

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

Інститут геодезії

Кафедра вищої геодезії та астрономії

Галузева науково-дослідна лабораторія ГНДЛ-93



"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Проректор з наукової роботи

НУ «Львівська політехніка»

Н.І.Чухрай

\_\_\_\_\_ 2018 р.

## ТЕХНІЧНИЙ ЗВІТ

“ЗВЕДЕНИЙ КАТАЛОГ КООРДИНАТ АКТИВНИХ РЕФЕРЕНЦНИХ СТАНЦІЙ  
УКРАЇНИ: 2015-2017 РР.”

*Робота виконана згідно з Угодою про співпрацю  
з Державним підприємством «Закарпатгеодезцентр» та фірмою «TNT-  
ТPI»*

Директор Інституту геодезії ..... К.Р.Третяк

Науковий керівник ГНДЛ-93 ..... Ф.Д.Заблоцький

Керівник проекту..... С.Г.Савчук

**ЛЬВІВ 2018**

## ЗМІСТ

<b>Перелік виконавців</b> .....	3
<b>Перелік додатків</b> .....	4
<b>Реферат</b> .....	5
<b>1. Загальні відомості</b>	6
<b>2. Глобальні/континентальні мережі перманентних GNSS станцій</b>	8
<b>3. Національні мережі референцних GNSS станцій</b>	11
<b>4. Глобальні, регіональні та національні референцні системи координат</b>	13
4.1. Загальні відомості про референцні системи	13
4.2 Реалізації референцних систем	13
<b>5. Опис проекту згущення ETRF2000-UA</b>	17
5.1. Передумови проекту	17
5.2. GNSS станції та пункти геодезичної мережі	19
<b>6. Опрацювання даних GNSS спостережень</b>	21
6.1. Підготовчий етап	21
6.2. Основний етап обчислень	23
6.2.1. Порівняння отриманих координат	25
6.3. Створення зведеного каталогу	28
<b>Висновки</b> .....	30
<b>Список літератури</b> .....	31

## **Перелік виконавців**

Керівник проекту, д.т.н. проф. Савчук С.Г.  
ст.інженер Ванчура О.І.  
аспірант Доскіч С.В.

## Перелік додатків

Додаток А	Загальні відомості про процес опрацювання GNSS-даних з використанням програмного пакету GIPSY в Центрі аналізу LPI
Додаток В	Загальні відомості про процес опрацювання GNSS-даних з використанням програмного пакету GAMIT в Центрі аналізу LPI
Додаток С	Перелік перманентних GNSS-станції EPN
Додаток D	Мережі опорних GNSS-станцій EPN
Додаток Е	Перелік референцних GNSS-станцій України
Додаток F	Перелік зарубіжних референцних GNSS-станцій
Додаток G	Перелік періодично діючих пунктів GNSS-спостережень та геодезичних пунктів ДГМ
Додаток H	Координати референцних GNSS-станцій в системі ETRF2000-UA
Додаток I	Координати референцних GNSS-станцій України в системі УСК-2000

## РЕФЕРАТ

Звіт по НДР: 31 с., 10 рис., 7 табл., 20 джерел.

Об'єкт дослідження – мережі активних референцних GNSS станцій України.

Предмет дослідження – координати GNSS станцій

Мета роботи – отримання однорідного ряду координат активних референцних станцій України на основі опрацювання даних GNSS -спостережень за 2015-2017 рр.

Описується історія формування мереж перманентних GNSS станцій у світі та Європі, а також активних референцних GNSS станцій на теренах України. Приведено відомості про сучасні земні системи відліку та їх практичні реалізації. Розглянуто технологію отримання GNSS даних від операторів мереж активних референцних станцій України та сусідніх країн. Дані отримано від більше ніж 150 станцій, на яких проводились GNSS - спостереження у 2015-2017 рр. Описано технологію опрацювання даних спостережень з використанням програмних пакетів GAMIT/GLOBK та GIPSY-OASIS. Координати більшості станцій отримано у поточній референцній системі IGB08. Проведено трансформування остаточних координат у референцні системи ETRS89/ETRF2000 та UCR-2000.

Ключові слова: перманентні GNSS станції, активні референцні GNSS станції, референцні системи, системи координат, програмне забезпечення.

## 1. Загальні відомості

Можливості супутникових технологій достатньо ефективні та універсальні, а тому їх широко застосовують при розв'язанні геодезичних задач найвищої точності. З урахуванням цього потреба у тимчасових базових станціях, що донедавна були основою відносного методу при GNSS спостереженнях, практично відпала. Сьогодні облаштовуються станції, що працюють за принципами глобальних перманентних станцій IGS (International GNSS Service) чи, наприклад, регіональних EUREF (Reference Frame Sub-Commission for Europe). Такі станції називають референцними станціями, оскільки їхні координати ретельно визначаються, уточнюються, тобто їх безпосередньо моніторять.

На відміну від «класичних» перманентних, референцні станції об'єднуються у локальну/національну мережу і працюють для реалізації RTK (Real Time Kinematic)-технології. У цьому випадку вони стають активними референцними станціями, тобто станціями, які у режимі реального часу «спілкуються» зі своїм обчислювальним центром. Власне саме тому і виникли нові поняття – «активна референцна станція» та «активна мережа референцних станцій».

У геодезичному сенсі активна мережа референцних станцій є мережею згущення від мережі перманентних станцій, хоча й вони відрізняються своїми функціями, точністю, інфраструктурою тощо.

Якщо основною геодезичною задачею мережі перманентних станцій IGS та її складової EPN (European Permanent Network) є підтримання загальноземної референцної системи координат ITRS та її практичних реалізацій ITRF (за допомогою всіх доступних методів космічної геодезії) чи IGS/IGb (на основі тільки GNSS), то завданням активних мереж референцних станцій як мереж згущення від IGS/EPN є координатне забезпечення користувачів за рахунок поширення реалізацій загальноземних / регіональних / національних референцних систем на локальний рівень.

Точність реалізацій ITRF/IGb для перманентних станцій на разі становить 3-5 мм для координат та менше 1 мм/рік для швидкості їх зміни. Такої точності досягають за певних умов розташування антени приймача і при стабільному режимі роботи станції протягом декількох років.

Точність мережі згущення, тобто мережі активних референцних станцій, зважаючи на її локалізацію і конфігурацію, розташування, стабільність кріплення та калібрування антен GNSS -приймачів, тривалість їхньої безперервної роботи тощо, не повинна перевищувати 1-2 см. Це пояснюється тим, що послуги мережі активних референцних станцій (технології RTK та віртуальних референцних станцій) повинні гарантувати користувачам, що виконують знімальні топографо-геодезичні роботи, точність визначення координат на рівні 3-5 см, а їх використання у звичному статичному режимі – 2-3 см.

Інфраструктура мережі активних референцних станцій обов'язково повинна включати відповідне програмне забезпечення, яке на основі даних із таких станцій у режимі реального часу формує мережевий розв'язок – основу всіх GNSS -послуг для користувачів. Рівень цих послуг забезпечується репрезентативністю опорних координат референцних станцій, який контролюється мережевим програмним забезпеченням шляхом їх моніторингу, та якісними спостереженнями на цих станціях.

Відповідно до резолюції № 2, прийнятої підкомітетом EUREF на симпозиумі EUREF у м. Gavle, Швеція (2 червня 2010 р.), було вирішено, що реалізація Європейської земної референцної системи (ETRS89) - ETRF2000 стане опорною референцною системою для мереж активних референцних станцій Європи.

Отже, для функціонування мережі активних референцних станцій особливе значення має технологія опрацювання GNSS -спостережень для встановлення та моніторингу їх координат.

Перша в Україні мережа активних референцних станцій - ZAKPOS була створена у 2009 році на території Закарпатської обл. На етапі формування цієї мережі та її функціонування необхідно було прийняти опорну систему відліку координат (референцну систему) та встановити її належні зв'язки з національною системою відліку УСК-2000. Розробниками ще тоді було прийнято, що референцні станції ZAKPOS повинні реалізовувати Європейську земну референцну систему (ETRS89) на території України. Тобто активні референцні станції повинні бути пунктами згущення цієї референцної системи на тій території, яку вони покривають. Оскільки реалізацією референцної системи ETRS89 у 2009 р. була ETRF2000, то, відповідно, така система отримала назву ETRF2000-UA. З 2009 р. реалізація ETRF2000-UA базується на даних GNSS спостережень від окремих перманентних станцій мереж IGS/EPN, всіх доступних референцних станціях України і близького зарубіжжя та GNSS-спостереженнях на періодично діючих станціях Української постійно діючої (перманентної) мережі спостережень глобальних навігаційних супутникових систем (УПМ ГНСС).

## 2. Глобальні/континентальні мережі перманентних GNSS станцій

До глобальних/континентальних мереж перманентних GNSS станцій відносять мережі IGS та EPN.

Мережа IGS складається із сукупності різнорідних станцій, що управляються різними організаціями і установами, які об'єднали свої ресурси під егідою IGS для досягнення найвищих критеріїв точності в глобальному позиціонуванні. Хоча строгі правила їх функціонування не узгоджуються з добровільним характером діяльності IGS, проте учасники цього процесу погоджуються дотримуватись стандартів і конвенцій, що містяться в технічних регламентах, які забезпечують стабільно високу якість мережі IGS і її продуктів. Поскілки особливе значення для IGS має стабільне, довгострокове функціонування мережі, то зміни в конфігурації або умовах ведення спостережень будь-якої станції повинні бути ретельно спланованими, щоб мінімізувати «розриви» в часових рядах координат цієї станції.

Особливу увагу в мережі приділяють тим станціям, які вносять вклад в реалізацію Міжнародної земної референцної системи (ITRF). У регулярно оновлювальному файлі IGSXX.snх перераховуються станції, які сприяють системі відліку IGS. Їхня загальна кількість коливається в межах 800-1000 станцій, а опорних – 127 станцій. Серед цієї кількості є вісім українських станцій, в тому числі чотири опорних: CRAO (Симеїз, Крим), GLSV (Голосієво-Київ), POLV (Полтава), UZHL (Ужгород).

Основною метою мережі IGS є гарантування неперервного доступу користувачів до даних спостережень і продуктів. Мережа дає можливість отримання GNSS даних в різних часових затримках: від щоденних/щогодинних RINEX файлів до потоків безперервних даних у режимі реального часу та продуктів у вигляді орбіт супутників, координат станцій спостережень і швидкостей їх змін тощо. Отримання IGS даних і продуктів (GNSS Data & Product) можливе через доступні сервери чотирьох світових центрів зберігання даних: **CCDIS** (Crustal Dynamics Data Information System), **SOPAC** (Scripps Orbit and Permanent Array Center), **IGN** (Institut Geographic National), **KASI** (Korea Astronomy and Space Science Institute) та додаткового через сервери регіональних центрів зберігання даних (для Європи це **BKG** - Bundesamt für Kartographie und Geodäsie). Дванадцять центрів аналізу (Analysis Centers) та ряд асоційованих центрів аналізу використовують GNSS дані для створення IGS продуктів.

Серед таких центрів є: CODE - Center for Orbit Determination in Europe (Швейцарія), JPL - Jet Propulsion Laboratory (США), MIT - Massachusetts Institute of Technology (США) тощо. Більшість розв'язків та продуктів IGS генеруються за допомогою останніх версій програмного забезпечення Bernese GNSS Software (CODE), GIPSY/OASIS (JPL) та GAMIT/GLOBK (MIT).

Центри аналізу IGS в даний час забезпечують щоденне визначення координат станцій та швидкостей. На основі цих розв'язків виробляється комбінований (об'єднаний) продукт IGS. Ці комбіновані розв'язки і вважаються офіційними продуктами IGS, які дають свій вклад в реалізації ITRF.

З моменту початку розвитку ITRF та появи поліпшення позиціонування, національні геодезичні агенції здійснили значні зусилля для переосмислення та модернізації континентальних/національних геодезичних референцних систем, щоб вони були сумісні з ITRF. Наприклад, European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89), North American Datum of 1983 (NAD83), Geocentric Datum для Австралії (GDA) та інші континентальні/національні геодезичні системи пов'язані з ITRF за допомогою традиційно прийнятих параметрів та формул трансформування, і часто визначаються фіксованими координатами в певну епоху. Для реалізацій континентальних геодезичних референцних систем були створені відповідні інфраструктури. Така інфраструктура складається з двох основних компонентів: (1) мережа станцій спостережень; і (2) асоційована континентальна служба у складі фахівців та адміністраторів, які підтримують її функціонування.

EPN (European Permanent Network) – це європейська GNSS-мережа, що була організована в 1995 році. Склад станцій не залишався постійним: з року в рік кількість станцій невпинно збільшувалась, але і деякі станції припиняли свою роботу. Станом на початок 2018 р. у мережу EPN входило понад 300 GNSS станцій (див. рис.1).

На основі багаторічних часових серій координат та швидкостей із регулярних EPN-розв'язків, станції EPN класифікують за певними критеріями якості і тривалості доступного інтервалу часу спостереження.

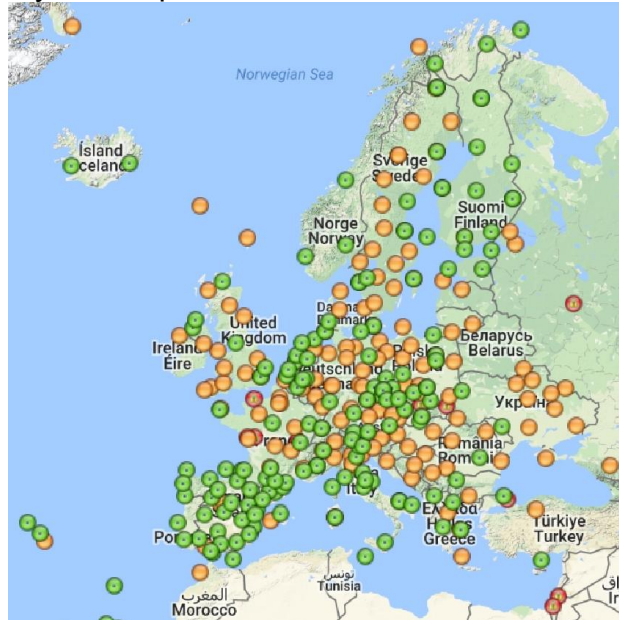


Рис. 1. GNSS-станції мережі EPN (початок 2018 р.)

Згідно цих критерії станції мережі EPN ділять на два класи:

- клас\_A: <1 см точності координат ETRS89 для будь-якої епохи та <1 мм/рік швидкості їх зміни;
- клас\_B: <1 см точності координат ETRS89 для епохи з мінімальною дисперсією щодо середньої епохи. Швидкості при цьому не публікуються.

Тільки станції класу А вважаються придатними в якості опорних станцій для згущення національної GNSS мережі в ETRS89.

На території України діє 14 перманентних GNSS станцій, включених до мереж IGS/EPN. Коротка характеристика їхньої діяльності в роках представлена на рис. 2.

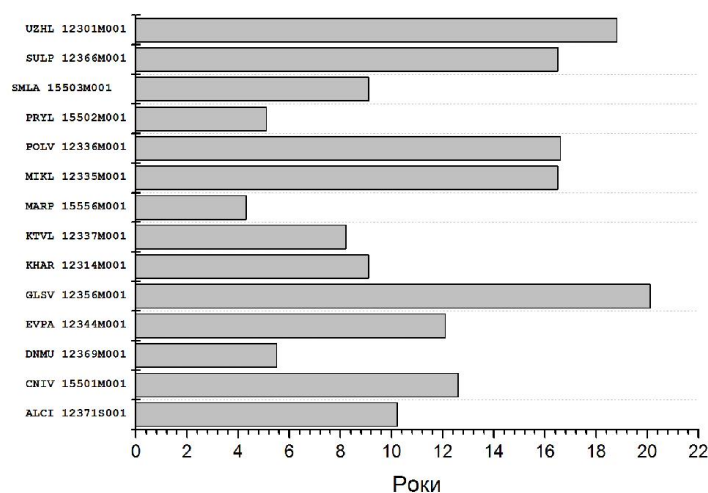


Рис.2. Тривалість роботи українських перманентних GNSS станцій, що працюють в мережі EPN/IGS (грудень 2017 р.)

Під час кампаній із згущення 7 станцій EPN в Україні мали категорію А та використовувались у реалізації ETRF2000-UA, тоді як станції класу В: GLSV 12356M001, KHAR 12314M001, KTVL 12337M001 та SMLA 15503M001 використовувалися як рядові GNSS-станції. Треба зазначити, що станції ALCI 12371S001 та EVPA 12344M001 на даний час не працюють, а станції PRYL 15502M001, MARP 15556M001 та DNMU 12369M001 ще мають порівняно малу тривалість спостережень і не включені до загальноєвропейського аналізу.

### **3. Національні мережі референцих GNSS станцій**

Якщо мережа перманентних станцій є фактично опорною фундаментальною мережею, що покликана вирішувати науково-технічні задачі найвищої точності, то мережа референцих станцій повинна донести до користувачів, що працюють в області координатного забезпечення, можливість практичного отримання координат будь-якої доступної для супутникових технологій точки на земній поверхні чи у навколишньому просторі з достатньою точністю (см-метри) та оперативністю.

У світі та Європі зокрема подібні мережі активно розвиваються від початку 2000 рр. Якщо на початковому етапі ці мережі мали майже виключно державний статус, то згодом почали з'являтися і приватні мережі референцих станцій. Їхня робота на території окремої країни може перекриватися або навіть дублюватися. Користувач має право вибору користування послугами конкретної мережі, якщо вони задовільняють (у розумінні якості і ціни) його запитам.

Отже, на відміну від «класичних» перманентних станцій, референцих станції мають деякі свої особливості. Серед них:

- 1) Густота розміщення є набагато щільнішою;
- 2) Вимоги до встановлення антен є менш прискіпливими;
- 3) Немає стандартизованого підходу до вибору обладнання на станції;
- 4) Можливість роботи у режимі реального часу (активні референцих станції).

Основною метою створення таких референцих станцій є побудова GNSS інфраструктури для реалізації RTK технології. У цю інфраструктуру, крім референцих станцій, входить також обчислювальний центр (оператор мережі), засоби комунікації (Інтернет-зв'язок) та спеціалізоване мережеве програмне забезпечення.

На даний час на території України функціонують декілька мереж активних референцих станцій, створених у 2009-2012 рр.. До найбільших із них можна віднести: ZAKPOS, ТНТ-ТPI, System Solutions. Мережі з меншою кількістю станцій: «GEOTERRACE» від Львівської політехніки та NGCNet від компанії «НГЦ» (м.Харків). Вже тривалий період функціонують активні референцих GNSS станції СКНЗУ (Система космічного навігаційного забезпечення України) від Державного космічного агентства, від групи компаній «Є.П.С.» (м.Харків). Є в Україні і поодинокі активні референцих станції, що належать різними власникам. Загальна кількість станцій постійно змінюється і за приблизними підрахунками на середину 2017 р. їхнє число складало десь біля 200.

Розглянемо коротко історію створення мереж активних референцих станцій в Україні. Перший проект мережі активних референцих GNSS -станцій на території України ZAKPOS (Transcarpathian Position Determination System) було створено у 2008 р. Ініціативною групою за приватні кошти було придбано відповідне обладнання, яке оптимально розмістили по території Закарпатської області, а обчислювальним центром мережі було обрано м. Мукачеве. Мережу побудовано на основі апаратного та програмного забезпечення фірми Trimble за принципами та вимогами EUPOS, розробленими для Європейського регіону.

Упродовж 2009-2011 рр. мережу ZAKPOS було розвинуто на території сусідніх областей: Львівської, Волинської, Рівненської, Чернівецької, Івано-Франківської, Тернопільської та Хмельницької. У 2010-2011 рр. було підписано Угоди про обмін даними із прикордонними з Україною сусідніми державами: Румунією, Словаччиною, Угорщиною, Польщею, а дещо пізніше (2013 р.) із Молдовою. Фактично на кінець 2012 р. мережа ZAKPOS набула статусу мережі активних референцих GNSS -станцій Західного регіону нашої країни. Після того, як відбулися двосторонні переговори з іншими операторами референцих станцій щодо сумісного використання даних спостережень, мережа охопила своїми послугами практично всю територію України, за винятком деяких крайніх районів північного сходу та Криму.

Паралельно із розвитком мережі ZAKPOS розширювалась мережа референцих GNSS -станцій Державного космічного агентства України (ДКАУ), основним завданням

якого стало підтримання системи координатно-часового і навігаційного забезпечення країни (СКНЗУ). Ця система мала на меті в реальному часі досягти точності визначення координат будь-якої точки близько одного метра по всій території країни, субметрового рівня на відстані до 150 км від референцних станцій та сантиметрового в 20-кілометровій зоні поблизу кожної станції. Не вдаючись до аналізу функціонування мережі станцій ДКАУ, зазначимо, що практично всі вони були включені в мережу ZAKPOS і сприяли забезпеченню нею послуг.

У 2012 р. з'явилися перші подібні референцні станції Львівської політехніки (мережа Geoterrace), компанії «Навігаційно-геодезичний центр» (мережа NGCNet), групи компаній «Є.П.С». На даний час їхня діяльність носить локальний характер (Geoterrace, NGCNet) або вони лише підтримують роботу окремих станцій («Є.П.С»). Як уже зазначалося вище, за взаємною згодою більшість із цих станцій включено у мережеве обслуговування ZAKPOS з метою надання користувачам відповідних послуг на території всієї країни.

Самостійними операторами мережі референцних станцій є дистриб'ютор японської корпорації TOPCON в Україні – фірма TNT-TPI (мережа TNT GNSS Network – це близько 50-ти власних станцій) та спільне українсько-швейцарське підприємство – приватне акціонерне товариство "System Solutions" (мережа System.NET складається з майже 100-та власних станцій).

## 4. Глобальні, регіональні та національні референцні системи координат

### 4.1. Загальні відомості про референцні системи

На даний час загальноземна геоцентрична референцна система (земна система відліку) є базисом для розв'язування різних наукових і практичних завдань і забезпечує єдність координатних визначень. Реалізацією такої системи є: сукупність станцій/пунктів геодезичної мережі, які закріплюють її на земній поверхні, значення координат, присвоєних цим станціям/пунктам, а також значення їх середньорічних швидкостей. Така практична реалізація земної системи координат називається геодезичною відліковою основою.

Загальновизнаним світовим еталоном земної системи відліку є Міжнародна земна референцна система ITRS (International Terrestrial Reference System). Вона представляє собою ідеальну систему координат, що спільно обертається разом із Землею в її добовому русі та просторі. Система ITRS була прийнята Міжнародною геодезичною і геофізичною спілкою у 1991 р.. Відповідальним за впровадження системи ITRS є Міжнародна служба обертання Землі та референцних систем - IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service). Найточнішою фізичною реалізацією ITRS є ITRF (International Terrestrial Reference Frame). Головною складовою ITRF є мережа опорних станцій/пунктів, на яких встановлені вимірювальні інструменти різних методів космічної геодезії: радіоінтерферометрії з наддовгою базою (VLBI), лазерної локації супутників (SLR), глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS) і системи доплерівських вимірювань DORIS. ITRF визначається як реалізація ITRS, шляхом визначення її початку, орієнтації осей, масштабу та їх часових змін.

ITRF розвивалася поетапно і всього, починаючи з версії ITRF88, було опубліковано 13 її реалізацій. До останнього часу найбільшого поширення набула версія ITRF2008, рекомендована до використання IERS, а в 2016 році була опублікована нова реалізація - ITRF2014.

Розвиток і використання глобальних навігаційних супутникових систем в даний час дають можливість найбільш простим і ефективним способом визначити координати в загальноземній системі відліку. Разом з тим, в кожній GNSS реалізована своя версія такої системи відліку: в ГЛОНАСС - ПЗ-90.11; в GPS - WGS 84 (G1762); в Beidou - CTRF2000 (2000.0); в Galileo - GTRF16v01. Всі ці версії до теперішнього часу з досить високою точністю узгоджені з ITRF2008. Таке узгодження забезпечує контроль якості реалізації кожної системи і забезпечує принципи сумісності і взаємодоповнюваності існуючих GNSS.

Система відліку ETRS89, яка реалізується як однорідне координатне середовище, є достатньо надійним згущенням ITRF<sub>yy</sub> та дуже добре підходить в якості геодезичної референцної системи координат. Зважаючи на географічне розташування України (найбільш стабільна частина європейської тектонічної плити) можна стверджувати, що використання національної реалізації референцної системи ETRS89 є найбільш оптимальним напрямом згущення міжнародної системи відліку ITRS у її реалізаціях.

### 4.2 Реалізації референцних систем

Можна виділити наступні реалізації референцних систем координат, які мають безпосереднє використання у сучасній геодезичній практиці:

- ITRF реалізація (глобальна): комбінування різних технологій космічної геодезії (VLBI, SLR, DORIS, GNSS);
- IGS реалізація (глобальна): лише на основі GNSS;
- ETRF реалізація (фіксація тектонічної плити): відношення до ITRF/IGS
- ITRF2000, 2005.0 Для кожної референцної системи вказується датум (**datum**) або реалізація та епоха цієї реалізації. У сфері геодезії датум – важлива складова референцної системи у вигляді деякої апроксимації поверхні Землі, відносно якої

проводяться координатні визначення шляхом геодезичних вимірювань. В цьому плані історично використовуються такі поняття: горизонтальний датум - для двовимірного опису точки на поверхні Землі (за широтою та довготою або іншою системою координат), вертикальний датум - для одновимірного опису точки на поверхні Землі (вимірювані висоти або підводні глибини).

Наприклад, для реалізації системи ITRF2008, 2017.0 це буде:

- референсна система – ITRS;
- датум/реалізація – 2008, в даному випадку це рік укомплектування системи;
- епоха реалізації – 1 січня 2017 р.

Якщо для реалізацій ITRF/IGS обов'язковим атрибутом є вказування епохи задання координат, наприклад, IGb08, 2017.245, то для реалізації ETRF2000 «теоретично» цей атрибут можна опускати. Проте вказування епохи для координат ETRF2000 є важливим у тому аспекті, коли потрібно здійснити зворотній перехід від них до координат ITRF/IGS.

Для статичних геодезичних референцних систем координат, наприклад, УСК-2000 вказування епохи реалізації є беззмістовним.

Нижче наводиться короткий огляд реалізацій найбільш поширених референцних систем координат.

### **ITRF - International Terrestrial Reference Frame**

Це була перша 4-вимірна система відліку: тобто в цій системі були визначені не тільки положення (X, Y, Z), але й швидкості станцій спостережень. Глобальна (геоцентрична) система ITRF заснована не тільки на даних GPS (GNSS), але і на додаткових наборах даних, включаючи VLBI (Very Large Baseline Interferometry), SLR (Satellite Laser Ranging) і DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite). Ці технології дозволяють об'єднувати тектоніку плит і рухи земної поверхні через відповідне розташування станцій спостережень. Вона була створена в 1988 році Міжнародною службою обертання Землі (IERS) для підтримки високоточного координування і від того часу зазнала багато оновлень (реалізацій).

Останньою реалізацією до кінця 2015 р. була **ITRF2008** (Міжнародна земна референсна система 2008). На початку 2016 р. з'явилася чергова реалізація ITRF - **ITRF2014**.

### **IGS08 (IGb08) - International GNSS Service**

Це глобальна (геоцентрична) система, заснована тільки на GPS/GNSS даних вимірювання. Була розроблена за принципом сумісності з положеннями станцій в ITRF2008, тому вона не є новою системою, але відрізняється лише тим, що більш часто оновлюється ніж ITRF2008. Хоча через часте оновлення координати конкретної станції IGS08 можуть дещо відрізнятися від відповідних координат ITRF2008, проте їх швидкості залишаються ідентичними.

Перша реалізація IGS08 епоха 2005.0 була введена в 2011 році.

### **WGS84 - World Geodetic System 1984**

WGS84 є абсолютною системою визначення координат місця спостереження без будь-яких наземних засобів управління, а виключно на основі супутникових орбіт. Вона була створена Міністерством оборони США (DoD) для супутникових систем. Перша реалізація WGS84 була створена в 1987 році і базувалася виключно на доплерівських вимірюваннях. Із 1994 року у реалізації WGS84 основним вимірювальним засобом стала система GPS, а референсна система WGS84 стала асоціюватися із ITRF.

Нижче показані головні оновлення референцної системи WGS84:

- WGS84(G730) з 1994 р., асоціювалася як ITRF91;
- WGS84(G873) з 1997 р., асоціювалася як ITRF94;
- WGS84(G1150) з 2002 р., асоціювалася як ITRF2000;
- WGS84(G1674) з 2012 р., асоціювалася як ITRF2008.

Позначення «G з цифрами» означає GPS і номер тижня, починаючи з 2 січня 1994 року.

Останньою реалізацією WGS84 є **WGS84 (G1674)**.

### **ETRS89 - European Terrestrial Reference System 1989**

ETRS89 є загальноземною геоцентричною референчною системою для Європи, яка базується на основі стану глобальної (геоцентричної) системи ITRF, що зафіксований на 1 січня 1989 року, тобто ITRF89. Враховуючи, що Євразійська континентальна плита є, в основному, статичною, то, відповідно, і ETRS89 забезпечує Європу референчною системою, що є практично однорідною і не залежить від часу. Звідси виходить, що в системі ETRS89 координати станцій, розташованих на стабільній частині Європейської плити, залишаються незмінними.

Отже, реалізації системи ETRS89 тісно і нерозривно пов'язані з реалізаціями Міжнародної земної референчної системи ITRF. Це дозволяє строго її визначити через математичні формули трансформування між двома системами.

Багато країн у Європі протягом останніх двадцяти років визначили свої нові національні системи відліку (геодезичні референчні системи) безпосередньо в ETRS89 як мережі згущення від міжнародних IGS станцій.

З 1997 року система ETRS89 реалізовується за допомогою EUREF перманентної GNSS мережі – EPN. Мережа EPN використовується сьогодні для згущення національних реалізацій референчних систем. Національні GNSS мережі безпосередньо пов'язані з EPN і / або IGS станціями для реалізації системи відліку.

Останньою офіційною реалізацією ETRS89 є **ETRF2014**.

### **УСК-2000 – національна геодезична референчна система**

УСК-2000 є референчною системою для України, яка базується на прямому трансформуванні (прийнятих параметрах трансформування) щодо реалізації ITRF2000, епохи 2005.0.

Основні етапи впровадження геодезичної референчної системи координат УСК-2000:

- побудова періодично діючої мережі GNSS спостережень (16-ть станцій);
- проведення супутникових спостережень на пунктах періодично діючої мережі, перманентних GNSS станціях та їх опрацювання;
- моделювання параметрів геодезичної референчної системи координат;
- проведення супутникових спостережень на пунктах астрономо-геодезичної мережі України (більше 800-т пунктів) та їх опрацювання;
- створення та наповнення банку геодезичних даних пунктів ДГМ України;
- загальне вирівнювання ДГМ України та каталогізація пунктів;
- встановлення параметрів зв'язку між національною геодезичною референчною системою УСК-2000 та іншими референчними системами координат;
- розроблення цифрової моделі та програмно-методичного комплексу трансформування координат із державної системи СК-42 до національної геодезичної референчної системи УСК-2000;
- введення геодезичної референчної системи координат УСК-2000, як складової національної геодезичної системи відліку.

При моделюванні параметрів геодезичної референчної системи координат дотримувались наступних вимог:

- геометричні параметри відлікової поверхні (еліпсоїда) нової системи координат повинні бути такими ж, як параметри еліпсоїда Красовського;
- координатні осі нової референчної системи повинні бути паралельними відповідним координатним осям загальноземної системи ITRF, а метрика цих систем повинна бути однаковою (масштабний коефіцієнт дорівнює одиниці);

- висоти квазігеоїда над відліковою поверхнею нової системи координат та відхилення прямовисних ліній повинні бути мінімальними;
- абсолютні значення різниць координат нової референцної системи та системи координат СК-42 повинні бути мінімальними.

Для загального урівнювання, крім пунктів періодично діючої мережі GNSS спостережень та пунктів супутникової геодезичної мережі, які суміщені в плановому положенні з існуючими пунктами ДГМ 1-го та 2-го класів (всього біля 800 пунктів), були залучені всі доступні пункти класичної геодезичної мережі. Так дані лінійно-кутових спостережень були отримані на 21768 пунктів державної геодезичної мережі 1, 2, 3, 4 класів. До цих даних було долучено ще 1739 пунктів геодезичної мережі 2, 3, 4 класів, які не були включені у попередні каталоги координат, оскільки роботи на них були завершені дещо пізніше, а також ще біля 1200 пунктів, які були визначенні у різні роки, переважно в кінці ХХ ст. на окремих об'єктах.

Координати пунктів періодично діючої мережі GNSS спостережень та пунктів супутникової геодезичної мережі, отримані в процесі виконання робіт в системі ITRS/ITRF2000 на епоху 2005.0, були трансформовані у систему координат УСК-2000 за змодельованими параметрами зв'язку та прийняті за вихідні (опорні) при урівнюванні. Таким чином загальне урівнювання ДГМ України було виконане в системі координат УСК-2000. Середні квадратичні похибки координат склали біля 3-5 см.

## 5. Опис проекту згущення ETRF2000-UA

### 5.1. Передумови проекту

Перші кроки з побудови постійнодіючої мережі GNSS спостережень в Україні розпочалися у 1995 році з реалізації проекту Технічної робочої групи Підкомісії EUREF – UKRREF95. У відповідності з загальноприйнятою тоді методикою національного згущення мережі EUREF планувалось провести п'ятидобові GPS спостереження на 16 спеціально побудованих пунктах з середніми відстанями між ними близько 200-300 км. Такі пункти отримали назву періодично діючі, оскільки GPS спостереження планувалося проводити коротко тривалими (не більше одного тижня) кампаніями не частіше ніж через декілька років.

Характеристики мережі, побудованої за проектом EUREF-UKR95, наведені у табл.1.

Таблиця 1. Відомості про періодично діючі пункти проекту EUREF-UKR95

№ з/п	Повна назва пункту	Код пункту	Ідентифікатор пункту	Місцезнаходження Широта/Довгота
1	Вапнярка (сmt.Томашпіль)	016	VAPN	48°34' / 28°31'
2	Каховка	004	KACH	46°48' / 33°29'
3	Кіровоград	005	KIRO	48°32' / 32°17'
4	Київ (ГУГК)	013	GUGK	50°28' / 30°38'
5	Львів (с.Брюховичі)	015	LVIV	49°55' / 23°57'
6	Одеса (с.Крижанівка)	017	ODES	46°34' / 30°48'
7	Суми	001	SUMY	50°52' / 34°46'
8	Ужгород (с.Деренівка)	б/№	UZHD	48°34' / 22°19'
9	Чернівці	008	CHER	48°16' / 25°59'
10	Шацьк (с.Світязь)	010	SHAT	51°28' / 23°49'
11	Шепетівка	б/№	SHEP	50°10' / 27°01'
12	Маріуполь	003	MARI	47°05' / 37°27'
13	Сімеїз		SIME	44°25' / 34°00'
14	Полтава	002	POLT	49°34' / 34°24'
15	Алчевськ (с.Михайлівка)	009	ALCH	48°27' / 38°54'
16	Миколаїв	019	MIKO	46°58' / 31°58'

Побудовані пункти в переважній більшості (окрім пункту Сімеїз) є турами (бетонний моноліт) різної висоти (від 0.1 до 3 м) та глибини закладки (до 3 м) з маркою для примусового центрування.

Основні функції періодично діючої мережі GNSS спостережень зводились до задавання та «оперативного» відтворення загальноземної системи координат ITRS та континентальної ETRS89.

На жаль завершити тоді повноцінно спостереження, згідно з планом, не вдалось з причини деяких організаційних прорахунків. Були отримані дані спостережень десь на 80% від запланованого і це дало можливість провести перше попереднє їх опрацювання у 1996 р.. Головним недоліком виконаного опрацювання була відсутність надійної прив'язки побудованої мережі до перманентних станцій Європи, тому завдання цієї кампанії не можна вважати досягнутими.

Процес згущення EUREF мережі на території України було відновлено тільки у 2000 році. За період 2000-2007 рр. було проведено цілий ряд GPS-кампаній на пунктах періодично діючої GPS мережі (УПМ ГНСС) та окремих пунктах Державної геодезичної мережі (ДГМ). З появою перших перманентних GPS-станцій мережі IGS/EPN на території України процес згущення мережі EUREF можна було вважати успішним.

Зазначимо, що опрацювання даних GPS спостережень, які проводилися від 2000 р., виконувалося у Науково-дослідному інституті геодезії і картографії. Результатом цих опрацювань стало отримання координат УПМ ГНСС та окремих пунктів ДГМ у різних реалізаціях ITRS на епоху виконаних спостережень. Важливим моментом при цьому є те, що носіями реалізацій ITRS виступали українські та закордонні перманентні GPS-станції IGS/EPN, координати яких приймалися за опорні.

Шляхом урівнювання мережі УПМ ГНСС разом з окремими пунктами ДГМ було реалізовано мережу згущення у вигляді національної реалізації ITRF2000 на епоху 2005.0. Використавши змодельовані параметри трансформування між реалізацією ITRF2000, епоха 2005 та геодезичною референчною системою УСК-2000, було отримано координати пунктів УПМ ГНСС та окремих пунктів ДГМ в системі УСК-2000. Саме ці пункти приймалися за опорні для загального урівнювання ДГМ. Результатом такого урівнювання було отримання координат всіх пунктів ДГМ у геодезичній референційній системі УСК-2000. З 2004 р. пункти ДГМ підтримують національну референцну систему УСК-2000 і використовуються як опорні пункти для згущення мереж нижчих класів за допомогою як GNSS, так і класичних геодезичних методів.

Таким чином, в Україні є такі варіанти згущення геодезичних мереж (див. рис.3):

- 1) від перманентних GNSS-станцій IGS/EPN - для отримання координат в реалізаціях ITRS/ETRS89;
- 2) від перманентних GNSS-станцій IGS/EPN (попередньо трансформували їх координати до реалізації ITRF2000, епоха 2005) - для отримання координат в УСК-2000;
- 3) від станцій УПМ ГНСС та пунктів ДГМ - для отримання координат в УСК-2000.

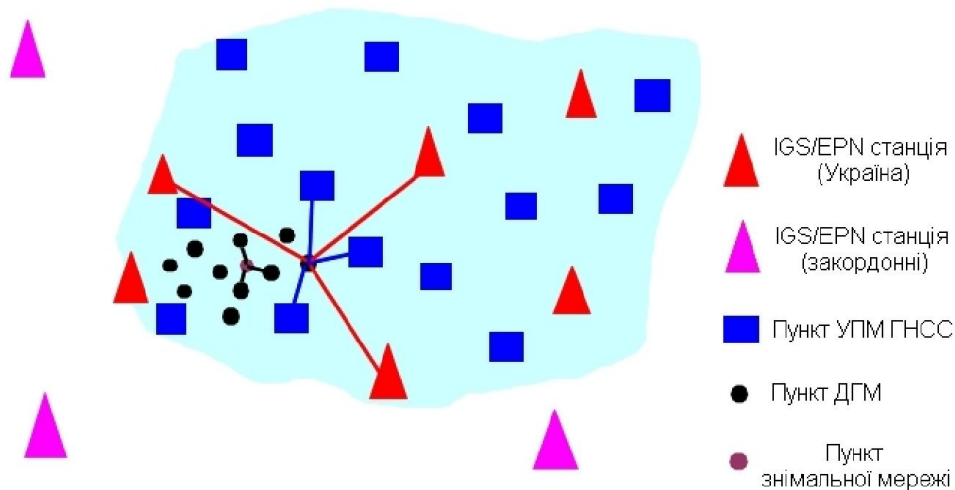


Рис.3. Можливі варіанти згущення геодезичної мережі

В даному звіті приведена методика та результати згущення ETRS89 у її реалізації ETRF2000 - ETRF2000-UA на основі використання перманентних GNSS-станцій IGS/EPN та активних референційних станцій України. Результатом такого згущення є зведений каталог координат зазначених станцій у референційних системах ETRF2000-UA та УСК-2000.

## 5.2. GNSS станції та пункти геодезичної мережі

В проект згущення ETRF2000-UA було включено понад 150 станцій та пунктів. Були використані референсні GNSS станції та геодезичні пункти, що належать до різних типів геодезичних мереж. Ми можемо виділити деякі категорії станцій та пунктів за їхнім типом та місцезнаходженням:

1) GNSS станції, що працюють у постійному режимі спостережень:

- опорні станції, розташовані за кордоном України, що працюють в мережі EPN (тільки клас А) -17 станцій,
- опорні станції, що розміщуються на території України і працюють у мережі EPN (клас А і В) –12 станцій,
- референсні станції активних мереж України (за виключенням станцій EPN – біля 100 станцій),
- закордонні референсні станції, що розташовані поруч із прикордонною зоною за межами України, і працюють в системі активних мереж України (вибрані станції з мереж: ASG-EUPOS, TPI NETpro, SKPOS, GNSSnet.hu, ROMPOS, MoldPOS) – 21 станцій.

2) Періодично діючі пункти GNSS-спостережень та геодезичні пункти (всі на території Західної України):

- фундаментальні пункти УМП ГНСС, на яких виконують періодичні GNSS-спостереження в рамках національних та міжнародних проектів –5 пунктів,
- геодезичні пункти ДГМ 1-го класу – 21 пунктів.

Перелік перманентних GNSS-станцій мережі EPN, що приймали участь в нашому опрацюванні, а також тип обладнання на них приведено у додатку С. У додатку D наведено схеми опорних мереж, що склалися із перманентних GNSS-станцій мережі EPN, та використовувалися при опрацюванні різними програмними пакетами.

Перелік референсних станцій України, що входять у різні мережі, і приймали участь в нашому опрацюванні, а також тип обладнання на них приведено у додатку Е. Там червоним кольором виділено тип обладнання, що не входить у стандартну класифікацію IGS, а їхні антени не мають доступних параметрів абсолютного калібрування фазового центру.

Перелік референсних станцій, що мають приналежність до операторів національних мереж сусідніх країн, і використовуються для отримання мережевого розв'язку на території України, приведено у додатку F.

Характеристики фундаментальних пунктів УМП ГНСС та геодезичних пунктів ДГМ 1-го класу, що розташовані у західній частині України, приведено у додатку G.

Пункти УПМ ГНСС та геодезичні пункти ДГМ мають безпосереднє відношення до національної геодезичної референсної системи УСК-2000, тому вони приймали участь у вимірвальних кампаніях для контрольної прив'язки референсних GNSS-станцій до цієї референсної системи. Тобто, ці пункти повинні були мати координати, виражені в одній і тій же реалізації референсної системи, і саме для того вони були включені в спостережну кампанію, але пізніше виключені із згущення ETRS89.

Розташування референсних GNSS-станцій та пунктів, що приймали участь у контрольній прив'язці до референсної системи УСК-2000, наведено на рис.4.

Всі референсні GNSS-станції працювали у безперервному режимі, що давало можливість отримувати повноцінні добові файли спостережень на періоди проведення спостережних кампаній на контрольній геодезичній мережі. GNSS вимірювання на періодично діючих пунктах УПМ ГНСС та геодезичних пунктах ДГМ проводились окремими спостережними підкампаніями в період з липня 2015 р. по грудень 2017 р. Такий значний період був зумовлений нашими організаційними та фінансовими спроможностями.

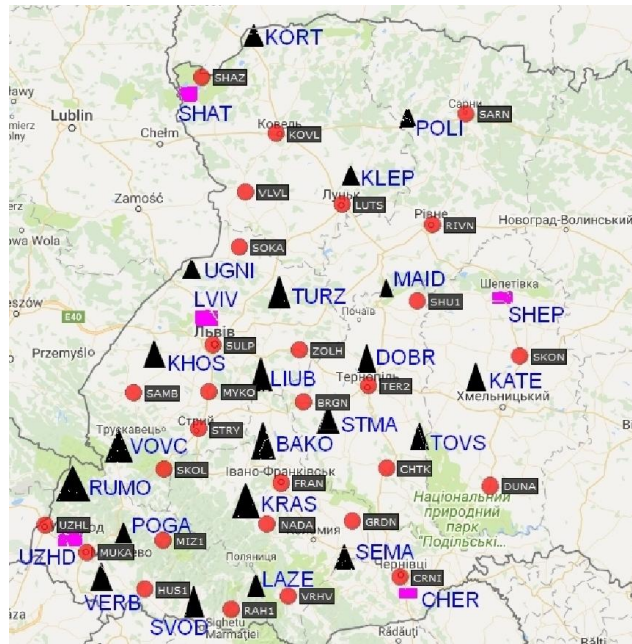


Рис.4. Схема контрольної геодезичної мережі (червоним кольором виділено референсні GNSS-станції, малиновим – пункти УПМ ГНСС, чорним – пункти ДГМ)

Усі GNSS-підкампанії базувалися на однаковій процедурі та параметрах:

- час спостереження для пунктів УПМ ГНСС – одна безперервна 24 год. сесія,
- час спостереження для пунктів ДГМ – 24 годинна сесія (з 12 до 12 год GPST наступного дня),
- кут піднесення – для всіх пунктів становив  $5^\circ$ .
- час реєстрації сигналів –  $5^s$ .
- част'я у одночасних спостереженнях мінімум три пункти.

В усіх підкампаніях були задіяні 5 GNSS приймачів: три приймачі від НУ «Львівська політехніка» і два приймачі від ДП «Закарпатгеодезцентр». Характеристики GNSS-обладнання, що приймало участь у підкампаніях спостережень, наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Відомості про GNSS обладнання

№	Власник	Приймач	Антенa
1	НУ «Львівська політехніка»	TRIMBLE R7 GNSS № 5136K22210	TRM55970.00
2	НУ «Львівська політехніка»	TRIMBLE R7 GNSS № 5136K22233	TRM55971.00
3	НУ «Львівська політехніка»	LEICA GX1230GG № 472884	LEIAX1202GG
4	ДП «Закарпатгеодезцентр»	Trimble 5700 № 0220398561	TRM41249.00
5	ДП «Закарпатгеодезцентр»	Trimble 5700 № 0220413465	TRM41249.00

Таким чином, усі доступні станції та пункти були включені в проект згущення, але не всі вони використовувались як згущення ETRS89 на території України. Референсні станції, розташовані в сусідніх країнах, необхідні для збільшення площі покриття реалізації референцної системи координат до кордонів України, і вони також важливі для розподілу послуг мереж активних референцих станцій.

## 6. Опрацювання даних GNSS спостережень

### 6.1. Підготовчий етап

Маючи певні напрацювання в розроблені технологій згущення мережі IGS/EPN та використання загальноєвропейської референційної системи координат ETRS89/ETRF2000 для мережі активних референційних GNSS-станцій ZAKPOS протягом 2009-20012 рр., на кафедрі вищої геодезії та астрономії Львівської політехніки з 2013 р. був створений Центр опрацювання GNSS –даних, що отримав назву проєкт WGA LPI.

Основною метою цього проєкту є збір та підготовка GNSS-даних із всіх доступних станцій спостережень, опрацювання даних GNSS –спостережень з використанням наукового програмного забезпечення, а також створення зведеного каталогу координат референційних станцій.

Згідно з рекомендаціями EUREF було використано організаційну схему, яка включає такі структури:

- **станції спостереження:** на них на постійній основі встановлено GNSS -приймачі та закріплено на геодезичних центрах антени, що безперервно спостерігають за супутниками і формують вихідні дані;
- **операційні центри:** тут перевіряють дані від станцій спостережень, перетворюють вихідні дані з формату приймача у незалежний формат RINEX, їх архівують та завантажують у центр даних відповідної мережі через Інтернет. У більшості випадків роль операційних центрів виконують самі станції через відповідний комплекс спеціалізованого програмного забезпечення або обчислювальні центри мережі;
- **центр даних регіональної мережі** шляхом відповідного сортування (годинних і добових файлів) збирає дані з усіх станцій спостережень, що входять у конкретну мережу, та операційних центрів і розміщує їх на своєму ftp-сервері. Для нас такими були центри даних від ZAKPOS і TNT-TPI.
- **центр аналізу даних** збирає дані із усіх центрів даних регіональних мереж та центру даних EPN з метою їх подальшого використання.

Схема формування GNSS-даних Центром аналізу LPI приведена на рис. 5.

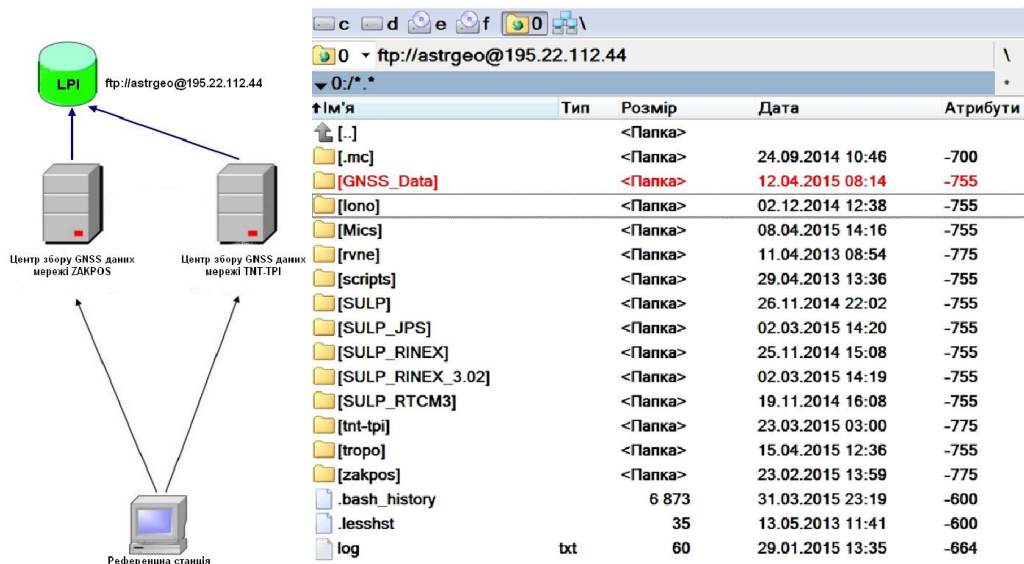


Рис.5 Схема організації потоків GNSS-даних

Добові дані з тридцятисекундним інтервалом спостережень від різних джерел надходять на сервер Львівської політехніки (ftp-сервер LPI: astrgeo@195.22.112.44) у форматі RINEX у папку GNSS\_Data (рис. 5), де в автоматичному режимі вони формуються блоками залежно від дня поточного GPS-тижня. Туди ж надходять дані

спостережень та продуктів IGS/EPN: файли GNSS-спостережень від перманентних станцій, точні й навігаційні ефемериди супутників GPS і ГЛОНАСС, параметри орієнтації Землі, параметри: поправок годинників супутників, фазових центрів антен супутників і приймачів, іоносфери, координати європейських перманентних станцій і швидкості їх зміни.

У ході попереднього опрацювання добових файлів автоматично перевіряється якість спостережень на рівні RINEX-файлів (програма TEQC) та у візуально-ручному режимі вилучаються станції з малою за часом тривалістю спостережень.

За станції спостережень нами було обрано 118 GNSS -станцій, з яких 12 – це станції IGS/EPN, 86 – референсні станції українських операторів, 20 – закордонні. Кількісний склад станцій спостережень мереж IGS/EPN, ZAKPOS та TNT-TPI, дані з яких використовувалися в опрацюванні, наведено у табл.3. Треба зауважити, що протягом останніх 5-ти років кількість станцій спостережень, що приймають участь в опрацюванні, постійно змінюється. Це пов'язано із процесом створення нових станцій, великими перервами в роботі та припинення роботи окремих станцій.

**Таблиця 3. Кількісний склад станцій GNSS спостережень (кінець 2017 р.)**

Назва мережі	Приналежність станцій	Кількість станцій
IGS/EPN		12/17
ZAKPOS	ZAKPOS	14
	СКНЗУ (Державне космічне агентство України)	12
	GEONET (НУ «Львівська політехніка»)	9
	NGCNet (Навігаційно-геодезичний центр)	3
	System.Net (ПрАТ «System Solutions»)	6
	EPS (Група компаній «Є.П.С.»)	6
	Закордонні (Польща, Словаччина, Угорщина, Румунія, Молдова)	20
TNT GNSS Network	фірма TNT-TPI	47

Через велику кількість станцій і складну конфігурацію мережі в процесі опрацювання нами застосовувалась блочна система, тобто окремі станції (близько 50-ти) об'єднуються в блоки. Ми розділили їх на три територіальні блоки, які охоплюють східну (блок E - east), центральну (блок C - center) і західну (блок W west) частини території України (табл. 4). До кожного блоку обов'язково входили всі вибрані нами для опрацювання перманентні IGS/EPN-станції, а координати однієї з них на попередньому етапі фіксувалися як опорні. Такими опорними станціями, враховуючи їх статус в ієрархії EPN, ми обрали перманентні станції SULP (м. Львів) для західного блоку, GLSV (м. Київ) – для центрального та MIKL (м. Миколаїв) – для східного блоку.

**Таблиця 4. Поділ мережі референцних станцій на блоки**

Станції	Блоки		
	західний	центральний	східний
Станції IGS/EPN	12/17	12/17	12/17
Національні референцні станції	32	40	27
Закордонні референцні станції	16	4	3
Всього станцій	60/65	56/61	42/47
Опорна станція	SULP	GLSV	MIKL

Зазначимо, що деяка кількість станцій одного блоку, крім перманентних IGS/EPN-станцій, входила і в сусідній блок, тобто окремі станції брали участь у подвійному опрацюванні. Таке «перекриття» блоків дозволяло аналізувати хід процесу опрацювання та оцінювати отримані результати.

Опрацювання даних GNSS -спостережень на більшості референцних станцій країни проводилось виключно за методичними рекомендаціями IGS і EPN, а практична реалізація виконувалась з використанням програмних пакетів GIPSY-OASIS v.6.3 та GAMIT/GLOBK v.10.5. Треба зауважити, що основним програмним забезпеченням, яке використовувалося в опрацюванні GNSS-даних був пакет GIPSY-OASIS v.6.3. Це було зумовлено більш вигідною автоматизацією процесу обчислень і навиками оператора. Пакет GAMIT/GLOBK v.10.5 використовувався, з одного боку, як контрольний засіб, а з другого – він був направлений на отримання комбінованих розв'язків з метою визначення швидкостей змін координат референцних GNSS-станцій з часом.

Процедура опрацювання передбачала потижневий хід процесу, починаючи з початкового дня тижня (0 – неділя) і закінчуючи його останнім днем (6 – субота).

Апріорні координати перманентних станцій і швидкості їх змін (8 станцій класу А зі списку IGS/EPN для пакету GIPSY і 23 станції, відповідно для GAMIT) вибиралися із <ftp://epncb.oma.be/pub/product/cumulative> у системі Igb08 на епоху 2005.0 (до 28.01.2017 р.), а для решти станцій їх спочатку отримували із попереднього етапу опрацювання, зафіксувавши лише одну опорну станцію (див. табл.4). Починаючи із 29.01.2017 р. (1934 GPS-тиждень) і по даний час, апріорні координати перманентних станцій (13 станцій класу А для пакету GIPSY і 22 станції, відповідно для GAMIT) приймаються у системі IGS14 на епоху 2010.0 (<http://www.epncb.oma.be/productservices/coordinates/>).

## **6.2. Основний етап обчислень**

Процес обчислень по окремих блоках станцій (частини мережі) базувався на методі мінімальних обмежень і передбачав:

- перетворення вхідних даних у внутрішні формати;
- попереднє опрацювання даних кодових спостережень, оцінювання поправок до годинників приймачів, розташованих на референцних станціях.
- опрацювання даних фазових спостережень, визначення моментів стрибків фази, виявлення викидів, малих інтервалів спостережень і спостережень за супутниками з кутом місця менше ніж 5°;
- маркування викидів, малих інтервалів спостережень і спостережень за супутниками з кутом місця менше як 5°;
- вилучення з опрацювання даних по супутниках з великою кількістю маркованих спостережень;
- обрання однієї з станцій мережі IGS/EPN за опорну;
- отримання добового розв'язку з фактичними значеннями фазових

неоднозначностей та оцінювання параметрів тропосфери.

У результаті отримуємо SINEX-файл розв'язку, який містить інформацію про станції, параметри опрацювання даних спостережень, результати опрацювання та оцінювання точності.

Наступним кроком опрацювання результатів спостережень за методом мінімальних обмежень стало застосування процедури трансформування координат за Гельмертом, тобто пошуку семи параметрів трансформації між координатами EPN-станцій, що визначаються центром аналізу EPN та приведених на поточну дату наших спостережень, і координатами тих самих станцій, обчислених за допомогою програмного пакету GIPSY-OASIS.

Результати опрацювання кожного блоку у вигляді gfile.pos та LPIXXXXD.snх сортуються по днях: D – номер дня в тижні (0,1,...,6) у межах поточного тижня: XXXX – номер GPS-тижня (1800,...) (див, рис. 6. в). Там же наводиться і файл LPIXXXXD.res з оцінкою точності розв'язку (у міліметрах), який формується на основі різниць координат станцій IGS/EPN, отриманих із опрацювання та за розв'язком EPN.

Після опрацювання блоків мережі за описаною вище технологією програмою AVED\_POS створюється добовий комбінований розв'язок, який формується в аналогічному форматі LPIXXXXD.ITR.

Кінцевим етапом процесу опрацювання є формування програмою AVEN тижневих комбінованих розв'язків LPIXXXX7.ITR на основі отриманих добових файлів, розміщених уже у папках порядкового номера дня тижня (0,1,...,6) (див. рис.6. б).

а

Ім'я	Тип	Розмір	Дата
[.]	<Папка>		10.04.2015 10:11
[1825]	<Папка>		10.04.2015 10:11
[1826]	<Папка>		10.04.2015 10:11
[1827]	<Папка>		10.04.2015 10:11
[1828]	<Папка>		10.04.2015 10:11
[1829]	<Папка>		10.04.2015 10:11
[1829Tira]	<Папка>		10.04.2015 10:11
[1830]	<Папка>		10.04.2015 10:11
[1831]	<Папка>		10.04.2015 10:11
[1832]	<Папка>		10.04.2015 10:11
[1833]	<Папка>		10.04.2015 10:12
[1834]	<Папка>		10.04.2015 10:12

б

Ім'я	Тип	Розмір	Дата
[.]	<Папка>		10.04.2015 10:1
[0]	<Папка>		10.04.2015 10:1
[1]	<Папка>		10.04.2015 10:1
[2]	<Папка>		10.04.2015 10:1
[3]	<Папка>		10.04.2015 10:1
[4]	<Папка>		10.04.2015 10:1
[5]	<Папка>		10.04.2015 10:1
[6]	<Папка>		10.04.2015 10:1
LPI18337	ETR	4 347	25.03.2015 15:2
LPI18337	ITR	4 344	25.03.2015 15:2
LPI18337	RES	388	25.03.2015 15:2
LPI18337	USK	4 347	25.03.2015 15:2

б

Ім'я	Тип	Розмір	Дата
[.]	<Папка>		10.04.2015 10:12
gfilee	pos	5 997	23.03.2015 13:24
gfilew	pos	10 712	24.03.2015 10:14
gfilec	pos	7 842	23.03.2015 10:55
lpc18332	snx	195 207	23.03.2015 10:54
lpe18332	snx	118 338	23.03.2015 13:22
LPI18332	ITR	4 324	24.03.2015 11:16
LPI18332	RES	279	24.03.2015 11:16
lpw18332	snx	353 421	24.03.2015 10:14

Рис.6. Організація розміщення файлів опрацювання

Отримані розв'язки – комбіновані добові та комбіновані тижневі одержуємо в поточній реалізації ITRS - IGB08/IGS14 на епоху спостережень. Усі вони мають розширення файлів - \*.ITR. На етапі комбінованих тижневих розв'язків координати всіх референціальних станцій за відповідними алгоритмами трансформуються у референціальні системи ETRS89/ETRF2000 (файл LPIXXXX7.ETR) та UСК-2000 (файл LPIXXXX7.USK)

(див. рис. 6 б). Як і для добових файлів, тут також формується контрольний файл LPIXXXX7.RES.

```
IGS/EPN & UKRAINIAN GNSS STATIONS
REFERENCE FRAME: Igb08 AT EPOCH OF 2015.153
GPS Week:1833 GPS Week Number:18332 Day of Year: 55
RELEASED BY UKRAINIAN REFERENCE FRAME COORDINATOR (STEPAN SAVCHUK, LVIV POLYTECHNIC, UKRAINE)
BAIA 3945839.5961 1720428.4350 4691082.8077
CNIV 3397784.9859 2066990.6572 4969811.6084
GLSV 3512888.7614 2068980.0314 4888903.2909
IGEO 3814975.0787 2101075.3190 4644144.0650
KHAR 3312984.1221 2428203.5833 4863307.9161
KTVL 3785991.6031 2550749.2113 4439438.3041
MIKL 3698553.7838 2308676.1642 4639769.5830
POLV 3411557.1301 2348464.1124 4834396.9583
SULP 3765296.7974 1677559.3542 4851297.4929
USDL 3837557.7008 1596303.4109 4822409.9368
UZHL 3907587.2808 1602428.8623 4763783.8537
CRNI 3824750.1743 1860009.0028 4737620.4707
CTIG 3817635.9748 2104405.5080 4640546.7215
HMEL 3706268.9641 1885665.7929 4820450.2155
HUST 3913941.8218 1685120.2000 4730124.2192
MIZG 3881155.0325 1687860.7465 4756281.9048
MUKA 3909874.0081 1637331.2849 4750029.3782
RAHI 3896206.8812 1751119.3892 4721217.7657
SHAZ 3631977.7994 1609614.6391 4973373.1640
SKON 3673288.2986 1884882.1729 4845675.6473
TERN 3740711.9464 1788698.6129 4830767.4111
SARN 3569794.4665 1788894.7313 4957203.6428
```

Рис.7. Фрагмент комбінованого добового розв'язку в системі IGb08 на епоху 2015.153

На рис.7 показано фрагмент добового комбінованого розв'язку (файл LPI18332.ITR), в якому наводяться координати перманентних станцій IGS/EPN та референцних станцій мережі України в системі IGb08 на 1833-й GPS-тиждень, що відповідає епосі 2015.153 (24.02.2015 р.).

### 6.2.1. Порівняння отриманих координат

#### а) для опорних станцій

Відмінності в координатах для опорних станцій, отриманих від кумулятивного розв'язку EPN\_A\_IGb08\_C1890.SSC, та цих же станцій із комбінованих щотижневих розв'язків LPIXXXX7.ITR представлені в таблиці 5. Координати, виражені у системі IGb08, порівнювали, посилаючись до епохи опрацювання (2016.979), тобто між отриманими координатами з двох розв'язків утворювали різниці в межах одного тижня (1928).

#### б) для референцних станцій

Оскільки опрацювання більшості даних GNSS-спостережень за період 2015-2017 рр. проводилось з використанням двох програмних пакетів, то це дозволило провести порівняння отриманих координат. Підставою для порівняння були щотижневі комбіновані файли LPIwww7.ITR від GIPSY та аналогічні файли globkwww.org від GAMIT. У таблиці 6 наведено статистичні дані різниць між зазначеними двома розв'язками (середні квадратичні похибки –СКП). Треба зауважити, що опрацювання в цих пакетах проводилося із різною кількістю опорних станцій (див. схеми у додатку D) і результати порівняння можна вважати коректними.

**Таблиця 5. Різниці між координатами з кумулятивного розв'язку EPN та комбінованого розв'язку LPI**

№	Станція	IGb08,2016.979 - EPN_A_IGb08_C1890.SSC		
		dx [м]	dy [м]	dz [м]
1	BAIA	-0.0003	0.0002	0.0012
2	CNIV	0.0026	0.0001	0.0007
3	GRAZ	0.0008	-0.0020	0.0010
4	IGEO	0.0046	0.0012	0.0045
5	JOZ2	-0.0019	-0.0002	-0.0027
6	MIKL	0.0049	0.0026	0.0052
7	POLV	0.0043	0.0024	0.0016
8	SOFI	-0.0027	0.0007	-0.0035
9	SULP	0.0016	0.0009	0.0019
10	TUBO	0.0048	0.0003	-0.0015
11	USDL	0.0012	0.0061	0.0013
12	UZHL	-0.0035	0.0002	-0.0018
13	VLNS	-0.0029	0.0003	-0.0039

**Таблиця 6. Статистичні дані різниць двох LPI розв'язків**

	X	Y	Z
СКП, mm	5.2	4.6	6.9

Як видно із табл.5, використані опорні станції є достатніми для визначення референцної системи, тому що точність їх положення у випадково вибраному тижні не перевищує 10 мм.

СКП різниць координат, отримані в процесі опрацювання двома різними пакетами та приведені у табл.6, відповідають вимогам IGS, оскільки не перевищували 1 см.

**в) для пунктів УПМ ГНСС та геодезичних пунктів ДГМ**

Пункти УПМ ГНСС та геодезичні пункти ДГМ (див. додаток G) мають визначені із загального урівнювання координати у національній геодезичній референцній системі УСК-2000. Разом з тим вони приймали участь у вимірювальних кампаніях і отримали координати, виражені в тій же реалізації референцної системи ETRF2000-UA, що і референцні GNSS-станції.

На рис.8 у лівій його частині наведена блок-схема можливого обчислення координат пунктів GNSS-спостереження у геодезичній референцній системі УСК-2000. Для цього потрібно від отриманої із спостережень реалізації ITRF2008/IGb08, епохи  $t$  чи на даний час IGS14,  $t$  через відомі параметри трансформації P3 перейти до реалізації ITRF2000, епохи 2005.0, а вже потім, через відомі параметри зв'язку P4, безпосередньо до УСК-2000. Найбільшою невизначеністю при цьому є швидкості зміни координат станцій спостережень, що параметрично входять у P3 і які на такий значний часовий інтервал ( $t-2005.0=10$  і більше років) можуть давати значну похибку у трансформування координат. Параметри P4 є відомими і незмінними.

Альтернативний варіант переходу до системи УСК-2000 полягає у додатковому трансформуванні ITRF2008/IGb08, епохи  $t$  чи на даний час IGS14,  $t$  до континентальної референцної системи ETRF2000 (через відомі параметри P1). Враховуючи той факт, що між системами ITRF2000,2005.0 і ETRF2000,2005 існує строгі параметри трансформування, аналогічні до параметрів P1, і наявний зв'язок P4, то проблема переходу від ETRF2000 до УСК-2000 розв'язується шляхом простого сумування цих параметрів (див.рис.8).

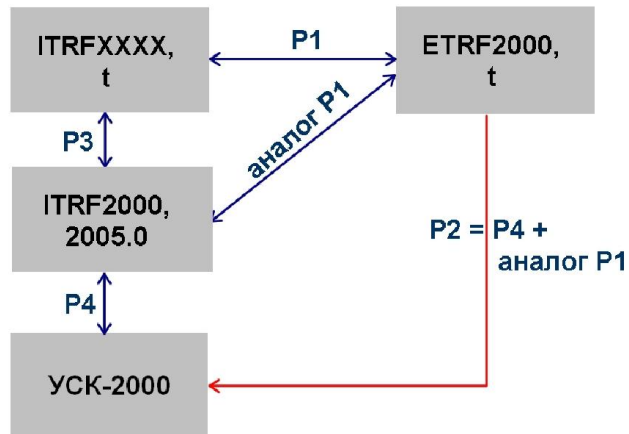


Рис.8. Блок-схема визначення координат у геодезичній референційній системі УСК-2000

На основі такого альтернативного варіанту нами були визначені координати всіх пунктів УПМ ГНСС і геодезичних пунктів ДГМ, що приймали участь у спостереженнях 2015-2017 рр, у референційній системі УСК-2000. У табл.7 наведено різниці між каталожними координатами УСК-2000 від НДІГІК і обчисленими нами координатами, отриманими від згущення ETRF2000-UA.

Таблиця 7. Різниці між координатами УСК-2000<sub>НДІГІК</sub> та УСК-2000<sub>ETRF2000-UA</sub>

№ п/п	Назва пункта	УСК-2000 <sub>НДІГІК</sub> - УСК-2000 <sub>ETRF2000-UA</sub>	
		dx [см]	dy [см]
1	CHER	-3.2	1.4
2	LVIV	2.3	4.1
3	SHAT	3.3	-2.8
4	SHEP	-2.7	3.4
5	UZHD	1.9	-2.7
6	BAKO	4.0	3.6
7	DOBR	3.7	3.5
8	KATE	5.1	2.9
9	KHOS	4.2	3.7
10	KLEP	3.6	2.8
11	KORT	4.1	3.4
12	KRAS	2.8	3.0
13	LAZE	3.9	4.1
14	LIUB	1.7	3.8
15	MAID	2.6	3.1
16	POGA	3.7	3.4
17	POLI	2.9	3.3
18	SEMA	4.0	2.8
19	STMA	3.3	2.4
20	SVOD	2.5	3.0
21	TOVS	3.4	3.3
22	TURZ	2.7	3.1
23	RUMO	4.2	4.3
24	UGNI	2.2	2.9
25	VERB	2.8	3.0
26	VOVC	4.2	3.9

Як видно із табл.7, різниці координат є задовільними. Очевидно, що величини різниць залежать від тривалості проведення спостережень, але отримані оцінки говорять про можливість альтернативного варіанту визначення координат у системі УСК-2000.

### 6.3. Створення зведеного каталогу

Для створення зведеного каталогу координат усіх референцних станцій України нами було вибрано результати опрацювання ГНСС-спостережень від 1826-го до 1981-го GPS-тижнів (721-го добового розв'язку), що охоплює період від 4.01.2015 р. до 30.12.2017 р. включно. На рис. 9 відображено структуру вихідних даних.

*Зведений каталог координат референцних станцій створювався у два етапи. На першому* передбачалося отримання часових рядів координат кожної станції, їх усесторонній аналіз та формування «очищених» тижневих файлів. Другий етап передбачав формування кумулятивних файлів на основі «очищених» окремих тижневих файлів та складання на їх основі зведеного каталогу.

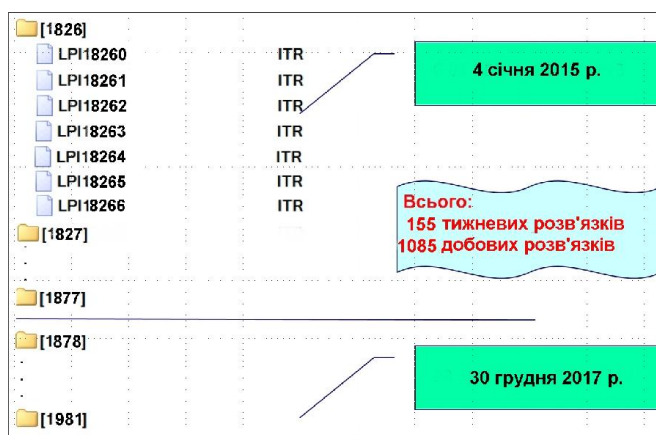


Рис. 9. Вихідні дані (структура файлів) для зведеного каталогу

Загальна тенденція динаміки змін координат GNSS-станцій, які отримуються у референцній системі IGB08/IGS14, пов'язана з рухом тектонічних плит, а зміни координат окремої станції можуть бути ще додатково викликані змінами метеорологічної ситуації, сонячної активності, місцевими особливостями у розміщенні станцій, змінами обладнання на них тощо.

Для активних референцних станцій, що працюють в Україні, характерними причинами змін координат можуть бути також: постійні зміни конфігурації мережі станцій в результаті введення або зміни їх місця розташування, використання для станцій антен, що не відповідають вимогам IGS, тобто вони не калібровані, а ще через тривалі перерви в роботі або просто непостійний характер роботи. З урахуванням зазначених особливостей і проводився аналіз змін координат шляхом використання статистичних та графічних процедур. Основною умовою проведення фільтрації на наявність загальної тенденції до змін координат референцних станцій було виявлення відхилень координат від деякого «теоретичного» їх ходу, спричиненого змінами координат перманентних IGS/EPN GNSS-станцій. Умовою фільтрації показників змін координат було виявлення в ході статистичних та графічних процедури невстановлених одиничних «скачків» у часовому ряді. У результаті на основі добових було отримано та сформовано тижневі «очищені» файли координат кожної станції. Загалом ступінь «очищення» не перевищував 1 % від усього масиву вихідних даних.

Для проведення **другого етапу**, тобто утворення кумулятивних (усереднених за певний період з врахуванням кількості станцій) файлів на основі «очищених» окремих

тижневих файлів було створено ще одну додаткову програму «AVR\_Weeks». На рис. 9 зображено її головне вікно.

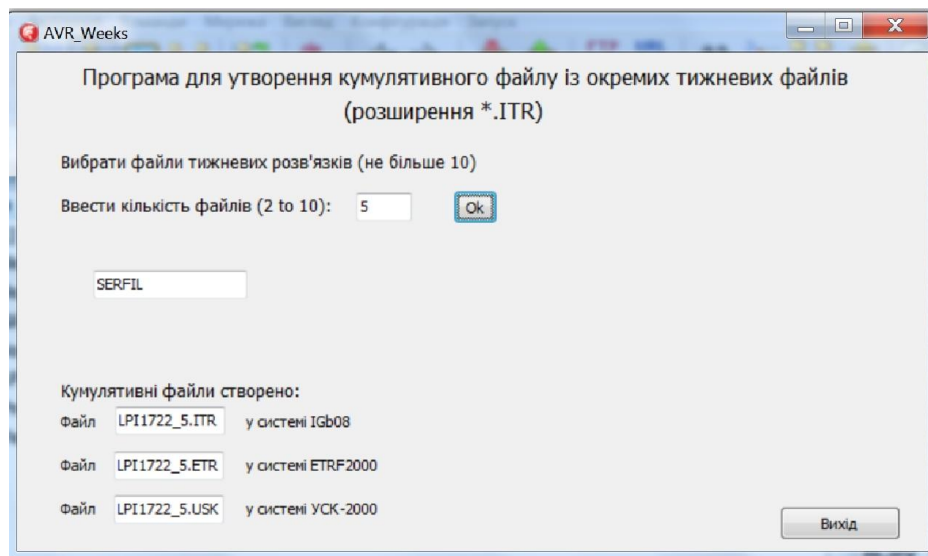


Рис. 10. Програма для формування кумулятивних файлів

Основне завдання цієї програми – створення кількотижневих (від 2-х до 10-ти) кумулятивних файлів у різних референцних системах координат (IGb08, ETRF2000, УСК-2000). Для того щоб не спотворювати тенденцію в динаміці змін координат GNSS-станцій, викликану рухом тектонічних плит, було обрано період усереднення у п'ять тижнів. Вибір саме такого періоду усереднення показує, що при максимально можливій зміні координат станцій унаслідок руху тектонічної плити в нашому регіоні зі швидкістю 20 мм/рік це призведе до помилки менше 1 мм для середини цього періоду. Якщо кумулятивні файли у системі IGb08/IGS14 у подальшому можуть використовуватися для визначення швидкостей зміни координат референцних станцій України, то відповідні файли у системах ETRF2000 та УСК-2000 призначені для утворення зведеного каталогу координат цих станцій. Саме на їх основі з використанням стандартних статистичних програм і були створені такі каталоги.

## Висновки

У звіті описано технологію опрацювання GNSS-даних із спостережень на референцних станціях України, прикордонних референцних станціях сусідніх країн та частини станцій мережі IGS/EPN і формування зведеного каталогу їх координат:

1. Наведено узагальнену характеристику мереж активних референцних станцій в Україні;
2. Описано технологію опрацювання GNSS -спостережень для великої кількості референцних станцій (понад 100) методом згущення мережі IGS/EPN та поділу на окремі блоки;
3. Описано технологію створення зведеного каталогу координат активних референцних станцій за результатами опрацювання GNSS -спостережень 2015-2017 рр.. При цьому:
  - проаналізовано значний масив даних часових рядів координат референцних станцій України з метою визначити їхню якість унаслідок зміни їх значень, викликаних рухами тектонічних плит та іншими змінними факторами;
  - виявлено, що понад 99 % усього масиву даних мають реальну точність координат, що не перевищує 1 см;
  - створено зведений каталог координат референцних станцій України у системах ETRF2000 та УСК-2000.
4. Активні референцні станції, що наведені у зведеному каталозі, можуть бути використані при створенні та оновленні топографічних карт і планів у державній геодезичній референцній системі координат УСК-2000, геодезичному забезпеченні ведення земельного кадастру та інших топографо-геодезичних роботах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Савчук С., Проданець І.І., Калинич І.В. Перша мережа активних референцних станцій в Україні ZAKPOS. Етапи становлення та початок діяльності // Геопрофіль. – 2010. – № 1. – С.16-23.
2. Савчук С.Г., Гринишина-Полюга О.Я. Встановлення вихідних координат референцних станцій мережі ZAKPOS / С.Г. Савчук, О.Я. // Геодезія, картографія і аерофотознімання – 2009. – № 72. – С. 3-13.
3. Стопхай Ю., Висотенко Р. Обробка GPS-спостережень, виконаних на пунктах фундаментальної геодезичної мережі України в 2000 році // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Л.: Вид-во «Ліга-Прес», 2003. – С. 48-54.
4. Хо́да О. А. Определение координат восточноевропейских перманентных ГНСС-станций по данным наблюдений для GPS-недель 1632–1708 // Космічна наука і технологія. – 2015. – Т. 21. – № 4. – С. 56–65.
5. A.Kenyeres, T.Horváth, A.Baron, A.Caporali, F.de Doncker, B.Drosčak, A.Duret, P.Franke, I.Georgiev, D.Hansen, L.Huisman, O.Khoda, K.Morozova, J.Nagl, X.Papanikolaou, P.Pihlak, G.Stangl, M.Valdes, K.Szafranek, M.Figurski, M.Ryczywolski, C.Bruyninx, D.Mesmaker. EPN Densification: Status Report 2016 // Presented at the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF). – San Sebastian (Spain) – 2016. – Режим доступа: <http://www.euref.eu/symposia/2016SanSebastian/02-02-Kenyeres.pdf>
6. *Guidelines* for EPN Analysis Centers  
[http://www.epncb.oma.be/organisation/guidelines/guidelines\\_analysis\\_centres.php](http://www.epncb.oma.be/organisation/guidelines/guidelines_analysis_centres.php)
7. *Guidelines* for EUREF Densifications //  
[ftp://epncb.oma.be/pub/general/Guidelines for EUREF Densifications.pdf](ftp://epncb.oma.be/pub/general/Guidelines%20for%20EUREF%20Densifications.pdf)
8. EPN – Європейська перманентна мережа. – <http://www.epncb.oma.be/>
9. GNSS -мережа ZAKPOS. – [www.zakpos.zakgeo.com.ua](http://www.zakpos.zakgeo.com.ua)
10. Центр контролю навігаційного поля України. – <http://www.gcknp.com.ua/>
- 11.
12. GNSS -мережа від фірми Topcon в Україні – TNT GNSS Network. – <https://net.tnt-tpi.com/page>
13. GNSS -мережа від фірми «System Solutions» – System.NET. – <https://systemnet.com.ua>
14. GNSS -мережа від фірми «Навігаційно-геодезичний центр» – NGCNET. – <http://www.ngcnet.com.ua>
15. GNSS -мережа Польщі – ASG-EUPOS. – [www.asgeupos.pl](http://www.asgeupos.pl)
16. GNSS –мережа Польщі – TPI NETpro. - <http://www.tpinet.pl>
17. GNSS -мережа Словаччини – SKPOS. – [www.skpos.gku.sk](http://www.skpos.gku.sk)
18. GNSS -мережа Румунії – ROMPOS. – [www.rompos.ro](http://www.rompos.ro)
19. GNSS -мережа Угорщини – GNSSnet.hu. – [www.GNSSnet.hu](http://www.GNSSnet.hu)
20. GNSS -мережа Молдови – MOLDPOS. – <http://moldpos.md>