

О.В. Глушков, д.ф.-м.н., Ю.Я. Бунякова, к.геогр.н., О.М. Грушевський, к.геогр.н., Г.К. Балан, стар.викл.

Одеський державний екологічний університет

ХАОС-ГЕОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ЧАСОВИХ РЯДІВ КОНЦЕНТРАЦІЙ ДІОКСИДУ АЗОТУ В АТМОСФЕРІ ПРОМИСЛОВОГО МІСТА (НА ПРИКЛАДІ ГДАНСЬКОГО РЕГІОНУ)

На основі методу теорії хаосу, зокрема, схеми кореляційної розмірності, алгоритму Гросберге-ра-Прокаччі, виконано аналіз часових рядів концентрацій діоксиду азоту у м. Гдиня (Гданський регіон) і розраховано спектр кореляційних розмірностей, що підтверджує наявність відповідного хаосу. Отримані чисельні оцінки узгоджуються з даними по спектру розмірностей Ляпунова, розмірності Калана-Йорка та ентропії Колмогорова. Надано оцінку ліміту передбачуваності методу короткострокового прогнозу

Ключові слова: часові ряди концентрацій, діоксид азоту, метод кореляційної розмірності, хаос

Вступ. Загальновідомо, забруднення атмосфери є найбільш небезпечним фактором для людини, флори і фауни, а забезпечення її чистоти є найбільш складною і актуальною проблемою сучасної атмосферної екології [1-4]. Одним з ключових аспектів проблеми є те, що склад атмосфери промислового міста формується під впливом безлічі факторів, у число яких входять характеристики джерел забруднення, їх розташування на місцевості, кліматичні і гідрометеорологічні параметри, особливості архітектури міста, процеси енергообміну і переносу, дисипативність і релаксація, самоочищення та регенерація, і т.ін. Найважливішого значення набуває математичний аспект проблеми, пов'язаний з адекватним аналізом часових рядів концентрацій забруднюючих атмосферних речовин. В останні роки широкого застосування у вивченні антропогенного впливу на екологічний стан промислового міста набули методи теорії хаосу [4-15], які дозволяють, наприклад, на основі дослідження часових рядів концентрацій забруднюючих атмосферу промислового міста речовин давати цілком адекватний аналіз і навіть короткостроковий прогноз подальшої тимчасової еволюції концентрацій забруднюючих речовин. Такий підхід з успіхом використовувався при аналізі флуктуацій метеорологічних та гідрологічних характеристик [16-22]. У роботах [4-7] методи нелінійного прогнозу і теорії хаосу з успіхом застосовувалися до аналізу тимчасових рядів концентрацій атмосферного пилу, сірчистого ангідриду на двох постах м. Одеса, а також в ряді міст Гданського регіону. У цих роботах використовувалися спрощені моделі відновлення спектра розмірностей Ляпунова і на його основі розраховувалась розмірність Калана-Йорка, ентропія Колмогорова. Було показано, що навіть спрощена методика побудови прогностичної моделі дає цілком задовільні результати прогнозу. Метою цієї роботи є проведення більш докладної у порівнянні з попереднім аналізом [5,6] програми досліджень часових рядів для діоксиду азоту у м. Гдиня (Гданський регіон) і оцінка ліміту передбачуваності короткострокового методу прогнозу.

Дані та методика аналізу. У якості вихідних даних використані дані спостережень за діоксидом азоту (NO_2) у м. Гдиня впродовж грудня 2002р. та всього 2003 року (див. цитування в [11]). Концентрації цих двох газів (у мг/м^3) вимірялися кожні 5 хвилин, а потім по цих вимірах розраховувалися середньогодинні значення (усього 9480 величин). Відзначимо, що з 10 постів, розташованих у районі Гданська, тільки на цих двох протягом 2003 року спостереження відбувались безупинно. Це й стало причиною вибору зазначених вище постів, тому що для подальшого аналізу методами теорії хаосу необхідний набір даних з регулярним кроком за часом. У табл. 1 наведені деякі статис-

тичні характеристики для розглянутих вихідних даних, а на рис.1 – самі часові ряди.

Таблиця 1 - Середні (\bar{f}), максимальні (f_{\max}) і мінімальні (f_{\min}) величини, середньоквадратичні відхилення (σ^2), коефіцієнти асиметрії (γ_1) і ексцесу (γ_2) для часових рядів NO_2 у м. Гдиня Гданського регіону за 2003 рік

Гдиня	\bar{f}	f_{\max}	f_{\min}	σ^2	γ_1	γ_2
NO_2	17,03	101,12	3,90	11,23	1,81	4,44

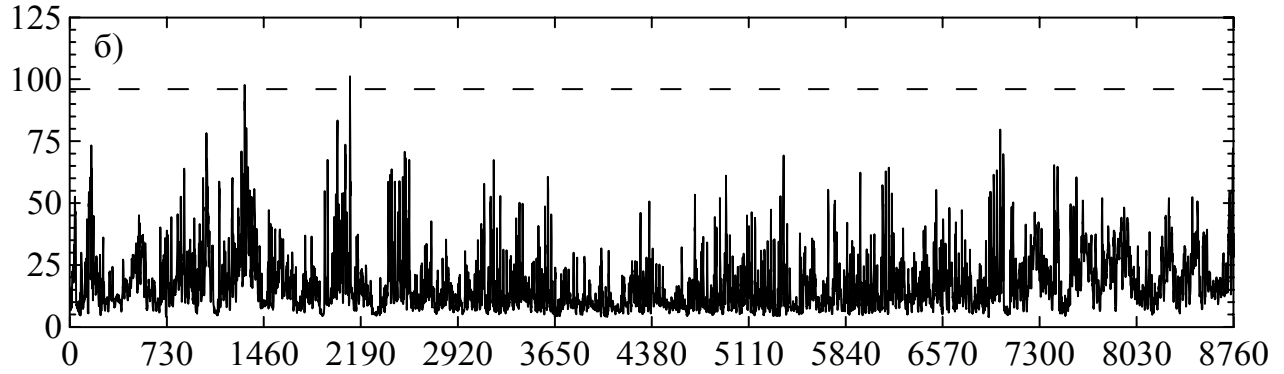


Рис. 1 - Часові ряди NO_2 (у mg/m^3) для м. Гдиня в 2003 році. Штрихові лінії позначають індекс 2 забруднення повітря. Вісь X – порядковий номер години в році.

Мітки на осі X рис. 1 нанесені так, щоб відповідати приблизно першому дню місяця. Також, на цьому рисунку штриховою лінією наведена нижня межа індексу 2 забруднення ($96 \text{ mg}/\text{m}^3$ для NO_2) згідно з Директивою ЄЕС по якості повітря (усього індексів 10). Видно, що впродовж 2003 року спостерігалось декілька випадків, коли досягалося значення цього індексу, і всі вони припадали на зиму або початок весни, тоді як улітку концентрації забруднюючих речовин, у середньому, менші. На рис.2 наведено спектр Фур'є для часового ряду (рис.1.) Беручи до уваги нерегулярний характер змін концентрацій (див. рис.1), не дивно, що ці спектри виглядають такими ж, як і у випадкового процесу.

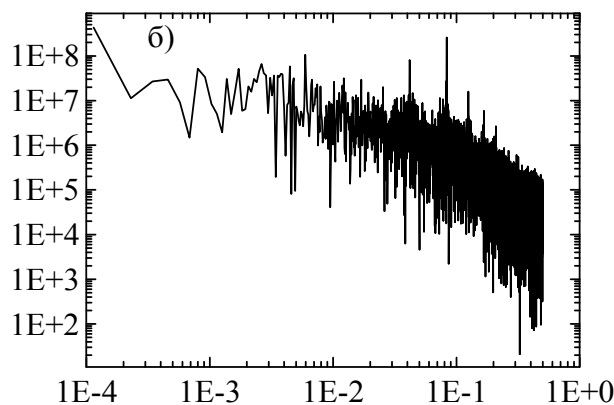


Рис. 2 - Спектр Фур'є концентрацій NO_2 : вісь X – частота, вісь Y – енергія

Результати аналізу та висновки. Важливий крок у аналізі, згідно з [1], - це відновлення фазового простору, для чого потрібно визначення часової затримки за допомогою автокореляційної функції або взаємної інформації. У табл. 2 зведені всі отримані результати для часової затримки в інтервалі від 1 до 1000. Відзначимо, що навіть у цьому випадку автокореляційна функція для NO_2 стала меншою від нуля.

Таблиця 2 - Часова затримка (τ) в залежності від різних значень автокореляційної функції (C_L) і перший мінімум взаємної інформації ($I_{\min 1}$) для часових рядів NO_2

Гдиня	$C_L = 0$	$C_L = 0,1$	$C_L = 0,5$	$I_{\min 1}$
NO_2	102	53	4	8

Подальший крок - чисельні експерименти з відновлення розмірності фазового простору (d_E), використовуючи при цьому метод кореляційної розмірності й алгоритм помилкових найближчих сусідніх точок. У табл. 3 зведені всі результати по відновленню аттракторів, а також розрахунку показника K тесту Готтвода й Мелбена і глобальних розмірностей Ляпунова. Нагадаємо, що показник K тесту Готтвода й Мелбена набуває значень від 0 (регулярність) до 1 (хаос). При цьому важливо зазначити, що величини відмінні від нуля, є показниками хаотичності процесу. В нашому випадку значення K у всіх випадках перевищують 0,6, тобто розглянуті часові ряди піддаються впливу хаотичної динаміки. Можна також відзначити, що розмірність Каплана-Йорка, яка також є одним з показників розмірності аттрактора, у всіх випадках менша, ніж використовувана нами розмірність d_A , а це також може служити одним з показників правильності нашого вибору.

Таблиця 3 - Часова затримка (τ), кореляційна розмірність (d_2), розмірність простору вкладення (d_E), перші дві розмірності Ляпунова (λ_1 і λ_2), розмірність Каплана-Йорка (d_L), межа передбачуваності (Pr_{\max} , години) і показник K для NO_2

	τ	d_2	d_E	λ_1	λ_2	d_L	Pr_{\max}	K
NO_2	8	5,32	6	0,0190	0,0054	3,86	42	0,68

Зупинимося тепер на результатах розрахунку спектра розмірностей Ляпунова. У табл. 3. наведені позитивні λ_i . Оскільки швидкість перетворення сфери в еліпсоїд по різних осях визначається λ_i , то ясно, що чим менша сума позитивних розмірностей, тим більш стійкою є динамічна система. Відповідно це збільшує її передбачуваність. Наявність для кожної із систем двох (із шести) позитивних λ_i свідчить про те, що в шестивимірному просторі система розширюється уздовж двох осей і звужується уздовж чотирьох, що залишилися. Сума позитивних λ_i визначає ентропію Колмогорова, яка обернено пропорційна межі передбачуваності. Для використання методу нелінійного прогнозу необхідно вирішити ще одну задачу, яку можна сформулювати так: скільки найближчих сусідніх точок (NN) потрібно взяти, щоб результати прогнозу були задовільними. Для розв'язання цієї задачі можна попередньо зробити кілька оцінок для різної кількості NN, а потім розрахувати коефіцієнт кореляції між фактичними й прогностичними даними. Як правило, коефіцієнт кореляції збільшується, досягає якогось максимуму [19]. Нами такий підхід був використаний для прогнозу на двадцять чотири години для 100 останніх точок часових рядів NO_2 . Проведені чисельні експерименти показали, що зі збільшенням числа найближчих сусідніх точок прогностична крива, як правило, наближається до фактичної. Результати розрахунку коефіцієнта кореляції між фактичними й прогностичними (на 24 години) величинами при деяких NN представлені в табл.4. Як вказувалося вище, коефіцієнт кореляції зростає зі збільшенням числа NN і досягає деякого значення, після чого його зміни не істотні. Оскільки кількість даних у часових рядах у нашому випадку велика, то максимуму коефіцієнт кореляції може досягти при дуже великій кількості найближчих сусідніх точок, однак, брати їх усіх для побудови моделі прогнозу не має сенсу, тому що якість самого прогнозу при цьому істотно не покращиться.

Таблиця 4 - Коефіцієнт кореляції (r) між фактичним і прогностичним на 24 год. рядами залежно від числа найближчих сусідніх точок (NN) для останніх 100 точок ряду

NN	35	220	240
r	0,960	0,974	0,972

Цікаво відзначити, що, хоча у даному дослідженні розглядалися більш довгі числові ряди, одержані результати практично не відрізняються від результатів попереднього дослідження часових рядів зміни концентрацій діоксиду азоту у декотрих містах Гданського регіону. Це безперечно свідчить про надійність й певну стійкість всієї чисельної схеми дослідження. Важливо також зазначити, що одержані фактичні й прогностичні на 12 годин величини концентрацій досліджуваних домішок у м. Гдиня дуже добре узгоджуються один з одним. З іншого боку, авжеж слід мати на увазі, що, незважаючи на те, що практично всі піки на фактичній кривій повторюються на прогностичній, різниця між прогнозом і фактичними даними у випадку підвищених концентрацій інгредієнтів може бути істотною, але й у розглянутому випадку результати такого прогнозу можна вважати цілком задовільними.

Список літератури

1. Бунякова Ю.Я, Глушков А.В. Анализ и прогноз влияния антропогенных факторов на воздушный бассейн промышленного города.- Одесса: Экология.-2010.-256с.
2. Chelani A.B. Predicting chaotic time series of PM10 concentration using artificial neural network // Int. J. Environ. Stud.-2005.-Vol.62.-P. 181-191.
3. Sivakumar B. Chaos theory in geophysics: past, present and future // Chaos, Solitons & Fractals.-2004.-Vol.19,№ 2.-P. 441-462.
4. Glushkov A.V., Bunyakova Yu.Ya., Khokhlov V.N., Prepelitsa G.P., Tsenenko I.A. Sensing air pollution field structure in the industrial city's atmosphere: stochasticity and effects of chaos // Sensor Electr. and Microsyst. Tech.-2005.-№1.-P. 80-84.
5. Глушков А.В., Хохлов В.Н., Сербов Н.Г., Бунякова Ю.Я., Балан А.К., Баланюк Е.П. Низкоразмерный хаос во временных рядах концентраций загрязняющих веществ в атмосфере и гидросфере// Вестник Одесск.гос.эколог.ун-та.-2007.-N4.-С.337-348.
6. Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Loboda N.S., Bunyakova Yu.Ya. Short-range forecast of atmospheric pollutants using non-linear prediction method// Atmospheric Environment (Elsevier; The Netherlands).-2008.-Vol.42.-P. 7284-7292.
7. Глушков А.В., Серга Э. Н., Бунякова Ю.Я. Хаос во временных рядах концентраций загрязняющих веществ в атмосфере (г. Одесса)//Вісник Одеського держ. екологічного ун-ту.-2009.-N8.-С.233-238.
8. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow // J. Atmos. Sci.-1963.-Vol.20.-P.130-141.
9. Abarbanel H.D.I., Brown R., Sidorowich J.J., Tsimring L.Sh. The analysis of observed chaotic data in physical systems // Rev. Mod. Phys.-1993.- Vol.65.-P.1331-1392.
10. Packard N.H., Crutchfield J.P., Farmer J.D., Shaw R.S. Geometry from a time series // Phys. Rev. Lett. – 1980. – Vol. 45. – P. 712-716.
11. Песин Я.Б. Характеристические показатели Ляпунова и гладкая эргодическая теория // Успехи мат. наук.-1977.-Т. 32,№ 1.-С. 55-112.
12. Kaplan J.L., Yorke J.A. Chaotic behavior of multidimensional difference equations // Functional differential equations and approximations of fixed points. Lecture Notes in Mathematics No. 730 / H.-O. Peitgen, H.-O. Walter (Eds.). Berlin: Springer, 1979.-P.204-227.
13. Grassberger P., Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors // Physica D.-1983.-Vol.9.-P.189-208.

14. Sano M., Sawada Y. Measurement of the Lyapunov spectrum from a chaotic time series // Phys. Rev. Lett.-1985.-Vol.55.-P.1082-1085.
15. Schreiber T. Interdisciplinary application of nonlinear time series methods // Phys. Rep.-1999.-Vol.308.-P.1-64.
16. Tsonis A.A., Elsner J.B. Global temperature as a regulator of climate predictability // Physica D.-1997.-Vol.108.- P.191-196.
17. Islam M.N., Sivakumar B. Characterization and prediction of runoff dynamics: a nonlinear dynamical view // Adv. Water Res.-2002.-Vol.25, № 2.-P.179-190
18. Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Prepelitsa G.P., Tsenenko I.A. Temporal variability of the atmosphere ozone content: Effect of North-Atlantic oscillation// Optics of atmosphere and ocean.-2004.-Vol.14,N7.-P.219-223.
19. 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-SW-Ukraine region//Atmosph. Research (Elseiver).-2005.-Vol.77.-P.100-113.
20. 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.
21. 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 (Elsevier; The Netherlands).-2006.- Vol. 322. -N1-4.-P.14-24.
22. Khokhlov V.N., Glushkov A.V., Loboda N.S. Relationship between SOI and global temperature anomalies: nonlinear approach// IOP Journal of CS: Earth and Environmental Science, Spec. Issue: Climate Change - Global Risks, Challenges and Decisions. -2009.- Vol.6.-P.072034 (4p.).

Хаос-геометрический анализ временных рядов концентраций диоксида азота в атмосфере промышленного города (на примере Гданьского региона)

Глушков А.В., Бунякова Ю.Я., Грушевский О.Н., Балан А.К.

На основе метода теории хаоса, в частности, схемы корреляционной размерности, алгоритма Гроссбергера-Прокаччи, выполнен анализ временных рядов концентраций диоксида азота в г.Гдыня (Гданьский регион) и рассчитан спектр корреляционных размерностей, подтверждающий наличие соответствующего хаоса. Полученные численные оценки согласуются с данными по спектру размерностей Ляпунова, размерности Калана-Йорка и энтропии Колмогорова. Дана оценка предела предсказуемости метода краткосрочного прогноза

Ключевые слова: временные ряды концентраций, диоксид азота, метод корреляционной размерности, хаос

Chaos-geometric analysis of time series of concentrations of nitrogen dioxide in the atmosphere of the industrial city (on example of the Gdansk region)

Glushkov A.V., Bunyakova Yu.Ya., Grushevsky O.N., Balan A.K.

On the basis of the theory of chaos, in particular, correlation dimension method and the Grossberger-Procaccia algorithm, is has been performed the analysis of time series of concentrations of nitrogen dioxide in Gdynia (Gdansk region) and calculated spectrum of the correlation dimension, that confirms the existence of a chaos existence. The resulting numerical estimates are consistent with the data from the spectrum of Lyapunov dimension, Kaplan-York dimension and Kolmogorov entropy. The estimation of the limit of predictability for the method of the short-termed forecast is given.

Keywords: time series of concentrations of nitrogen dioxide, method of correlation dimension, chaos