



ISSN 2411–6602 (Online)

ISSN 1607–2855 (Print)

Том 13 • № 1 • 2017 С. 48 – 53

УДК 551.244/242+528.2 : 629.78

Оцінка швидкостей за даними ГНСС-спостережень в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України для подальших геодинамічних досліджень

М.В. Іщенко

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, 03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27

Глобальні супутникові навігаційні системи (ГНСС) міцно увійшли не тільки у повсякденне життя суспільства, але й широко використовуються у різноманітних сферах наукового простору. Можливість ведення безперервних спостережень на постійнодіючих ГНСС-станціях, що не залежать від погодних умов, дозволила накопичити тривалі періоди спостережень. Все це призвело до отримання високоточних координатних рядів з точністю декілька мм. Одним із перших етапів у дослідженні локального рівня деформацій земної кори є оцінка значень швидкостей зміщень ГНСС-станцій. Одним з найбільш простих і поширених способів представлення горизонтальних рухів земної поверхні, що відбуваються в межах досліджуваної області, є отримання поля швидкостей. В Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАНУ отримано оцінки векторів швидкостей для 233 ГНСС-станцій (в координатній системі IGB08), 202 з яких розташовано на території України. Максимальний період оцінки з 7 грудня 1997 р. по 28 січня 2017 р. склав 6993 діб (приблизно 20 років). Оцінка швидкостей базується на ГНСС-спостереженнях державних, академічних, університетських та комерційних мереж України. Вектори швидкостей отримано з використанням програмного забезпечення «Bernese GNSS Software ver. 5.2» (були використані програмні модулі ADDNEQ2 та FODITS), яке рекомендовано Центрами аналізу ГНСС-даних, зокрема, Європейським Центром EUREF для проведення досліджень такого типу. Отримані оцінки векторів швидкостей повністю узгоджуються з рухом Євразійської літосферної плити. Проте для подальшого використання у дослідженнях по деформації земної кори кожна ГНСС-станція повинна бути ретельно перевірена на можливі ефекти (спричинені роботою апаратури, людським фактором тощо) та задовольняти мінімальному періоду спостережень у три роки.

Ключові слова: глобальні навігаційні супутникові системи; перманентна станція; поле швидкостей; вектор швидкості ГНСС-станції; ADDNEQ2; FODITS.

1. ВСТУП

Глобальні супутникові навігаційні системи (ГНСС) міцно увійшли не тільки у повсякденне життя суспільства, але й широко використовуються у різноманітних сферах наукового простору. ГНСС широко використовуються у навігаційній сфері, аграрній, дослідженнях, пов'язаних із деформацією земної кори, вивчення тропосфери та іоносфери, що дозволило створювати прогнозування погодних умов у реальному часі тощо. Починаючи з 2000-х років створюються мережі регіональних і локальних масштабів, що дозволяє проводити різноманітні дослідження для певних територіальних ділянок та виконувати геодинамічні дослідження на локальному рівні.

Можливість ведення безперервних спостережень на постійнодіючих ГНСС-станціях, що не залежать від погодних умов, дозволила накопичити тривалі періоди спостережень. Все це призвело до отримання високоточних координатних рядів з точністю декілька мм. Одним із перших етапів у дослідженні локального рівня деформацій земної кори може бути оцінка значень швидкостей зміщень ГНСС-станцій. Одним з найбільш простих і поширених способів представлення горизонтальних рухів земної поверхні, що відбуваються в межах досліджуваної області, є отримання поля швидкостей.

2. ОЦІНКА ШВИДКОСТЕЙ ГНСС-СТАНЦІЙ

Для оцінки швидкостей ГНСС-станцій були використані узгоджені координатні ряди в системі координат IGB08 для 233 ГНСС-станцій. Часові координатні ряди, отримані в Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАНУ, вільні від ефектів, спричинених змінами у апіорних даних, моделях, програмному забезпеченні та алгоритмах обробки. Більш детально про алгоритм репроцесингу та регулярної обробки можна ознайомитись за посиланням [6] та на веб-сторінці Центру аналізу ГНСС-спостережень [8].

Було використано два види робіт, що були виконані в Центрі аналізу ГНСС-спостережень ГАО НАН України:

- репроцесинг для GPS-тижнів 935–1708 (7 грудня 1997 р. — 6 жовтня 2012 р.);
- регулярна обробка для GPS-тижнів 1709–1832 (7 жовтня 2012 р. — 28 січня 2017 р.).

Отримані файли в форматах SINEX і TROPX у координатній реалізації IGB08 у вільному доступі розміщені на ftp-сервері ГАО НАН України [9] («МА1» та «МАО» — репроцесинг та регулярна обробка відповідно). Максимальний період спостережень склав 6993 діб (приблизно 20 років). Були використані спостереження ГНСС-супутників на 233 ГНСС-станціях, що розташовані на території Східної Європи, 202 з яких — на території України, рис. 1. Доступність ГНСС-станцій у часі зображено на рис. 2.

У репроцесинг та регулярну обробку увійшли ГНСС-спостереження державних, академічних, університетських та комерційних мереж України, серед яких є:

- мережа ГНСС-станцій ГАО НАН України — 7;
- мережа ГНСС-станцій System.NET — 93;
- мережа ГНСС-станцій TNT-TPI — 49;
- мережа ГНСС-станцій «GeoTerrace» — 9;
- мережа ГНСС-станцій Навігаційно-геодезичного центру «НГЦ.net» — 10;
- мережа ГНСС-станцій «MOLDPOS» — 7;
- мережа ГНСС-станцій Державного космічного агентства України — 12;
- ГНСС-станції партнерів — 22;
- ГНСС-станції Європейської постійнодіючої ГНСС-мережі — 24.

Репроцесинг та регулярна обробка були виконані відповідно до рекомендацій Центрального Бюро Європейської постійнодіючої ГНСС-мережі [5]. На рис. 3 наведено приклад однорідного часового ряду для ГНСС-станції «Київ/Голосієво» (GLSV).

Точність розв'язку була оцінена за допомогою повторюваності координат, яка склала наступні величини: для північної — 1,69 мм, для східної — 1,4 мм, для висотної — 3,63 мм відповідно. Така точність дозволила оцінити швидкість руху ГНСС-станцій для території України.

Швидкості постійнодіючих ГНСС-станцій були оцінені за допомогою модулів ADDNEQ2 («Combine Normal Equation System») та FODITS («Find Outliers and Discontinuities in Time Series»), що входять в програмний комплекс «Bernese GNSS Software ver. 5.2» [3], розроблений в Астрономічному інституті Бернського університету (Швейцарія). Для розрахунку були використані наступні дані:

- файли нормальних рівнянь для кожного дня;
- апіорні координати і швидкості в єдиній системі координат;
- список станцій, які задають опорну мережу.

Файли нормальних рівнянь були взяті з результатів репроцесинга і регулярної обробки для всього обробленого періоду.

В якості апіорних координат були використані координати двох типів. У першому випадку координати були взяті з каталогу IGB08 на епоху 2005.0 (для опорних станцій). А в другому були отримані в результаті репроцесингу і регулярної обробки і приведені до епохи 2005.0, координатна реалізація — IGB08.

Апіорні значення швидкостей були порашовані за допомогою моделі «NUVEL-1A» [4] з урахуванням швидкості руху тектонічних плит, на яких розташовані ГНСС-станції.

Перелік ГНСС-станцій, що задавав опорну мережу, відповідав переліку станцій, що використовувались у репроцесингу та регулярній обробці (18 ГНСС-станцій).

Спільне використання модулів ADDNEQ2 та FODITS дозволило виконати оцінку з урахуванням стрибків у часових рядах, що спричинені зміною обладнання та програмним забезпеченням [7].

В результаті було отримано значення північної, східної та висотної компонент швидкості у геоцентричній системі відліку (X , Y та Z) та у топоцентричній (North, East та Up).

Загальна характеристика по двом компонентам (N та E) наведена нижче:

- мінімальне значення: $N = 3,52$ мм та $E = 21,433$ мм/рік,
- максимальне значення: $N = 16,08$ мм та $E = 28,03$ мм/рік.

Вектори швидкостей для ГНСС-станцій наведено на рис. 4.

Карту з відображенням швидкостей виконано у програмному ГІС-середовищі «Quantum GIS» ver. 2.18. [10]. Проте не всі ГНСС-станції, чиї вектори швидкостей були оцінені, можуть бути використані у наступних дослідженнях, пов'язаних із деформацією земної кори. Перш за все, не всі станції мали достатній період спостережень у три роки, щоб оцінити більш якісно швидкості ГНСС-станцій [2].

Як можна бачити з рис. 4, деякі ГНСС-станції мають аномальні показники швидкості. Це може бути пов'язано як з роботою самої ГНСС-станції, так і з її локальною геодинамікою. Першим прикладом може бути станція «ORH2» мережі TNT-TPI. Ця станція має найбільші показники планового та висотного векторів: $N = 21,08$ см/рік, $E = 5,64$ см/рік та $U = 114,15$ см/рік. У 2016 році вона мала лише дві доби спостережень (дата встановлення 28 травня 2016 р.), що призвело до великої похибки визначення вектору швидкості, рис. 5,а.

Іншим прикладом може слугувати станція «KTVL» мережі ГАО НАНУ, яка має інше направлення планового вектору. Це пов'язано із активними процесами на території Кацивелі, АР Крим, зокрема,

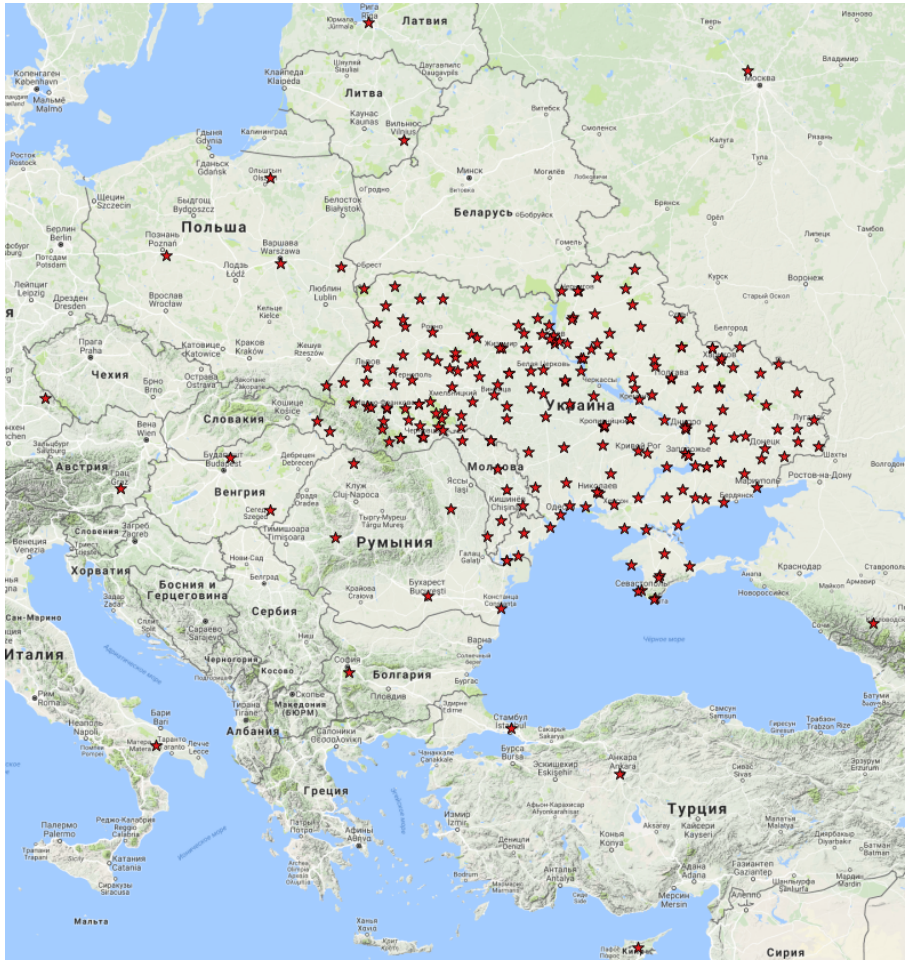


Рис. 1. Конфігурація ГНСС-мережі

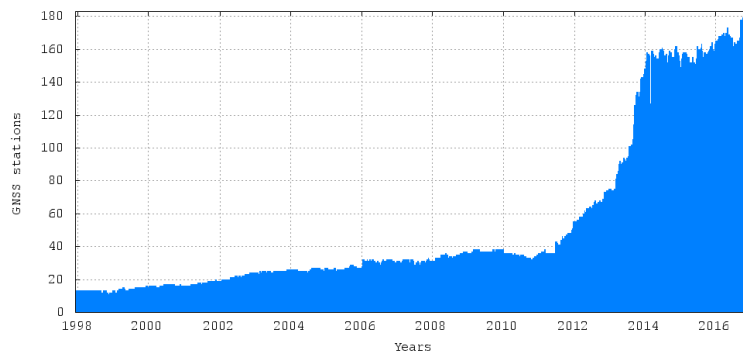
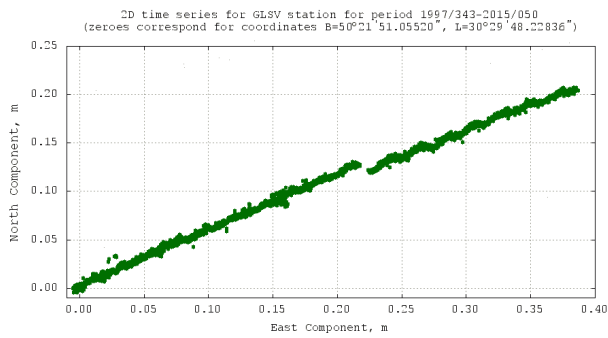
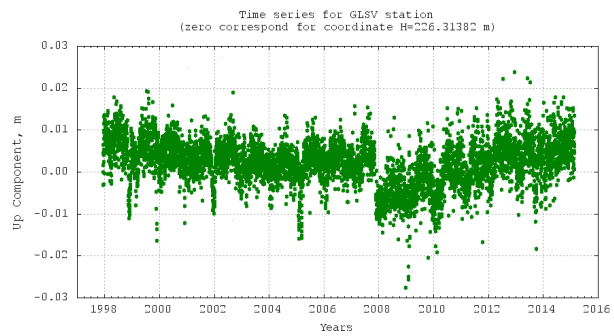


Рис. 2. Доступність ГНСС-станцій у часі



а)



б)

Рис. 3. Приклад однорідного часового ряду для ГНСС-станції «Київ/Голосієво» (топоцентрична система відліку): а — північна та східна компоненти; б — висотна компонента

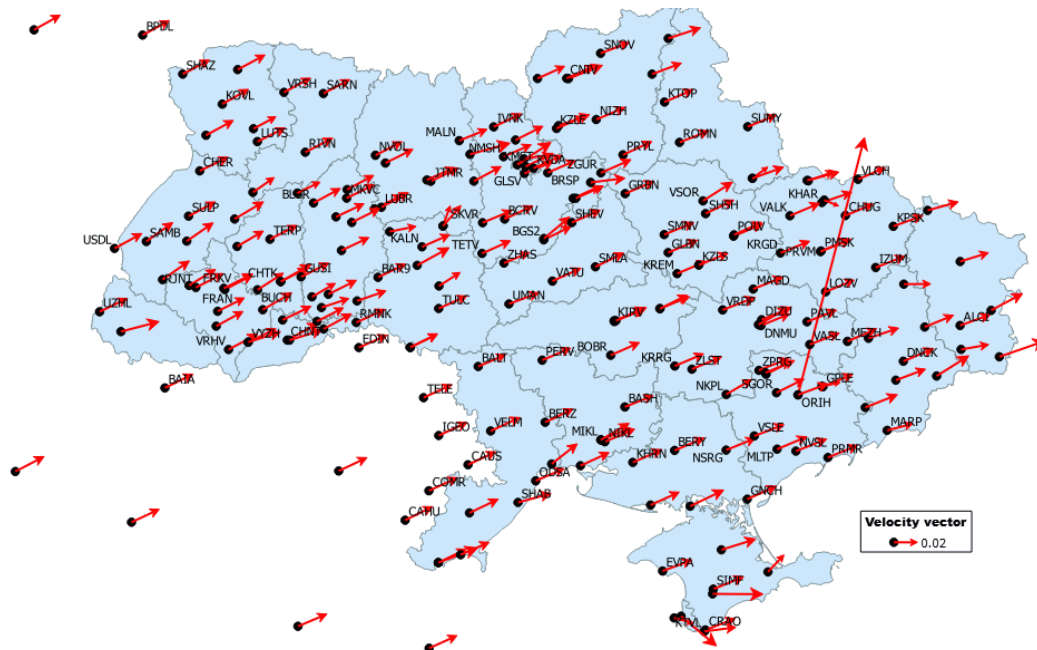
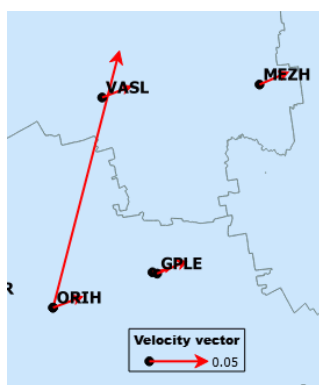
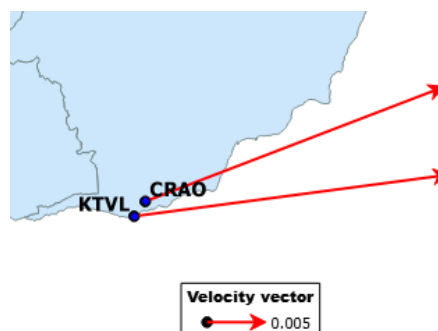


Рис. 4. Швидкості ГНСС-станцій за результатами репроцесингу та регулярної обробки



а)



б)

Рис. 5. Приклади аномальних векторів швидкостей ГНСС-станцій: а — пов'язані з малою кількістю спостережень; б — пов'язані з локальною геодинамікою на ділянці

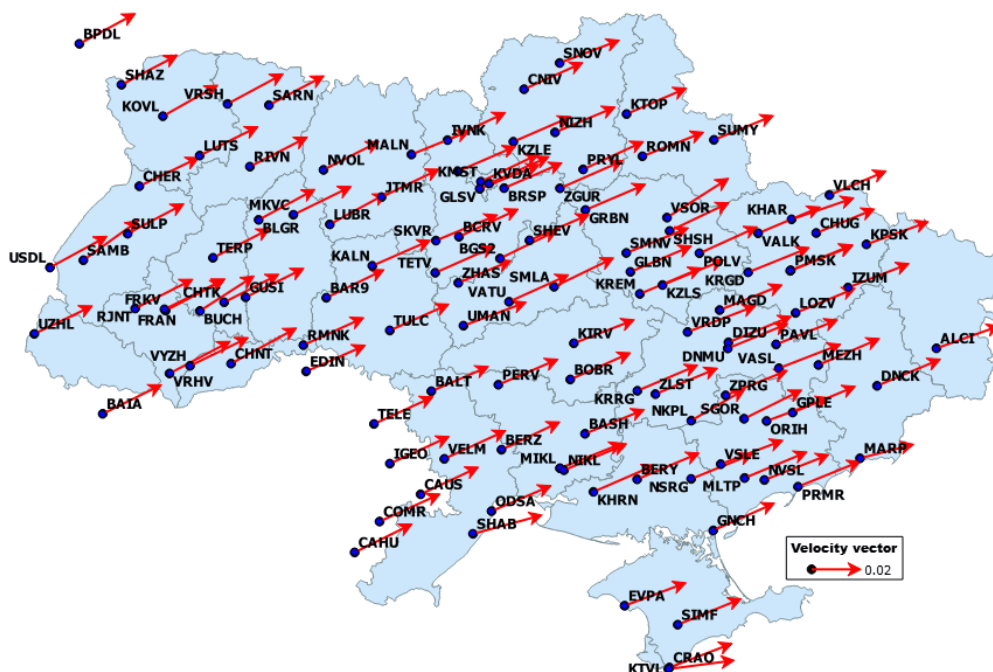


Рис. 6. ГНСС-станції, які можна використовувати у подальших геодинамічних дослідженнях

сповзанням поверхневого шару ґрунту до Чорного моря [1], рис. 5,б.

Отже, кожному ГНСС-станцію було переглянуто до відповідності цим двом критеріям. Загалом, з 233 ГНСС-станції залишилось 136. На рис. 6 представлені ГНСС-станції та їх швидкості, які можна використовувати у подальших геодинамічних дослідженнях.

3. ВИСНОВКИ

Глобальні навігаційні супутникові мережі надійно увійшли не тільки у повсякденне використання у сфері навігації та геодезії, але й мають на сьогодні широкий спектр застосування у науковій діяльності. Створення та подальший розвиток регіональних та локальних ГНСС-мереж, накопичення спостережувальних даних та подальша їх обробка дозволили мати часові координатні ряди ГНСС-станцій та отримати змогу виконати оцінку їх швидкостей. Для отримання цих результатів були використані спостереження державних, академічних, університетських та комерційних мереж України. Отримані оцінки векторів швидкостей повністю узгоджуються з рухом Євразійської літосферної плити.

Для подальшого використання у дослідженнях по деформації земної кори кожна ГНСС-станція має бути ретельно перевірена на можливі ефекти (спричинені роботою апаратури, людським фактором тощо) та задовольняти мінімальному періоду спостережень у три роки.

Публікація містить результати досліджень, проведених за грантом Президента України за конкурсним проектом (Ф103-2017) Державного фонду фундаментальних досліджень.

1. *Одинець О.П., Самойленко О.М., Яцків Я.С.* Исследование деформаций земной поверхности и локальная привязка астрономо-геодезических приборов на Крымском геодинамическом полигоне «Симеиз–Кацивели» // Бюлетень Українського центру визначення параметрів обертання Землі. — К.: Компанія ВАІТЕ, 2013. — № 8. — С. 15–35.
2. *Blewitt G., Lavalle D.* Effect of annual signals on geodetic velocity // J. Geophys. Res. — 2002. — Vol. 107, No. 7. — P. 1–11.
3. *Bernese GNSS Software Version 5.2* / Eds. R. Dach, S. Lutz, P. Walser, P. Fridez. — Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 2015. — 884 p.
4. *DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S.* Current plate motions // Geophys. J. Inter. — 1990. — Vol. 101. — P. 425–478.
5. Guidelines for EPN analysis centres / Prepared by the EPN Coordination Group and the EPN Central Bureau [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://www.epncb.oma.be/_documentation/guidelines/
6. *Ishchenko M.V.* Determination of velocities of East European stations from GNSS observations at the GNSS data analysis center of the main astronomical observatory, national academy of sciences of Ukraine // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. — 2016. — Vol. 32, No. 1. — P. 48–53.
7. *Ostini L., Dach R., Meindl M., Schaer S., Hugentobler U.* FODITS: A New Tool of the Bernese GPS Software [Електронний ресурс] // EUREF Symposium. — 2008. — Режим доступу: http://www.epncb.oma.be/_documentation/papers/eurefsymposium2008/fodits_a_new_tool_of_the_bernese_gps_software.pdf
8. <http://gnss.mao.kiev.ua/?q=node/17>
9. <ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/gnss/products/>
10. www.qgis.org

Оценка скоростей по данным ГНСС-наблюдений в центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины для дальнейших геодинамических исследований

Ищенко М.В.

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, 03143, г. Киев, ул. Академика Заболотного, 27

Глобальные спутниковые навигационные системы (ГНСС) прочно вошли не только в повседневную жизнь общества, но и широко используются в различных сферах научного применения. Возможность ведения непрерывных наблюдений на перманентных ГНСС-станциях, не зависящих от погодных условий, позволила накопить длительные периоды наблюдений. Все это привело к получению высокоточных координатных рядов с точностью несколько мм. Одним из первых этапов в исследовании локального уровня деформаций земной коры является оценка значений скоростей смещений ГНСС-станций. Одним из самых простых и распространенных способов представления горизонтальных движений земной поверхности, происходящих в пределах исследуемой области, является получение поля скоростей. В Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАНУ получены оценки векторов скоростей для 233 ГНСС-станций (в координатной системе IGB08), 202 из которых расположены на территории Украины. Максимальный период оценки с 7 декабря 1997 по 28 января 2017 составил 6993 дней (приблизительно 20 лет). Оценка скоростей базируется на ГНСС-наблюдениях государственных, академических, университетских и коммерческих сетей Украины. Векторы скоростей получены с использованием программного комплекса «Bernese GNSS Software ver. 5.2» (были использованы программные модули ADDNEQ2 та FODITS), рекомендованного Центрами анализа ГНСС-данных, в частности, Европейским Центром EUREF для исследований такого типа. Полученные оценки векторов скоростей полностью согласуются с движением Евразийской литосферной плиты. Для дальнейшего использования в исследованиях по деформации земной коры каждая ГНСС-станция должна быть тщательно проверена на возможные эффекты (вызванные работой аппаратуры, человеческим фактором и т.д.), а также удовлетворять минимальному периоду наблюдений в три года.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы; перманентная станция; поле скоростей; вектор скорости ГНСС-станции; ADDNEQ2; FODITS.

**Estimation of velocities using GNSS observations in the GNSS Data Analysis Center of
GAO NASU for further geodynamical studies**

Ishchenko M.V.

Main astronomical observatory of NASU, Akademika Zabolotnoho St. 27, 03143 Kyiv, Ukraine

Global satellite navigation systems (GNSS) has firmly entered not only in the daily life of society, but also widely used in various fields of scientific application. The possibility of conducting continuous observations at permanent GNSS stations, which do not depend on weather conditions, allowed to accumulate long periods of observations. All this led to the acquisition of precision time coordinate with accuracy of several millimeters. One of the first steps in the study of the local level of the crustal deformation is the estimation of the values of the displacement velocities of the GNSS stations. One of the simplest and most widespread ways of representing the horizontal movements of the earth's surface occurring within the region under study is the acquisition of a velocity field. GNSS data analysis center of GAO NASU received estimates of velocity vectors for 233 GNSS stations (in coordinate system IGB08), 202 of which are located in Ukraine. The maximum assessment period was from December 7, 1997 — January 28, 2017, or 6,993 days (approximately 20 years). The rate estimation is based on GNSS observations of state, academic, university and commercial networks of Ukraine. The velocity vectors were obtained using the Bernese GNSS Software Ver. 5.2 (ADDNEQ2 and FODITS software modules were used) recommended by the GNSS Data Analysis Centers, in particular by the EUREF European Center for research of this type. The obtained estimates of the velocity vectors fully coincide with the movement of the Eurasian lithospheric plate. For further use in studies on the deformation of the Earth's crust, each GNSS station should be thoroughly tested for possible effects (caused by the operation of the apparatus, human factor, etc.), as well as to satisfy the minimum observation period of three years.

Keywords: Global Navigation Satellite Systems; permanent station; velocity vector; ADDNEQ2; FODITS.

Надійшла до редакції / Received	4.09.2017
Виправлена авторами / Revised	16.10.2017
Прийнята до друку / Accepted	25.10.2017