

## СУЧАСНІ СУПУТНИКОВІ ТЕХНОЛОГІЇ У ДОСЛІДЖЕННІ ГЕОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

© Терещук О., 2009

*Проанализировано использование современных спутниковых технологий при исследовании геодинамических процессов. Рассмотрены основные проблемы, что возникают при использовании различных подходов к интерпретации результатов спутниковых наблюдений.*

*In article are analyzed use of modern satellite technologies at research of geodynamic processes. The main problems that arise at use of various approaches to interpretation of results of satellite measurements are considered.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Динаміка літосфери, одне з найважливіших питань геодинаміки, була протягом багатьох років предметом геологічних і геофізичних досліджень, заснованих на різних підходах, що іноді взаємно виключають один одного. У міру накопичення даних, у різний час переважали різні концепції про походження сучасної конфігурації земної поверхні, історії її розвитку й про рушійні сили її еволюції. Спочатку більша частина даних була отримана геологічними методами, що різняться за ступенем детальності й масштабами охопленої частини земної поверхні.

До числа перших спостережень, що викликали широкі дискусії про можливі глобальні горизонтальні переміщення літосферних плит, належать виявлені смугові магнітні аномалії, що простягаються уздовж серединних океанічних хребтів, які в тектоніці плит пояснюються розсовуванням (спредінгом) дна океанів і періодичними змінами орієнтації глобального магнітного поля [3]. Приблизно в той же час сейсмологія зробила свій внесок у розуміння динаміки літосфери на основі такої інформації, як глобальний розподіл сейсмічних поясів, фокальні механізми землетрусів у трансформних розломах, азимуту векторів зсувів по розривах під час землетрусів у зонах субдукції.

Зіставлення різних даних про рухи літосфери тривалий час давало змогу змоделювати доволі приблизну загальну картину динаміки земної поверхні, що було обумовлено різноманітністю гіпотез про рушійні сили спостережуваних процесів. З наведених вище даних інформація про швидкість руху втримується тільки в структурі смугових магнітних аномалій, а напрямки руху визначаються із сейсмологічних спостережень і орієнтації трансформних розломів. Із сукупності цих даних були визначені вектори відносного обертання плит, зокрема загальноприйнята модель руху тектонічних плит NUVEL-1A, у якій швидкості усереднені за останні три млн. років. Цю модель прийнято називати геологічною, зважаючи на геологічний масштаб періоду часу, до якого вона зарахована.

Вивчення сучасних рухів і деформацій, що відбуваються в земній корі, вимагає проведення в моніторинговому режимі високоточних геодезичних вимірів зсувів реперів спеціально обладнаних спостережних станцій – геодинамічних полігонів. Жорсткі вимоги до проведення подібного роду геодезичних робіт – великі території, охоплювані вимірами, високий рівень точності визначення величин зміщень і деформацій, короткі періоди між серіями інструментальних вимірів, усе це визначає необхідність використання під час проведення досліджень сучасного високоточного й оперативного обладнання, що ґрунтується на супутникових технологіях.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В опублікованих за останні роки численних джерелах інформації ([3], [5], [9]) прийнято зазначену проблему розділяти на такі основні складові частини, як глобальна, регіональна й локальна геодинаміка. За такої класифікації під *глобальною* геодинамікою будемо розуміти динамічні процеси, що охоплюють усю земну кулю, і об'єднують

такі великомасштабні геодинамічні явища, як рух літосферних плит, динамічні зміни поверхні морів і океанів, великомасштабні варіації геопотенціалу в часі й інші аналогічні за масштабами, пов'язані із Землею зміни.

Під *регіональною* геодинамікою розумітимемо регіональні зміни положень точок земної поверхні, а також варіації гравітаційного поля, що є характерними для регіонів завдовжки від 100 до 1000 і більше кілометрів.

До *локальної* геодинаміки нами, відповідно до класифікації інших авторів публікацій з космічної геодезії, зараховано регіони, що охоплюють площі до 100 км, на яких проявляються деформації земної поверхні, обумовлені тектонічними, техногенними й іншими факторами, що активно впливають на приповерхневі геологічні структури. Підвищений інтерес до вивчення геодинамічних явищ локального масштабу є, як правило, у зонах будівництва й експлуатації великих інженерних споруд, а також на територіях великих міст. За останні роки з цього розділу геодинаміки опублікована велика кількість статей і зроблено багато доповідей на різних наукових конференціях і симпозіумах, що свідчить про постійно наростаючий інтерес до вивчення геодинамічних процесів на локальних ділянках земної поверхні.

Аналіз методів вивчення геодинаміки сучасними супутниковими методами свідчить про те, що на різних етапах розв'язку згаданих завдань виникає необхідність у використанні нестандартних підходів, що істотно відрізняються від розв'язку аналогічних завдань традиційними наземними геодезичними методами [6], [7], [8]. Такі особливості стосуються, насамперед, сфери вивчення динамічних процесів, характерних для стану земної поверхні на порівняно невеликих територіях [2].

**Виклад основного матеріалу.** Під час дослідження геодинамічних процесів із застосуванням супутникових технологій переважно використовуються два просторово-часові режими – разове перевизначення вихідних координат вибраних станцій, і вимір величин зсувів і деформацій у моніторинговому режимі. Найчастіше під час виконання тривалих досліджень знаходить застосування комбінований режим, коли при виконанні нульового циклу робіт перевизначаються вихідні координати станції, а у разі виконання наступних циклів вимірів визначаються зсуви й деформації, що відбулися за певний період часу.

Оскільки координати окремих станцій, які приймають за вихідні, визначалися ще до початку проведення моніторингових спостережень, то, в результаті разового перевизначення координат, вибраних для аналізу станцій, визначаються величини деформацій земної кори, що відбулися за доволі тривалі інтервали часу, як правило, декілька років. У цьому разі доводиться наражатися на доволі непрості питання відділення реальних зсувів станцій в мережі, викликаних деформаціями земної поверхні, від залишкового впливу джерел помилок, оскільки сучасна точність методів супутникової геодезії в 2–3 рази є вищою, ніж точність раніше виконаних спостережень. Цю задачу, залежно від конфігурації вихідної мережі, умов проведення вимірів і повноти вихідного матеріалу колишніх років, можна доволі коректно розв'язати із застосуванням спеціально розроблених методик, в основі яких лежать різні точки зору на процедуру аналізу взаємного положення пунктів геодезичної мережі.

Також доволі складним, а частіше нерозв'язним завданням є перевизначення висотних відміток станцій мережі, оскільки у разі провадження робіт методами супутникової геодезії визначаються висоти й перевищення пунктів над еліпсоїдом, а не над геоїдом, як це прийнято в традиційній геодезії. Коли геодезичні роботи проводяться на місцевості зі спокійним рельєфом, це завдання коректно виконується при використанні стандартних моделей геоїда, таких, як EGM2008. Однак для гористої місцевості з більшими перепадами висот, місцевості з локальними аномаліями гравітаційного поля, такий розв'язок неприйнятний, і сьогодні завдання не має коректного розв'язку.

Ще однією проблемою, з вирішенням якої доводиться зустрічатися як при разових перевизначеннях координат деформаційних мереж, так і у разі вимірювань у моніторинговому режимі, є проблема вибору із усіх станцій мережі тих, положення яких залишається стабільним доволі тривалий час. Наявність таких станцій у мережі необхідна, коли ставиться завдання визначити просторові вектори зсувів; у цьому разі проводиться строге урівнювання мережі з накладенням певних умов – фіксацією планових координат і висот опорних станцій мережі. Однак, як показує практика, це не завжди можливо зробити, оскільки вихідні станції також піддані деформуванню, і тому, з одного боку, використовувати

їхні координати за вихідні потрібно вкрай обережно, а з іншого, фіксація координат частини станцій зможе значно спотворити урівнювану мережу, що призведе до одержання некоректного результату. Для того, щоб цього уникнути, перевизначаються не самі координати станцій мережі, а фіксуються зміни просторових геометричних зв'язків між станціями мережі, які можна виміряти безпосередньо. Цього, як правило, цілком достатньо для побудови сумарного деформаційного поля й вивчення основних закономірностей зміни напружено-деформованого стану земної кори на досліджуваній території. Надалі, під час аналізу величин деформацій, із усіх станцій мережі виділяються такі, які від циклу до циклу не змінюють свого взаємного положення, і які можуть бути використані як опорні, внаслідок чого поступово, від серії до серії моніторингових спостережень, картина динаміки зсувів і деформацій буде уточнюватися.

Однак питання про можливість побудови об'єктивної й точної моделі сучасних геодинамічних процесів на земній поверхні залишається нез'ясованим, тому що виникає кілька серйозних проблем під час спроби ототожнення геологічних моделей руху плит із сучасними рухами. Конкретніше повинні досліджуватися такі питання:

- співвідношення усереднених за 3 млн. років і сучасних швидкостей;
- реальна точність геологічних моделей у зв'язку з тим, що вони засновані на інформації тільки по океанічних областях;
- вплив можливих систематичних похибок у даних по векторах зсувів у зв'язку з можливим впливом сейсмічної анізотропії.

Об'єктивність моделі має на увазі використання тільки таких апріорних гіпотез, які допускають апостеріорну перевірку прямим зіставленням зі спостереженнями. Точність моделювання обумовлена, з одного боку, рівнем технології й обсягом вимірів, а, з іншого, методологією обробки й інтерпретації спостережень. В останні роки розвиток методів космічної геодезії дозволив здійснити прямі виміри сучасних рухів тектонічних плит і деформацій на їхніх границях у планетарному масштабі з високою точністю, і, тим самим, підтвердити або спростувати існуючі дотепер різноманітні гіпотези про конфігурацію й природу границь тектонічних плит [10].

У зв'язку з розвитком сучасної космічної геодезії, поставлені вище питання щодо динаміки земної поверхні пояснюють актуальність основного завдання, а саме: побудова об'єктивної моделі сучасних рухів літосфери, опираючись на прямі виміри сучасними геодезичними методами. Сформульоване завдання має на увазі виділення стабільних, тобто таких, що не деформуються, сегментів поверхні Землі й аналіз зон деформації з оцінкою динаміки нагромадження напруг у таких зонах. До того ж становить інтерес як перевірка гіпотез про стабільність найпрадавніших платформ, так і з'ясування геометрії розподілу деформацій на їхніх границях, а саме, наскільки локалізовані по ширині пояса деформацій уздовж границь стосовно стабільних частин, і що можна сказати про глибинну будову таких зон за спостереженнями на поверхні.

Сучасні дослідження, що проводяться у цьому напрямі, спрямовані на розробку й реалізацію об'єктивного підходу до визначення великомасштабних рухів земної поверхні за допомогою супутникової геодезії на основі багаторічної діяльності перманентних GNSS станцій у загальноєвропейських масштабах. Відмінна ознака таких досліджень – мінімальний набір апріорних гіпотез, що обмежують безліч розв'язків, та узгоджуються з експериментальними даними. Всі гіпотези перевіряли зіставленням з незалежними вимірами, що дозволило значно підняти рівень вірогідності й об'єктивності такого розв'язку. Стійкість розв'язку була підтверджена порівнянням декількох варіантів оцінювання векторів взаємного обертання Євразійської літосферної плити.

Відомо, що в основі існуючих методів космічної геодезії лежать радіо- і оптичні спостереження за космічними об'єктами різного походження, розташованими на різних відстанях від Землі [10]. Технології спостереження й аналізу руху таких об'єктів розвивалися з кінця 70-х років і мають різні технічні можливості, які значною мірою залежать від складності й вартості як устаткування, так і самих процесів спостережень. У цей час склалися три основні методи космічної геодезії: радіоінтерферометрія з наддовгими базами (VLBI), лазерна локація супутників (SLR) і глобальна система позиціонування (GPS). Кожний із цих методів має свої переваги, і їхнє застосування залежить від характеру й масштабу геодинамічного завдання, що розв'язується на сучасному етапі.

Основна проблема з VLBI і SLR технологіями – дуже висока вартість апаратури, а для SLR – ще й погодні обмеження, властиві будь-якому оптичному методу. Відповідно, кількість станцій VLBI і SLR є порівняно невеликою, і вони розміщені вкрай нерівномірно, практично, у Північній Америці й у Західній Європі.

### Важливі зміни у стратегії опрацювання результатів сучасних GNSS-вимірювань

Суть зміни	Дата зміни
1	2
1. Зміна референцної системи – з ITRF92 до ITRF93	січень 1995 р.
2. Вдосконалення моделювання тіні Землі	березень 1995 р.
3. Зміна референцної системи – з ITRF93 до ITRF94	червень 1996 р.
4. виправлення фазових центрів антен приймачів	червень 1996 р.
5. Покращена модель орбіт супутників: гравітаційне поле, загальна релятивістська теорія, модель земних припливів, числа Ляві, конвенції IERS	жовтень 1996 р.
6. Зменшення кута відсічки з $20^0$ до $10^0$ та введення ваг у залежності від висоти супутника	жовтень 1997 р.
7. Введення функцій відображення Niell	жовтень 1997 р.
8. Зміна референцної системи – з ITRF94 до ITRF96	листопад 1997 р.
9. Введення поправок у результати опрацювання за океанічні припливи	березень 1998 р.
10. Набір антенних корекцій для супутників блоку Block IIR	листопад 1998 р.
11. Зміна референцної системи – з ITRF96 до ITRF97	серпень 1999 р.
12. Априорні значення гідростатичної тропосферної затримки через функцію відображення Niell (до того априорні значення не використовувалися)	серпень 2000 р.
13. Визначення тропосферної затримки через вологу складову функції відображення Niell	серпень 2000 р.
14. Визначення тропосферного градієнту	серпень 2001 р.
15. Зменшення кута відсічки з $10^0$ до $3^0$	серпень 2001 р.
16. Зміна референцної системи – з ITRF97 до ITRF2000	грудень 2001 р.
17. Введення поправок у результати опрацювання за тінь Місяця	січень 2002 р.
18. Заміна моделі рівня океану для океанічних припливів FES95.2 на GOT00.2	березень 2003 р.
19. Введення моделі океанічного рівня: CSR 2.0 ) CSR 3.0	грудень 2004 р.
20. Зміна референцної системи для орбіт супутників – з IGS00 до IGS05	червень 2005 р.
21. Заміна моделі нутації: від IAU80 до IAU2000A	листопад 2005 р.
22. Зміна априорної моделі тиску сонячного випромінювання з ROCK на CODE	листопад 2005 р.
23. виправлений симптом загального релятивістського прискорення	листопад 2005 р.
24. Заміна моделі рівня океану для океанічних припливів GOT00.2 на FES2004	травень 2006 р.
25. Зміна референцної системи – з ITRF2000 до ITRF2005/IGS05	листопад 2006 р.
26. Перехід від відносних калібрувань GNSS-антен до абсолютних індивідуальних	листопад 2006 р.
27. Що 15-ти тижневе EUREF згущення ITRF2005	грудень 2008 р.

Одна з найсучасніших супутникових систем позиціонування – GPS виникла спочатку як всепогодна супутникова радіонавігаційна система на початку вісімдесятих років XX ст. В основі її застосування лежить вимірювання відстаней до активних супутників, що випромінюють сигнали, прийняті наземними станціями. Одночасне визначення відстаней до декількох супутників дає змогу визначити координати точки спостереження в тривимірному просторі. Інструментальна точність приймання фазових сигналів становить  $\sim 0,2$  мм у розрахунках відстані до супутника, однак самі фазові вимірювання містять неоднозначність у вигляді невідомого цілого числа довжин хвиль, а також піддані впливу, що спотворює сигнали від супутників, насамперед затримок сигналу, пов'язаних із проходженням через іоносферу й тропосферу. Розв'язок зазначених неоднозначностей і усунення атмосферних впливів дозволили досягти точності вимірювання взаємних відстаней 1–2 мм, що власне і обумовило можливість застосування системи GPS для геодинамічних досліджень.

Однією із важливих проблем використання сучасних супутникових технологій у розв'язанні геодинамічних задач є вироблення єдиного підходу до використання наявної бази даних GNSS-опрацювань.

Відомо, що з 1994 р. неодноразово змінювалися підходи, моделі та стратегії опрацювання GNSS-спостережень. Як невеликий приклад наведено у таблиці найзначніші такі зміни (див. таблицю). Хоча цей перелік є достатньо довгим, проте він далеко не повний, оскільки до нього не потрапила значна частина змін, що вносили малі поправки у результати і тому не були включені. Єдиним шляхом, що дозволить гомогенізувати результати спостережень протягом тривалого часу, залишається повне переопрацювання “сирих” даних [1].

**Висновки.** На закінчення необхідно відзначити, що застосування сучасних методів супутникової геодезії для спостережень за геодинамічними процесами дає змогу нам проводити дослідження на якісно вищому рівні. Вимірювання, проведені з використанням сучасних геодезичних космічних комплексів, показали свою високу ефективність для розв’язку завдань геотектоніки, завдяки чому стали можливими не тільки дискретні виміри, але й регулярний моніторинг деформацій і напруг, що відбуваються в земній корі. Для повноцінного використання сучасних супутникових технологій необхідно розробити та правильно застосувати багато новітніх підходів.

1. John M. Dow, R. E. Neilan, C. Rizos *The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // Journal of Geodesy.* -2009. -p.p.191–198. 2. О. Болотіна, М. Медведський. *Результати дослідження стабільності роботи українських станцій лазерної локації// Кинематика и физика небесных тел.*–2007.–Т. 23, № 1.–С. 11–17. 3. Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В. *Геодинамика Евразии – тектоника плит и тектоника блоков // Геотектоника.* 2004. № 1. – С. 3–20. 4. Максимчук В.Ю., Кузнєцова В.Г., Вербицький Т.З. та ін. *Геодинаміка Українських Карпат.* – К.: Наукова думка, 2005. – 256 с. 5. Никонов А.А. *Активные разломы: определение и проблемы выделения // Геоэкология.* 1995. № 4. – С. 16–27. 6. Прилепин М.Т., Баласанян С., Баранова С.М. и др.. *Изучение кинематики Кавказского региона с использованием GPS технологии // Физика Земли.* 1997. № 6. С. 68–75. 7. Третьяк К., Серант О. *Дослідження деформації земної поверхні Центральної Європи за результатами GPS-спостережень перманентних станцій у 1992–2000 роках // Зб. наук. пр. “Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва”.* – Львів: вид-во “Ліга-прес”, 2004, с. 41-49. 8. Третьяк К., Серант О., Смірнова О. *Зв’язок між горизонтальними деформаціями земної поверхні та сейсмічною активністю Центральної Європи // Зб. наук. пр. “Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва”.* – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2008. – В.І (15). – С. 74–81. 9. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. *Геотектоника с основами геодинамики.* М.: Изд-во МГУ, 1995. – 480 с. 10. Яцків Я.С., Болотіна О.В., Болотін С.Л. та ін. *Українська мережа станцій космічної геодезії та геодинаміки (Укргеокоосмережа).* – 2005. – К.: Компанія ВАІТЕ. – 60 с.