

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЗМІН КООРДИНАТ ГЕОДЕЗИЧНИХ ПУНКТІВ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ЇХНЬОГО МЕХАНІЧНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ

Л. Янків-Вітковська

Національний університет “Львівська політехніка”

Ключові слова: зміни координат, зміщення пунктів.

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

Постановка проблеми

Координати геодезичних пунктів, визначені експериментально, за допомогою космічного вимірювального обладнання на перманентних GPS-станціях, відображають тектонічний рух точок на поверхні Землі. Крім того, числові значення цих геодезичних координат містять своєрідну систематичну похибку, викликану впливом навколосемних фізичних полів на вимірювальне обладнання. Для практичних потреб та науково-дослідних інтересів важливо, відділивши систематичну похибку від експериментально визначеної величини координат, встановити закономірності зміни координат геодезичних пунктів.

Невирішені частини загальної проблеми

У роботах [1, 2] цю задачу розглянуто на прикладі одного геодезичного пункту. В цих роботах прийнято концептуальне припущення, що тектонічний рух відображений у даних космічного вимірювання геодезичних координат повільно-змінною, аперіодичною складовою, а систематична похибка – деякими випадковими коливаннями. Тобто у цьому підході знехтувано сейсмічними коливаннями, котрі виникають, наприклад, під час землетрусів.

Постановка завдання

На основі даних космічного вимірювання координат декількох геодезичних пунктів визначити закономірності їхнього механічного переміщення.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для розкриття закономірностей аперіодичного та тектонічного коливного руху взято координати восьми GPS-станцій (станцій), виміряні протягом 1137–1495 тижнів GPS-вимірювань (табл. 1).

Позначимо експериментально виміряні координати символами

$$x_i^E(t_k), y_i^E(t_k), z_i^E(t_k); k = \overline{1, m_i}; i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

де величини x_i^E, y_i^E, z_i^E відповідають прийнятим у геодезії позначенням координат (у декартовій системі координат, прив’язаній до центра маси Землі) для i -ї станції (див. табл. 1); n – кількість станцій ($n = 8$); m_i – кількість дискретних вимірювань координат для i -ї станції; t_k – момент часу вимірювання. Зауважимо, що для кожної станції кількість вимірювань m_i різна, але моменти вимірювання t_k є спільними для всіх станцій.

Знаючи постійну складову координат геодезичних пунктів

$$\begin{aligned} x_i^C &= \min x_i^E(t_k), k \in [1, m_i]; \\ y_i^C &= \min y_i^E(t_k), k \in [1, m_i]; \\ z_i^C &= \min z_i^E(t_k), k \in [1, m_i]; \\ i &= \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (2)$$

знаходимо їхні змінні складові:

$$\begin{aligned} x_i(t_k) &= x_i^E(t_k) - x_i^C; k = \overline{1, m_i}; \\ y_i(t_k) &= y_i^E(t_k) - y_i^C; k = \overline{1, m_i}; \\ z_i(t_k) &= z_i^E(t_k) - z_i^C; k = \overline{1, m_i}; i = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (3)$$

Ці змінні складові відображають систематичну похибку вимірювання і тектонічний рух, котрий, як припускається, поєднує аперіодичні та коливні складові.

Графіки величин (3) для вибраних станцій показані на рис. 1. Як видно з цих графіків, за експериментально вимірними значеннями $x_i(t_k)$, $y_i(t_k)$, $z_i(t_k)$, $k = \overline{1, m_i}$, $i = \overline{1, n}$ важко робити висновки про фізичну природу відображених ними даних.

Апріорно відомо, що на космічне радіоелектронне геодезичне обладнання часто діють слабкі зовнішні впливи (наприклад, переміщення локальних вихорів в іоносфері під час проходження через неї радіохвиль), та рідко діють сильні зовнішні впливи (наприклад, великомасштабні іонізаційні збурення, викликані активністю Сонця). Отже, згладження величин (3) має приводити до

відділення дрібних рухів, представлених в цих величинах, та залишати в них істотні (триваліші та інтенсивніші) рухи. Це дає підстави сподіватися, що за деяких параметрів згладження величин (3) з них буде отримано “істотні коливні та аперіодичні складові”. Апріорно природа цих складових невідома. Тобто не відомо, чи вони викликані сейсмічним рухом, чи значними збурювальними впливами на вимірювальне обладнання.

З урахуванням такого припущення на основі змінних складових (3) експериментально визначених координат станцій знайдено згладжені значення

$$\tilde{x}_i(t_k), \tilde{y}_i(t_k), \tilde{z}_i(t_k); k = \overline{1, m_i}; i = \overline{1, n} \quad (4)$$

їхніх координат. Для вирахування цих згладжених значень застосовано методи сплайн-апроксимації. Графіки згладжених величин (4) та їхніх похідних показано на рис. 2–6.

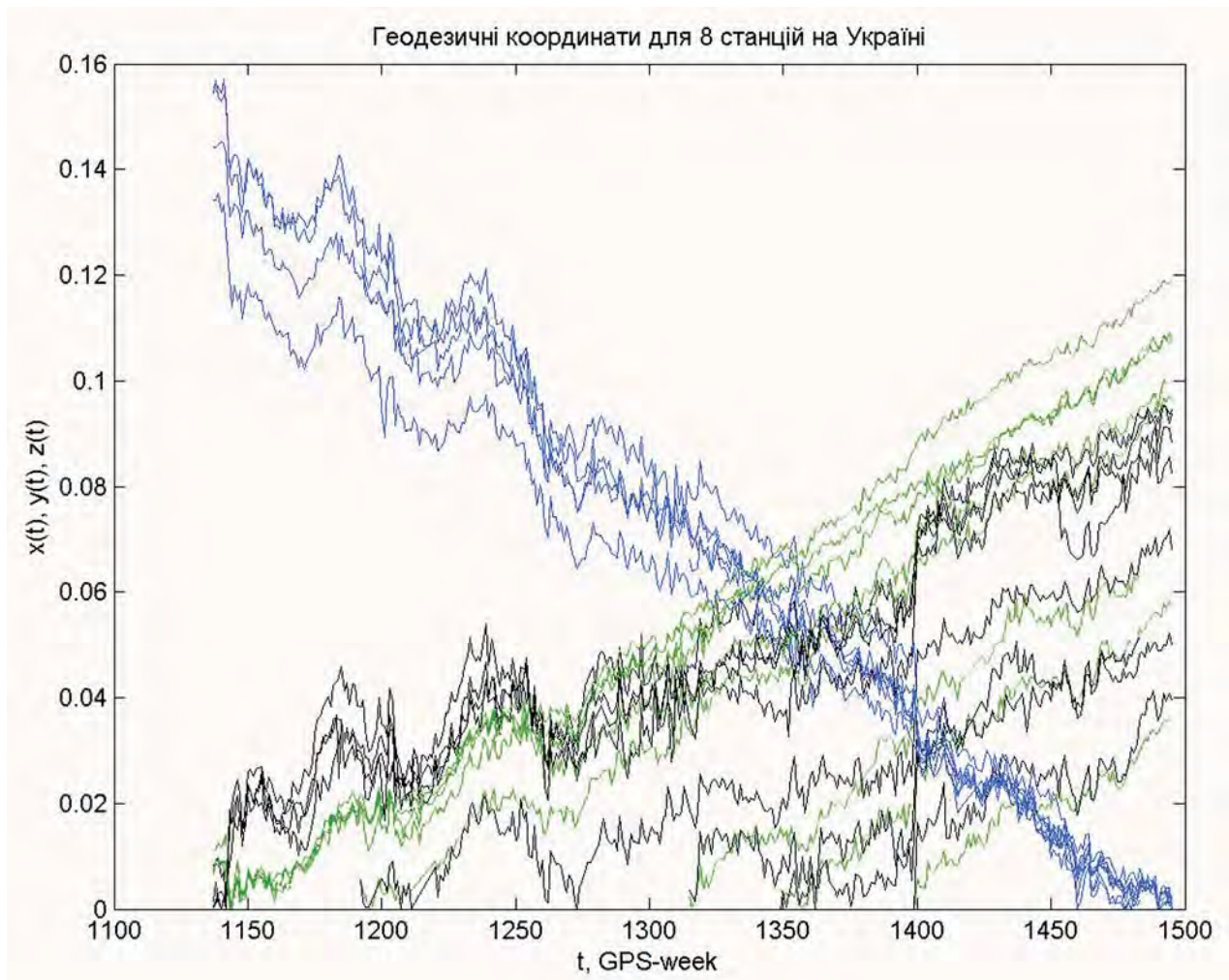
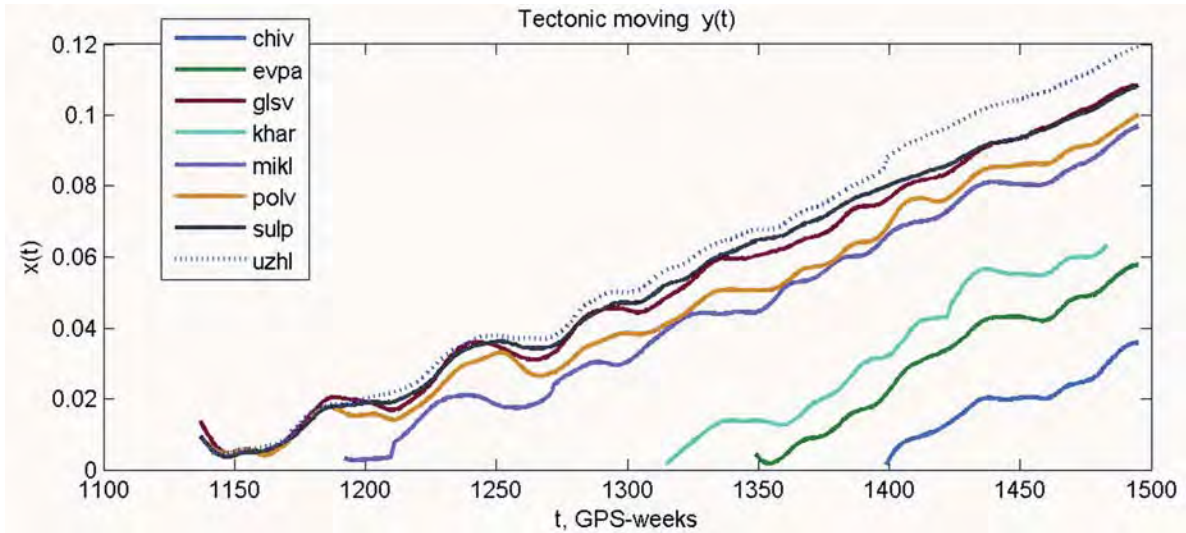
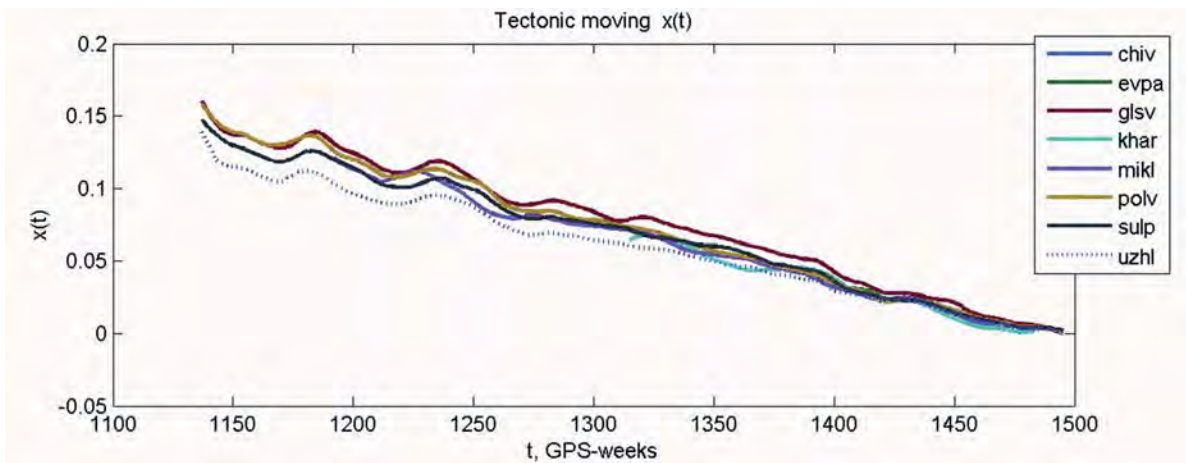


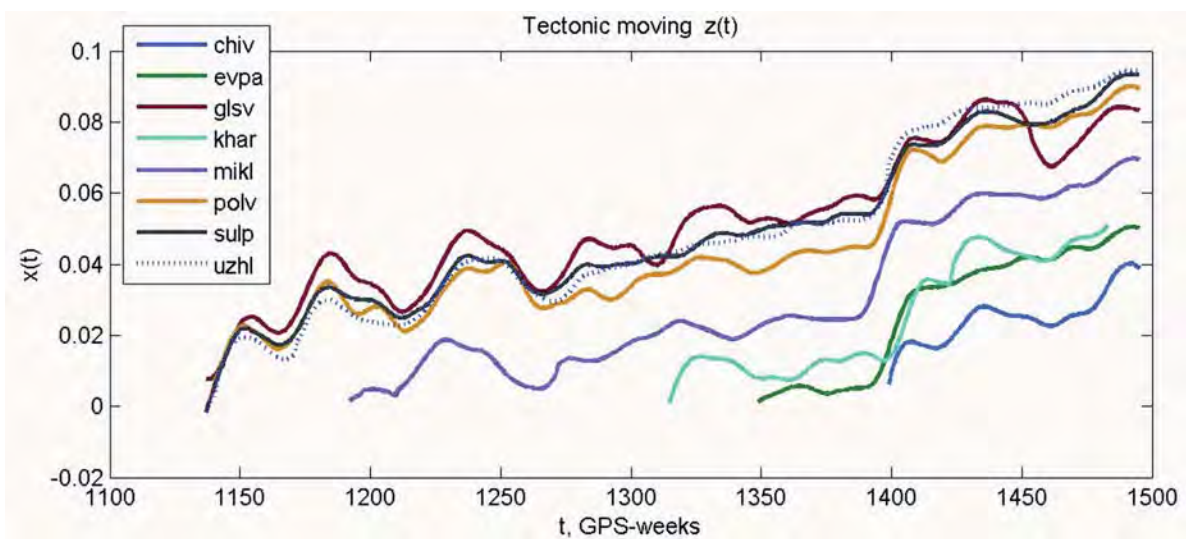
Рис. 1. Графіки $x_i(t)$, $y_i(t)$, $z_i(t)$ змінних складових експериментально вимірних координат станцій, $i = \overline{1, n}$



a

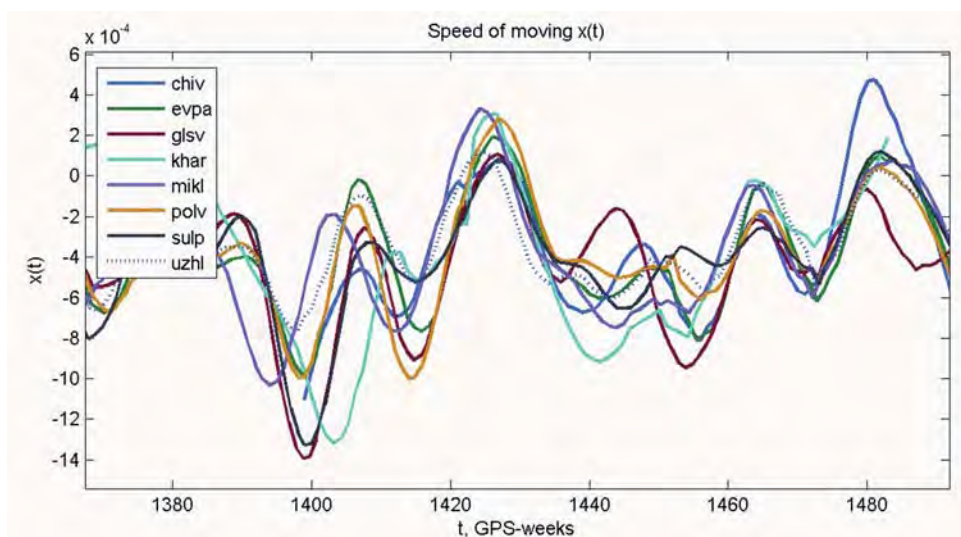


b

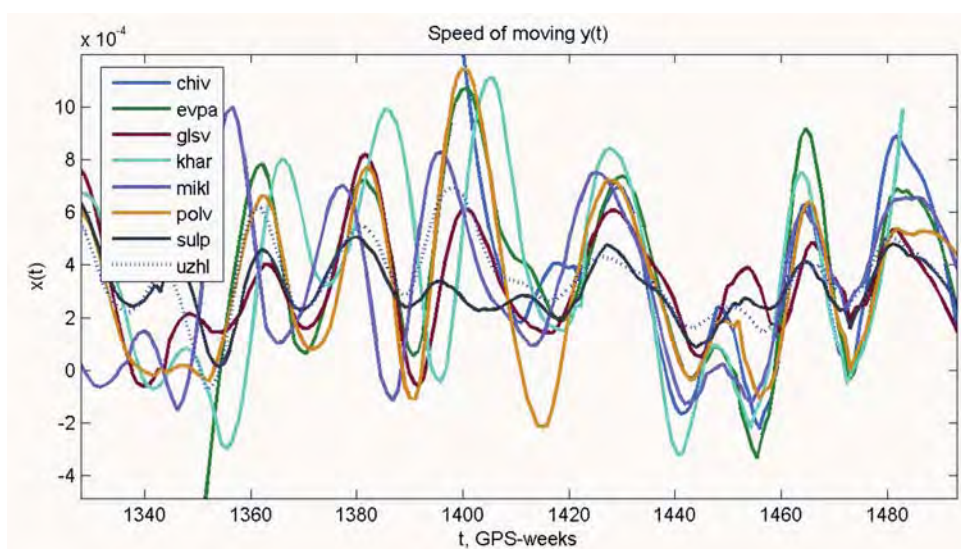


c

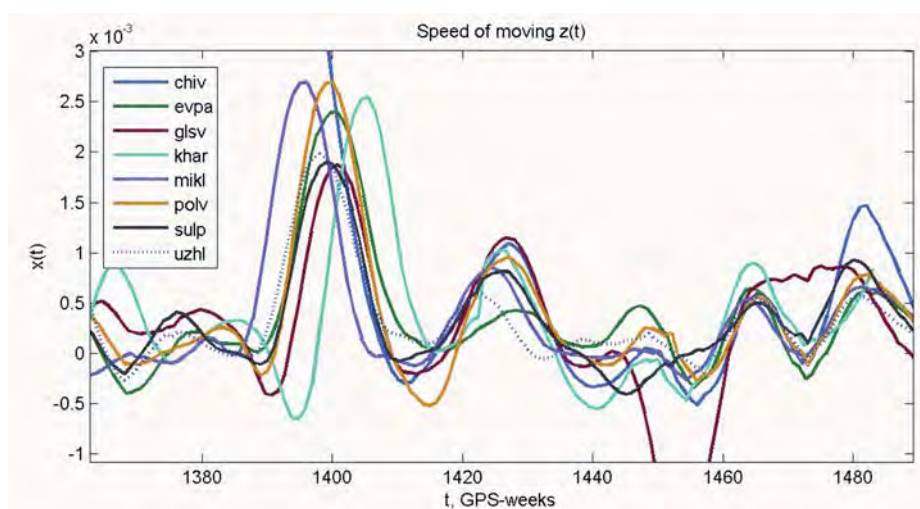
Рис. 2. Графік згладжених величин $\tilde{x}_i(t)$ (a), $\tilde{y}_i(t)$ (b), $\tilde{z}_i(t)$ (c) змінної складової координат n станцій



a

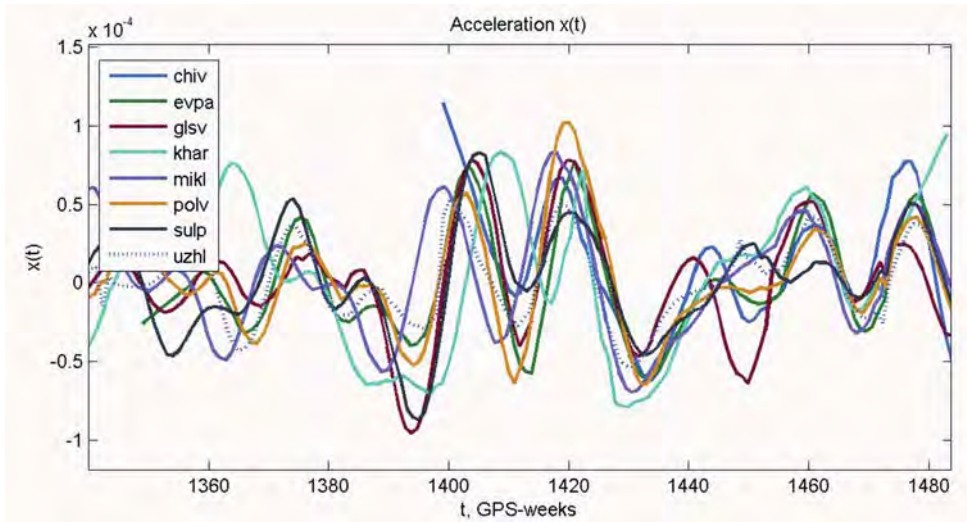


b

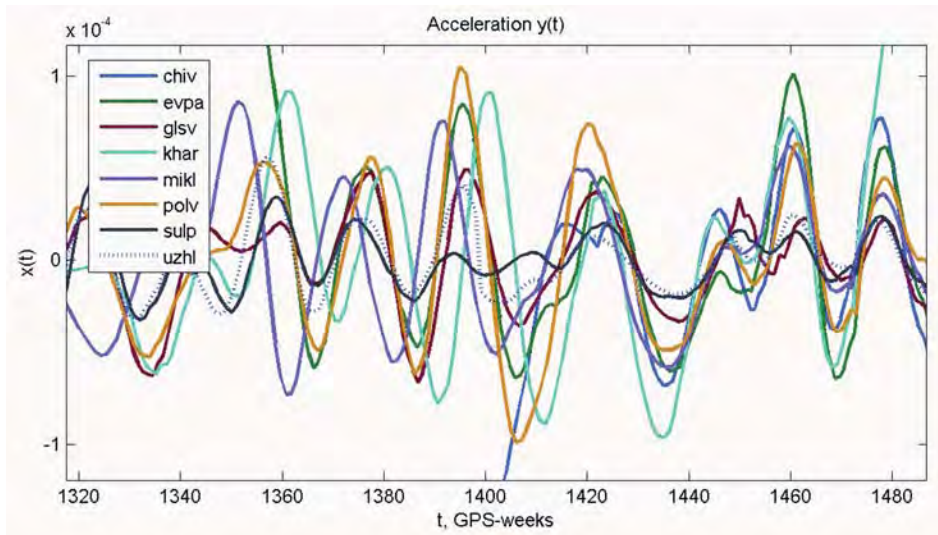


c

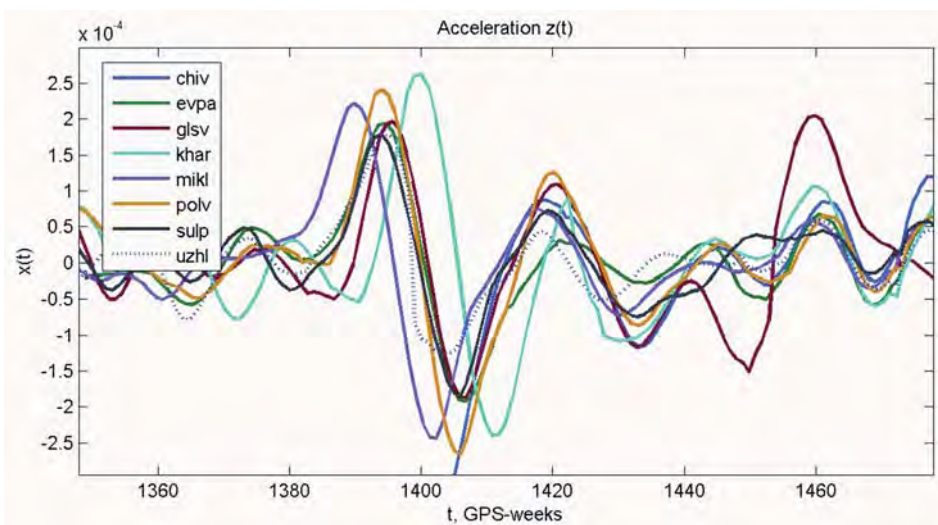
Рис. 3. Графік згладжених величин швидкостей $\tilde{x}_i^{(1)}(t)$ (a), $\tilde{y}_i^{(1)}(t)$ (b), $\tilde{z}_i^{(1)}(t)$ (c) координат п станцій



a

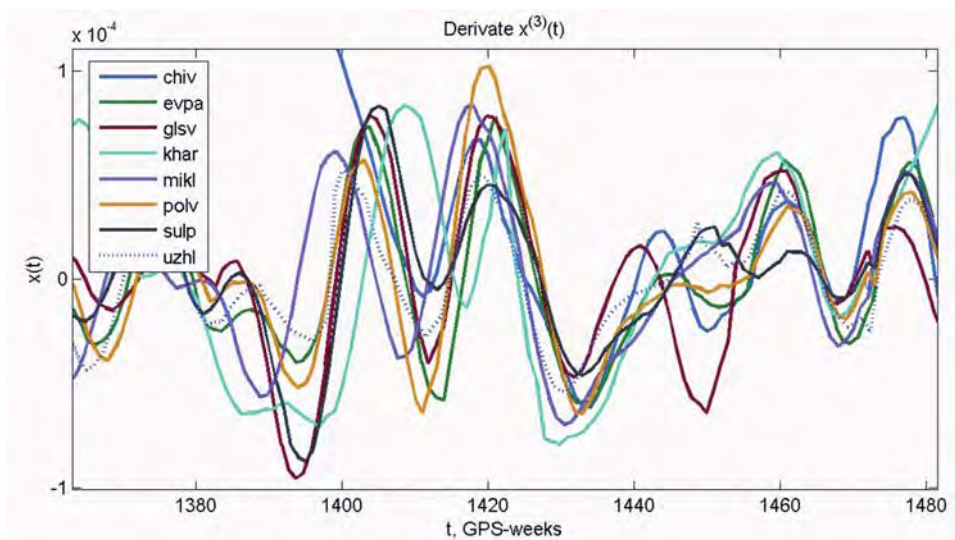


b

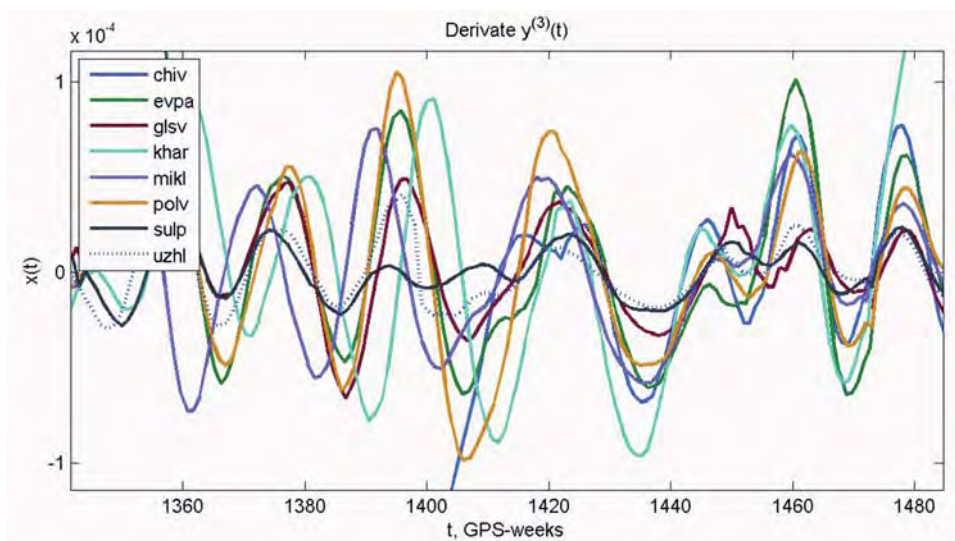


c

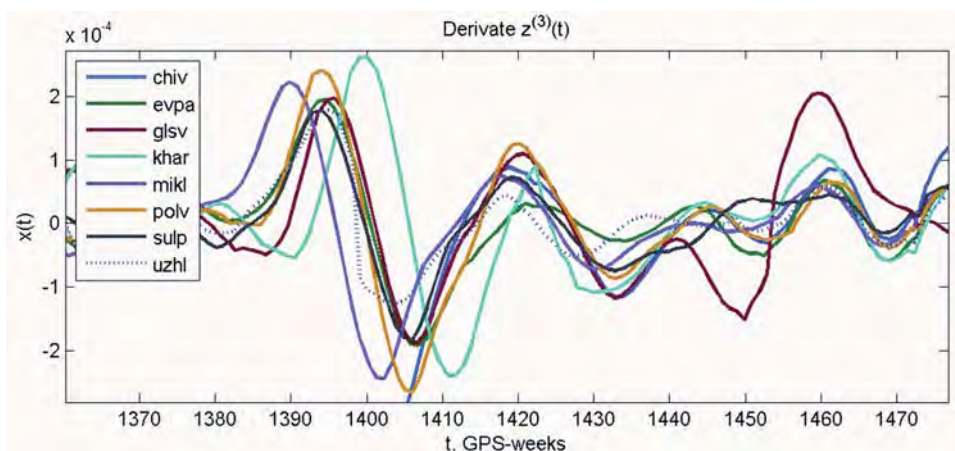
Рис. 4. Графік згладжених величин прискорень $\tilde{x}_i^{(2)}(t)$ (a), $\tilde{y}_i^{(2)}(t)$ (b), $\tilde{z}_i^{(2)}(t)$ (c) координат п станцій



a



b



c

Рис. 5. Графік згладжених величин трьох похідних прискорень $\tilde{x}_i^{(3)}(t)$ (a), $\tilde{y}_i^{(3)}(t)$ (b), $\tilde{z}_i^{(3)}(t)$ (c) координат п станцій

Додатково для непрямого підтвердження припущення про наявність тектонічних коливань, виявлених за даними (4), виконано обчислювальний експеримент, який ґрунтується на методах макромоделювання [3]. Зауважено, якщо змінні стану макромоделі, заданої системою рівнянь спеціальної структури (котра описана нижче), відповідають взаємозалежним фізичним величинам, тоді експериментально побудована така макромодел з деякою прийнятною точністю імітує взаємодію цих величин. І навпаки, – для фізично незалежних величин експериментально побудувати таку макромодел неможливо. На цій основі зроблено припущення. Якщо за даними (4) вдасться побудувати макромодел, описану в роботі [4], тоді це буде додатковим непрямим підтвердженням, що величини $\tilde{x}_i(t)$, $\tilde{y}_i(t)$, $\tilde{z}_i(t)$, взяті для деякої i -ї станції, є взаємозалежними. Тобто вони “можуть бути” реалізацією хвильового процесу.

Щоб з’ясувати результат такого припущення за даними $\tilde{x}_i(t)$, $\tilde{y}_i(t)$, $\tilde{z}_i(t)$, взятими для станції $i = 3$ (glsv), побудовано макромодел з 12 звичайних диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= x_1; \dot{x}_1 = x_2; \dot{x}_2 = x_3; \\ \dot{x}_3 &= P_x(x_0, x_1, x_2, x_3, y_0, y_1, y_3, y_4, z_0, z_1, z_2, z_3); \\ \dot{y}_0 &= y_1; \dot{y}_1 = y_2; \dot{y}_2 = y_3; \\ \dot{y}_3 &= P_y(x_0, x_1, x_2, x_3, y_0, y_1, y_3, y_4, z_0, z_1, z_2, z_3); \\ \dot{z}_0 &= z_1; \dot{z}_1 = z_2; \dot{z}_2 = z_3; \\ \dot{z}_3 &= P_z(x_0, x_1, x_2, x_3, y_0, y_1, y_3, y_4, z_0, z_1, z_2, z_3); \end{aligned} \quad (6)$$

з ідентифікаційними рівняннями виду

$$\begin{aligned} \min_{c_x} & \left(\sum_{k=1}^{m_i} [\tilde{x}_k^{(4)} - P_x(t_k)]^2 + \alpha_x \sum_{I_x} c_{xI_x}^2 \right) \\ \min_{c_y} & \left(\sum_{k=1}^{m_i} [\tilde{y}_k^{(4)} - P_y(t_k)]^2 + \alpha_y \sum_{I_y} c_{yI_y}^2 \right) \\ \min_{c_z} & \left(\sum_{k=1}^{m_i} [\tilde{z}_k^{(4)} - P_z(t_k)]^2 + \alpha_z \sum_{I_z} c_{zI_z}^2 \right) \end{aligned}$$

де символом $P_r(t_k)$ позначено

$$P_r(t_k) = P_r(\tilde{x}(t_k), \tilde{x}'(t_k), \tilde{x}''(t_k), \tilde{x}'''(t_k), \tilde{y}(t_k), \tilde{y}'(t_k), \tilde{y}''(t_k), \tilde{y}'''(t_k), \tilde{z}(t_k), \tilde{z}'(t_k), \tilde{z}''(t_k), \tilde{z}'''(t_k)); r = x, y, z;$$

де c_x, c_y, c_z – відповідно коефіцієнти поліномів P_x, P_y, P_z ; символами I_x, I_y, I_z позначено мультиіндекси при коефіцієнтах c_x, c_y, c_z – відповідно; $\alpha_x,$

α_y, α_z – параметри регуляризації, підібрані експериментально. Величини x_0, y_0, z_0 відповідно моделюють згладжені значення координат $\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, \tilde{z}_i$ для однієї i -ї вибраної станції.

Обчислюючи похідні $\tilde{x}_i^{(j)}(t), \tilde{y}_i^{(j)}(t), \tilde{z}_i^{(j)}(t), i \in [1, n], j \in [0, 4]$, виявили, що дані GPS-вимірювань подано кубічним сплайном (для якого похідні 2-го і 3-го порядків вироджуються у кусково-лінійні та кусково-постійні залежності). Це істотно звужує їх дослідження з допомогою обчислювальних методів.

Все ж за структурою (6) було побудовано макромодел, котра з прийнятною точністю наближає модельовану величину (4) на часовому відрізку, який дещо перевищує тривалість фізичних подій під час “проходження гребеня хвилі” у даних (4).

На рис. 6 зображено графіки розв’язків моделі (6), які ілюструють відповідність цієї моделі та даних (4).

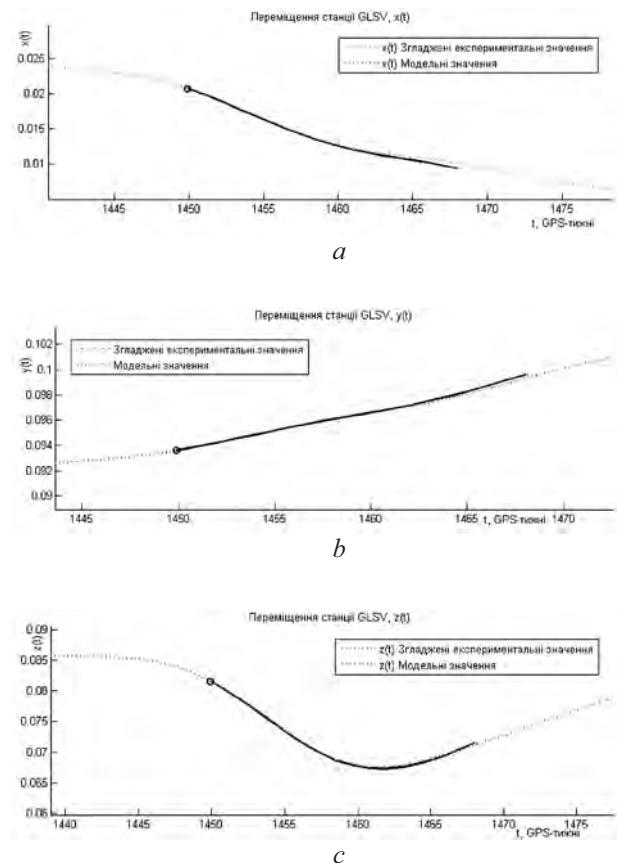


Рис. 6. Графіки згладжених величин (а), (b), (с) змінної складової координат $i = 3$ (glsv, крапками), та графіки їхніх відповідних модельних наближень, отриманих з розв’язку (6)

Висновки

Як видно з графіків на рис. 6, модель (6) 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. Тобто вони не утворені різними впливами, що притаманно завадам. 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 (1) 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.

Для експериментального підтвердження цього висновку потрібні вимірювання, виконані за допомогою альтернативних засобів.

Література

1. Янків-Вітковська Л.М., Савчук С.Г., Паучок В.К. До аналізу систематичних похибок координат перманентної GPS станції Sulp // Вісник геодезії і картографії. – К. – № 5, 2007. – С. 9–13.

2. Янків-Вітковська Л.М., Савчук С.Г., Паучок В.К. Дослідження динаміки змін координат перманентних GPS станцій // Вісник геодезії і картографії. – К. – № 1, 2008. – С. 7–12.

3. Матвійчук Я.М. Математичне макромодельовання динамічних систем: теорія та практика. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2000. – 215 с.

Дослідження динаміки змін координат геодезичних пунктів для прогнозування закономірностей їхнього механічного переміщення

Л. Янків-Вітковська

На підставі даних вимірювання координат декількох геодезичних пунктів визначено зако-

номірності їхнього механічного переміщення. Для непрямого підтвердження припущення про наявність тектонічних коливань виконано обчислювальний експеримент, який ґрунтується на методі макромодельовання. Опрацювання експериментальних геодезичних вимірювань за допомогою цього методу дає змогу пояснити природу досліджуваних явищ.

Исследование динамики изменений координат геодезических пунктов для прогнозирования закономерностей их механического перемещения

Л. Янків-Вітковська

На основании данных измерений координат нескольких геодезических пунктов определены закономерности их механического перемещения. Для непрямого подтверждения предположения о наличии тектонических колебаний осуществлен вычислительный эксперимент, основанный на методе макромоделирования. Обработка экспериментальных геодезических измерений с помощью этого метода позволяет объяснить природу исследуемых явлений.

Investigation of the dynamic changes of coordinates of geodetic points to predict the patterns of their mechanical movement

L. Yankiv-Vitkovska

On the basis of information of measuring of coordinates of a few geodesic points conformities to law of their mechanical moving are certain. For indirect confirmation of supposition about the presence of tectonic vibrations, a calculable experiment which is based on the methods of macromodeling is executed.

