів, необхідних для управління мережею.

Trimble Atmosphere App — нова інфраструктура App підтримує обчислення та аналіз інтегрованої

випадної водяної пари (IPWV) і повного вмісту електронів в іоносфері (TEC). Цей модуль може розраховувати атмосферні умови, базуючись на GNSS-спостереженнях, і даних метеорологічних приладів з метеостанцій, радіозондів тощо. *Atmosphere App* повністю підтримується поточною інфраструктурною стратегією Trimble і базується на технології VRS³Net.

Особливістю у *Atmosphere App* є те, що модуль дозволяє обчислювати значення як IPWV, так і TEC не з поодиноких GNSS-станцій, а з мережі перманентних станцій. При цьому IPWV обчислюється з використанням наземних метеорологічних даних, таких як температура і тиск, а також даних радіозондувань. Результати представляються в табличній формі, а також в різноманітних графічних формах. На рис. 2 подано значення IPWV, визначене на основі оперативного опрацювання GNSS-даних з мережі референціальних станцій UA-EUPOS/ZAKPOS у вигляді ізоліній. Завдяки введенню в дію та постійній експлуатації української мережі активних референціальних стан-

цій ZAKPOS/UA-EUPOS в даний час є можливість опрацювання GNSS IPWV-даних в режимі реального часу з дискретністю 1 хв.

Розробка методів отримання інформації про просторовий розподіл водяної пари в атмосфері за даними реєстрації GNSS-сигналів дозволить вийти на якісно новий рівень метеорологічного забезпечення, підвищити якість метеорологічних прогнозів погоди і поліпшити точність позиціонування користувачів навігаційних систем ГЛОНАСС і GPS.

ВИСНОВКИ

Оперативність даного підходу, повна автоматизація та відсутність витратних матеріалів при здійсненні дистанційного зондування відкривають можливості до широкого впровадження у практику неперервного та оперативного контролю за станом атмосфери з метою покращення деталізації даних і підвищення точності регіональних короткострокових прогнозів погоди.

На основі GNSS-спостережень у мережі станцій ZAKPOS/UA-EUPOS та даних транскордонної співпраці із Європейськими країнами, ми можемо мати точну, щільну і часту вибірку значень IWV на значних територіях, що дозволяє визначати і прогнозувати динаміку зміни водяної пари в реальному часі.

Дистанційний моніторинг атмосфери створює потужну систему та основу для розвитку транскордонного співробітництва у напрямку підвищення точності попередження складних метеоумов на транскордонній території (надмірні опади дощу, снігу, граду, виникнення обледеніння, сильних шквалів тощо), прогнозу виникнення небезпечних стихійних явищ (паводків, селевих потоків, зсувів, сходження снігових лавин у горах) та можливих екологічних загроз, до яких вони можуть призвести (потрапляння стічних вод у річки, джерела питної води, загрози виникнення небезпечних інфекцій, забруд-

нення атмосфери, екологічних катастроф), тому що чим більшою є територія вивчення, тим точнішим буде прогноз.

1. *Гринишина-Полога О. Я.* Порівняльна характеристика визначення координат активних референсних станцій мережі ZAKPOS/UA-EUPOS за даними спостережень 2009—2010 рр. // Геодезія, картографія і аерофотознімання. — 2010. — Вип. 73. — С. 7—13.
2. *Каблак Н. І.* Моніторинг осадженої водяної пари на основі обробки ГНС-даних // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 4. — С. 65—73.
3. *Каблак Н. І., Клімик В. У., Швалагін І. В., Каблак У. І.* Моніторинг випадуючої водяної пари за допомогою GPS для прогнозування погоди // Космічна наука і технологія. — 2004. — 10, № 5/6. — С. 163—166.
4. *Devis M., Businger S., Herring T. A., et al.* GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System // J. Geophys. Res. — 1992. — 97. — P. 15,787—15,801.
5. *Elgered G., Plag H. P., Van der Marel H.* Exploitation of groundbased GPS for operational numerical weather Prediction and Climate Applications. — EC/COST, EUR, 2005. — 234 p.
6. *Mendes V. B., Langley R. B.* Tropospheric zenith delay prediction accuracy for airborne GPS high-precision positioning // Proceedings of The Institute of Navigation 54th Annual Meeting, Denver, CO, USA., 1—3 June 1998. — Denver, 1998. — P. 337—347.
7. *Savchuk S., Kalynych I., Prodanets I.* Creation of ZAKPOS active network reference stations for Transcarpatian Region of Ukraine // Int. Symp. Global Navigation Satellite Systems, Spacebased and Ground-based Augmentation Systems and Applications, Berlin, 11—14 November 2008. — EUPOS Presentations.

Надійшла до редакції 01.10.11

N. I. Kablak, S. G. Savchuk

DISTANT MONITORING OF THE ATMOSPHERE

The distant monitoring of the atmosphere is designed to obtain some information on the atmosphere state. The principle of the distant monitoring of the atmosphere is based on the detection and processing of GNSS radio signals. Modern networks of active reference stations allow one to solve not only practical problems of surveying and navigation, but also scientific problems that are important for all the Earth sciences.