

УДК 556.12 : 551.577.35 : 517.444

## ВПЛИВ ПІВНІЧНОАТЛАНТИЧНОЇ ОСЦИЛЯЦІЇ НА ЧАСОВИЙ РОЗПОДІЛ ОПАДІВ: МЕТОД ВЕЙВЛЕТ-РОЗКЛАДАННЯ

В.Д. Русов<sup>1,2</sup>, О.В. Глушков<sup>1,3</sup>, В.М. Ващенко<sup>2</sup>, В.М. Павлович<sup>2</sup>, Н.С. Лобода<sup>3</sup>,  
Ж.І. Патлашенко<sup>4</sup>, В.М. Хохлов<sup>3</sup>, А.А. Свиначенко<sup>3</sup>, Т.В. Солонко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, пр. Шевченка, 1

<sup>2</sup>Український антарктичний науковий центр, м. Київ, б. Шевченка, 16

<sup>3</sup>Одеський державний екологічний університет, м. Одеса-9, п/с 24а

<sup>4</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка

**Реферат.** Проаналізовано вплив Північноатлантичної осциляції (NAO) на часові зміни опадів над Україною за допомогою методу вейвлет-розкладання. Показано, що найбільші коефіцієнти кореляції між індексами NAO та місячними сумами опадів відзначаються для заходу України і для періоду тривалого домінування однієї фази NAO.

**Ключові слова:** вейвлет-розкладання, Північноатлантична осциляція, часові зміни опадів

**Влияние Североатлантического колебания на временное распределение осадков: метод вейвлет-разложения.** В.Д. Русов, А.В. Глушков, В.Н. Ващенко, В.Н. Павлович, Н.С. Лобода, Ж.И. Патлашенко, В.Н. Хохлов, А.А. Свиначенко, Т.В. Солонко

**Реферат.** Проанализировано влияние Североатлантического колебания (NAO) на временные изменения осадков над Украиной на основе метода вейвлет-разложения. Показано, что наибольшие коэффициенты корреляции между индексами NAO и месячными суммами осадков отмечаются для запада Украины и для периода продолжительного доминирования одной фазы NAO.

**Ключевые слова:** вейвлет-разложение, Североатлантическое колебание, временные изменения осадков

**An effect of the North Atlantic oscillation on the temporal distribution of precipitation: Wavelet expansion method** by V.Rusov, A.Glushkov, V.Vaschenko, V.Pavlovich, Zh.Patlashenko, N.Loboda, V.Khokhlov, A.Svinarenko, T.Solonko

**Abstract.** Within the wave-let expansion method analysis of influence of North-Atlantic oscillation (NAO) on temporal distribution of precipitation on Ukraine is carried out. It is shown that the most large correlation coefficients between NAO indexes and month precipitation sums are defined for the west of Ukraine and for period of the long dominating the single NAO phase.

**Key words:** wavelet expansion, North Atlantic oscillation, temporal distribution of precipitation

### 1. Вступ

Ця робота продовжує наші дослідження із застосування одного з досить ефективних сучасних математичних методів до задач фізики атмосфери та клімату [1–5]. У роботі вивчається вплив Північноатлантичної осциляції (NAO) на часові зміни опадів над Україною. Як відомо, просторовий розподіл опадів на території України відзначається «плямистим» характером, і максимум опадів спостерігається на заході, а мінімум – на сході [6]. Дуже важко казати про внесок якогось одного певного атмосферного процесу у місячні або річні суми опадів над різними регіонами України. Як правило, згадується про вплив процесів одного масштабу, наприклад, великомасштабних чи синоптичних. Н.С. Лобода у своїй роботі [7] відзначила, що на кліматичний фон опадів, температури та стоку рік на

території Європи діє так звана Північноатлантична осциляція (NAO), і за допомогою методу головних компонентів показала її можливий вплив на поля гідрометеорологічних величин на території України.

Розглянемо стисло деякі характеристики NAO, яка є однією з найпомітніших схем телеконекції у всі пори року і яка була описана Е. Дж. Барнстоном та Р.Е. Лайвзі [8]. Північноатлантична осциляція складається з диполя аномалій тиску, перший центр якого розташований над Ісландією, а інший, з протилежним знаком, – біля Канарських островів. При додатній фазі NAO у високих широтах Північної Атлантики спостерігається тиск дещо нижчий за нормальний, а над центральною частиною Північної Атлантики, сходом США та Західною Європою реєструється тиск дещо вищий за звичайний. При від'ємній фазі NAO над цими районами спостерігаються аномалії протилежних знаків. Існує значна міжрічна мінливість NAO, при цьому як додатна, так і від'ємна, фази можуть спостерігатися протягом кількох місяців поспіль. У той же час для зазначеної мінливості існує певна періодичність. З іншого боку, якщо NAO мала тенденцію залишатися в одній екстремальній фазі, вона відповідала за більшість зимових потеплень та похолодань, що спостерігалися над Європою та Північно-Західною Атлантикою.

Хоча певного зв'язку між фазою Північноатлантичної осциляції та кліматичним фоном над Україною не можна заперечувати, але кількісно виразити такий зв'язок дуже важко. Наприклад, якщо обчислити коефіцієнт кореляції між місячними сумами опадів над різними регіонами України та індексами NAO, то його величина для достатньо довгого періоду (в нашому випадку більшого за 40 років) не перевищуватиме 0,04. Навіть якщо зробити фільтрацію цих часових рядів, коефіцієнт кореляції не перевищить 0,10. Тобто зв'язок практично відсутній.

У нашій роботі ми для виявлення впливу Північноатлантичної осциляції на часові зміни опадів над Україною застосуємо вейвлет-розкладання, яке є достатньо гнучким у припасуванні до локальних змін періоду сигналів, що змінюються в широких межах. Через те, що вейвлети містять чіткі мінімуми та максимуми, вони враховують реальні оцінки довжини циклу.

Можна без перебільшення сказати, що вейвлети здійснили революцію у теорії та практиці обробки нестационарних сигналів. Нині вейвлети широко застосовуються для розпізнавання образів; при обробці та синтезі різноманітних сигналів, наприклад, мовних та медичних; для вивчення властивостей турбулентних полів; для розв'язання задач стиснення та обробки зображень тощо. Деякі ідеї теорії вейвлетів частково були розроблені вже дуже давно. Наприклад, А. Хаар ще у 1910 році опублікував повну ортонормальну систему базисних функцій з локальною областю визначення, які зараз мають назву вейвлетів Хаара. Але приємно відзначити, що, мабуть, перша згадка про вейвлети з'явилась у літературі з цифрової обробки та аналізу геофізичних сигналів (зокрема, сейсмічних) у роботах, які було виконано під керівництвом А. Гроссмана та Ж. Морле [9, 10]. На сьогодні бібліографія про застосування вейвлет-перетворення для аналізу різноманітних геофізичних сигналів, зокрема метеорологічних, налічує велику кількість публікацій, тому наведення хоча б невеликої їх частки у статті, присвяченій конкретній проблемі, є, мабуть, зайвим (для довідок див. [11–13]).

## 2. Метод дослідження

Отож вейвлети є функціями стандартних блоків і аналогічні тригонометричним функціям синус та косинус. Перетворення Фур'є добуває деталі з частоти сигналу, але вся інформація про розташування окремої частоти всередині сигналу втрачається. Тому при аналізі нестационарних сигналів вейвлети за рахунок своєї локальності мають суттєву перевагу над перетворенням Фур'є. Для опису різноманітних метеорологічних сигналів часто застосовується (див., наприклад, [11–15]) неперервне вейвлет-перетворення.

У цій статті ми використовуємо так зване стаціонарне вейвлет-перетворення, тому що воно має деякі переваги над зазначеним вище. Зокрема, воно має набагато краще розв'язання на великих часових масштабах, а також дозволяє більш безпосередньо ізолювати часові ряди головних компонентів (див., наприклад, [16]).

Розширення та зміщення материнського вейвлета  $\psi(t)$  генерує вейвлет

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k).$$

Параметр розширення  $j$  контролює величину вейвлета, а параметр зміщення  $k$  – наскільки вейвлет зрушений уздовж осі  $t$ . Для вибраного належним чином материнського вейвлета ряд  $\{\psi_{j,k}\}_{j,k}$  забезпечує ортогональний базис, а функція  $f$ , що визначена в межах реальних чисел, може бути розкладена як

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

де максимальний масштаб  $J$  визначається кількістю даних,  $c_{0,k}$  є коефіцієнтами найнижчої частоти і  $d_{j,k}$  надають інформацію про динаміку функції  $f$ , що концентрується на ефектах масштабу навколо  $2^{-j}$  близько до часу  $k \times 2^{-j}$ . Це вейвлет-розкладання функції майже точно відображає дискретне вейвлет-перетворення (ДВП) сигналу, що спостерігається у дискретні моменти часу.

На практиці довжина сигналу  $n$  має обмеження, наприклад, в нашому дослідженні використовуються середньомісячні дані за конкретний період, тобто функція  $f(t)$  у рівнянні (1) є вектором  $f = (f(t_1), \dots, f(t_n))$  з  $t_i = i/n$  та  $i = 1, \dots, n$ . Тоді ДВП вектора  $f$  є звичайним матричним добутком  $d = Wf$ , де  $d$  є вектором  $n \times 1$  коефіцієнтів дискретного вейвлета з цілими індексами, кратними 2;  $d_{j,k}$  та  $W$  є ортогональними матрицями  $n \times n$ , пов'язаними з базисом вейвлета. З обчислювальних причин простіше виконувати вейвлет-перетворення часового ряду з діагностичною (показник степені 2) довжиною. В нашому випадку довжина ряду становить 512 місяців (з липня 1960 по лютий 2003 року).

Однією з особливих проблем ДВП є відсутність інваріанта зміщення, що може стати причиною феномена Гіббса при реконструкції функції [16]. Стаціонарне вейвлет-перетворення (СВП) даних  $(f(t_1), \dots, f(t_n))$  на рівномірно розташованих точках  $t_i = i/n$  визначається як серія усіх ДВП, сформованих з  $n$  можливих зсувів на величину  $i/n$ , де  $i = 1, \dots, n$ . Тобто на відміну від ДВП існує  $2^j$  коефіцієнтів на  $j$ -тому рівні розв'язання та  $n$  рівномірно розташованих коефіцієнтів вейвлета у СВП на кожному рівні розв'язання  $j$ :

$$d_{j,k} = n^{-1} \sum_{i=1}^n 2^{j/2} \psi[2^j(i/n - k/n)] y_i,$$

де  $k = 0, \dots, n-1$ . Це веде до  $\log_2(n)$  коефіцієнтів у кожній точці розташування. Безпосереднім наслідком цього є те, що СВП стає інваріантом зміщення. Внаслідок своєї структури СВП припускає кращу частоту вибірки на всіх рівнях  $i$ , таким чином, забезпечує кращий дослідницький засіб для аналізу змін частоти базисного сигналу в часі. Переваги СВП перед ДВП для аналізу часових рядів демонструються в роботах [16, 17].

Як і для області Фур'є, важливо визначити потужність сигналу при заданому розв'язанні. Для цього використаємо еволюційний вейвлет-спектр, який визначає внесок у зміну процесу на масштабі  $j$  та часі  $k$  [16]. Використовуючи наведену у попередньому підрозділі, можна легко побудувати будь-який часовий ряд в області вейвлета. Інший спосіб побачити результат СВП полягає у поданні часової еволюції даних на заданому масштабі. Щоб зробити це, треба визначити гладкий  $S_0$  та деталізований  $D_j$  ( $j = 1, \dots, J$ ) сигнали за формулами:

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

Також часове розкладення  $D_j$  можна послідовно визначити з  $D_j(t) = S_j(t) - S_{j-1}(t)$ . Отже, високочастотні осциляції описуються, головним чином, компонентами  $D_j$  та  $D_{j-1}$ , а компоненти грубого масштабу  $S_0$ ,  $D_1$  та  $D_2$  відповідають низькочастотним коливанням сигналу. У подальшому викладі як материнський застосовується вейвлет Добеші 15-го порядку (db15). Відзначимо, що цей вейвлет є біортогональним та підтримує дискретне вейвлет-перетворення [11]. Високий порядок обрано для гладкішого відтворення деталізованих сигналів.

### 3. Основні результати

Використовуючи вейвлет-розкладання, охарактеризуємо головні складові мінливості індексів Північноатлантичної осциляції та місячних сум опадів у західній, північній, центральній та південній частинах України за методикою, описаною в попередньому розділі. Відсутність у подальшому аналізі результатів для Східної України пояснюється тим, що навіть для деталізованих сигналів коефіцієнт кореляції був малим, тобто вплив Північноатлантичної осциляції на формування опадів на сході України майже відсутній. Спочатку розглянемо деталізований компонент  $D_3$  для NAO (рис. 1).

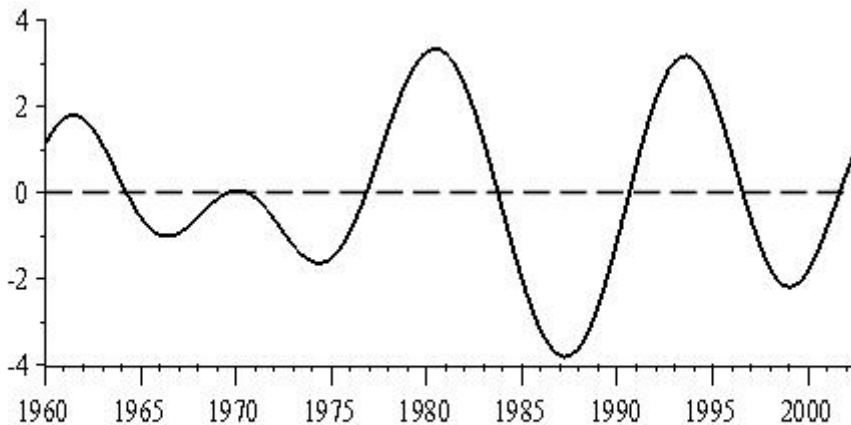


Рис.1 – Деталізований компонент  $D_3$  для індексів NAO.  
Мітки по осі x – роки, головні мітки відповідають липню

По-перше, він характеризує доміантність протягом довгого періоду часу позитивної чи негативної фази NAO. Добре відомо [13], що з середини 1950-х років по 1979 рік превалювала негативна фаза NAO. Взимку 1979–80 року відбувся перехід до позитивної фази, яка тривала до зими 1994–95 року. Протягом цього 15-річного інтервалу істотна негативна фаза спостерігалася лише у 1984–86 роках. Але з листопада 1995 року знову відбувся перехід до негативної фази. Всі ці коливання відображуються на рис. 1, тобто вейвлет-розкладання добре відокремило натуральні довготермінові зміни фази NAO. Найбільший коефіцієнт кореляції (0,59) спостерігався для деталізованих компонентів  $D_4$  індексів NAO і місячних сум опадів над заходом України (рис. 2).

Деталізований компонент  $D_4$  цікавий тим, що період його коливань налічує від 4 до 8 років, а саме на такі тривалості припадає максимум аномалій атмосферного тиску, як показано Е.Д. да Костою та Е.К. де Верд'є [18], хоча треба відзначити, що у своїх

розрахунках вони використовували інший математичний апарат. Також рис. 2 підтверджує особливу перевагу вейвлет-розкладання, а саме його гнучкість у припасуванні до локальних змін періоду NAO, який може змінюватись у досить широких межах. Через те, що вейвлети містять чіткі мінімуми та максимуми, вони враховують реальні оцінки довжини циклу.

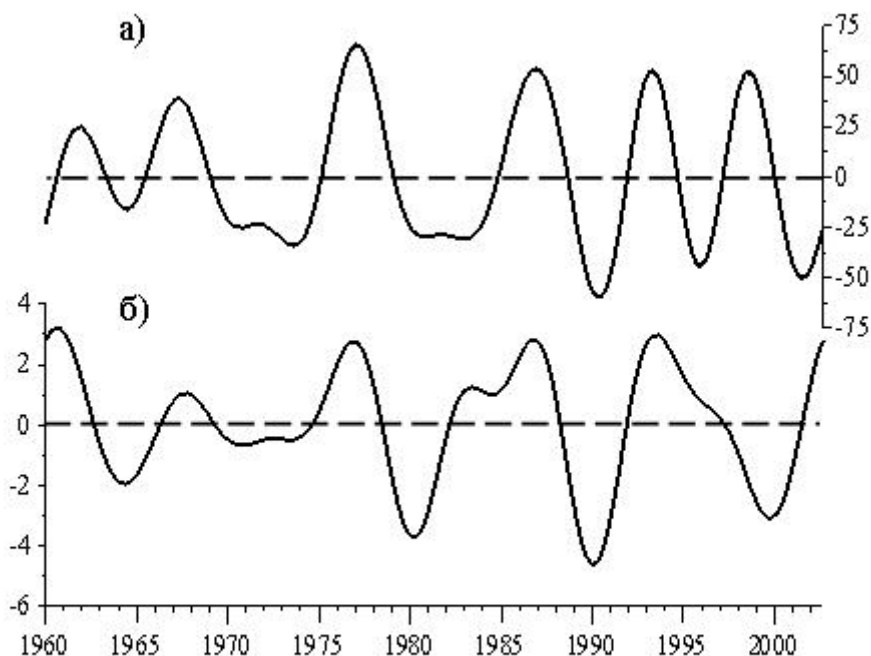


Рис. 2 – Деталізований компонент  $D_4$  для кількості опадів за місяць на заході України (а) та індексів NAO (б). Позначення як на рис. 1.

З рис. 2 видно, що індекси NAO та місячні суми опадів змінюються майже синхронно, і для випадків, коли домінує додатна фаза NAO, кількість опадів на заході України збільшується.

Для інших регіонів України найбільші коефіцієнти кореляції між місячними сумами опадів та індексами NAO відзначалися для деталізованого компонента  $D_5$ , період якого становить приблизно 3 роки. В середньому для північного, центрального та південного регіонів

України коефіцієнт кореляції з індексами NAO становить 0,54 і незначно зменшується з півночі на південь. На рис. 3 представлено саме деталізований компонент  $D_5$ .

З метою вивчення впливу на опади тривалого домінування однієї фази NAO весь період було розділено на дві частини. Протягом першої (з липня 1960 р. по березень 1979 р.), як уже відзначалося, позитивна фаза Північноатлантичної осциляції спостерігалася лише одного разу (взимку 1961–62 рр.), а протягом другої – обидві фази змінювали одна одну. Виявилось, що для періоду тривалого домінування однієї фази NAO коефіцієнти кореляції збільшуються й майже для всіх регіонів перевищують 0,60, а для другого – зменшуються до 0,35.

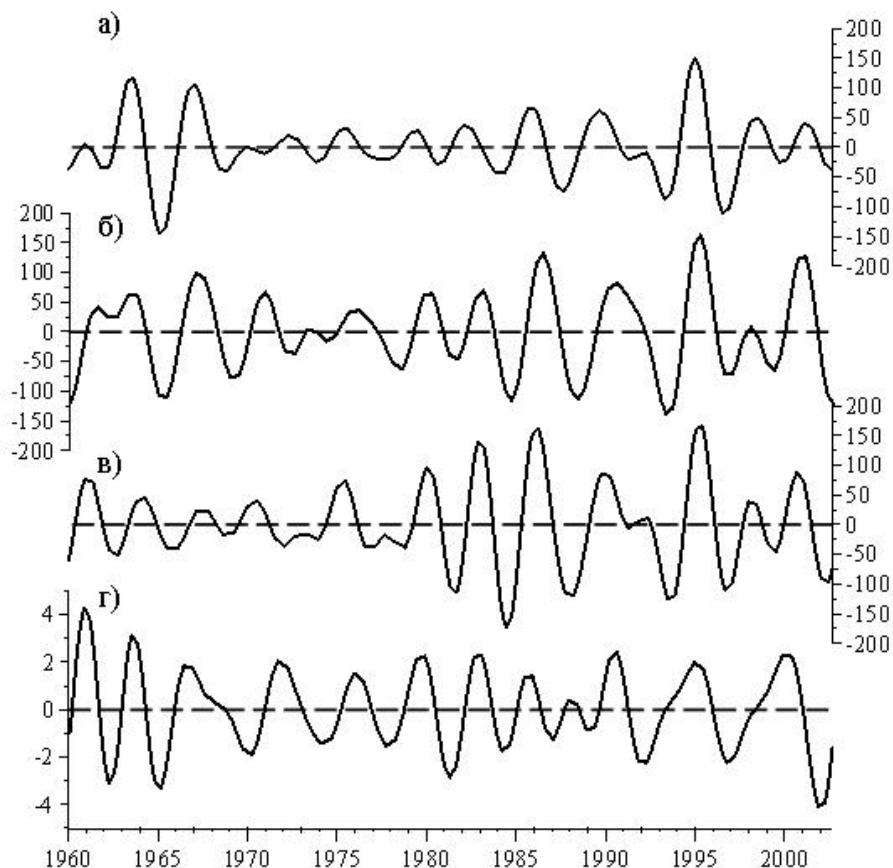


Рис. 3 – Деталізований компонент  $D_5$  для кількості опадів за місяць на півночі (а), у центрі (б), на півдні (в) України та індексів NAO (г). Позначення як на рис. 1.

#### 4. Висновки

Використовуючи вейвлет-розкладання, що ґрунтується на стаціонарному вейвлет-перетворенні, було виявлено деякі первинні періодичності для індексів Північноатлантичної осциляції, як-от 4–8-річна, на яку припадає максимум аномалій атмосферного тиску, а також природна зміна домінуючих фаз NAO. Ці виявлені коливання були проаналізовані разом із місячними сумами опадів. Основні результати такого спільного аналізу можна стисло викласти таким чином.

Вплив Північноатлантичної осциляції на опади над різними регіонами України (за винятком східного) досить істотний. До того ж цей вплив позначається на періодичностях, більших за три роки.

Найбільші коефіцієнти кореляції між індексами NAO та місячними сумами опадів відзначаються для заходу України та для періоду тривалого домінування однієї фази NAO. Перевагою застосування запропонованого в цьому дослідженні розкладання є те, що з його допомогою стає можливим ізолювання коротко- та довготермінових компонентів, причому підтримується достатня гнучкість для змін довжини циклу.

Отже, можна відзначити, що використаний метод досить добре відображає відомі фізичні закономірності динаміки великомасштабних атмосферних процесів і дозволяє

виявити їх деталізовані характеристики. Тому його застосування у подальшому для аналогічних фізикоатмосферних сигналів доволі перспективне.

### Література

1. **Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Tsenenko I.A.** Atmospheric teleconnection patterns and eddy kinetic energy content: wavelet analysis// *Nonlinear Processes in Geophysics*. – 2004. –V. 11, N3. – P. 285–293.
2. **Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Prepelitsa G.P., Tsenenko I.A.** Temporal variability of the atmosphere ozone content: Effect of North-Atalantic oscillation// *Optics of atmosphere and ocean*. – 2004. – Vol. 14, N7. – P. 219–223.
3. **Glushkov A.V., Loboda N.S., Khokhlov V.N.** Using meteorological data for reconstruction of annual runoff series over an ungauged area: Empirical orthogonal functions approach to Moldova-Southwest Ukraine region//*Atmospheric Research (Elseiver)*. – 2005. – Vol. 77. – P. 100–113.
4. **Glushkov A.V., Loboda N.S., Khokhlov V.N., Lovett L.** Using non-decimated wavelet decomposition to analyse time variations of North Atlantic Oscillation, eddy kinetic energy, and Ukrainian precipitation // *Journal of Hydrology (Elseiver)*. – 2006. – Vol. 322. N1–4. –P. 14–24.
5. **Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Loboda N.S.** On the nonlinear interaction between global teleconnection patterns// *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* – 2006. – Vol. 132. – Pp. 447–465.
6. **Лобода Н.С., Хохлов В.Н.** Статистический анализ связи климатических факторов, полей осадков и гидрологических параметров для юго-западной части Украины// *Гидрохимия, гидрология и гидроэкология*. – 2004. – Т. 6. – С. 60–66.
7. **Лобода Н.С.** Применение метода главных компонент к исследованию закономерностей многолетних колебаний годового стока и его климатических факторов // *Метеорология, климатология и гидрология*. – 1999. – Вып. 38. – С. 112–122.
8. **Barnston A.G., Livezey R.E.** Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // *Mon. Wea. Rev.* – 1987. – Vol. 115. – P. 1083–1126.
9. **Morlet J., Arens G., Fourgeau E., Giard D.** Wave propagation and sampling theory // *Geophysics*. – 1982. – Vol. 47. – P. 203–236.
10. **Goupillaud P., Grossman A., Morlet J.** Cycle-octave and related transforms in seismic signal analysis // *Geoexploration*. – 1984. – Vol. 23. – P. 85–102.
11. **Rusov V.D., Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Vaschenko V.N., Pavlovich V.N., Tsenenko I.A., Patlaschenko Zh.I.** On long-term fluctuations of the atntarctic oscillation phase and relationship with southern hemisphere total ozone // *Вісник Київського ун-ту.Сер фіз.-мат.* – 2004. – №4. – С. 471–476.
12. **Goswami J.C., Chan A.K.** Fundamentals of wavelets: theory, algorithms, and applications. – Wiley-Interscience, 1999. – 306 pp.
13. **Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Tsenenko I.A.** Application of the wavelet-expansion to analysis vortex kinetic energy values and heat-mass-energy transfer processes in atmosphere//*Phys. Aerodisp. systems*. – 2003. – Vol. 40. – P. 131–139.
14. **Torrence C., Webster P.J.** Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system // *J. Climat.* – 1999. – Vol. 12. – P. 2679–2690.
15. **Fligge M., Solanki S., Beer J.** Determination of solar cycle length variations using continuous wavelet transform // *Astronomy and Astrophysics*. – 1999. – Vol. 346. – P. 313–321.
16. **Nason G., von Sachs R., Kroisand G.** Wavelet processes and adaptive estimation of the evolutionary wavelet spectrum // *J. Royal Stat. Soc.* – 2000. – Vol. B-62. – P. 271–292.
17. **Hurrell J.W.** Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation // *Science*. – 1995. – Vol. 269. – P. 676–679.
18. **da Costa E.D., de Verdiere A.C.** The 7.7-year North Atlantic Oscillation // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* – 2002. – Vol. 128. – P. 797–817.