

Прокоф'єв О.М., асп.

Одеський державний екологічний університет

## ВЗАЄМНИЙ СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ГЛОБАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ ІНДЕКСІВ ТА ПРИЗЕМНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ СТАНЦІЙ АНТАРКТИДИ

*Представлений взаємний спектральний аналіз приземної температури повітря станцій Антарктиди з глобальними кліматичними індексами (Південне коливання та Ель-Ніньо – Південне коливання). Взаємний спектральний аналіз дав можливість визначити залежність приземної температури повітря від Південного коливання та Ель-Ніньо – Південне коливання.*

**Ключові слова:** *приземна температура повітря, спектральна щільність, взаємна когерентність процесів.*

**Постановка проблеми** Кліматичні зміни в значній мірі впливають на стан природного середовища, суспільства і економіки. На сьогодні в різних країнах розробляються таблиці індикаторів, які можна використовувати для відстеження (моніторингу) кліматичних змін на території країни і відбиття впливу цих змін на навколишнє середовище, більш того, у ряді країн вже розроблені документи, які містять індикатори стійкого розвитку держави, включаючи і індикатори кліматичної мінливості:

- 1 – кліматичні індекси, що відображають стан атмосфери і океану в глобальному масштабі;
- 2 – індикатори, що відображають стан атмосфери і гідросфери в певному регіоні земної кулі, наприклад, на території якої-небудь конкретної країни.

В представленій роботі зроблена спроба виявити взаємозв'язок між приземною температурою повітря та глобальними кліматичними індексами.

**Матеріали та методи дослідження.** В роботі використовуються середньомісячні значення приземної температури повітря (максимальний об'єм вибірки становить 57 років) та середньомісячні значення глобальних кліматичних індексів. Для спектрального аналізу було використані данні, які характеризують приземну температуру повітря по 33 антарктичним станціям: 14 станцій східної Антарктиди, 6 – західної та 13 станцій Антарктичного півострова [1]. Взаємний спектральний аналіз проводився між SOI, ENSO та приземною температурою повітря [2].

Індекс Південного коливання (SOI) являє собою стандартизовану різницю нормалізованих середньомісячних аномалій тиску на станціях Таїті і Дарвін. Він використовується для ідентифікації явища ENSO. Явище Ель-Ніньо – Південне коливання (ENSO) представляє собою найбільш важливий сигнал в міжрічній кліматичній мінливості в системі океан-атмосфера, спостерігається регулярно, кожні 2 – 7 років, наслідки ENSO виявляються у вигляді значущих кліматичних аномалій в різних районах земної кулі.

Індекс ENSO – індекс Ель Ніньо і Ла Нінья визначається по аномаліях температури поверхні океану, район Nino 3-4 (5° півн. ш. – 5° півд. ш.; 120° – 170° зах.д.). Хоча за походженням терміни Ель Ніньо і Ла Нінья відносяться до аномалій температури поверхні океану, на цей час в дослідженнях ENSO під назвою Ель Ніньо і Ла Нінья розуміють не просто аномалії температури поверхні в екваторіальному районі Тихого океану, але й відповідні аномалії циркуляції атмосфери і опадів в цьому регіоні, тобто кліматичні аномалії в системі океан-атмосфера [2].

**Результати дослідження та їх аналіз.**

Взаємозв'язок між періодичними складовими в часових рядах середньомісячних значень SOI та приземної температури повітря визначався за допомогою взаємного спектрального аналізу [3]. Алгоритм дослідження стаціонарних випадкових процесів було реалізовано на ПЕОМ за допомогою комп'ютерної програми "Spektr". Були одержані статистичні оцінки взаємної спектральної щільності SOI та середньомісячної температури повітря для усіх 33 станцій Антарктиди, як приклад представимо вищевказані характеристики для ст. Новолазарівська (70°46' півд. ш., 11°52' сх. д., вибірка складала 43 роки) (табл. 1). В таблиці 1 представлені статистичні оцінки взаємної спектральної щільності для SOI та середньомісячної приземної температури повітря (ст. Новолазарівська), де  $S_x(\omega)$  – спектральна щільність процесу X (SOI),  $S_y(\omega)$  – спектральна щільність процесу Y (приземна температура повітря на ст. Новолазарівська),  $C_{xy}(\omega)$  – ко-спектр,  $Q_{xy}(\omega)$  – квадратурний спектр,  $\gamma(\omega)$  – взаємна когерентність процесів X та Y,  $\psi_{xy}(\omega)$  – фазовий спектр процесів X та Y. В таблиці жирним шрифтом виділено випередження процесу X.

Таблиця 1 – Статистичні оцінки взаємної спектральної щільності для SOI та середньомісячної приземної температури повітря (ст. Новолазарівська)

№ п/п	$S_x(\omega)$	$S_y(\omega)$	$C_{xy}(\omega)$	$Q_{xy}(\omega)$	$\gamma(\omega)$	$T_k, \text{місяць}$	$\psi_{xy}(\omega), \text{град.}$
1	2	3	4	5	6	7	8
64	0,37	1,15	0,51	-0,35	0,94	8,0	325,5
<b>74</b>	<b>0,70</b>	<b>11,46</b>	<b>1,60</b>	<b>1,81</b>	<b>0,86</b>	<b>6,9</b>	<b>48,6</b>
95	0,71	10,45	1,97	-1,52	0,91	5,4	322,3
<b>107</b>	<b>0,44</b>	<b>1,71</b>	<b>-0,72</b>	<b>-0,23</b>	<b>0,87</b>	<b>4,8</b>	<b>17,7</b>
<b>134</b>	<b>0,37</b>	<b>3,61</b>	<b>-0,80</b>	<b>-0,74</b>	<b>0,94</b>	<b>3,8</b>	<b>42,8</b>
<b>156</b>	<b>0,24</b>	<b>2,55</b>	<b>0,27</b>	<b>0,63</b>	<b>0,88</b>	<b>3,3</b>	<b>66,8</b>
162	0,80	3,79	0,33	-1,60	0,94	3,2	281,6
<b>181</b>	<b>0,52</b>	<b>2,36</b>	<b>-0,73</b>	<b>-0,64</b>	<b>0,88</b>	<b>2,8</b>	<b>41,3</b>
<b>199</b>	<b>0,49</b>	<b>2,09</b>	<b>0,94</b>	<b>0,15</b>	<b>0,94</b>	<b>2,6</b>	<b>9,1</b>
<b>206</b>	<b>0,68</b>	<b>6,98</b>	<b>-0,76</b>	<b>-1,92</b>	<b>0,95</b>	<b>2,5</b>	<b>68,4</b>
<b>216</b>	<b>0,42</b>	<b>3,22</b>	<b>0,84</b>	<b>0,61</b>	<b>0,90</b>	<b>2,4</b>	<b>36,0</b>

За даними табл. 1 (ст. Новолазарівська) побудовані графіки функцій: ко-спектра  $C_{xy}(\omega)$  (рис. 1), квадратурного спектра  $Q_{xy}(\omega)$  (рис. 2) та взаємної когерентності процесів  $\gamma(\omega)$  (рис. 3). Вірогідність статистичних оцінок взаємної спектральної щільності визначаємо по когерентності за умови  $\gamma(\omega) \geq 0.85$ . Взаємна когерентність ( $\gamma(\omega)$ ) має сенс спектрального коефіцієнта взаємної кореляції процесів X та Y і визначає тісноту кореляційного зв'язку між цими процесами на фіксованих частотах.

За допомогою методики, яка була викладена у [3], розраховані спектральні щільності окремих випадкових процесів, а саме SOI [процес  $X(t)$ ] та середньомісячної приземної температури повітря [процес  $Y(t)$ ]. На рис. 4 та рис.5 представлені відповідні спектрограми.

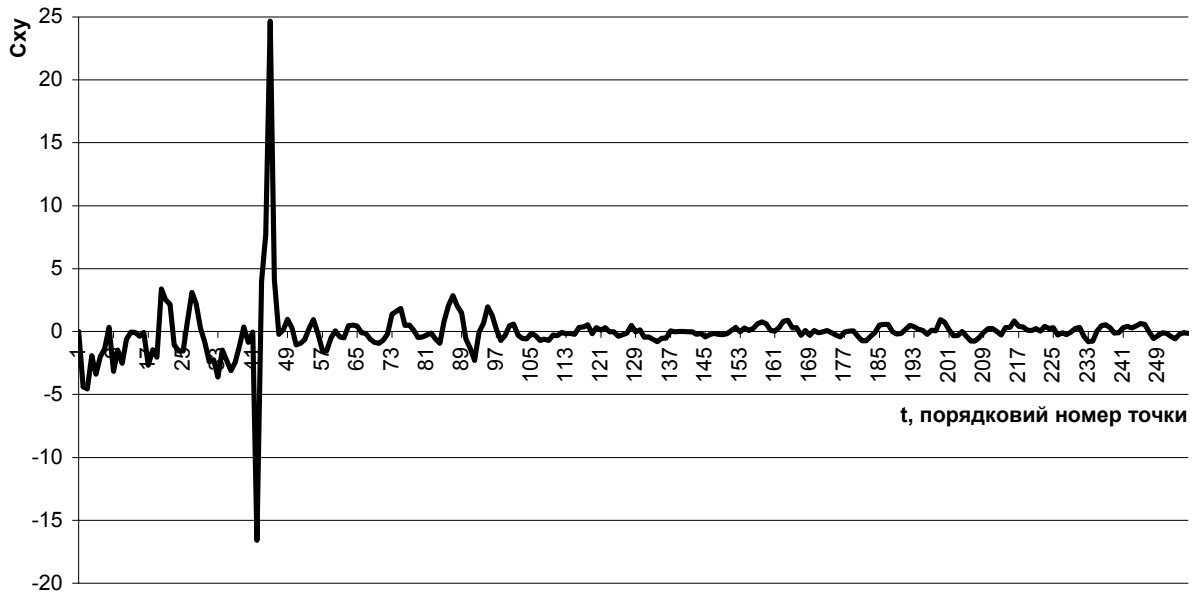


Рис. 1 – Ко-спектр процесів: індекс Південного коливання та середньомісячна температура повітря (ст. Новолазарівська).

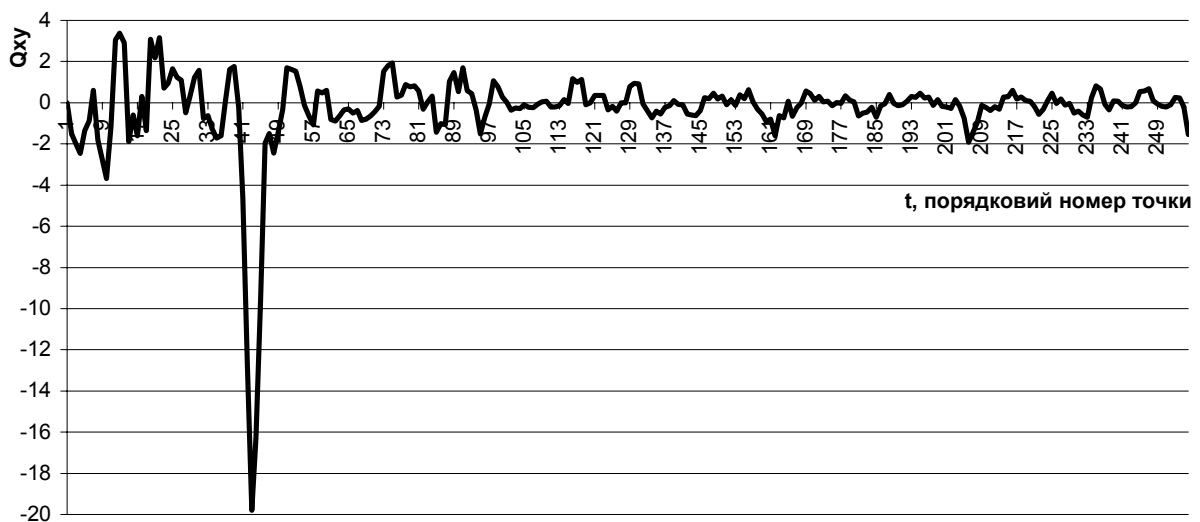


Рис. 2 – Квадратурний спектр процесів: індекс Південного коливання та середньомісячна температура повітря (ст. Новолазарівська).

Для визначення вірогідності статистичної оцінки спектральної щільності середніх місячних значень SOI треба використовувати довірчий інтервал, для якого значення оцінки спектра попадає із заданою ймовірністю. Нуль гіпотезу треба формулювати таким чином: на рівні значущості 0,05 (та 0,10) відсутні гармонічні коливання в спектрі середніх місячних значень SOI на фоні спектра реалізації «червоного шуму», спектром якого є спадна експоненціальна крива. Але в даній роботі перевірка цієї гіпотези не виконувалась.

Мінімальний період коливань, що може бути виявленим у випадковому процесі визначається частотою Найквіста, яка являє собою подвійний інтервал дискретності. В нашому випадку дискретність дорівнює одному місяцю, а мінімальний період коливань, який при цьому може бути знайденим, дорівнює двом місяцям.

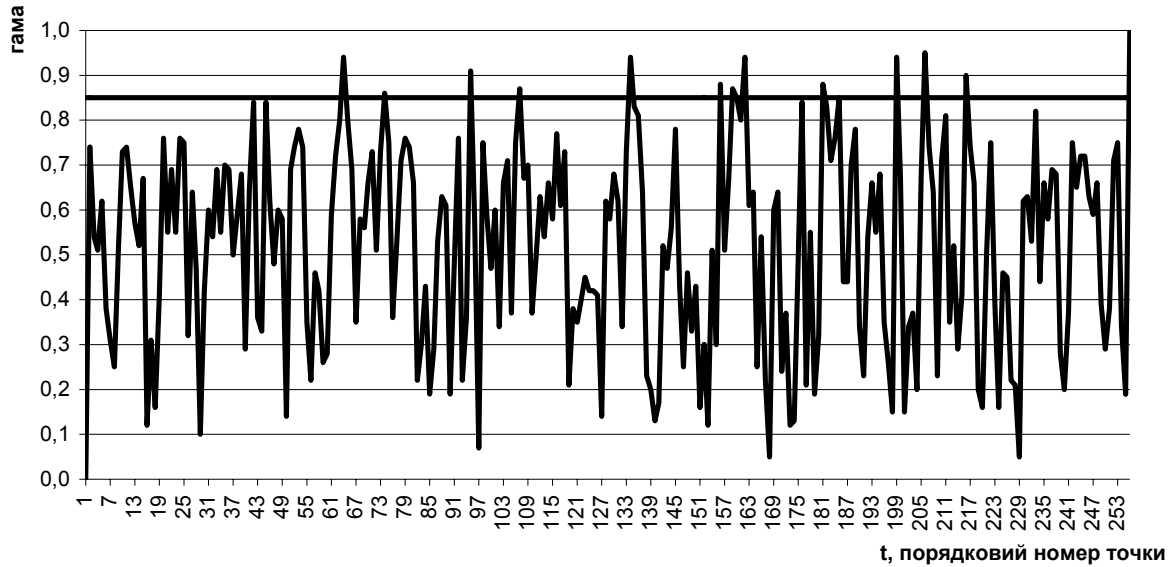


Рис.3 – Когерентність процесів: індекс Південного колювання та середньомісячна температура повітря (ст. Новолазарівська).

Як впливає з рис. 4, в спектральній щільності середніх місячних значень SOI для станції Новолазарівська виявлені квазидворічні колювання з періодом 30,1 місяця (2,5 року), піврічні та сезонні колювання (для Антарктиди сезонними є колювання з періодом від 2 до 6 місяців). Також були виявлені періодичні колювання з періодом – 42,7 місяця (3,6 року) та 51,2 місяця (4,3 року).



Рис. 4 – Спектрограма середньомісячних значень індексу Південного колювання.

Для визначення вірогідності статистичної оцінки спектральної щільності середніх місячних значень приземної температури повітря використовується довірчий інтервал, для якого значення оцінки спектра попадає із заданою ймовірністю. Нуль гіпотезу також треба формулювати таким чином: на рівні значущості 0,05 (або 0,10) відсутні гармонічні колювання в спектрі середніх місячних значень приземної температури повітря на фоні спектра реалізації «червоного шуму», спектром якого є

спадна експоненціальна крива. В даній роботі перевірка цієї гіпотези також не виконувалась. Як випливає з рис. 5, в спектральній щільності середніх місячних значень температури повітря для станції Новолазарівська виявлені річні періодичні коливання, піврічні та сезонні.



Рис. 5 – Спектрограма приземної температури повітря (ст. Новолазарівська).

Далі було визначено початок фази кожного процесу (табл. 1).

Як показали розрахунки, для гармонік від 2-х до 5-ти місяців спостерігається випередження процесу X (який характеризує SOI) по відношенню до процесу Y (який характеризує зміни приземної температури повітря на ст. Новолазарівська), при цьому фазовий зсув складає від 10 до 70 градусів.

Гармоніки 8,0, 5,4 і 3,2 місяця характеризуються випередженням процесу Y по відношенню до процесу X відповідно на 326, 322, 281 градус. Це може свідчити про наявність деякого великомасштабного процесу, який впливає на зміну приземної температури повітря та (з певним запізненням) індексу Південного коливання.

Такі самі розрахунки проведені для всіх 33 станцій Антарктиди. Аналіз одержаних результатів показав, що в спектральній щільності індексу Південного коливання для станцій східної та західної Антарктиди присутні сезонні, піврічні коливання та періодичні коливання з періодом 42,7 місяця (3,6 року). Спектральна щільність індексу Південного коливання для станцій Антарктичного півострова також має сезонні коливання, піврічні коливання, а також коливання з періодом 14,2, 25,6 та 42,7 місяця (3,6 року).

Спектральна щільність середньомісячної температури повітря за той же період досліджень для станцій східної, західної Антарктиди і Антарктичного півострова має також сезонні коливання, піврічні коливання, річні – 10,7 і 11,6 місяця та коливання з періодом 42,7 місяця (3,6 року).

Одержані висновки довели існування тісного кореляційного зв'язку між періодичними складовими в часових рядах індексу Південного коливання (SOI) та приземної температури повітря станцій Антарктиди. Виявлена залежність приземної температури повітря від SOI. Ця залежність спостерігається із зсувом від 10 до 45 градусів (для гармонік приблизно двох місяців). Для купольних станцій, станцій, які

мають значну висоту над рівнем моря або знаходяться на шельфових льодовиках, спостерігаються сезонні зсуви від 40 до 80 градусів.

Як і для SOI були одержані статистичні оцінки взаємної спектральної щільності індексу Ель-Ніньо – Південне коливання (ENSO) та середньомісячної температури повітря. Як демонстраційний зразок також наведено таблицю статистичних оцінок взаємної спектральної щільності для індексу ENSO та середньомісячної приземної температури повітря для ст. Новолазарівська (табл. 2).

Так само, як і для SOI, вірогідність статистичних оцінок взаємної спектральної щільності визначалася по когерентності за умови  $\gamma(\omega) \geq 0.85$ , яка також має сенс спектрального коефіцієнта взаємної кореляції процесів X та Y (табл. 2). За даними табл. 2 також були побудовані графіки всіх функцій. Для прикладу наведені графіки ко-спектра  $C_{xy}(\omega)$  (рис. 6), когерентності  $\gamma(\omega)$  (рис. 7), а також спектральної щільності індексу ENSO  $S_x(\omega)$  (рис. 8) та приземної температури повітря на станції Новолазарівська (рис. 9).

Для визначення вірогідності статистичної оцінки спектральної щільності обох процесів треба використовувати довірчий інтервал, для якого значення оцінки спектра попадає із заданою ймовірністю. Нуль гіпотезу треба формулювати таким чином: на рівні значущості 0,05 (або 0,10) відсутні гармонічні коливання в спектрі середніх місячних значень індексу ENSO (Ель-Ніньо – Південне коливання) на фоні спектра реалізації «червоного шуму», спектром якого є спадна експоненціальна крива. Але в даній роботі перевірка цієї гіпотези теж не виконувалась. В таблиці жирним шрифтом виділено випередження процесу X.

Таблиця 2 – Статистичні оцінки взаємної спектральної щільності середніх місячних значень індексу ENSO та середніх місячних значень приземної температури повітря

№ п/п	$S_x(\omega)$	$S_y(\omega)$	$C_{xy}(\omega)$	$Q_{xy}(\omega)$	$\gamma(\omega)$	$T_k, \text{місяць}$	$\psi_{xy}(\omega), \text{град.}$	$\psi, \text{місяць}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
25	7,85	65,95	-15,54	15,03	0,95	20,5	315,9	18,0
<b>39</b>	<b>1,53</b>	<b>28,92</b>	<b>3,98</b>	<b>4,27</b>	<b>0,88</b>	<b>13,1</b>	<b>47,0</b>	<b>1,7</b>
51	1,95	2,68	1,97	-0,59	0,90	10,0	343,3	9,6
55	0,90	5,95	-1,79	1,11	0,91	9,3	328,2	8,5
56	1,05	6,62	-0,94	2,21	0,91	9,1	293,0	7,4
<b>74</b>	<b>1,68</b>	<b>16,05</b>	<b>3,39</b>	<b>3,36</b>	<b>0,92</b>	<b>6,9</b>	<b>44,8</b>	<b>0,9</b>
95	1,07	6,20	1,30	-2,04	0,94	5,4	302,5	4,5
118	1,65	2,20	-0,29	1,75	0,93	4,3	279,4	3,4
<b>123</b>	<b>0,18</b>	<b>3,41</b>	<b>0,63</b>	<b>0,39</b>	<b>0,94</b>	<b>4,2</b>	<b>31,8</b>	<b>0,4</b>
156	0,49	3,02	-1,06	0,50	0,97	3,3	334,7	3,1
185	0,59	2,10	0,44	-0,89	0,90	2,8	296,3	2,3
211	0,23	1,83	0,16	-0,58	0,92	2,4	285,4	1,9
<b>216</b>	<b>0,51</b>	<b>3,25</b>	<b>1,12</b>	<b>0,34</b>	<b>0,91</b>	<b>2,4</b>	<b>16,9</b>	<b>0,1</b>

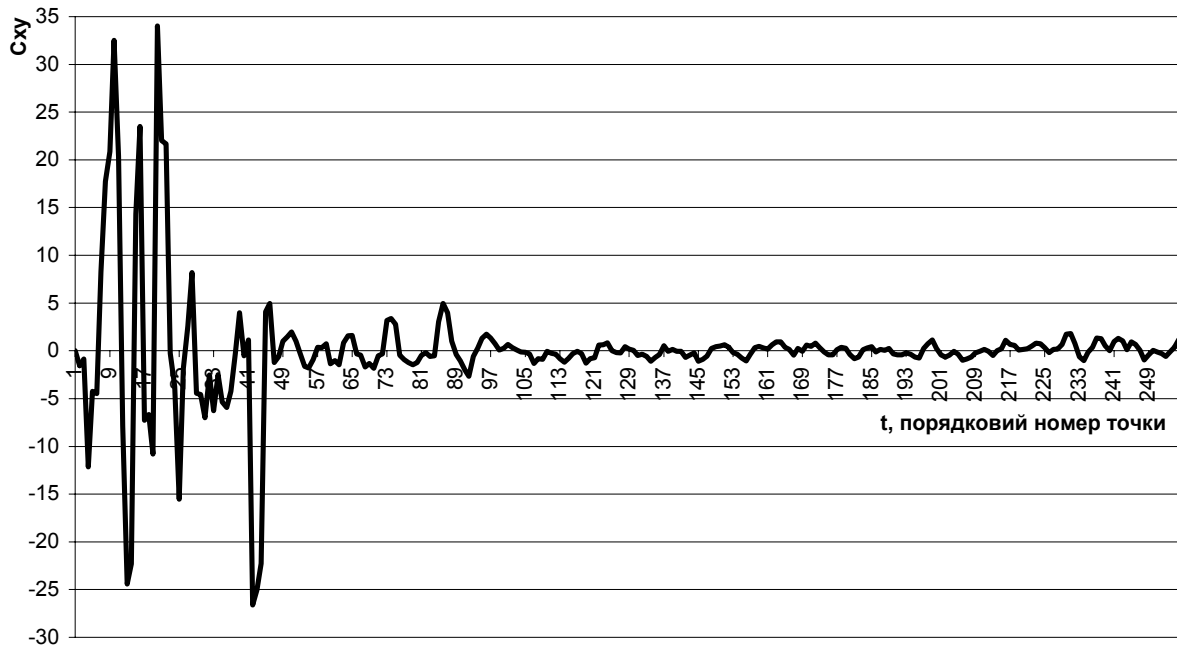


Рис. 6 – Ко-спектр процесів: індекс ENSO та середньомісячна температура повітря (ст. Новолазарівська).

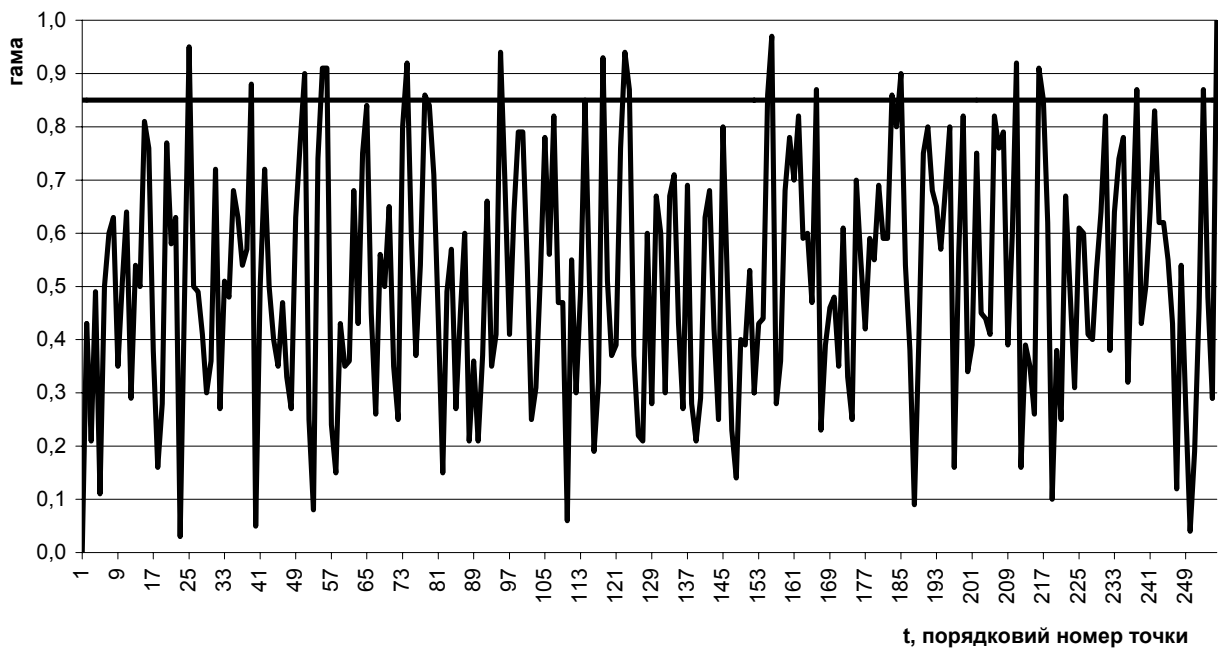


Рис. 7 – Когерентність процесів: індекс ENSO та середньомісячна температура повітря (ст. Новолазарівська).

Як впливає з рис. 8, в спектральній щільності середніх місячних значень індексу ENSO для станції Новолазарівська виявлені періодичні коливання з періодом 170,7 місяця (14,2 року), 51,2 (4,3 року), квазидворічні коливання з періодом 30,1 й 23,3 місяця (2,5; 1,9 року відповідно), піврічні та сезонні коливання.

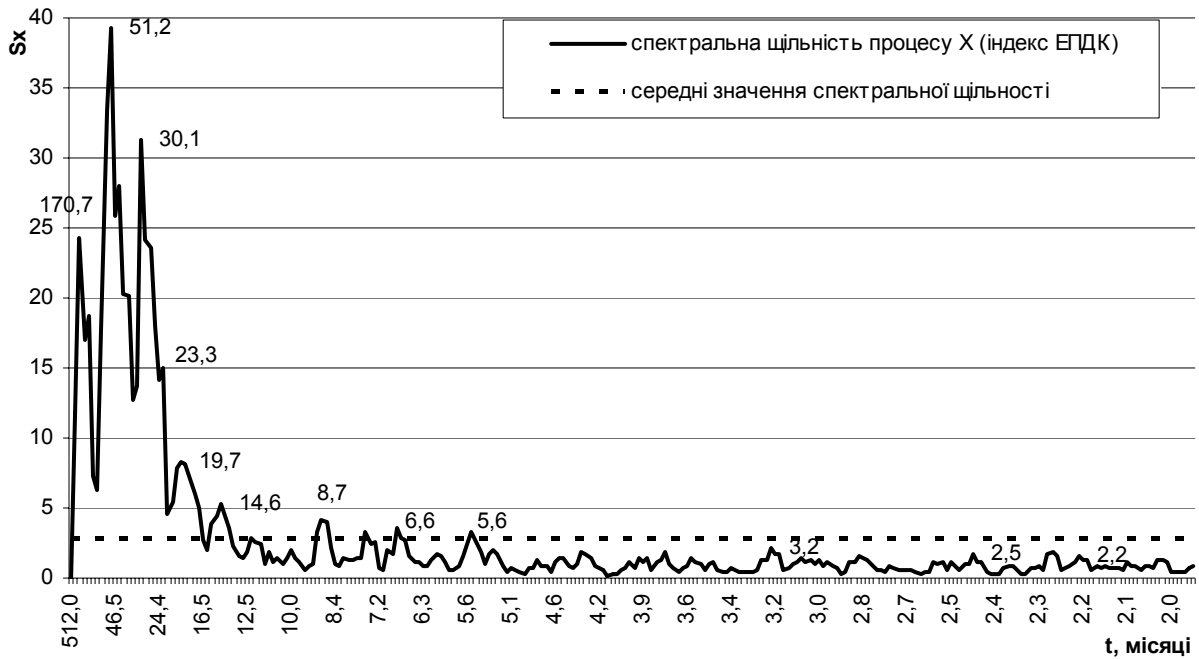


Рис. 8 – Спектрограма середньомісячних значень індексу ENSO.

В спектральній щільності середніх місячних значень температури повітря для станції Новолазарівська (рис. 9) виявлені річні періодичні коливання з періодом – 11,9 місяця, піврічні та сезонні коливання.



Рис. 9 – Спектрограма приземної температури повітря (ст. Новолазарівська).

Також був визначений початок фази кожного процесу (табл. 2). Як показали розрахунки, тільки для гармонік 13,1 6,9 та 4,2 місяця спостерігається випередження процесу X (який характеризує зміни індексу ENSO) по відношенню до процесу Y (який характеризує зміни приземної температури на ст. Новолазарівська). Відповідно на 47,0, 44,8 та 31,8 градуси. Усі інші гармоніки характеризуються випередженням процесу Y по відношенню до процесу X відповідно. Це також може свідчити про наявність



деякого великомасштабного процесу, який впливає на зміну приземної температури повітря та (з певним запізненням) індексу ENSO.

Такі самі розрахунки проведені для всіх 33 станцій Антарктиди. Аналіз одержаних результатів показав, що в спектральній щільності індексу ENSO для станцій східної та західної Антарктиди присутні сезони коливання, піврічні, річні (11,1-14,6 місяця) та періодичні коливання з періодом 42,7 місяці (3,6 року), а для західної Антарктиди ще й – 170,7 місяця (14,2 року). Спектральна щільність індексу ENSO для станцій Антарктичного півострова також має сезонні та піврічні коливання, а ще коливання з періодом 14,2, 25,6 та 42,7 місяця (3,6 року).

Спектральна щільність середньомісячної температури повітря за той же період досліджень для станцій східної, західної Антарктиди і Антарктичного півострова має також сезонні, піврічні, річні коливання та коливання з періодом 42,7 місяця (3,6 року).

Проведений аналіз показав, що між періодичними складовими в часових рядах індексу ENSO та приземної середньомісячної температури повітря на станціях Антарктиди існує тісний кореляційний зв'язок. А саме – залежність приземної температури повітря від індексу ENSO із зсувом від 10 до 40 градусів. Для купольних станцій та станцій, які знаходяться на шельфових льодовиках, виявлена залежність приземної температури повітря від індексу ENSO із зсувом від 30 до 70 градусів.

**Висновки.** Одержані результати дозволили зробити такі висновки.

- Доведено існування тісного кореляційного зв'язку між періодичними складовими в часових рядах індексу Південного коливання (SOI) і Ель-Ніньо – Південне коливання (ENSO) та приземної температури повітря станцій Антарктиди.
- Виявлена залежність приземної температури повітря від SOI. Ця залежність спостерігається з зсувом від 10 до 45 градусів. Для купольних станцій, станцій, які мають значну висоту над рівнем моря або знаходяться на шельфових льодовиках, спостерігаються зсуви від 40 до 80 градусів.
- Залежність приземної температури повітря від індексу ENSO проявляється із зсувом від 10 до 40 градусів. Часто спостерігається зсув з періодом в 1 місяць, який відповідає річним гармонікам, а також сезонні зсуви (приблизно 2 місяці). Для купольних станцій та станцій, які знаходяться на шельфових льодовиках, виявлена залежність приземної температури повітря від індексу ENSO із зсувом від 30 до 70 градусів.

#### Список літератури

1. Т.Е. Danova, О.М. Prokofev. Dynamics of temperature of air of the ground layer of troposphere of the coastal stations of Antarctica // Зб. тезисів доповідей міжнародної антарктичної конференції IAC2009: "Міжнародний полярний рік в Україні підсумки та перспективи". – Харків, 2009. – С. 29.
2. data.oceaninfo.ru/applications/indexes
3. Гончарова Л.Д. Школьнік С.П. Методи обробки та аналізу гідрометеорологічної інформації (збірник задач і вправ). – Одеса: Екологія, 2007. – 464с.

#### **Взаимный спектральный анализ глобальных климатических индексов и приземной температуры воздуха станций Антарктиды. Прокофьев О.М.**

*Представлен взаимный спектральный анализ приземной температуры воздуха станций Антарктиды с глобальными климатическими индексами (Южное колебание и Эль-Ниньо – Южное колебание). Взаимный спектральный анализ дал возможность определить зависимость приземной температуры воздуха от Южного колебания и Эль-Ниньо – Южное колебание.*

**Ключевые слова:** *приземная температура воздуха, спектральная плотность, взаимная когерентность процессов.*

#### **Mutual spectral analysis of global climatic indices and surface air temperature stations in Antarctica.**

**Prokof'ev O.**

*Submitted by the mutual spectral analysis of surface air temperature stations in Antarctica to global climatic indices (Southern Oscillation and El Niño - Southern Oscillation). The mutual spectral analysis made it possible to determine the dependence of surface air temperature from the Southern Oscillation and El Niño - Southern Oscillation. **Keywords:** ground temperature of air, spectral closeness, mutual coherent of processes.*