

АНАЛІЗ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІН КОНЦЕНТРАЦІЙ ДІОКСИДУ СІРКИ В АТМОСФЕРІ ПРОМИСЛОВОГО МІСТА (НА ПРИКЛАДІ ГДАНСЬКОГО РЕГІОНУ, ПОЛЬЩА) МЕТОДОМ ТЕОРІЇ ХАОСУ

На основі методу теорії хаосу здійснено аналіз часових рядів концентрацій діоксиду сірки в атмосферному повітрі м. Гдиня та м. Сопот (Гданський регіон, Польща) 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. Дано оцінку ліміту передбачуваності методу. Отримано короткостроковий прогноз часової еволюції концентрації діоксиду сірки й проведено порівняння з фактичними даними.

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

Вступ і постановка задачі. Зростаючий антропогенний вплив на атмосферне повітря справляє відповідну потужну негативну дію на довкілля в цілому, в тому числі, на здоров'я людини, що найбільшою мірою проявляється в промислових містах, де проживає значна кількість населення й зосереджена велика кількість промислових підприємств та транспорту. Одним з ключових аспектів проблеми є те, що склад атмосфери промислового міста формується під впливом безлічі факторів, до числа яких входять характеристики джерел забруднення, їх розташування на місцевості, кліматичні і гідрометеорологічні параметри тощо [1, 2].

В останнє десятиліття у зв'язку з розвитком теорій стохастичних динамічних систем і теорії хаосу стає актуальним використання цих методів у задачах прикладної екології, метеорології, гідрології, соціально-економічної географії тощо. Розвиток на їхній основі принципово нових підходів до моделювання просторово-часової структури полів концентрацій шкідливих домішок в атмосфері, їх аналізу й прогнозування. У сучасній теорії стохастичних динамічних систем часовий ряд розглядається як реалізація випадкового процесу, коли випадковість є результатом складного руху з багатьма незалежними ступенями свободи. Альтернативою випадковості є феномен хаосу, що може мати місце як у найпростіших детерміністичних системах, так і досить складних стохастичних системах.

При цьому фундаментальну роль відіграє притаманна всім хаотичним системам властивість радикальної зміни динаміки системи у фазовому просторі залежно від зміни початкових умов. Для так званих дисипативних систем їхня динаміка реалізується в обмеженій області фазового простору станів, зазвичай званого дивним аттрактором. При цьому для часових характеристик динамічних змінних аттракторних систем виявляється характерним фактично стохастичний режим.

Отже, найважливішого значення набуває математичний аспект проблеми, пов'язаний з адекватним аналізом часових рядів концентрацій забруднюючих атмосфери речовин. У вивченні антропогенного впливу на

екологічний стан атмосфери промислового міста методи теорії хаосу дозволяють, наприклад, на основі дослідження часових рядів концентрацій забруднюючих атмосферу промислового міста речовин давати цілком адекватний аналіз і навіть короткостроковий прогноз подальшої часової еволюції концентрацій забруднюючих речовин [3–14]. Такий підхід з успіхом використовувався при аналізі флуктуацій метеорологічних та гідрологічних характеристик [15–17]. У роботах [3–6] методи нелінійного прогнозу і теорії хаосу з успіхом застосовувалися до аналізу часових рядів концентрацій пилу, діоксиду сірки на двох стаціонарних постах м. Одеси, а також в ряді міст Гданського регіону. Було показано, що навіть спрощена методика побудови прогностичної моделі дає цілком задовільні результати прогнозу.

На основі вище вказаних підходів ставиться задача дослідити можливості застосування методів теорії хаосу до аналізу і прогнозування забруднення атмосфери міст Гданського регіону, Польща.

Дані та методика аналізу. У якості вихідних даних використано результати спостережень за діоксидом сірки (SO_2) на постах міст Сопот і Гдиня (№№ 6 і 9 відповідно) Гданського регіону Польщі продовж 2003 року. Концентрації цих домішок (у мг/м^3) вимірювались кожні 5 хвилин, а потім по цих вимірах розраховувались середньогодинні значення (усього 8760 величин). Відзначимо, що з десяти постів, розташованих у районі Гданська, тільки на цих двох, протягом 2003 року спостереження відбувались безупинно. Це й стало причиною вибору даних зазначених вище постів, оскільки для подальшого аналізу методами теорії хаосу необхідний набір даних з регулярним кроком за часом. Показано, що продовж 2003 року спостерігалось декілька випадків, коли досягалося значення нижньої межі індексу забруднення атмосферного повітря для SO_2 , і всі вони доводилися на зиму або початок весни, тоді як улітку концентрація забруднюючої речовини, у середньому, менше.

Результати аналізу і прогнозування. Важливим кроком у аналізі змін концентрацій забруднюючої речовини є відновлення фазового простору, для чого потрі-

бно визначення часової затримки за допомогою автокореляційної функції або взаємної інформації. Подальший крок – чисельні експерименти з відновлення розмірності фазового простору (d_E), використовуючи при цьому метод кореляційної розмірності й алгоритм по-

милкових найближчих сусідніх точок. У табл. 1 зведені всі результати по відновленню аттракторів, а також розрахунку показника K тесту Готтвода й Мелбена і глобальних розмірностей Ляпунова.

Таблиця 1. 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 SO_2 на постах Гданського регіону

	τ	d_2	d_E	λ_1	λ_2	d_L	Pr_{max}	K
Пост 6 (Сопот)								
SO_2	19	1,58	6	0,0164	0,0066	5,01	43	0,71
Пост 9 (Гдиня)								
SO_2	17	3,40	6	0,0150	0,0052	4,60	49	0,73

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.

Зупинимось тепер на результатах розрахунку спектру розмірностей Ляпунова. У табл. 1 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 вісей і звужується уздовж чотирьох, що залишилися. Сума позитивних λ_i визначає ентропію Колмогорова, яка обернено пропорційна межі передбачуваності.

Для використання методу нелінійного прогнозу необхідно розв'язати ще одну задачу, яку можна сформулювати таким чином: 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 [15]. Нами такий підхід був використаний для прогнозу на двадцять чотири години для 100 останніх точок часових рядів діоксиду сірки. Проведені чисельні експерименти показали, що зі збільшенням числа найближчих сусідніх точок прогностична крива, як правило, наближається до фактичної.

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. Тому для наступних розрахунків шкідливої домішки було обрано NN=260 на пості 6 і NN=250 на пості 9.

На рис. 1 представлені фактичні й прогностичні на 12 годин величини концентрацій діоксиду сірки на пості 6.

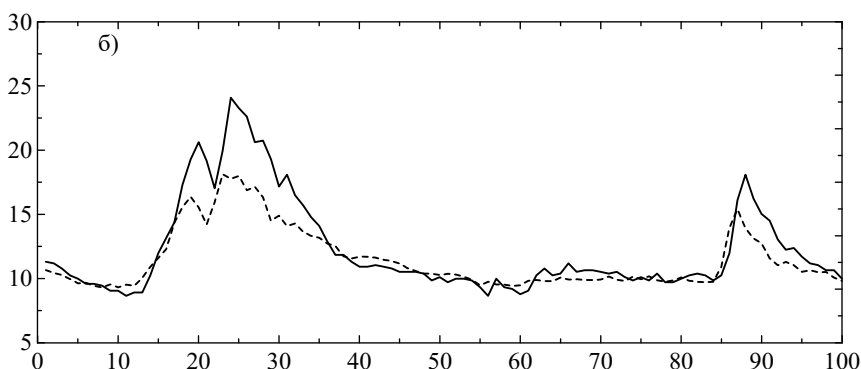


Рис.1. Фактичні (суцільні) і прогностичні на 12 годин (пунктир) SO_2 (б) на пості 6 для останніх ста членів часових рядів. Вісь X – порядковий номер терміну

Висновки. Як можна бачити, 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 досить великою. Тим не менше результати такого прогнозу можна вважати цілком задовільними.

Представлені тут результати можуть розглядатися як приклад цілком задовільного короткострокового прогнозу концентрацій домішок в атмосфері.

Можна відзначити й той факт, що метод нелінійного прогнозу достатньо добре працює у випадках, коли відбувається збільшення концентрацій, принаймні, практично усі тенденції до такого збільшення були виявлені при прогнозуванні, а це свідчить про можливість його використання як альтернативи до звичайних методів.

Список використаних джерел

1. Бунякова Ю.Я. Статистичні дослідження забруднення повітряного басейну міста Одеси // Людина і довкілля. Проблеми неоекології. – 2003. – Вип.4. – С. 42 – 47.

2. Бунякова Ю.Я. Структура поля загрязнения атмосферы промышленного города: стохастичность и эффекты хаоса / Бунякова Ю.Я., Глушков А.В., Хохлов В.Н. // Метеорология, климатология, гидрология. Вып. 49. – Одесса, 2005. – С. 347–352.
3. 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.
4. 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 Одесского гос.экологического ун-та. – 2007. – №4. – С.337-348.
5. 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.
6. Глушков А.В., Серге Э. Н., Бунякова Ю.Я. Хаос во временных рядах концентраций загрязняющих веществ в атмосфере (г. Одесса)// Вісник Одеського держ. екологічного ун-ту. – 2009. – №8. – С.233-238.
7. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow // J. Atmos. Sci. – 1963. – Vol.20. – P.130-141.
8. 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.
9. 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.
10. Песин Я.Б. Характеристические показатели Ляпунова и гладкая эргодическая теория // Успехи мат. наук. – 1977. – Т. 32, № 1. – С. 55-112.
11. 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.
12. Grassberger P., Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors // Physica D. – 1983. – Vol.9. – P.189-208.
13. Sano M., Sawada Y. Measurement of the Lyapunov spectrum from a chaotic time series // Phys. Rev. Lett. – 1985. – Vol.55. – P.1082-1085.
14. Schreiber T. Interdisciplinary application of nonlinear time series methods // Phys. Rep. – 1999. – Vol.308. – P.1-64.
15. 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 (Elsevier). – 2005. – Vol.77. – P.100-113.
16. 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.
17. 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.

Надійшла до редколегії 20.04.15

Ю. Бунякова, канд. геогр. наук, доц.
Одесский государственный экологический университет, Одесса, Украина

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ ДИОКСИДА СЕРЫ В АТМОСФЕРЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ГОРОДА (НА ПРИМЕРЕ ГДАНСКОГО РЕГИОНА, ПОЛЬША) МЕТОДОМ ТЕОРИИ ХАОСА

На основе метода теории хаоса выполнен анализ временных рядов концентраций диоксида серы в г.Гдыня и г.Сопот (Гданьский регион, Польша) 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 серы, метод корреляционной размерности, хаос.

Yu. Bunyakova, PhD, Philosophy Doctor, Senior Lecturer
Odessa State Environmental University, Odessa, Ukraine

AN ANALYSIS AND PROGNOSTICATION OF CHANGES OF CONCENTRATIONS OF DIOXIDE OF SULPHUR ARE IN THE ATMOSPHERE OF INDUSTRIAL CITY (ON THE EXAMPLE OF THE GDANSK REGION)

On the basis of method of theory of chaos the analysis of temporal rows of concentrations of dioxide of sulphur is executed in Gdynia and Sopot (Gdansk region, Poland) and the spectrum of cross-correlation dimensions, confirmative the presence of corresponding chaos, is expected. The got numeral estimations comport with data on the spectrum of dimensions of Lyapunov, dimension of Kaplan-York and entropy of Kolmogorov. The estimation of limit of predictability of method of short-term prognosis is given.

Keywords: temporal rows of concentrations, dioxide of sulphur, method of cross-correlation dimension, chaos.