

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЗМІН КООРДИНАТ GPS-СТАНЦІЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЇХ ТОЧНОСТІ

© Янків-Вітковська Л.М., 2011

Результаты наших предыдущих исследований указывают на то, что прогноз такого колеблющегося движения, как изменение координат, без учета физических причин их поведения путем моделирования дает лишь общую качественную картину этого процесса. Поэтому мы должны точно знать, какие шаги надо сделать для того, чтобы предложенный нами метод позволил нам делать качественные прогнозы для координат GPS-станций.

The results of our previous studies indicate that the prognosis of the oscillating motion, as a change of coordinates, without taking into account the physical causes of their behavior through simulation gives only a general qualitative picture of this process. We need to know exactly what steps should be done to ensure that our proposed method allowed us to make qualitative predictions for the coordinates of GPS-stations.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку суспільства існує багато практичних задач – як цивільних, так і військових, що потребують високоточного визначення місцеположення (позиціонування) рухомих об'єктів за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем – таких, як GPS (США), ГЛОНАСС (Росія), Galileo (ЄС), COMPASS/Beidou (Китай) [1-3]. Розв'язання цих задач потребує досягнення субдециметрової і сантиметрової точності визначення координат об'єктів. Досягнення такого рівня точності координатних визначень є доволі складною задачею, а існуючі підходи до її розв'язання не мають єдиного досконалого математичного апарату, який би дав змогу однозначно гарантувати отримання найкращого розв'язку. Дослідження динаміки змін координат перманентних супутникових станцій має особливе значення не тільки з погляду вдосконалення реалізації земної системи координат, а й у зв'язку з необхідністю вивчення фізичних явищ, які зумовлюють ці зміни[4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В Україні, на жаль, за останні десятиліття не приділяється належна увага розвитку вітчизняних технологій високоточного позиціонування, що призвело до того, що у нас поки що не існує програмного забезпечення, яке здатне конкурувати із зарубіжними розробками. Проте окремі роботи із створення математичного і програмного забезпечення опрацювання супутникових спостережень для високоточного позиціонування ведуться в Головні астрономічній обсерваторії НАНУ, а також на кафедрі ОПТ Харківського НУРЕ[7].

Окремі задачі із створення математичних методів для прогнозування точності координат GPS-станцій виконуються і в Інституті геодезії Національного університету "Львівська політехніка" [4–6]. Отже, можна зробити висновок, що для України доволі актуальними є питання створення вітчизняних технологій опрацювання ГНСС-спостережень, які спрямовані на розвиток математичного і програмного забезпечення досліджень GPS-спостережень з метою розв'язання задач високоточного позиціонування.

Постановка завдання. Ми ставимо собі завдання проаналізувати наші результати дослідження динаміки змін координат GPS-станцій для того, щоби використати їх для практичних задач, які вимагають високоточного визначення місцезнаходження рухомих об'єктів. Результати наших попередніх досліджень [4] вказують на те, що прогноз такого коливного руху, як зміна координат, без урахування фізичних причин їх поведінки шляхом моделювання дає лише загальну якісну картину цього процесу. Тому ми повинні вказати на наступні кроки, які потрібно зробити, щоби наш метод дав нам можливість робити якісні прогнози координатних визначень.

Виклад основного матеріалу. В наших попередніх дослідженнях за змінами часових рядів координат перманентної станції SULP було досліджено динаміку явища зміни координат та визначено реальну й прогнозу швидкості цих змін. Для вирішення цього завдання було взято щотижневі експериментальні значення координат станції SULP за 286 GPS тижнів (від кінця 2001 р.), які представлені у вигляді

$$x(t_k), y(t_k), z(t_k), k=1, \dots, m, \quad \text{де } m - \text{кількість дискретних вимірювань} \quad (1)$$

задані в прямокутній Декартові системі координат, прив'язаній до центру мас Землі, розкладено на постійну складову $r_{\min} = (x_{\min}, y_{\min}, z_{\min})$, яка відображає віддаленість геодезичного пункту від центру маси Землі, повільнозмінну складову $\bar{r}(t) = (\bar{x}(t), \bar{y}(t), \bar{z}(t))$, котра, апріорно припускається, пов'язана з рухом тектонічних плит, середньозмінну складову, $\tilde{r}(t) = (\tilde{x}(t), \tilde{y}(t), \tilde{z}(t))$ природа якої остаточно не з'ясована, і «залишкову складову» $\tilde{\tilde{r}}(t) = (\tilde{\tilde{x}}(t), \tilde{\tilde{y}}(t), \tilde{\tilde{z}}(t))$, яку надалі не враховуватимемо:

$$r(t_k) = r_{\min} + \bar{r}(t_k) + \tilde{r}(t_k) + \tilde{\tilde{r}}(t_k), \quad k = \overline{1, m}, \quad (2)$$

у формі (2) застосовано методи усереднення за допомогою набору ковзних поліномів та згладжуючої сплайн-апроксимації.

Параметри цього згладження вибрано емпірично. Для моделювання взято повільно-змінну складову $\bar{r}(t)$. Нами отримано експериментально виміряні швидкості переміщення геодезичного пункту та його прискорення. Графіки окремих складових координат геодезичного пункту, тобто доданки (2), показано на рис. 1.

Для моделювання величини $\bar{r}(t_k); k = \overline{1, m}$ застосовано три окремі автономні макромоделі, задані незалежними рівняннями

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_0 = \bar{x}_1; \\ \dot{\bar{x}}_1 = \bar{x}_2; \\ \dot{\bar{x}}_2 = P(\bar{x}_0, \bar{x}_1, \bar{x}_2; c_{\bar{x}}); \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{\bar{y}}_0 = \bar{y}_1; \\ \dot{\bar{y}}_1 = \bar{y}_2; \\ \dot{\bar{y}}_2 = P(\bar{y}_0, \bar{y}_1, \bar{y}_2; c_{\bar{y}}); \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{\bar{z}}_0 = \bar{z}_1; \\ \dot{\bar{z}}_1 = \bar{z}_2; \\ \dot{\bar{z}}_2 = P(\bar{z}_0, \bar{z}_1, \bar{z}_2; c_{\bar{z}}); \end{cases} \quad (3)$$

де $\bar{x}_i \equiv \bar{x}^{(i)}; \bar{y}_i \equiv \bar{y}^{(i)}; \bar{z}_i \equiv \bar{z}^{(i)}, i=0,1,2; P(\dots)$ – багатовимірні степеневі поліноми з коефіцієнтами апроксимації. Прогнозні розв'язки, що задають очікувану координату геодезичного пункту, його швидкості та прискорення, проілюстровано на рис. 2.

Зауважимо, що рис. 1 ілюструє, як протягом перших 6 тижнів спостереження (1136–1142 тижні GPS спостережень) на станції SULP, та протягом наступних 148 тижнів (1143–1399) відбулася істотна зміна розв'язуючих алгоритмів, що перетворюють результати вимірювань на координати пункту. Зазначимо, що ця зміна обчислень не вплинула на моделювання повільно змінного $\bar{r}(t)$ переміщення геодезичного пункту.

Оскільки якісний аналіз руху геодезичного пункту вздовж «тангенціальних» координат x, y приблизно ідентичний та однаково відрізняється від руху вздовж «радіальної» координати z , то внаслідок дослідження взаємозалежності різних складових руху (1) було побудовано дві неавтономні моделі.

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_0 = \bar{x}_1; \\ \dot{\bar{x}}_1 = \bar{x}_2; \\ \dot{\bar{x}}_2 = P(\bar{x}_0, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{y}_0, \bar{y}_1; c); \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{\bar{x}}_0 = \bar{x}_1; \\ \dot{\bar{x}}_1 = \bar{x}_2; \\ \dot{\bar{x}}_2 = P(\bar{x}_0, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{z}_0, \bar{z}_1; c); \end{cases} \quad (4)$$

де $\tilde{x}_i \equiv \tilde{x}^{(i)}; \tilde{y}_i \equiv \tilde{y}^{(i)}; \tilde{z}_i \equiv \tilde{z}^{(i)}, i=0,1,2$.

Розв'язки рівнянь (3), (4) легко отримано з допомогою розробленого нами програмного забезпечення. Отже, припускаючи, що макромоделі зі структурою (4) дають точніше наближення для суттєво залежних величин, і гірше наближення – для величини, які не мають суттєвої залежності, планувалося, порівнюючи два розв'язки (4), розкрити, яка з складових руху – горизонтальна поперечна чи вертикальна сильніше діє на горизонтальне переміщення. На жаль, похибки апроксимації (див рис. 2) не дали змоги отримати однозначного висновку. Втім, це не виключає такого застосування макромоделі в разі покращення її точності. Тому ми вирішили повторити цей експеримент, але для декількох геодезичних пунктів (табл. 1).

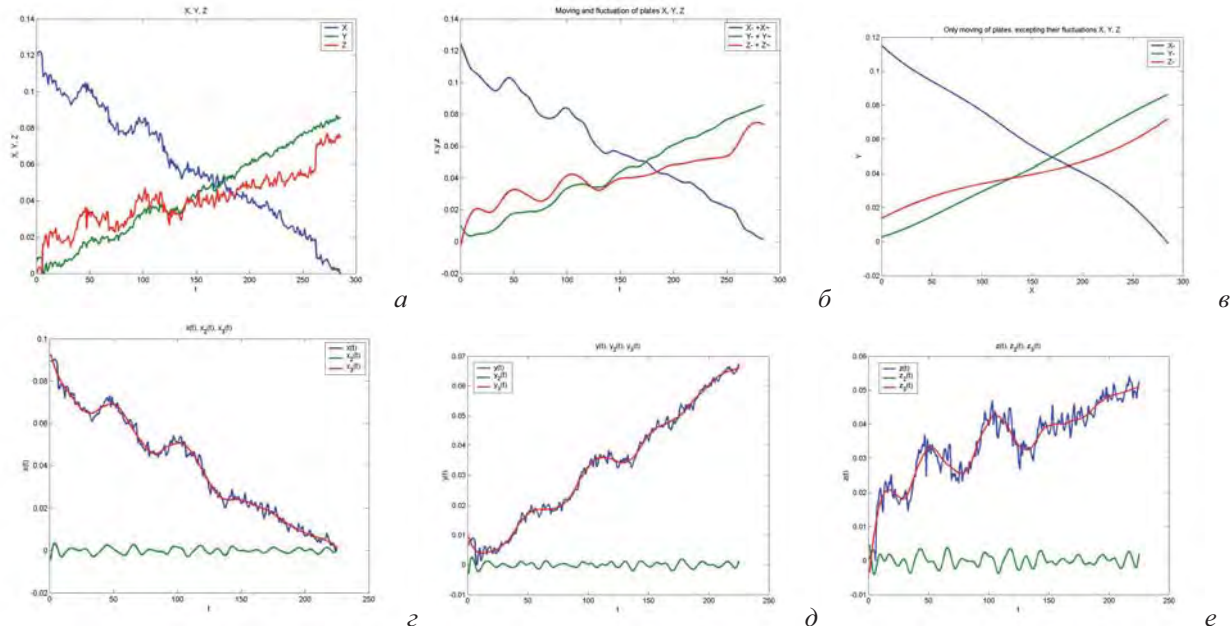


Рис. 1. Графіки залежності від часу координат геодезичного пункту $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ без сталої складової (а), графіки їх згладжених значень (б), сильно згладжених значень (в), та графіки (г, д, е) залежностей від часу експериментально виміряних координат геодезичного пункту ($x(t)$, $y(t)$, $z(t)$), їх згладжених значень й коливних складових ($\tilde{x}(t)$, $\tilde{y}(t)$, $\tilde{z}(t)$)

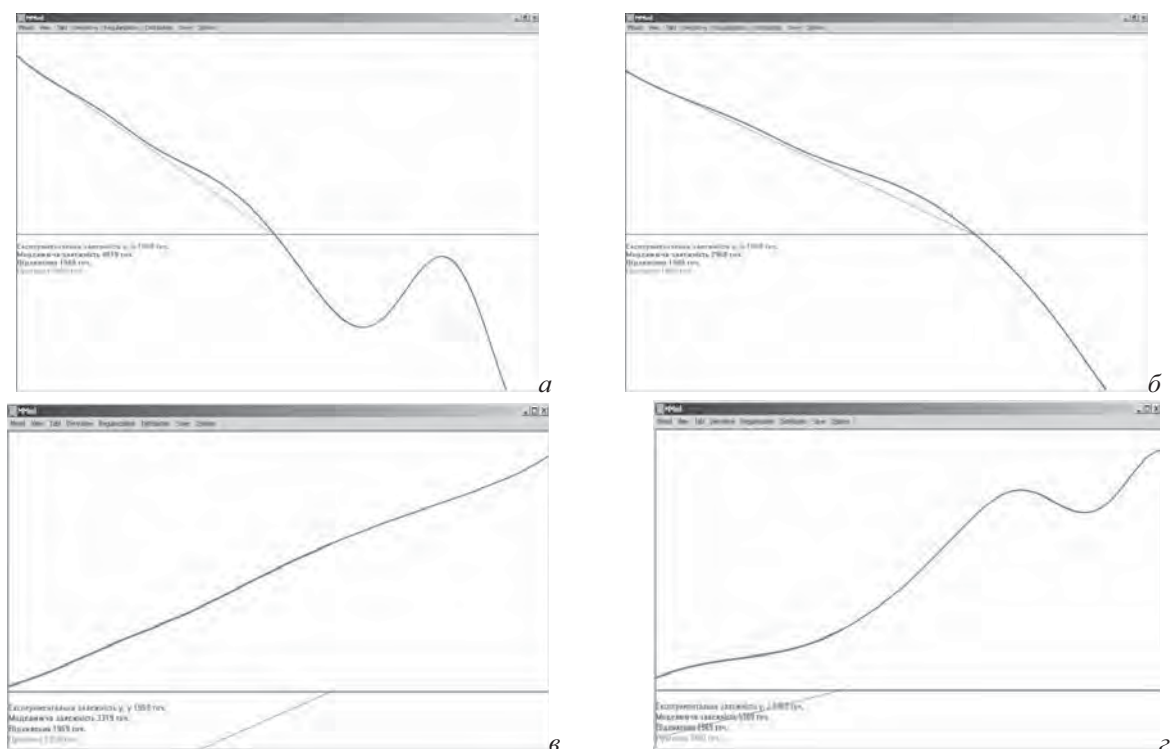


Рис. 2. Графіки залежностей від часу (а, б) повільно-змінної складової геодезичної координати $\bar{x}(t)$ та два її прогнози (на 748 і 367 тижнів). Графіки (в) залежності від часу повільно-змінної складової геодезичної координати $\bar{y}(t)$ та її прогноз (на 196 тижнів). Графік залежності від часу (г) повільно-змінної складової геодезичної координати $\bar{z}(t)$ та її прогноз (на 493 тижні). (Експериментальні дані за 286 тижнів)

На основі даних вимірювання координат декількох перманентних GPS-станцій було визначено закономірності їх механічного переміщення. Для підтвердження та перевірки цих закономірностей запропоновано і виконано обчислювальний експеримент, заснований на методі макромоделювання [6]. Як ми згадували раніше, опрацювання експериментальних геодезичних вимірювань за допомогою цього методу дає змогу пояснити природу досліджуваних явищ, що впливають на точність визначення координат GPS-станцій. Нами було отримано такі прогнозні результати.

Таблиця 1

Назви даних космічного вимірювання геодезичних координат

№ з/п	Назва GPS-станції	Початковий момент часу вимірювань (GPS-тиждень)	Кінцевий момент часу вимірювань (GPS-тиждень)
1	CHIV	1399	1495
2	EVPA	1349	1495
3	GLSV	1137	1495
4	KHAR	1315	1483
5	MIKL	1192	1495
6	POLV	1137	1495
7	SULP	1137	1495
8	UZHL	1137	1495

Як видно з графіків на рис. 4, наша модель вдало відображає динамічний зв'язок між величинами $\tilde{x}_i(t)$, $\tilde{y}_i(t)$, $\tilde{z}_i(t)$, взятими на прикладі i -ї станції ($i = 3$). Це слугує частковим непрямим підтвердженням, що складові $\tilde{x}_i(t)$, $\tilde{y}_i(t)$, $\tilde{z}_i(t)$, виділені згладженням з експериментально визначених координат геодезичного пункту, відображають особливий вид коливного руху окремих точок на поверхні Землі. Цей рух поєднує дрейфовий зсув та безсистемні коливання, серед яких іноді утворюються біжучі хвилі, що видно на рис. 3. Для експериментального підтвердження цього висновку потрібні вимірювання, виконані за допомогою альтернативних засобів.

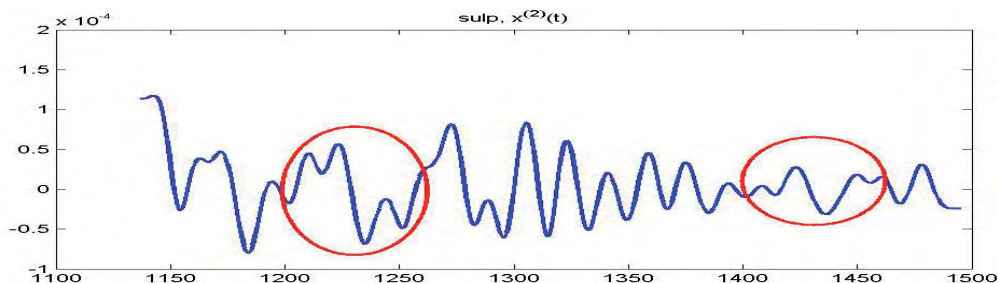


Рис. 3. Графіки $\tilde{x}_7^{(2)}(t)$ (a), $\tilde{y}_8^{(2)}(t)$ (b), $\tilde{z}_6^{(6)}(t)$ (c), на яких видно явище, схоже до “проходження біжучої хвилі”

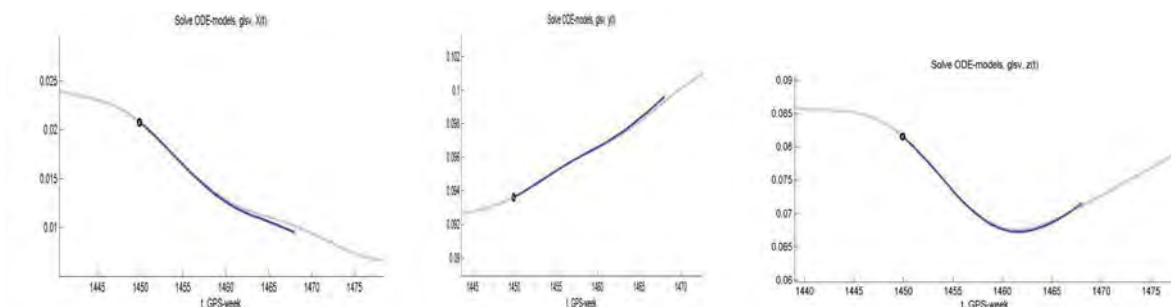


Рис. 4. Графіки згладжених величин $\tilde{x}_i(t)$ (a), $\tilde{y}_i(t)$ (b), $\tilde{z}_i(t)$ (c) змінної складової координат $i = 3$ для станції **glsv** – крапками, та графіки їхніх відповідних модельних наближень, отриманих з макро-модельного розв'язку

Для практичного впровадження запропонованого нами макромодельного методу ми застосували його для прогнозного моделювання коливної складової координат геодезичних станцій UA-EUPOS (ZAKPOS), оскільки цей підхід придатний для застосування в системах реального часу. Сьогодні мережа референчних станцій ZAKPOS складається з 19 GNSS станцій; нами взято лише дані з таких станцій, як: Рахів (RAKH), Міжгір'я (MIZG), Мукачево (MUKA), Хуст (KHST), Великий Березний (VBER). Регулярні GNSS спостереження на референчних станціях мережі ZAKPOS розпочалися 04 лютого 2009 р. (35 GPS день, 1517 GPS-тиждень) [7]. Якщо у наших дослідженнях динаміки змін координат станції SULP[4] ми брали експериментальні дані координат станції, усереднені за тиждень, то для дослідження зміни координат станцій UA-EUPOS ми вже мали можливість працювати зі щоденними значеннями геодезичних координат. Це дуже важливо, бо тепер, аналізуючи дані, отримані після застосування макромодельного підходу, ми зможемо оцінити вплив атмосфери (іоносфери) на точність визначення координат GPS-станцій.

За даними (1) відновлено систему звичайних диференціальних рівнянь, яка наближено відтворює динамічну зміну цих даних. Зокрема для моделювання зміни координат з часом взято їхні щоденні значення за 26 тижнів. На рис. 4, 5 проілюстровано виконані нами обчислення.

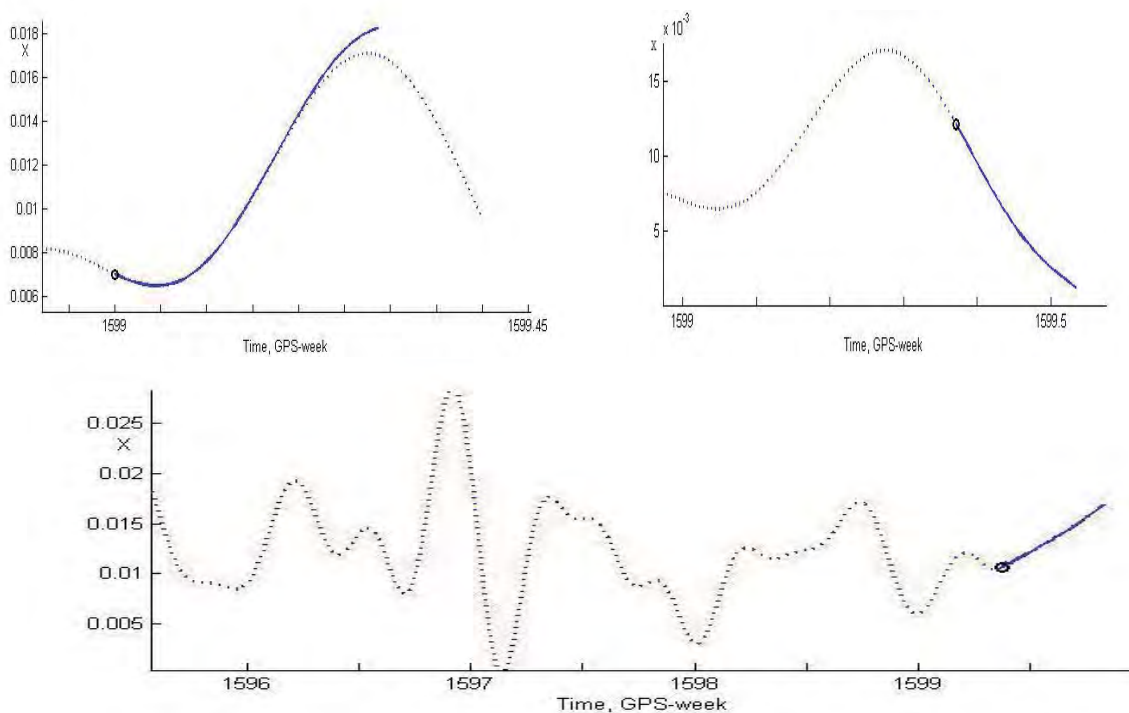


Рис. 5. Графік коливної складової координати $x_1(t)$ (крапками, станція KHST) та її наближення $x_{11}(t)$, отриманого з розв'язку рівнянь (2). Графік коливної складової координати $x_1(t)$ (крапками, станція KHST) та її прогнозу $x_{11}(t)$, отриманого внаслідок розв'язання рівнянь (2). Графік коливної складової координати $x_2(t)$ (крапками, станція RAKH) та її прогнозу $x_{11}(t)$, отриманого внаслідок розв'язання рівнянь (2)

Висновки. Як видно з графіків на рис. 4, побудована нами у [6] модель вдало відображає динамічний зв'язок між величинами $\tilde{x}_i(t)$, $\tilde{y}_i(t)$, $\tilde{z}_i(t)$, взятими на прикладі i -ї станції ($i = 3$). З цього випливає висновок, що самі величини $\tilde{x}_i(t)$, $\tilde{y}_i(t)$, $\tilde{z}_i(t)$ є реалізацією спільного фізичного процесу. Це слугує частковим непрямым підтвердженням, що складові $\tilde{x}_i(t)$, $\tilde{y}_i(t)$, $\tilde{z}_i(t)$, виділені згладженням з експериментально визначених координат (1) геодезичного пункту, відображають особливий вид коливного руху окремих точок на поверхні Землі. Цей рух поєднує дрейфовий зсув

та безсистемні коливання. Явище спізненого проходження максимуму швидкостей [6] приводить до таких припущень щодо причини виникнення коливної систематичної похибки космічного вимірювання геодезичних координат. Цю похибку викликають: тектонічні механічні хвилі на поверхні Землі, іонізаційні збурення атмосфери, гравітаційний вплив позаземних тіл на супутники, котрі здійснюють вимірювання, помилки алгоритмів обробки даних радіолокаційних вимірювань.

Низькі прогнозні якості побудованої нами моделі показують, що в обчислювальному експерименті не вдалося звести похибку вимірювання координати до рівня руху механічного тіла [5]. Це дає підстави припустити, що систематична похибка вимірювання геодезичних координат істотно залежить від усереднення затримки радіохвилі в іоносфері. Проте це не проста задача, для її розв'язання потрібна коштовна апаратура. Проте ми зробили деякі спроби дослідження впливу іоносфери за допомогою запропонованого нами макромодельного методу, вдосконаливши його. І тому врахування впливу іоносфери на зміни координат GPS-станцій буде наступним кроком у нашому дослідженні. Правильне врахування впливу іоносфери дасть змогу робити не лише короткотривалі, але і довготривалі прогнози для високоточного визначення місцеположення рухомих об'єктів за сигналами глобальних навігаційних супутникових систем.

1. Антонович К.М. *Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монограф. в 2 т. / К.М. Антонович.* – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – Т. 1. – 334 с. 2. *Europe's Satellite Navigation Programmes GALILEO and EGNOS Plan [Электронный ресурс]* // Режим доступа: <http://www.gsa.europa.eu/download.cfm?downloadfile=52B7C637-02C6-7DA7-C2F2E75DCA239878&typename=dmFile>. 3. *Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС [ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина]* – М.: ИПРЖР, – 1998. – 400 с. 4. Янків-Вітковська Л.М., Савчук С.Г., Паучок В.К. Дослідження динаміки змін координат перманентних GPS станцій // *Вісник геодезії і картографії.* – 2008. – № 1. – С. 7–12. 5. Янків-Вітковська Л.М., Савчук С.Г., Паучок В.К. Новий підхід до аналізу систематичних похибок координат перманентної GPS-станції SULP // *Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землепорядкування – європейський досвід* // *Збірник наукових праць.* – Чернігів, 2007. – Вип. 3. 6. Янків-Вітковська Л. Дослідження динаміки змін координат геодезичних пунктів для прогнозування закономірностей їхнього механічного переміщення // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр.* – Л., 2010., Вип. II(20) – С.117–124. 7. Янків-Вітковська Л. Дослідження динаміки змін координат референційних станцій мережі ZAKPOS // *Геодезія, картографія і аерофотознімання : міжвідомчий наук.-техн. збірник.* – Львів: Вид-во Нац ун-ту “Львівська політехніка”, 2010. – Вип.. 73, – С. 41–44. 8. Желанов О.О. *Розвиток методу та алгоритмів обробки фазових спостережень глобальних навігаційних супутникових систем в задачах високоточного кінематичного позиціонування: Дис. канд. техн. наук, 157 с.*