

УДК 551.513.7

В.М. Хохлов, д.геогр.н.

Одеський державний екологічний університет

ЗВ'ЯЗОК МІЖ ІНДЕКСОМ ПІВДЕННОГО КОЛИВАННЯ ТА АНОМАЛІЯМИ ТЕМПЕРАТУРИ ГЛОБАЛЬНОГО МАСШТАБУ: НЕЛІНІЙНИЙ МЕТОД

Досліджується нелінійний зв'язок між індексами Південного коливання та аномаліями температури (глобальної та окремо в південній і північній півкулях). Методологія ґрунтується на спільному аналізі взаємної інформації та причинності Грангера для часових рядів зазначених величин, розкладених за допомогою стаціонарного вейвлет-перетворення. Показано, що має місце як вплив Південного коливання на аномалії температури, так й обернений процес, а також обернені зв'язки.

Ключові слова: зміна клімату, Південне коливання, причинність Грангера.

Вступ.

Глобальна кліматична система є дуже складною і в ній існує велика кількість різноманітних обернених зв'язків, які потрібно брати до уваги для пояснення існуючих коливань температури. Аналіз часових рядів спостережень показує, що глобальна приземна температура повітря збільшилася з 1861 року на 0,6°C, причому у двадцятому сторіччі швидкість збільшення була дещо більшою. Зокрема, в останні 25 років середній тренд глобальної приземної температури становив 0,171°C за десятиріччя. Таке збільшення температури супроводжувалось зі збільшенням опадів над суходолом, зменшенням снігового і льодового покриву, підняттям рівня моря та змінами режимів циркуляції атмосфери і океану. Моделювання глобального клімату показало, що потепління наприкінці двадцятого сторіччя може бути пояснене, тільки якщо ураховується антропогенний чинник, а для пояснення змін температури на початку минулого сторіччя до моделі мають бути залучені природні чинники [1].

В сучасних чисельних моделях використовуються, головним чином, два підходи, що дозволяють фізично пояснити зміни клімату: вплив парникового ефекту на кліматичну систему та її відгук на аномалії температури поверхні моря в тропічній частині Тихого океану. В останньому випадку моделюється відгук глобальної системи «атмосфера-океан» на Ель Ніньо-Південне коливання (ENSO), яке є однією з найяскравіших структур телеконекції. Ця особливість ENSO дозволяє використовувати часові ряди його індексів як інтегральний індикатор змін клімату над великими територіями земної кулі [2–4]. У випадку такої складної системи адекватне нелінійне моделювання може бути зроблене тільки за умови, що тільки декілька чинників є переважними, а динаміка системи спрощується відповідно до зменшення кількості ступенів свободи. Отже, поняття теорії хаосу, а саме те, що складний на вигляд процес може бути результатом простого детермінізму, на який впливають тільки декілька нелінійних взаємозалежних змінних, та відповідні методи нелінійної динаміки можуть покращити розуміння змін клімату, викликаних Ель Ніньо-Південне коливанням.

Незважаючи на те, що вплив ENSO на клімат є добре вивченим, з нашої точки зору є цікавими відповіді на такі три запитання. По-перше, чи є цей вплив головним чином лінійним або нелінійним? По-друге, чи існує взаємозв'язок між змінами температури та подіями Ель Ніньо на різних часових масштабах? По-третє, чи можливо, що події Ель Ніньо зумовлюють коливання температури і навпаки? Пошук відповідей на ці запитання за допомогою сукупності різноманітних нелінійних методів

й є метою цієї статті.

Об'єкти та вихідні матеріали дослідження.

Грунтуючись на часових рядах за останні 150 років (рис. 1), комплексний підхід, який базується на спільному застосуванні взаємної інформації, причинності Грангера та вейвлет-розкладенні, використовується для виявлення нелінійної взаємодії між індексами Північного коливання (SOI) та аномаліями температури. Тут SOI визначається як різниця тиску між Таїті та Дарвіном і використовується метод Ропелевські та Джонса [5]. Найяскравішою особливістю SOI є добре відоме чергування подій Ель Ніньо (теплих) та Ла Нінья (холодних), протягом яких мають місце додатні чи від'ємні тренди аномалій температури. Незважаючи на те, що в деякі роки відгук атмосфери на подію Ель Ніньо виглядає яскраво вираженим (наприклад, потепління атмосфери протягом січня-березня 1998 року; див. рис. 1), когерентність між змінами незгладжених, нефільтрованих часових рядів є безсумнівно малою. Тому, щоб виявити (можливий) нелінійний зв'язок між SOI та аномаліями температури, у цій роботі спочатку застосовується стаціонарне вейвлет-розкладання часових рядів, а потім для одержаних деталізованих компонентів розраховується взаємна інформація [6] та причинність Грангера [7].

Методи дослідження.

Припущення про можливо нелінійний зв'язок між ENSO та змінами клімату накладає обмеження на застосування лінійних методів, таких як кореляційний аналіз. Використання функціоналів теорії інформації, наприклад, взаємної інформації, має принаймні три важливі переваги у порівнянні з іншими нелінійними статистиками. По-перше, для дослідження окремих типів залежностей між (або серед) змінними (або їх

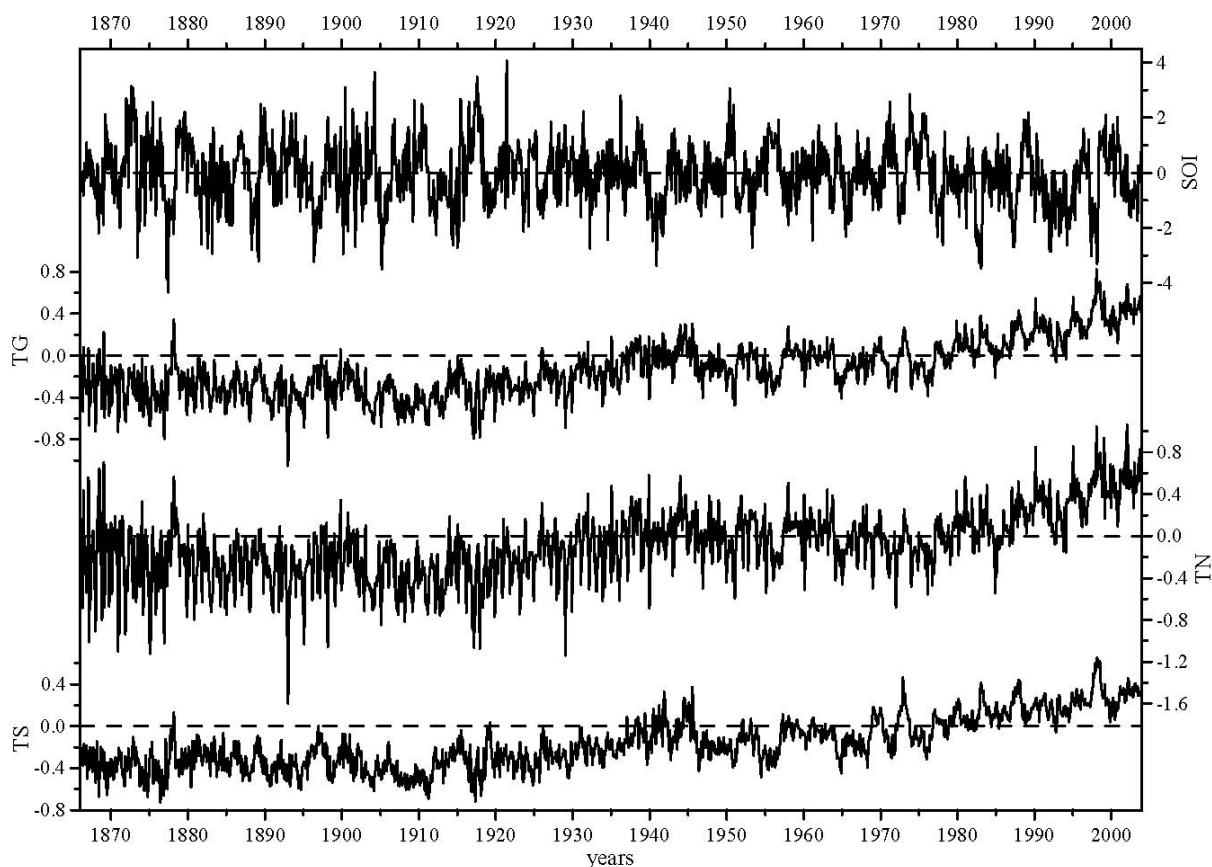


Рис. 1 – Часові ряди середньомісячних індексів Південного коливання (SOI) та відхилень температури (в °С) від базового періоду 1961–90 рр. для усієї земної кулі (TG), північної (TN) та південної (TS) півкуль протягом 1866–2003 рр.

групами) можуть бути побудовані різноманітні види цих функціоналів. По-друге, інформаційні функціонали можуть бути оцінені як функції часової затримки, що й є взаємною інформацією, внаслідок чого структура досліджуваної залежності не є статичною, а стосується динаміки досліджуваної системи. По-третє, існує лінійна форма будь-якого функціонала, яка реагує тільки на лінійну залежність. Але, взаємна інформація не визначає причинний зв'язок, який, проте, можна одержати за допомогою причинності Грангера.

Отже методологія є наступною. Спочатку, для кожного часового ряду $f(t)$ здійснюється стаціонарне вейвлет-розкладання часових рядів за формулами:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{0k} \varphi_{0,k}(t) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{jk} \psi_{j,k}(t), \quad (1)$$

$$S_0(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{0k} \varphi_{0,k}(t) \quad \text{і} \quad D_j(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{jk} \psi_{j,k}(t), \quad (2)$$

де $\psi(t)$ – материнський вейвлет (тут використано вейвлет Добеші db15);

$\varphi(t)$ – скейлінгова функція;

c_{0k} – коефіцієнти, які представляють компоненти за найменшою частотою;

d_{jk} – коефіцієнти, які надають інформацію про поведінку $f(t)$ поблизу масштабу 2^{-j} та часу $k \times 2^{-j}$;

S_0 – згладжений компонент розкладання;

d_{jk} – деталізовані компоненти розкладання.

Далі, для «необроблених» часових рядів та деталізованих компонентів розраховується взаємна інформація

$$I_q(X, Y; \varepsilon) = \log C_q(X, Y; \varepsilon) - \log C_q(X; \varepsilon) - \log C_q(Y; \varepsilon), \quad (3)$$

де X і Y – два часових ряди;

$C_q(\varepsilon)$ – узагальнений кореляційний інтеграл;

ε – масштабний коефіцієнт,

а також причинність Грангера. Наприкінці, здійснюється аналіз значущості одержаних результатів. Докладніше ця методологія викладена в роботі Хохлова та інш. [8].

Результати дослідження та їх аналіз.

На рис. 2 наведені взаємна інформація та причинність Грангера для часових рядів SOI та аномалій температури. До того, як зробити аналіз, зробимо деякі зауваження щодо інтерпретації результатів, поданих на графіках. По-перше, тільки додатні величини взаємної інформації свідчать про наявність взаємозв'язку між рядами. По-друге, величини ймовірності причинності Грангера позначені трикутниками; якщо ті величини розташовані в зоні додатних часових затримок, то, наприклад, для рис. 2а, SOI є грангеровською причиною TG та навпаки. Відзначимо, що в цій статті причинність Грангера визначалася при рівні значущості 95%. По-третє, точкова лінія вказує 97,5% квантілі, одержані за допомогою 5000 бутстрап-копій за умови, що не існує взаємозв'язку між часовими рядами, що розглядаються.

Як відомо [9], великі величини взаємної інформації можна одержати для випадку, коли часові ряди характеризуються істотною когерентністю. В незгладжених, нефільтрованих часових рядах SOI та аномалій температури багато властивостей є прихованими внаслідок наявності високочастотних компонентів, які впливають як білий шум. З іншого боку, через те, що вейвлет-розкладання діє як широкосмуговий фільтр, є можливим визначити низькочастотні компоненти, для яких така когерентність може мати місце. Тому, в цій статті низькочастотні компоненти розглядаються разом з вихідними часовими рядами. Перший такий компонент (D_5) має період приблизно 5–9

років, тобто майже співпадає з головною модою мінливості ENSO, а другий компонент (D_4) характеризується періодом приблизно 14 років. Можна відзначити, що аналогічні періодичності були виявлені й іншими дослідниками (див., наприклад, [10]).

Рисунок 2 повністю підтверджує вище зазначену тезу. Дійсно, взаємна інформація для деталізованих компонентів принаймні вдвічі більша, ніж для вихідних часових рядів. Проте можна побачити, що в останньому випадку аномалії температури є грангеровськими причинами SOI з дворічної затримкою як для усієї земної кулі, так й для окремих півкуль (рис. 32–с). З іншого боку, самі індекси Південного коливання визначають глобальну температуру з затримкою 3–5 місяців, а температуру північної півкулі – 13–20 місяців. Також, має місце великий нелінійний зв'язок між SOI та аномаліями температури майже без будь-якої затримки, а також близько 30 місяців.

Що стосується лінеаризованої взаємної інформації (пунктирні лінії на рис. 2), то, на відміну від нелінійної міри, багато максимумів є меншими або, взагалі, відсутніми, що підтверджує факт про превалюючий нелінійний взаємозв'язок між розглянутими величинами. Також, лінеаризована взаємна інформація є значущою тільки у двох випадках: SOI-TG і SOI-TS для вихідних часових рядів. Відповідно, такий результат може розглядатися як підтвердження використання нелінійних мір, а не їх лінеаризованих версій.

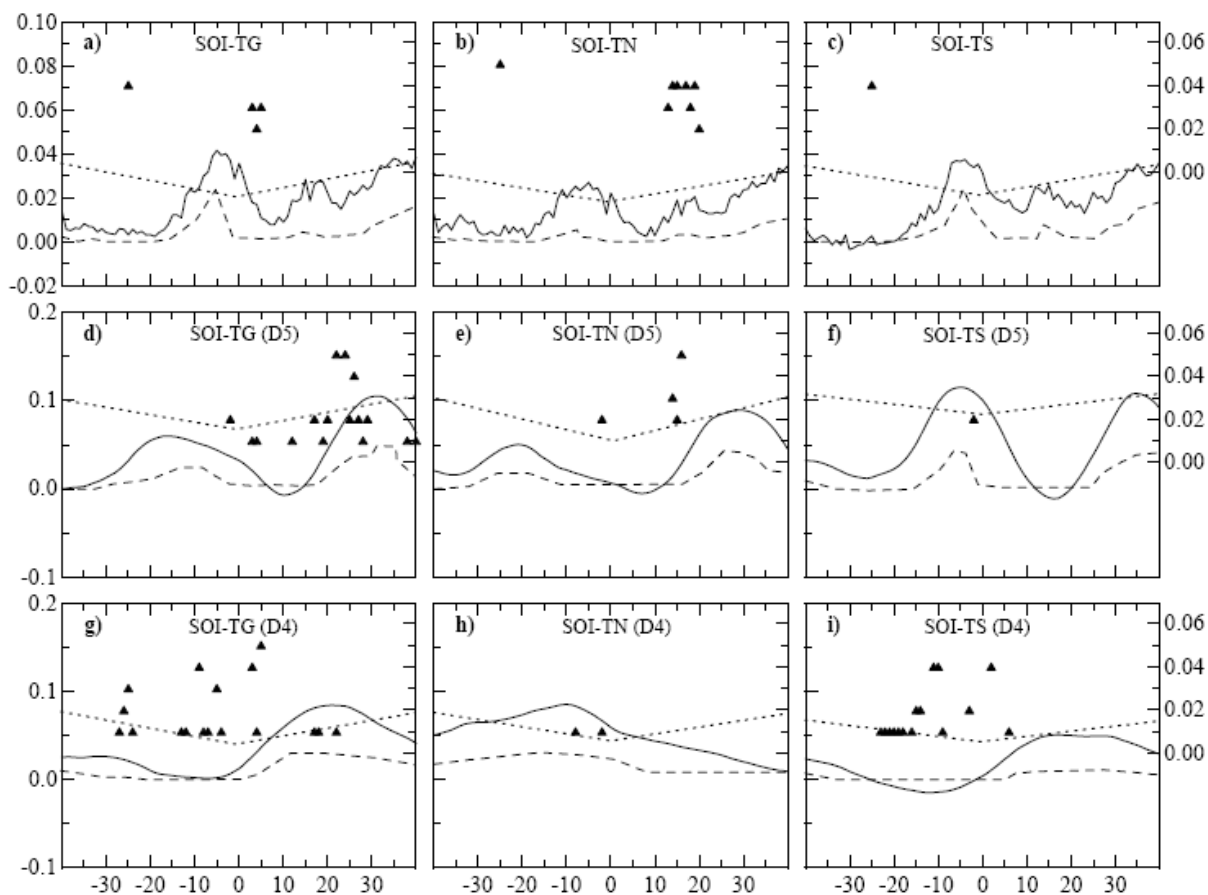


Рис. 2 – Взаємна інформація (суцільні лінії, ліва вісь y), лінеаризована взаємна інформація (пунктир, ліва вісь y) та ймовірність причинності Грангера (трикутники, права вісь y) для вихідних часових рядів (а-с) та деталізованих компонентів вейвлет-розкладання D_5 (d-f) і D_4 (g-i). Точкова лінія вказує квантілі 97,5% для взаємної інформації за відсутності залежності. Взаємозв'язок між SOI і TG, SOI і TN та SOI і TS подано у лівій, центральній та правій частині рисунку, відповідно.

У випадку деталізованого компонента D_5 , аномалії температури викликають зміни SOI з затримкою у два місяці, а також має місце обернений зв'язок між SOI і TG з цією затримкою. Хоч й у всіх випадках відзначаються максимуми на затримках більше 30 місяців (рис. 2d–f), тільки взаємозв'язок SOI-TS є дуже схожим на той, що був одержаний для незгладжених вихідних рядів (порівняйте рис. 2c і 2f), тоді як для SOI-TG і SOI-TN другий максимум зсунувся до більш від'ємних затримок (приблизно 20 місяців).

Певною мірою, є несподіваним те, що аномалії температури в південній півкулі не спричиняються Південним коливанням, тоді як відгук у північній півкулі на головну моду ENSO має місце з затримками приблизно один рік (рис. 2e). Але, більш явно індекси Південного коливання впливають на аномалії глобальної температури; найбільша ймовірність причинності Грангера реєструється на затримках близько 2 років.

Якщо взаємна інформація для SOI та аномалій температури у випадках незгладжених часових рядів і деталізованого компонента D_5 у загальних рисах є дуже схожими, то випадок компонента D_4 дуже відрізняється від них. Максимуми нелінійного зв'язку для SOI-TG, SOI-TN і SOI-TS мають місце з затримкою 20, –10 та 24 місяця відповідно (див. рис. 2g–i). Значимі величини ймовірності причинності Грангера у випадку SOI-TG спостерігаються у широкому діапазоні часових затримок (від –27 до 22 місяців), і обернений зв'язок має місце з затримкою 5 місяців. Інша відмінність для цієї періодичності полягає у тому, що температурні аномалії в південній півкулі є грангеровськими причинами SOI з затримкою приблизно 1–2 роки, що не спостерігалось для вихідних часових рядів та компонента D_5 (порівняйте рис. 2i з рис. 2c і 2h), а обернений зв'язок має місце з затримкою 3 та 22 місяці.

Отже, комплексний підхід, застосований у цьому дослідженні, дозволив виявити деякі цікаві закономірності нелінійного взаємозв'язку між індексами Південного коливання та аномаліями температури в цілому для земної кулі і окремих півкуль. Можна відзначити, що використання деталізованих компонентів вейвлет-розкладання, у нашому випадку, виявилось дуже наочним засобом для виявлення закономірностей. До того ж, періоди деталізованих компонентів співпадають з головними модами мінливості Ель Ніньо-Південного коливання.

Висновки.

Спочатку, зупинимось на вихідних даних, використаних у цьому дослідженні. Добре відомо, що протягом двадцятого сторіччя реєструвалися періоди з додатним та від'ємним трендами температури. Але, більш-менш істотні тренди подій Ель Ніньо, пов'язані зі змінами температури не спостерігалися; рис. 1 може бути підтвердженням цього факту. Більше того, численні відтворення за допомогою різних моделей глобальної циркуляції атмосфери та океану показують, що найбільш вірогідним сценарієм є відсутність трендів як до умов Ель Ніньо, так і до Ла Нінья, хоч й є невелика ймовірність до змін у напрямку умов Ель Ніньо [11]. З цієї точки зору, немає потреби в аналізі окремих періодів похолодання або потепління.

В багатьох попередніх дослідженнях було показано, що зміни температури (глобальні й регіональні) перебувають під впливом внутрішньо та зовнішньо згенерованих змін в атмосферній циркуляції, пов'язаній з ENSO та іншими модами мінливості. Наприклад, Крукс і Грей [12] показали, що відгуки на ENSO спостерігаються, головним чином, в тропіках та субтропіках, хоч значущий відгук спостерігається також поблизу 70 °півд.ш. (принаймні в лінійній моделі, але треба відзначити, що лінійні моделі звичайно недооцінюють відгук на ENSO у позатропічних широтах [13]). З цієї точки зору, взаємна інформація, наведена на рис. 2a–c, може

розглядатися як прояв таких відгуків, особливо внаслідок того, що SOI є грангеровською причиною змін температури. З іншого боку, існують ознаки того, що зміни температури також є грангеровською причиною SOI з затримкою у два роки. Це означає, що зміни температури, імовірно, є механізмом, який ініціює відхилення Ель Ніньо від сталого стану [14]. Більше того, температура, принаймні поблизу екватора, може розглядатися як прекурсор початку Ель Ніньо або Ла Нінья [15].

Рисунок 2 також підтверджує переваги нелінійного підходу, використаного в цьому дослідженні, у порівнянні з лінійними моделями. У випадку вихідних часових рядів, коефіцієнт кореляції між TG і TN становить 0,93, а між TG і TS – 0,88. Верхні графіки на рис. 2 є дуже схожими, але у випадку деталізованого компонента D_5 і, особливо, D_4 , як взаємна інформація, так й причинність Грангера, відрізняються істотно. Незважаючи на те, що десятирічна мінливість ENSO є звичайним довгостроковим осередненням міжрічної її мінливості на часових масштабах десять років та більше [16], ці істотні відмінності вказують на неоднозначний вплив, який спричиняє ENSO на обидві півкулі. Треба також відзначити, що амплітуда змін взаємної інформації для детальних компонентів D_5 і D_4 є різною. Найвірогідніше, це викликано тим, що у випадку, коли амплітуда циклу ENSO збільшується внаслідок потужного нелінійного режиму, її період стає коротшим [17], тоді як для температури це не повинно виконуватися.

Отже, головний висновок цього дослідження полягає у виявленні нелінійного взаємозв'язку між SOI та змінами температури для середньомісячних часових рядів та їх низькочастотних компонентів. Цей взаємозв'язок було виявлено за допомогою комплексного підходу, який ґрунтується на стаціонарному вейвлет-розкладанні та оцінюванні взаємної інформації та причинності Грангера для часових рядів.

Список літератури

1. Meehl G.A., Washington W.M., Ammann C.M., Arblaster J.M., Wigley T.M.L., Tebaldi C. Combinations of natural and anthropogenic forcings in twentieth-century climate // *J. Climate* 2004. – V. 17. – P. 3721–3727.
2. Dai A., Wigley T.M.L. Global patterns of ENSO-induced precipitation // *Geophys. Res. Lett.* 2002. – V. 27. – P. 1283–1286.
3. Khokhlov V.N., Glushkov A.V., Tsenenko I.A. Atmospheric teleconnection patterns and eddy kinetic energy content: wavelet analysis // *Nonlin. Processes Geophys.* 2004. – V. 11. – P. 295–301.
4. Brönnimann S. Impact of El Niño-Southern Oscillation on European climate // *Rev. Geophys.* 2007. – V. 45. – RG3003, doi: 10.1029/2006RG000199.
5. Ropelewski C.F., Jones P.D. An extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index // *Mon. Wea. Rev.* 1987. – V. 115. – P. 2161–2165.
6. Prichard D., Theiler J. Generalized redundancies for time-series analysis // *Physica D* 1995. – V. 84. – P. 476–493.
7. Granger C.W.J. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods // *Econometrica* 1969. – V. 37. – P. 424–438.
8. Khokhlov V.N., Glushkov A.V., Loboda N.S. On the nonlinear interaction between global teleconnection patterns // *Q. J. Royal Meteorol. Soc.* 2006. – V. 132. – P. 447–465.
9. Diks C., Mudelsee M. Redundancies in the Earth's climatological time series // *Phys. Lett. A* 2000. – V. 275. – P. 407–414.
10. Jevrejeva S., Moore J.C., Grinsted A. Influence of the Arctic Oscillation and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet approach // *J. Geophys. Res.* 2003. – V. 108. – 4677, doi:10.1029/2003JD003417.
11. Collins M. El Niño- or La Niña-like climate change? // *Clim. Dyn.* 2005. – V. 24. –

P. 89–104.

12. Crooks S.A., Gray L.J. Characterization of the 11-year solar signal using a multiple regression analysis of the ERA-40 dataset // J. Climate 2005. – V. 18. – P. 996–1015.

13. Blender R., Luksch U., Fraedrich K., Raible C.C. Predictability study of the observed and simulated European climate using linear regression // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2003. – V. 129. – P. 2299–2313.

14. Kessler W.S. Is ENSO a cycle or a series of events? // Geophys. Res. Lett. 2002. – V. 29. – P. 2125, doi:10.1029/2002GL015924.

15. Kug J.-S., An S.-I., Jin F.-F., Kang I.-S. Preconditions for El Niño and La Niña onsets and their relation to the Indian Ocean // Geophys. Res. Lett. 2005. – V. 32. – L05706, doi:10.1029/2004GL021674.

16. Vimont D.J. The contribution of the interannual ENSO cycle to the spatial pattern of decadal ENSO-like variability // J. Climate 2005. – V. 18. – P. 2080–2092.

17. Eccles F., Tziperman E. Nonlinear effects of ENSO's period // J. Atmos. Sci. 2004. – V. 61. – P. 474–482.

Связь между индексом Южного колебания и аномалиями температуры глобального масштаба: нелінійний метод. Хохлов В.Н.

Исследуется нелинейная взаимосвязь между индексами Южного колебания и аномалиями температуры (глобальной и отдельно в северном и южном полушарии). Методология основывается на совместном анализе взаимной информации и причинности Гранжера для временных рядов указанных величин, разложенных с помощью стационарного вейвлет-преобразования. Показано, что имеет место как влияние Южного колебания на аномалии температуры, так и обратный процесс, а также обратные связи.

Ключевые слова: изменение климата, Южное колебание, причинность Гранжера.

Relationship between Southern Oscillation Index and global temperature anomalies: nonlinear approach. Khokhlov V.N.

The non-linear relationship between Southern Oscillation Index and temperature anomalies (global as well as both northern and southern) is studied. The methodology is based on the joint analysis of cross-redundancies and Granger causality, which are applied to time series decomposed by the non-decimated wavelet transform. It is shown that there are both the effects of Southern oscillation on the temperature anomalies and vice versa, as well as the feedbacks.

Keywords: climate changes, Southern Oscillation, Granger causality.