

ПРО КОРЕЛЯЦІЙНИЙ ЗВ'ЯЗОК ГЕОДЕЗИЧНИХ І ГЕОСЕЙСМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

© Янків-Вітковська Л.М., 2011

Исследована корреляционная связь между значениями геодезических координат, полученных с помощью GPS-наблюдений и данными, которые описывают локальное состояние земной поверхности и околоземного пространства. Для выявления возможной связи между изменчивостью геодезических координат и параметрами, которые описывают геосейсмическую и солнечную активность, вычислены автокорреляционные интегралы и взаимные корреляционные интегралы функций для заданного периода времени.

The correlation between the values of geodetic coordinates obtained using GPS-observations and data that describe the local state of the earth's surface and near-Earth space was researched. We calculate autocorrelation and cross-correlation integrals of integrals of functions for a given period of time to identify the possible connection between the oscillating components of the geodetic coordinates and parameters that describe geo-seismic and solar activity

Постановка проблеми. Координати геодезичних пунктів відображають просторове розміщення об'єктів, а також їх зміщення, пов'язане з тектонічним дрейфом. Крім того, числові дані визначених геодезичних координат відображають відносно повільно-змінні коливання, природу яких остаточно не з'ясовано. Припускається, що вони викликані систематичною похибкою геодезичних координат, отриманих із GPS- спостережень та впливом навколоземних фізичних полів [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що стан близького навколоземного простору залежить від впливів Сонця і Місяця. Припливні сили, викликані гравітаційним притяганням Місяця, впливають на земну поверхню. Результатом проявів сонячної активності є гравітаційний та іонізаційний вплив на навколоземне середовище. Ситуація в іоносфері постійно змінюється залежно від регулярних варіацій геліофізичних та геофізичних умов. Антропогенні дії, пов'язані зі впливом людини на погоду, клімат і навколоземний космічний простір, стають порівнянними також із впливом природних процесів [3–6].

Сьогодні багато говорять про можливість прогнозування сейсмічних катастроф на Землі за допомогою оцінювання параметрів іоносфери. Проте це складна і нетривіальна задача, хоча досліджують іоносферу вже чимало років. Основна проблема полягає в тому, що комплекс "Сонце – сонячний вітер – атмосфера Землі" – це складна нелінійна система, в якій відбуваються процеси з різним просторовим і часовим масштабом, та попри те вона практично постійно знаходиться у невірноваженому стані [7]. Складність таких досліджень зумовлена також тим, що повна інформація про стан іоносфери недоступна, а наявні моделі не завжди коректно відображають реальну ситуацію. Однак значна частка варіацій іоносферних параметрів обумовлена періодичними процесами і може бути прогнозована. Для цього лише потрібно вдало застосувати альтернативні підходи.

Наші дослідження [8–10] динаміки змін координат геодезичних пунктів, визначення закономірностей їхнього механічного переміщення відкривають шлях для складання прогнозів, що розширює сферу практичного застосування даних GPS- спостережень.

Постановка завдання. Засоби автоматизованого визначення геодезичних координат за допомогою GPS- технологій набувають дедалі ширшого застосування, тривалість цих розрахунків стає дедалі меншою. Це приводить до необхідності зменшити вплив систематичної похибки вимірювання геодезичних координат. Для цього необхідно з'ясувати, які фізичні процеси викликають характерні середньотривалі коливання складових геодезичних координат перманентних станцій, отриманих із GPS-спостережень.

Виклад основного матеріалу. У зв'язку з цим поставлено задачу дослідити кореляційний зв'язок між даними визначених геодезичних координат і даними, які описують локальний стан земної поверхні й навколосередовищного простору.

Для нашого дослідження як експериментальні вимірювання було використано щотижневі комбіновані розв'язки координат станції JOZE, отримані із GPS-спостережень за 1999 рік:

$$X(T_k), Y(T_k), Z(T_k), (k = \overline{1, M}),$$

де T_k – тижні GPS-вимірювань, M – кількість таких вимірювань. На основі цих значень вираховано щоденні значення коливних складових геодезичних координат:

$$\begin{aligned} x(t_k) &= X(t_k) - \min_{t \in [t_1, t_M]} X(t); \\ y(t_k) &= Y(t_k) - \min_{t \in [t_1, t_M]} Y(t); \quad (k = \overline{1, m}) \\ z(t_k) &= Z(t_k) - \min_{t \in [t_1, t_M]} Z(t), \end{aligned} \quad (1)$$

де t_k – моменти часу, для яких встановлено значення координат, m – кількість таких моментів часу.

Для опису локального стану земної поверхні взято величину геосейсмічної активності $g(t)$ й інфразвуку земної поверхні $v(t)$:

$$g(t_k), v(t_k), (k = \overline{1, m}), \quad (2)$$

які визначені за спеціальною методикою.

Для опису стану близького навколосередовищного середовища взято сонячну активність $s(t)$, кутову висоту Місяця $h(t)$ над горизонтом у тій самій місцевості, де визначено геодезичні координати (1), а також довжину проекції $f(t)$ на полярну вісь Землі одиничного радіус-вектора, напруженого на Місяць з місцевості, де визначено координати (1).

$$s(t_k), h(t_k), f(t_k) \quad (k = \overline{1, m}). \quad (3)$$

Для дослідження взято щоденні значення коливних складових координат $x(t), y(t), z(t)$, показників активності земної поверхні $g(t), v(t)$ і параметрів впливу на неї $s(t), h(t), f(t)$ за 1999 рік, протягом якого відбулися типові події зміни сонячної активності й рідкісна подія сильної зміни локальної геосейсмічної активності й інфразвуку земної поверхні (йдеться про землетрус у 1999 році).

Щоб виявити можливий зв'язок між величинами (1), (2), (3), обчислено автокореляційні інтеграли та взаємні кореляційні інтеграли функцій $x(t), y(t), z(t), g(t), v(t), s(t), h(t), f(t)$ на $t \in [t_1, t_m]$, де t_1 і t_m – відповідно перша і остання (365-та) доба 1999 року.

Графіки досліджуваних величин показано на рис. 1, 2. Графіки знайдених кореляційних інтегралів показано на рис. 3–13. Проаналізуємо результати обчислень.

Графіки автокореляційних інтегралів досліджуваних функцій мають центральні максимуми. Ці інтеграли є функціями, симетричними відносно лінії цього центрального максимуму. Ширина центрального максимуму досліджуваних функцій відображає приблизну тривалість проміжку часу, протягом якого відповідний фізичний процес відбувається як детермінований. На рис. 3, 4 характерний час, протягом відображений процес є детермінованим, позначено символом τ .

Інтеграли автокореляційних функцій $x(t), z(t), s(t)$ мають максимум із приблизно середньою шириною. Ширини цих максимумів для координат $x(t), z(t)$ і сонячної активності $s(t)$ відповідно дорівнюють $\tau_x = 38$, $\tau_z = 36$, $\tau_s = 21$ (тут і далі – час у земних добах). Протягом цих проміжків часу процеси зміни $x(t), z(t), s(t)$ мали ознаки “сильної залежності від попередніх значень”. Це дає підстави виділити названий характерний час як параметр, що описує процеси зміни $x(t), z(t), s(t)$.

Тривалість характерного часу із сильною залежністю наступних значень від попередніх для геосейсмічної активності $g(t)$ й інфразвуку $v(t)$ значно коротша: $\tau_g = 10$, $\tau_v = 7$. Половина проміжку часу $\tau_v/2 = 3.5$ – це найкоротший час для раннього виявлення фізичних процесів у земній поверхні за її інфразвуком.

Графік автокореляційного інтегралу функції $y(t)$ (див. рис. 3, б) не має характерного максимуму. Це означає, що протягом всього проміжку спостереження координата $y(y)$ змінювалася “з малим впливом випадкових процесів”.

На графіках автокореляційних функцій (див. рис. 3, 4) видно локальні “бокові” максимуми. Відстань між цими максимумами показує, через які проміжки часу значення величини сильніше залежать від минулих значень. На рис. 3 і 4 ці проміжки часу позначено символом ΔT .

Характерний час, через який минулі значення величини $y(t - \Delta T_y)$ впливають на поточні її значення $y(y)$, дорівнює $\Delta T_y = 27$ (див. рис. 3, б). Такий самий час для координати $x(t)$ становить $\Delta T_x = 34$ (див. рис. 3, а). Причому відстань між кількома локальними максимумами на периферії графіка автокореляційного інтегралу від $x(t)$ є приблизно сталою і дорівнює $\Delta T_x = 34$. Це показує, що $x(t)$ залежить від факторів, які мають періодичність, приблизно кратну $\Delta T_x = 34$. Аналогічно встановлено $\Delta T_z = 36$ (див. рис. 3, в), $\Delta T_s = 49$ (див. рис. 4, а), $\Delta T_{g1} = 42$, $\Delta T_{g2} = 72$ (див. рис. 4, б), $\Delta T_v = 53$ (див. рис. 4, в).

Ці зауваження приводять до такого припущення. Визначення геодезичних координат за допомогою GPS – спостережень залежить від зовнішніх впливів, які мають детерміновану періодичність. Для перевірки такого припущення потрібні додаткові дослідження, зокрема за допомогою методів, описаних у роботах [3, 4].

Для автокореляційних інтегралів досліджуваних величин обчислено середні за модулем значення для областей, які знаходяться поза центральним максимумом. На рис. 3, 4 ці середні величини позначено горизонтальною лінією. Числові їх значення такі: $\bar{x} = 0.383$; $\bar{y} = 0.223$; $\bar{z} = 0.0635$; $\bar{s} = 0.1192$; $\bar{g} = 0.0197$; $\bar{v} = 0.0514$; $\bar{h} = 0.4410$; $\bar{f} = 0.5288$. Невисокі значення цих середніх значень вказують, що протягом відносно тривалих проміжків часу досліджувані величини (крім параметрів h, f) є реалізацією процесу з низькою автокореляцією. Однак це не виключає короткотривалих детермінованих зв'язків між ними.

Графіки взаємних кореляційних інтегралів, обчислених для пар координат (x, y) , (x, z) , (y, z) , наведено на рис. 5. Значення цих кореляційних інтегралів має декілька максимумів і в окремі моменти часу досягає 0.7. Це означає, що в різні моменти часу величини $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ мають різний рівень статистичної залежності. Така залежність характерна для динамічних величин, які відображають один і той самий динамічний процес [1, 2].

Графіки взаємних кореляційних інтегралів між сонячною активністю $s(t)$ та геодезичними координатами $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ (рис. 6) якісно схожі на графіки кореляційних інтегралів між координатами $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ (див. рис. 5). З цього випливає припущення, що координати $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ взаємозалежні і залежать від сонячної активності $s(t)$. Причиною цієї залежності може бути збурення в іоносфері, в окремих випадках – гравітаційний вплив речовини сонячного вітру на обладнання, яке використовують для визначення геодезичних координат. Для уточнення такого припущення придатні методи динамічного макромодельовання [11, 12].

Кореляційний інтеграл між геосейсмічною активністю $g(t)$ та координатою $x(t)$ не лежить в межах до 0.1 (рис. 7). Менше його значення (порівняно з кореляційним інтегралами для пар (x, g) , (z, g)) може бути пов'язане з проявом обертового руху Землі навколо своєї осі. Значення взаємного кореляційного інтегралу порядку 0.1 не виключає наявності нелінійного зв'язку між парами (x, g) , (y, g) , (z, g) .

У роботі [13] встановлено, що інфразвук $v(t)$ залежить від сонячної $s(t)$ та геосейсмічної активності $g(t)$. Такий висновок збігається з результатами якісного аналізу взаємних кореляційних інтегралів для пар (x, v) , (y, v) , (z, v) . Це означає, що дані моніторингу інфразвуку земної поверхні можуть бути застосовані для моделювання динаміки геодезичних координат лише протягом відносно коротких проміжків часу.

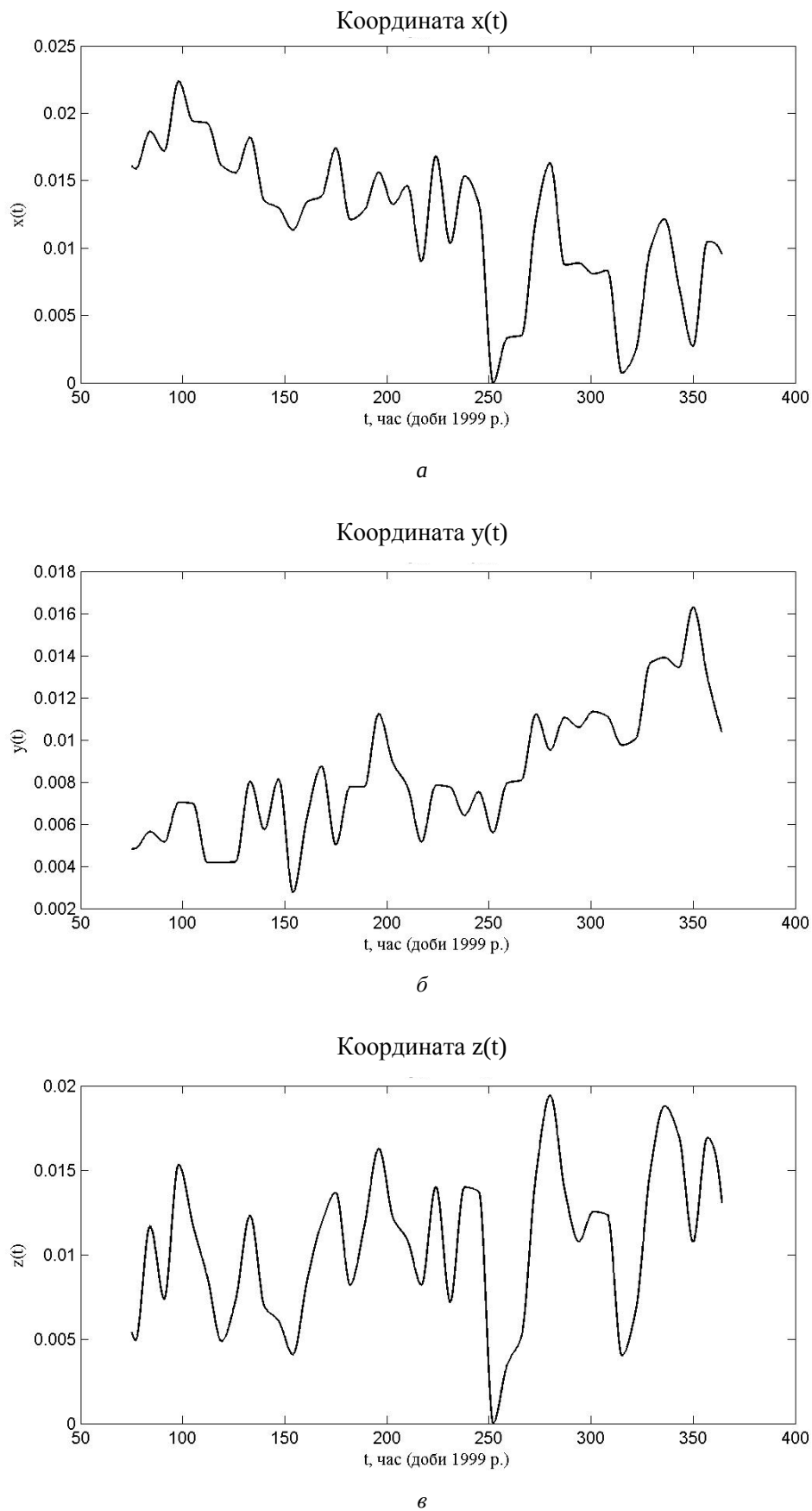


Рис. 1. Графіки змінних складових координат $x(t)$ (а), $y(t)$ (б), $z(t)$ (в) станції JOZE, 1999 р.

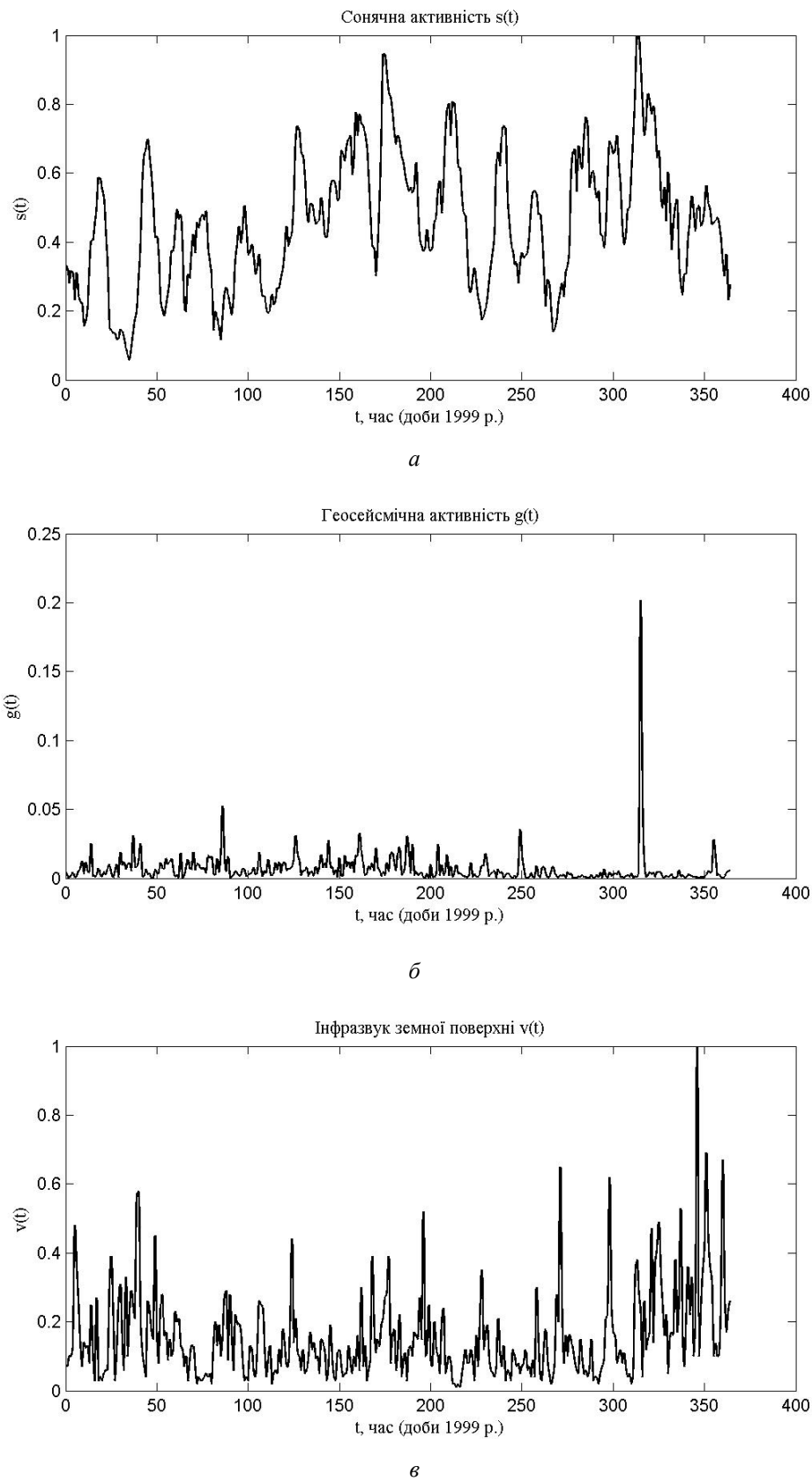


Рис. 2. Графіки сонячної активності $s(t)$ (а), геосейсмічної активності $g(t)$ (б) й інфразвуку земної поверхні $v(t)$ (в), 1999 р.

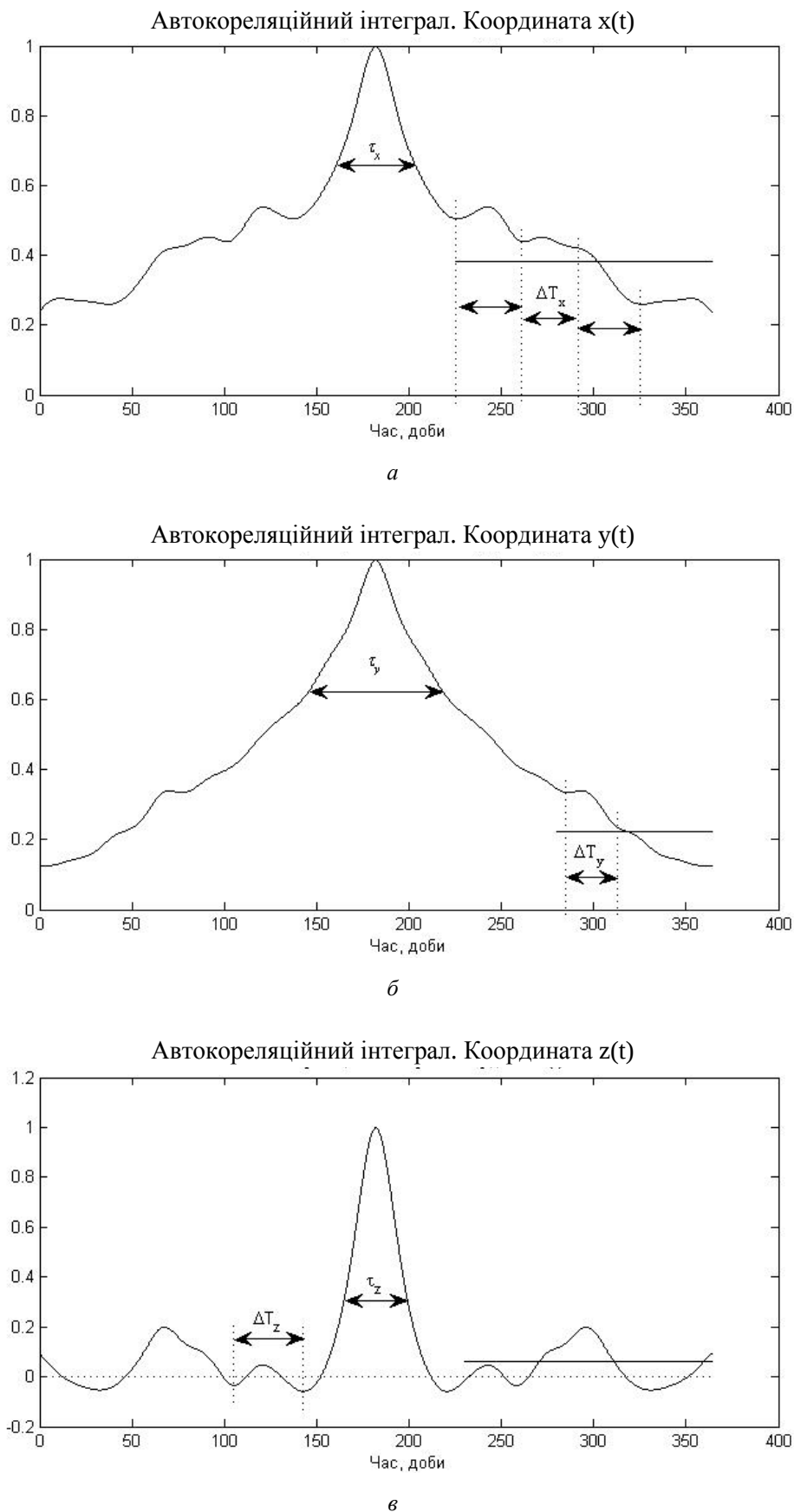
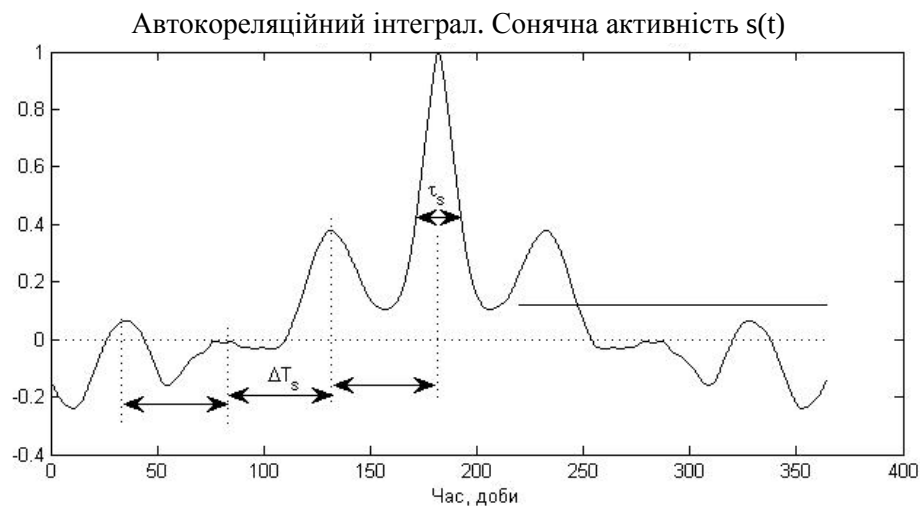
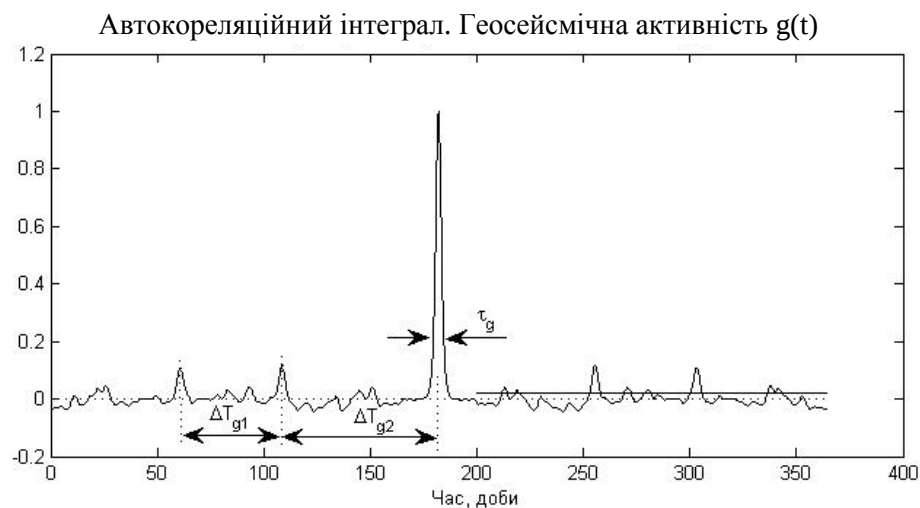


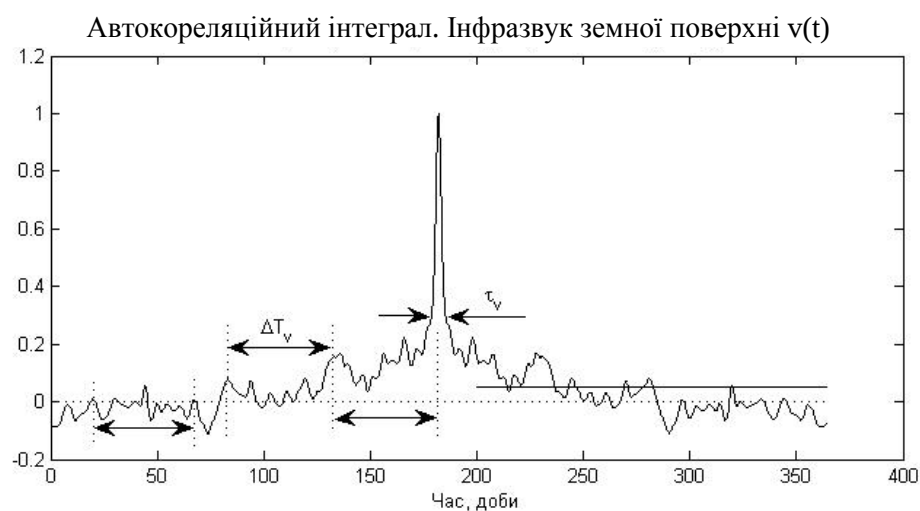
Рис. 3. Графіки автокореляційних інтегралів змінних складових координат $x(t)$ (а), $y(t)$ (б), $z(t)$ (в) станції JOZE, 1999 р.



а



б



в

Рис. 4. Графіки автокореляційних інтегралів сонячної активності $s(t)$ (а), геосейсмічної активності $g(t)$ (б), інфразвуку земної поверхні $v(t)$ (в), 1999 р.

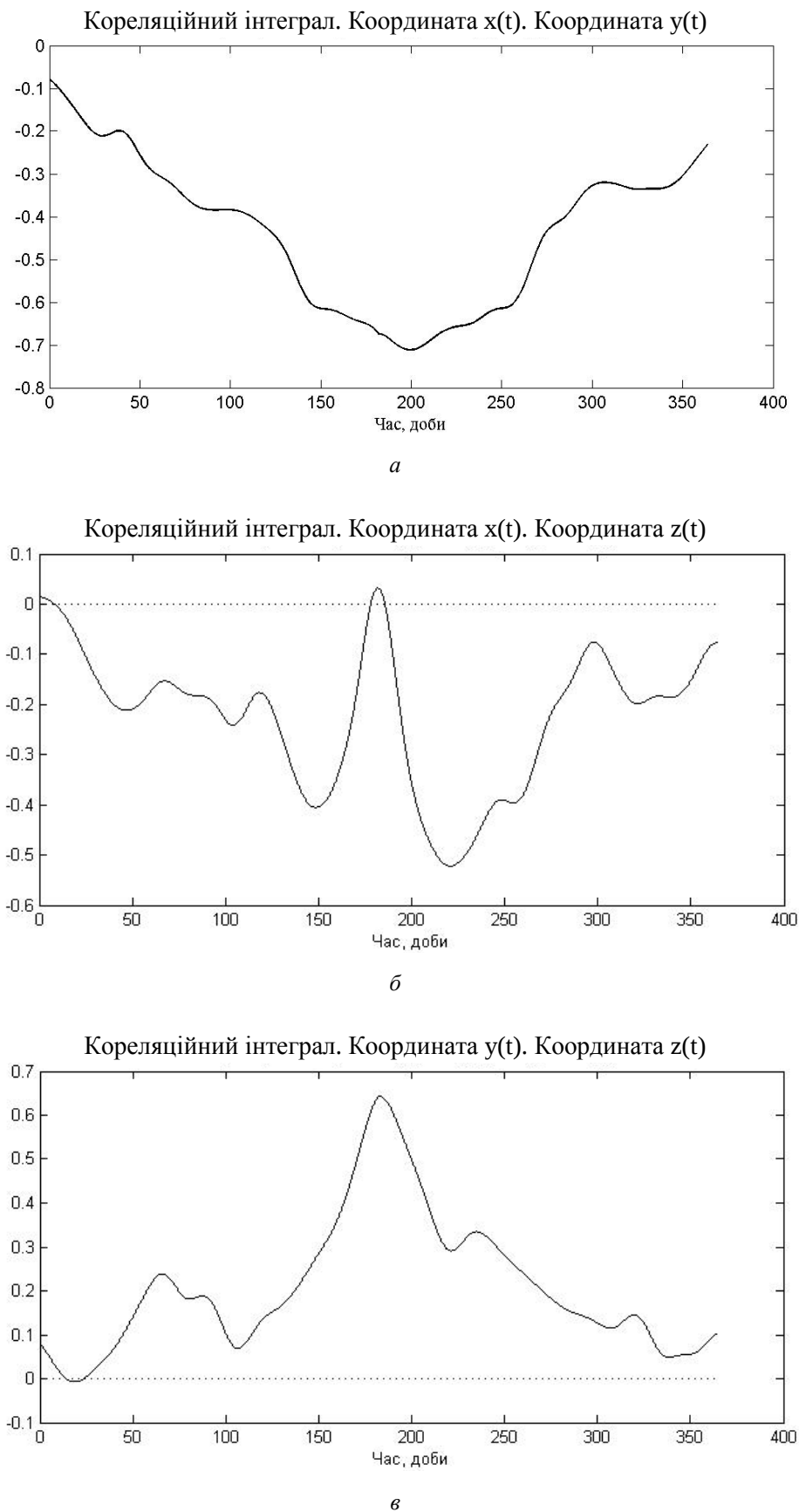


Рис. 5. Графіки кореляційних інтегралів, вирахованих між змінними складовими координат $x(t)$, $y(t)$ (*a*), $x(t)$, $z(t)$ (*б*), $y(t)$, $z(t)$ (*в*) станції JOZE, 1999 р.

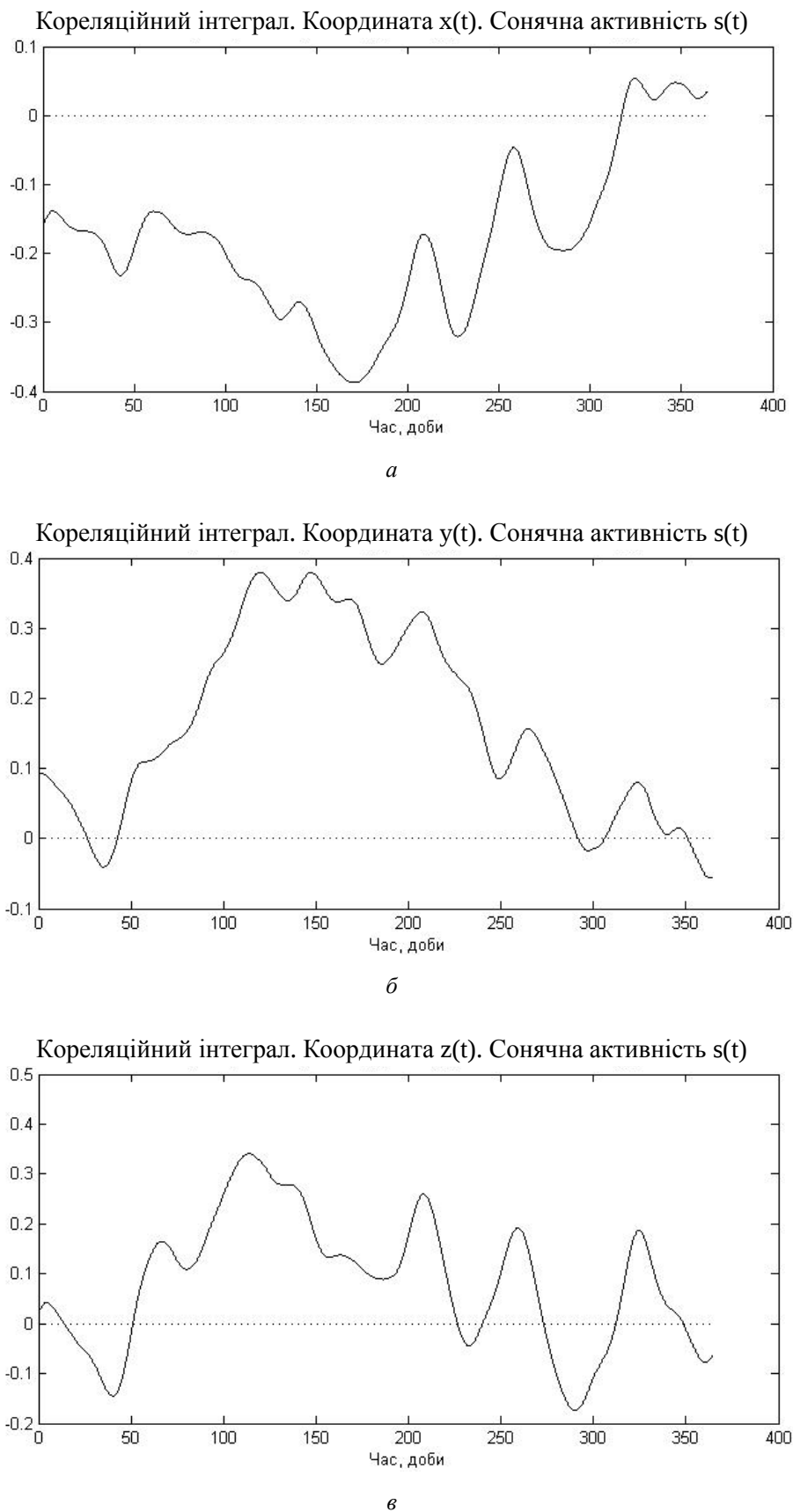
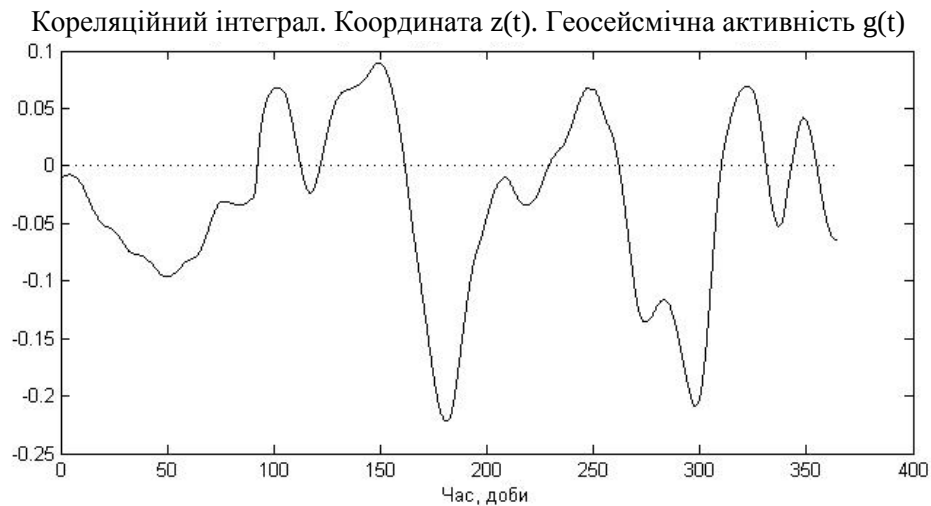


Рис. 6. Графіки кореляційних інтегралів, вирахованих між сонячною активністю $s(t)$ і змінними складовими координат $x(t)$ (а), $y(t)$ (б), $z(t)$ (в) станції JOZE, 1999 р.



a



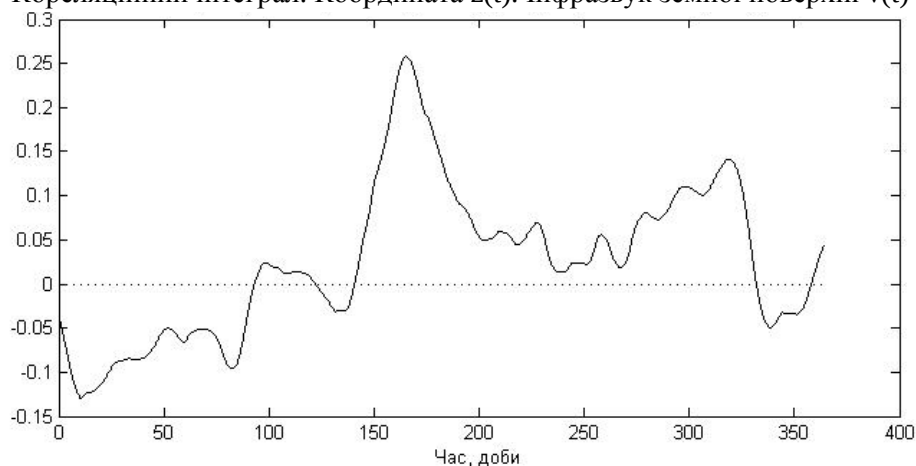
б



в

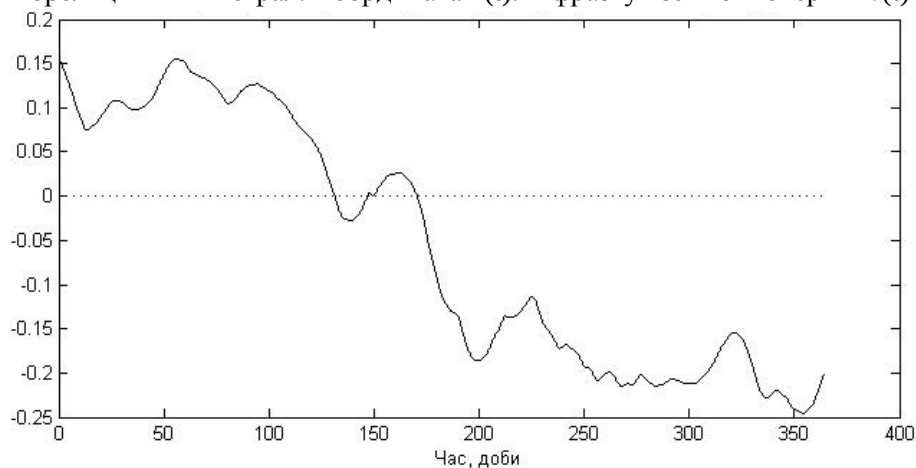
Рис. 7. Графіки кореляційних інтегралів, вирахованих між геосейсмічною активністю $g(t)$ і змінними складовими координат $x(t)$ (а), $y(t)$ (б), $z(t)$ (в) станції JOZE, 1999 р.

Кореляційний інтеграл. Координата $z(t)$. Інфразвук земної поверхні $v(t)$



a

Кореляційний інтеграл. Координата $x(t)$. Інфразвук земної поверхні $v(t)$



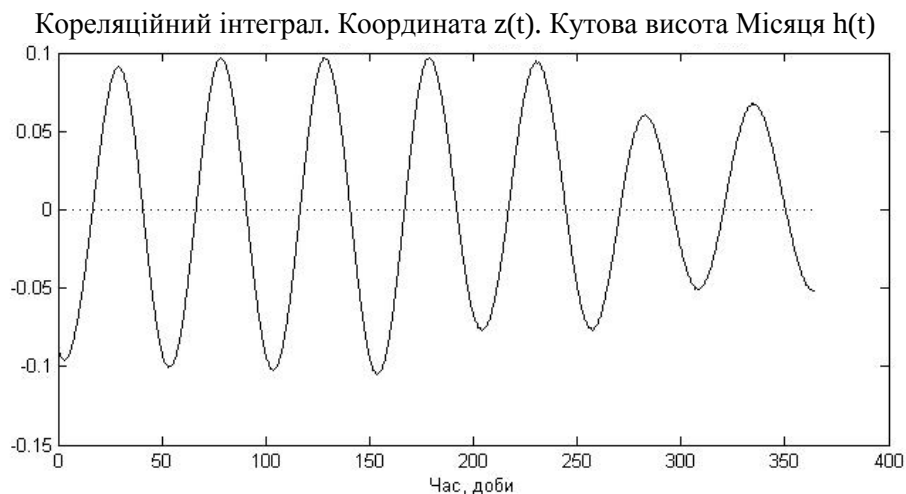
б

Кореляційний інтеграл. Координата $y(t)$. Інфразвук земної поверхні $v(t)$

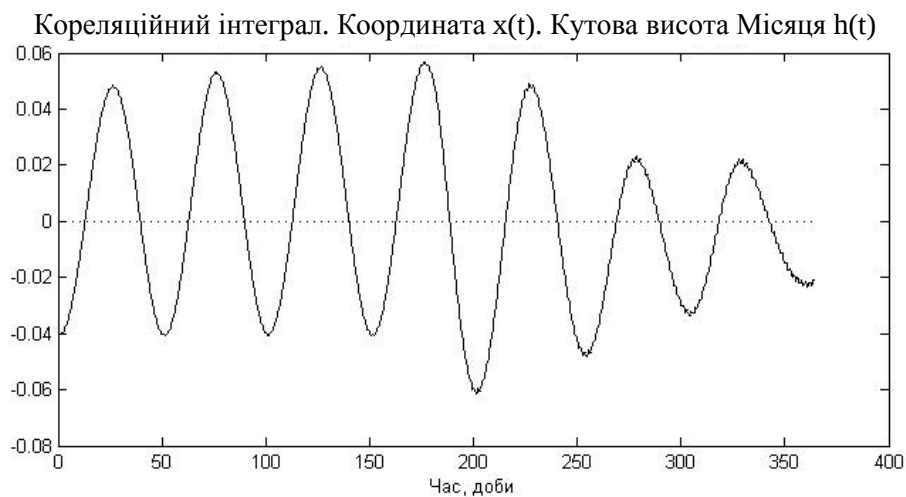


в

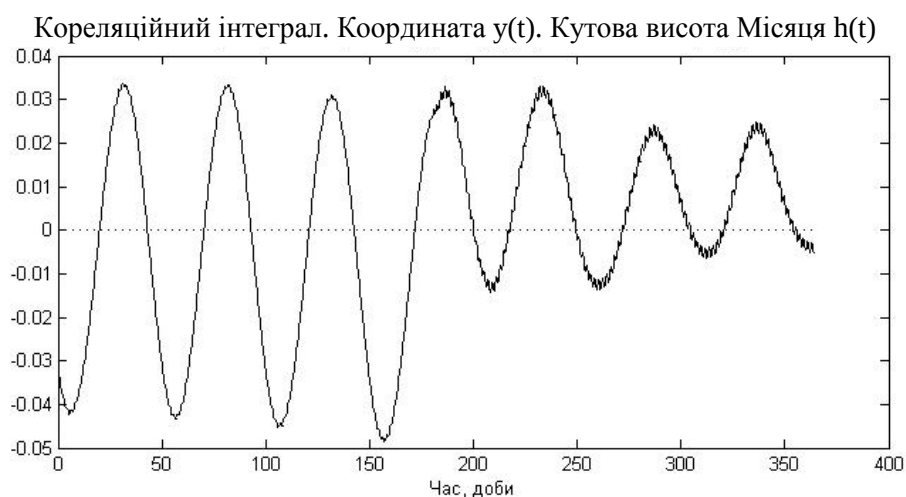
Рис. 8. Графіки кореляційних інтегралів, вирахованих між інфразвуком земної поверхні $v(t)$ і змінними складовими координат $x(t)$ (а), $y(t)$ (б), $z(t)$ (в) станції JOZE, 1999 р.



a



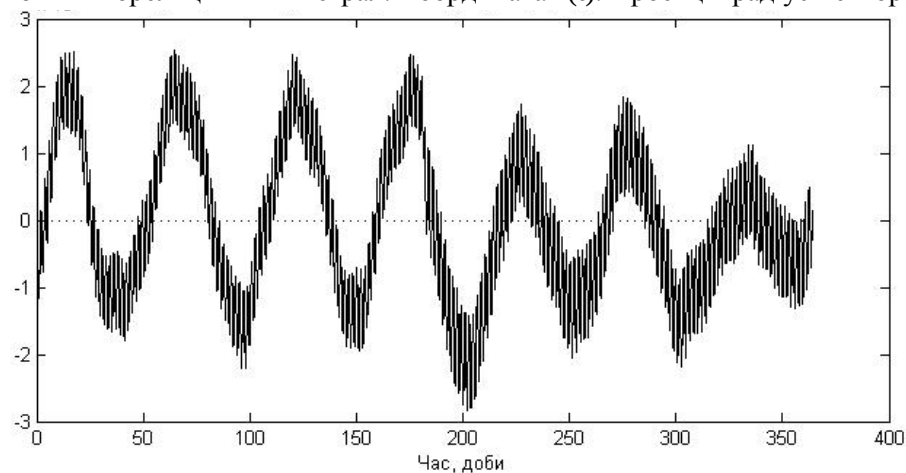
б



в

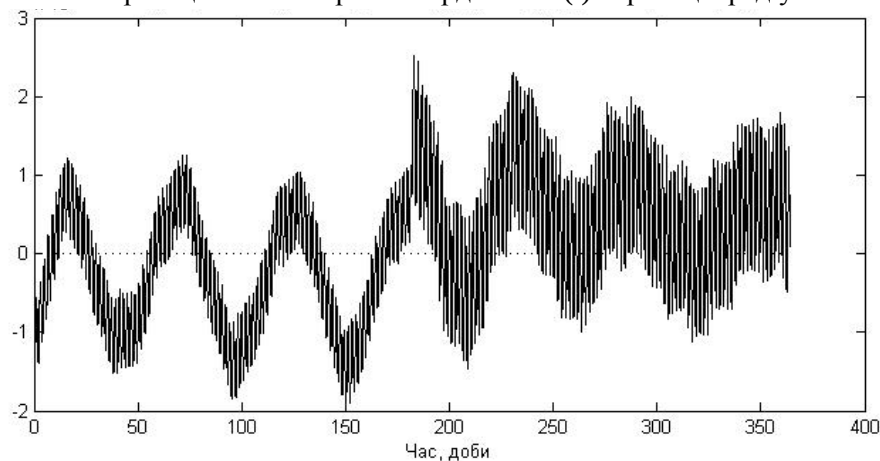
Рис. 9. Графіки кореляційних інтегралів, вирахованих між кутовою висотою Місяця $h(t)$ і змінними складовими координат $x(t)$ (а), $y(t)$ (б), $z(t)$ (в) станції JOZE, 1999 р.

$\times 10^{-3}$ Кореляційний інтеграл. Координата $z(t)$. Проекція радіус-вектора Місяця $f(t)$



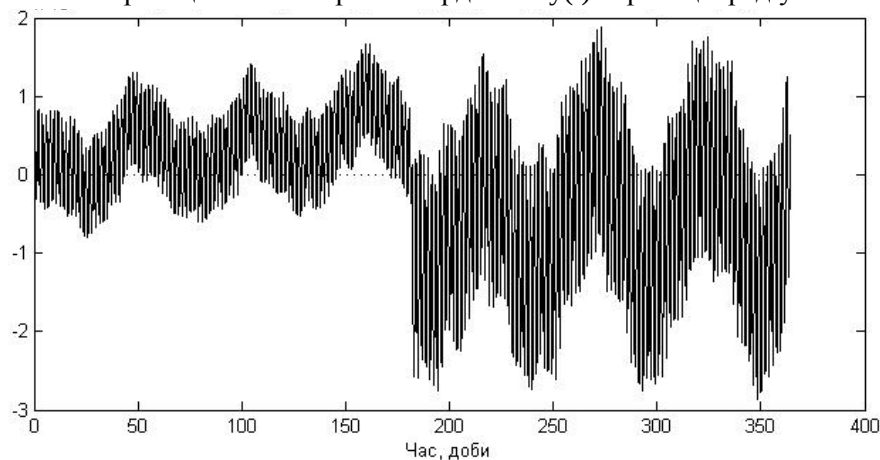
a

$\times 10^{-3}$ Кореляційний інтеграл. Координата $x(t)$. Проекція радіус-вектора Місяця $f(t)$



б

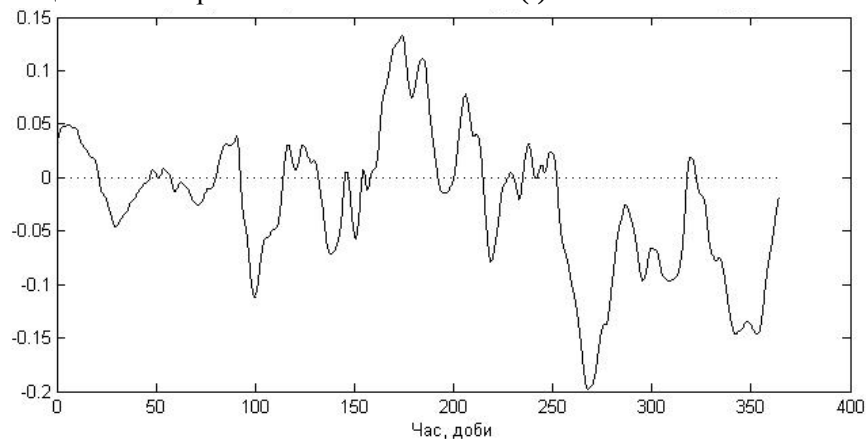
$\times 10^{-3}$ Кореляційний інтеграл. Координата $y(t)$. Проекція радіус-вектора Місяця $f(t)$



в

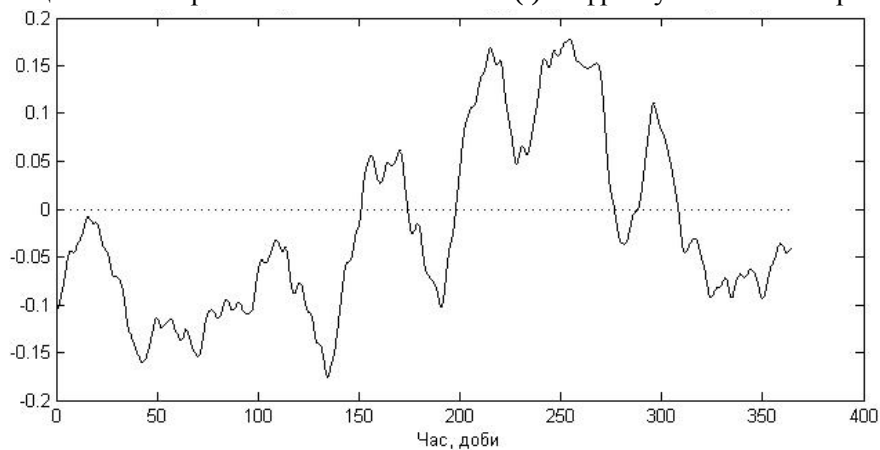
Рис. 10. Графіки кореляційних інтегралів, вирахованих між довжиною проекції одиничного радіус-вектора Місяця на полярну вісь Землі $f(t)$ і змінними складовими координат $x(t)$ (а), $y(t)$ (б), $z(t)$ (в) станції JOZE, 1999 р.

Кореляційний інтеграл. Сонячна активність $s(t)$. Геосейсмічна активність $g(t)$



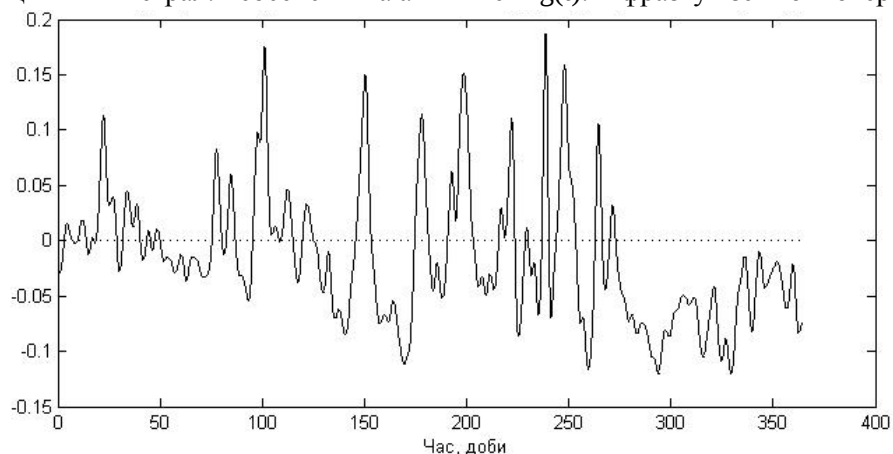
a

Кореляційний інтеграл. Сонячна активність $s(t)$. Інфразвук земної поверхні $v(t)$



б

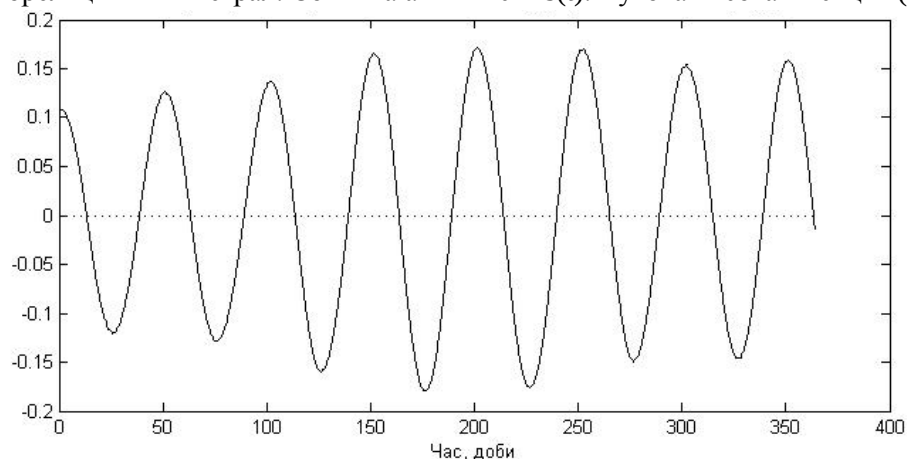
Кореляційний інтеграл. Геосейсмічна активність $g(t)$. Інфразвук земної поверхні $v(t)$



в

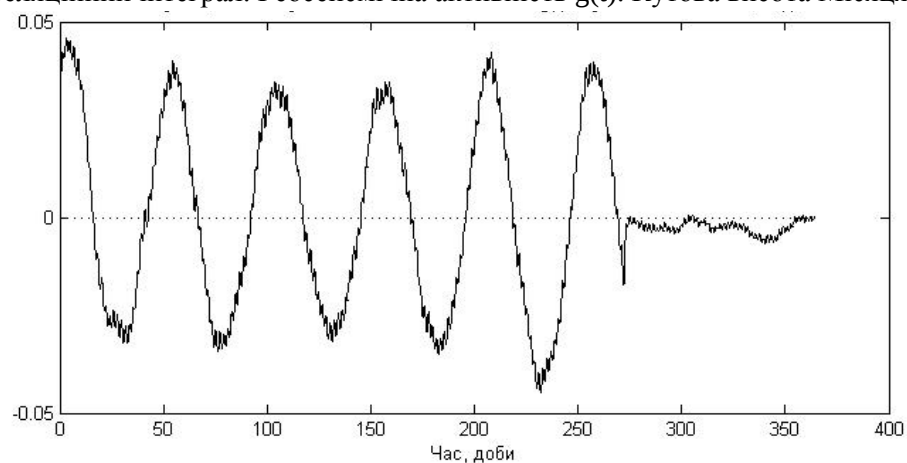
Рис. 11. Графіки кореляційних інтегралів, вирахованих між сонячною активністю $s(t)$ і геосейсмічною активністю $g(t)$ (а), сонячною активністю $s(t)$ та інфразвуком земної поверхні $v(t)$ (б), геосейсмічною активністю $g(t)$ та інфразвуком земної поверхні $v(t)$ (в)

Кореляційний інтеграл. Сонячна активність $s(t)$. Кутова висота Місяця $h(t)$



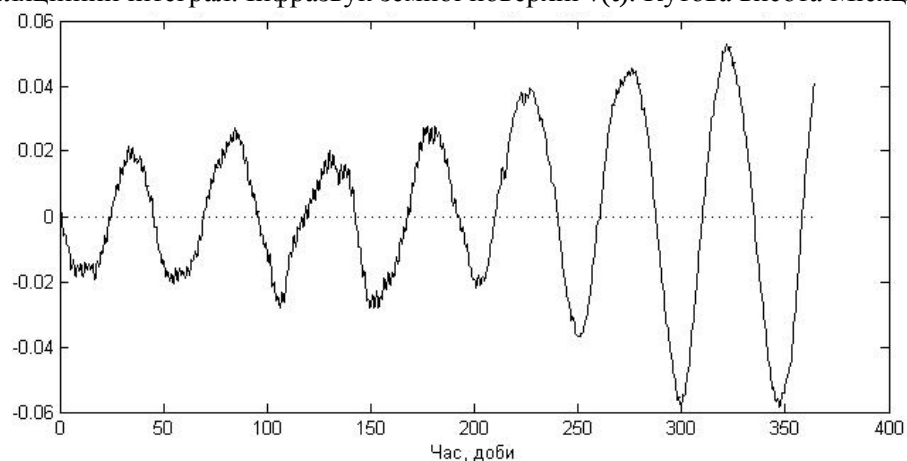
a

Кореляційний інтеграл. Геосейсмічна активність $g(t)$. Кутова висота Місяця $h(t)$



б

Кореляційний інтеграл. Інфразвук земної поверхні $v(t)$. Кутова висота Місяця $h(t)$



в

Рис. 12. Графіки кореляційних інтегралів, вирахованих між кутовою висотою Місяця $h(t)$ і сонячною активністю (а), геосейсмічною активністю $g(t)$ (б), інфразвуком земної поверхні $v(t)$ (в)

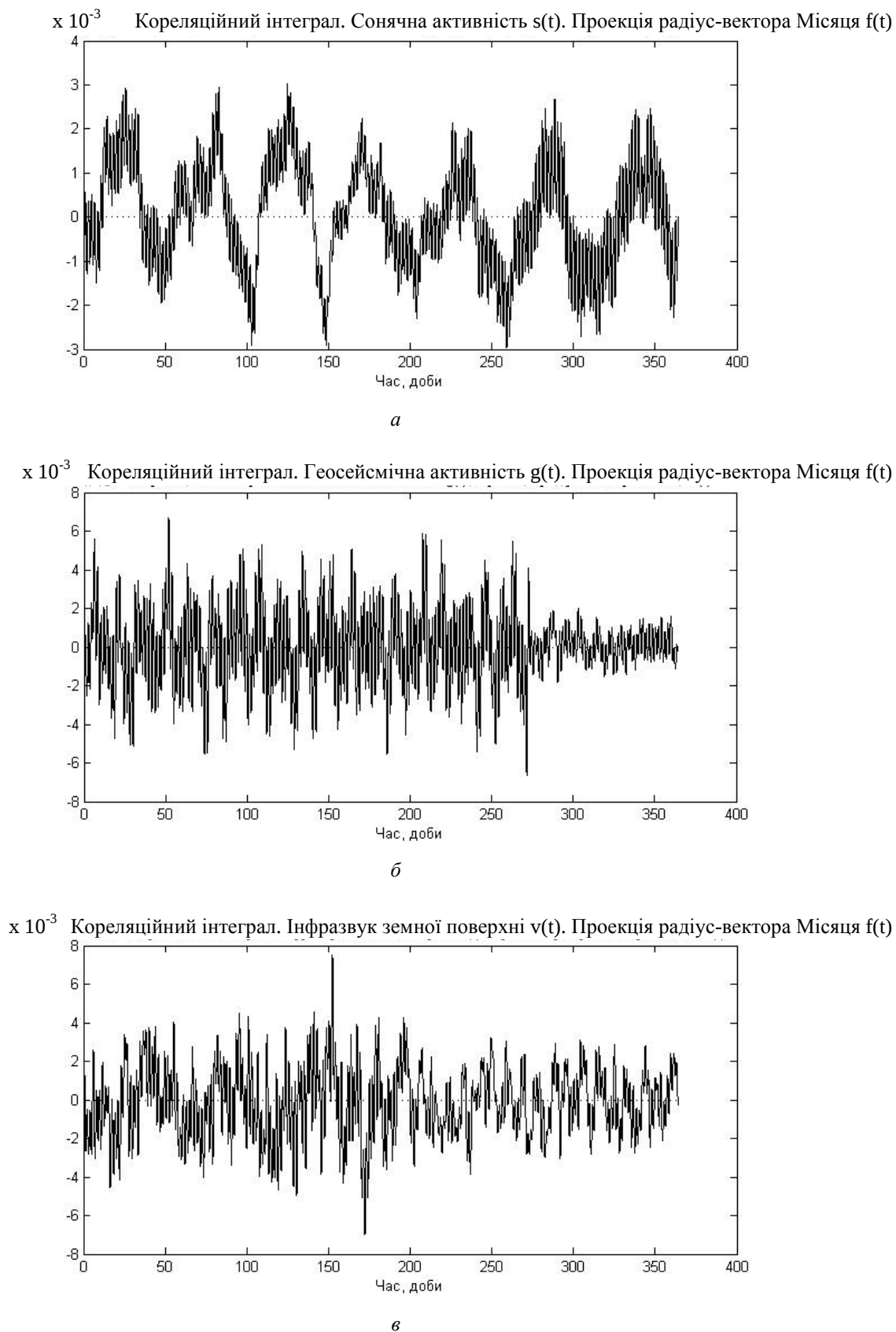


Рис. 13. Графіки кореляційних інтегралів, вирахованих між довжиною проекції одиничного радіус-вектора Місяця $f(t)$ на полярну вісь Землі і сонячною активністю (а), геосейсмічною активністю $g(t)$ (б), інфразвуком земної поверхні $v(t)$ (в)

На рис. 8–13 показано графіки взаємних кореляційних інтегралів, обчислених для параметрів, які відображають вплив Місяця [13]. Якісний аналіз значень цих кореляційних інтегралів приводить до висновку про слабкий динамічний зв'язок між вимірними геодезичними координатами й впливами Місяця.

Висновки

1. Безперечно, що значення геодезичних координат отриманих за допомогою GPS-спостережень, залежать від зовнішніх впливів, які мають детерміновану періодичність, однак для перевірки цього потрібні додаткові дослідження, зокрема за допомогою методів, описаних в роботах [1, 2].

2. Координати $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ є взаємозалежними і залежать від впливу сонячної активності $s(t)$. Причиною цієї залежності може бути зміна стану іоносфери, в окремих випадках – гравітаційний вплив речовини сонячного вітру на космічну техніку, що використовується для визначення геодезичних координат. Для уточнення такого припущення придатні методи динамічного макромодельовання [11, 12].

3. Дані моніторингу інфразвуку земної поверхні можуть бути застосовані для моделювання динаміки геодезичних координат лише протягом відносно коротких проміжків часу.

4. Для підтвердження наших припущень варто дослідити зв'язок між малими змінами геодезичних координат і сонячною активністю для мережі багатьох GPS-станцій у період високої геосейсмічної та сонячної активності.

1. Янків-Вітковська Л.М., Савчук С.Г., Паучок В.К. До питання аналізу систематичних похибок координат перманентної GPS станції SULP. // Вісник геодезії і картографії. – К., 2007. – № 5. – 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., 2008. – № 1. – С. 7–12. 3. Фридман А.М., Поляченко Е.В., Насырканов Н.Р. О некоторых корреляциях в сейсмодинамике активности Земли // УФН. – 2010. – № 3. – С. 303–312. 4. Иванов В.В. Периодические колебания погоды и климата // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172, № 7. – С. 777–811. 5. Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. – М.: Мир, 1975. 6. Кременецкий І.А., Черемних О.К. Космічна погода: механізми і прояви. – К.: Наукова думка, 2009. 7. Парновский А.С., Ермолаев Ю.И., Жук И.Т. Космическая погода: история исследования и прогнозирование // Космічна наука і технологія. – 2010. – Т. 16. – № 1. – С. 90–99. 8. Янків-Вітковська Л.М. Прогнозування впливу іоносфери на часові зміни координат перманентних GPS станцій. Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів. – 2009. – Вип. 72. – С. 35–41. 9. Янків-Вітковська Л.М. Дослідження динаміки змін координат геодезичних пунктів для прогнозування закономірностей їхнього механічного переміщення // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів. – 2010. – С. 117–124. 10. Янків-Вітковська Л.М. Дослідження динаміки змін координат GPS-станцій для прогнозування їх точності // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів. – Вип. 74. – 2011. – С. 77–82. 11. Матвійчук Я.М. Регуляризована ідентифікація динамічних прогностичних макромоделей / Я.М. Матвійчук, В.К. Паучок // Теоретична електротехніка. – 2003. – Вип. 57. – С. 13–18. 12. Матвійчук Я.М., Савула М.М., Паучок В.К. Модель впливу харчування та сонячної активності на захворюваність на туберкульоз // Інфекційні хвороби. № 4, 2010. – С. 43–49. 13. Паучок В.К. Регуляризована ідентифікація математичних макромоделей процесів і систем різної природи: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Львів, 2010. – 16 с.