

Аналіз і прогнозування антропогенного впливу на атмосферне повітря промислового міста із застосуванням нових географо-математичних підходів

Ю.Я. Бунякова, О.В. Глушков, 2020

Одеський державний екологічний університет, Одеса, Україна

Надійшла 18 лютого 2020 р.

В останні два десятиліття доволі успішно впроваджуються різні математичні й кібернетичні підходи до розв'язання географічних і екологічних задач. Важливо зазначити, що екологічна динамічна система є нелінійною, й із застосуванням лінійних методів аналізу, перетворення Фур'є та інших не завжди можна отримати задовільний результат, як у разі лінійної системи. Пов'язане це з тим, що процеси, які приводять до хаотичного режиму, є фундаментально багатовимірними. Саме ці обставини характерні для динаміки розподілу шкідливих домішок у повітряному басейні промислового міста. Розглянуто розвиток поглибленого вдосконаленого аналізу, моделювання та прогнозування часової динаміки концентрацій речовин, що забруднюють атмосферу, для конкретних індустріальних міст. Запропоновано новий метод аналізу та прогнозування структури полів концентрацій інгредієнтів в атмосфері промислового міста, що ґрунтується на положеннях теорії хаосу. Для аналізу використано дані щогодинних спостережень за концентрацією діоксиду азоту на постах моніторингу Гданського регіону — Гдиня і Сопот (Польща) впродовж року. На підставі аналізу емпіричних даних щодо концентрацій забруднювальних речовин у повітряному басейні виявлено стохастичні особливості та ефект хаосу в динаміці й структурі часових рядів концентрацій домішок.

Наведені результати можна вважати прикладом цілком задовільного короткострокового прогнозу концентрацій забруднювальних речовин в атмосфері. Метод нелінійного прогнозу досить добре працює, якщо концентрації цих речовин збільшуються. Усі тенденції до такого збільшення виявлено при прогнозуванні, що дає змогу використовувати метод як альтернативу традиційним методам.

Ключові слова: теорія хаосу, часові ряди концентрацій речовин, що забруднюють атмосферу, діоксид азоту, аналіз і прогнозування, метод кореляційної розмірності.

Вступ і постановка задачі. Незважаючи на численні спроби розв'язання задач в області аналізу просторової структури рівня забруднення повітряного басейну промислових міст і районів, на сьогодні ситуація характеризується станом, далеким від задовільного. Серед основних підходів до розв'язання зазначеного класу задач можна виділити системно-географічні (системно-екологічні), гідродинамічні (моделі типу

«факела», «молекулярної дифузії», «мілководдя», «рівняння гідродинаміки приземного шару»), ймовірно-статистичні підходи тощо.

Аналіз цих підходів дає змогу зробити висновок про те, що, у принципі, жодна з існуючих досі моделей не забезпечує достатньо достовірного прогнозу забруднення атмосфери промислових міст і районів від антропогенного впливу на повітряний

басейн. Тому залишається актуальним завдання комплексного дослідження повітряного басейну промислового міста, пошуку принципово нових підходів до аналізу й прогнозу, які адекватно відображають основні фізичні механізми і процеси.

У зв'язку з розвитком останнім часом теорій стохастичних динамічних систем і теорії хаосу із застосуванням для різних галузей стає важливим використання методів цих теорій у задачах прикладної екології, метеорології, гідрології, соціально-економічної географії тощо. У цьому аспекті до перспективних напрямів досліджень слід віднести використання нелінійних фізико-статистичних методів (методи мультифрактального моделювання, теорії хаосу й оптимального керування, теорії диференціальних рівнянь та ін.) і розвиток на їхній основі принципово нових підходів до моделювання просторово-часової структури полів концентрації домішок в атмосфері. Особливо перспективним з погляду не тільки аналізу, а й прогнозування є розробка моделей аналізу й прогнозу на основі фундаментальних положень теорії хаосу.

З огляду на те, що системи гідрометеорології, екології тощо переважно належать до хаотичного типу, зрозуміло, що їхній адекватний опис має базуватися на методах аналізу й моделювання хаотичних систем, що замінюють традиційні лінійні методи. У класичній теорії хаосу довгий час домінував напрям, що ґрунтується на апараті якісних систем звичайних нелінійних диференціальних рівнянь із хаотичним режимом, який реалізується. При цьому вкрай корисними виявилися поняття біфуркації та стійких і нестійких різноманіть.

Паралельно з теорією хаосу спочатку як окремий напрям, а потім в органічному зв'язку з феноменом хаосу розвивався апарат фрактального й мультифрактального моделювання. Фактично уявлення про фрактали було уведено ще наприкінці XIX ст., в 1970-роках Б. Мандельброт явно визначив фрактальні об'єкти як об'єкти із властивостями самоподібності [Мандельброт, 2002]. У теорії хаосу «дивні атрактори» фактично є мультифрактальними об'єктами з

відповідними геометричними структурами у фазовому просторі. В останню чверть XIX ст. з'явилася значна кількість досліджень у різних галузях науки, у яких положення теорії хаосу й фракталів застосовували до різних динамічних систем [Sprott et al., 2005; Brock et al., 1991]. Водночас вивчення хаотичних режимів у часових рядах концентрацій забруднювальних речовин украй нечисленні, а результати цих досліджень не є однозначними. У публікації [Lanfredi, Machhiato, 1997] наведено результати моделювання часової динаміки трьох складових атмосферного повітря (NO_2 , CO , O_3), однак автори не змогли визначити наявність у відповідних часових рядах елементів низькорозмірного хаосу. У статті Челані [Chelani, 2005] подано результати моделювання часової динаміки концентрацій пилу, що демонструють ефект низькорозмірного хаосу, однак для прогнозу автор використовував метод штучних нейромереж. У наших публікаціях [Bunyakova et al., 2011; Glushkov et al., 2010; Бунякова, 2015], а також В.Д. Русова, М. Палуша та інших дослідників [Paluš et al., 2001; Rusov et al., 2010; Khokhlov et al., 2008] показано, що застосування нелінійних методів у задачах аналізу й у певному сенсі прогнозування динаміки флуктуацій концентрації різних домішок в атмосфері, у принципі, може забезпечити високий ступінь вірогідності опису і прогнозу.

Отже, на підставі вказаних вище підходів ставиться задача дослідити можливості застосування методів теорії хаосу до динаміки розподілу забруднювальних речовин в атмосфері промислових міст.

Методика дослідження та результати. Як вихідні дані використано результати спостережень за зміною концентрації діоксиду азоту (NO_2) на постах 6 і 9 відповідно міст Сопот і Гдиня Гданського регіону Польщі упродовж року [Eugorean ..., 2003]. Концентрації забруднювальної речовини (mg/m^3) вимірювали кожні 5 хв, а потім за цими вимірами розраховували середньочасові значення (усього 8760 вимірів). Зауважимо, що з 10 постів, розташованих у районі м. Гданськ, тільки на 2 з них упродовж року спостереження здійснювалися

безупинно. Це й спричинило вибір зазначених вище постів, оскільки для подальшого аналізу методами теорії хаосу необхідний набір даних з регулярним за часом кроком. На рис. 1 по осі X поділки нанесено у такий спосіб, щоб відповідали приблизно першому дню місяця. Штрихова лінія позначає нижню межу індексу 2 забруднення (96 mg/m^3 для NO_2), згідно з Директивою ЄЕС стосовно якості повітря, що вказує на низький рівень забруднення (усього 10 індексів). Упродовж року спостерігали від одного до трьох випадків, коли досягалося таке значення індексу.

Відстань між постами всього 7 км, і розташовані обидва на березі Гданської затоки, тим не менш між ними існують деякі розходження. Наприклад, абсолютні максимуми концентрацій на посту 6 трохи більші, а мінімуми — менші, ніж на посту 9. У цілому можна вважати, що часові зміни вмісту діоксиду азоту в атмосфері на обох постах виявляють певну когерентність.

Зазначимо, що часові ряди концентрацій не підпадають під нормальний розподіл, про що свідчать значення коефіцієнтів асиметрії й ексцесу. Важливим кроком у аналізі змін концентрацій забруднювальної речовини є відновлення фазового простору, для чого потрібно визначення часової затримки за допомогою автокореляційної функції або взаємної інформації.

Слід підкреслити, що екологічна динамічна система є нелінійною, застосування лінійних методів аналізу, перетворення Фур'є тощо не завжди може дати задовільний результат, як у разі лінійної системи. Пов'язане це з тим, що процеси, які приводять до хаотичного режиму, є фундаментально багатовимірними. Саме ці обставини характерні для динаміки розподілу шкідливих речовин у повітряному басейні промислового міста. Тому очевидна необхідність розв'язання вкрай складної в математичному сенсі задачі відновлення фазового простору системи.

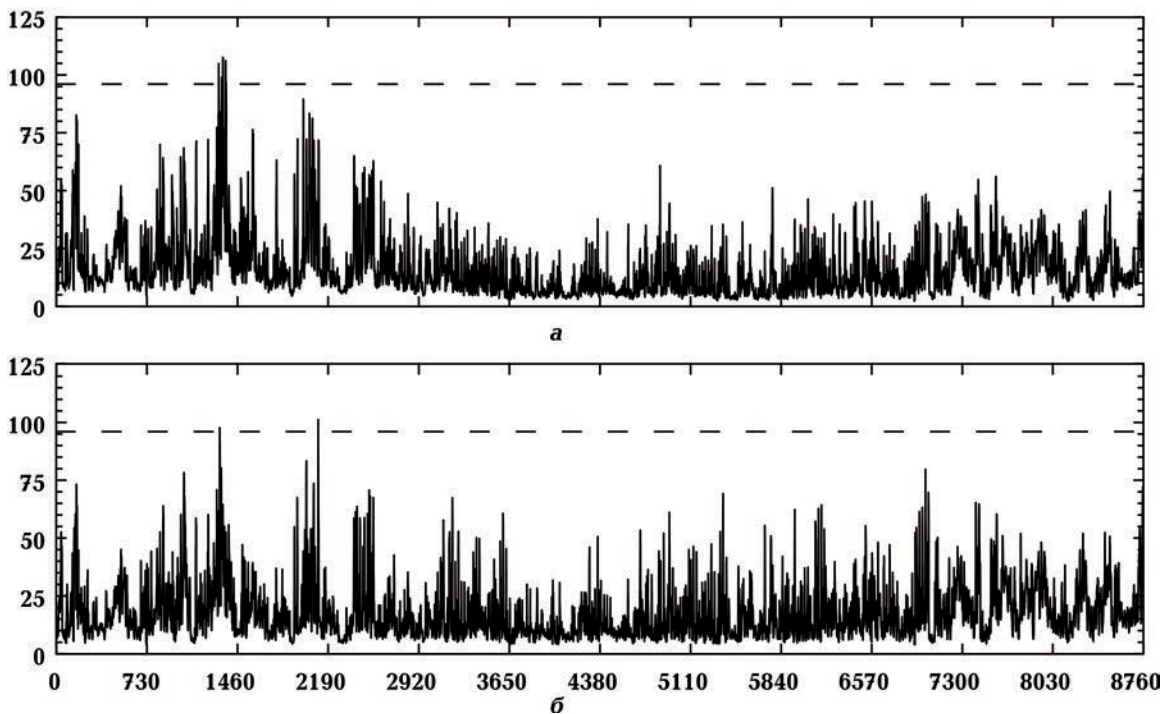


Рис. 1. Часові ряди NO_2 (mg/m^3) на постах 6 (а) і 9 (б) Гданського регіону. Вісь X — порядковий номер години у році.

Fig. 1. NO_2 time series (mg/m^3) at posts 6 (a) and 9 (б) Gdansk region. The X -axis is the order of the hour of the year.

Подальший крок — чисельні експерименти з відновлення розмірності фазового простору (d_E) з використанням при цьому методу кореляційної розмірності й алгоритму помилкових найближчих сусідніх точок.

У табл. 1 зведено всі результати з відновлення атракторів, а також розрахунку показника K -тесту Готтвода й Мелбена і глобальних розмірностей Ляпунова.

Нагадаємо, що показник K -тесту Готтвода й Мелбена набуває значень від нуля (регулярність) до одиниці (хаос). Як вказували автори цього тесту, величини, відмінні від нуля, є показниками хаотичності процесу. За нашими розрахунками значення K в усіх випадках перевищують 0,6, тобто розглянуті часові ряди зазнають впливу хаотичної динаміки. Зауважимо, що розмірність Капрана—Йорка — один з показників розмірності атрактора, також менша за використану розмірність d_A , що може бути одним з показників правильності нашого вибору.

Розглянемо результати розрахунку спектра розмірностей Ляпунова; у табл. 1 наведено додатні значення λ_i . Швидкість перетворення сфери в еліпсоїд по різних осях

Т а б л и ц я 1 . Часова затримка (τ), кореляційна розмірність (d_2), розмірність простору вкладення (d_E), перші дві розмірності Ляпунова (λ_1 і λ_2), розмірність Капрана—Йорка (d_L), межа передбачуваності ($P_{r_{max}}$, год) і показник K для NO_2 на постах Гданського регіону Польщі

Показник	NO_2 , мг/м ³	
	Пост 6 (Сопот)	Пост 9 (Гдиня)
τ	9	8
d_2	5,31	5,31
d_E	6	6
λ_1	0,0184	0,0189
λ_2	0,0061	0,0052
d_L	4,11	3,85
$P_{r_{max}}$	40	41
K	0,68	0,66

визначається λ_i , тому зрозуміло, що чим менша сума позитивних розмірностей, тим стійкішою є динамічна система. Відповідно, це збільшує її передбачуваність. Наявність для кожної із систем двох (із шести) позитивних λ_i засвідчує, що у шестивимірному просторі система розширюється уздовж двох осей і звужується уздовж чотирьох, що залишилися. Сума додатних значень λ_i визначає ентропію Колмогорова, що обернено пропорційна межі передбачуваності.

Для використання методу нелінійного прогнозу необхідно розв'язати 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 розрахувати кілька оцінок для різної кількості точок NN , а потім обчислити коефіцієнт кореляції між фактичними й прогностичними даними. Зазвичай, коефіцієнт кореляції збільшується, досягаючи певного максимуму [Islam, Sivakumar, 2002]. Такий підхід ми використали для прогнозу на 24 години для 100 останніх точок часових рядів кількості діоксиду азоту.

Згідно з чисельними експериментами, зі збільшенням числа найближчих сусідніх точок прогностична крива, зазвичай, наближається до фактичної. Результати розрахунку коефіцієнта кореляції між фактичними й прогностичними на 24 години значеннями за деяких точок NN наведено в табл. 2.

Т а б л и ц я 2 . Коефіцієнт кореляції (r) між фактичним і прогностичним на 24 години рядами залежно від числа найближчих сусідніх точок (NN) для NO_2 на постах Гданського регіону для останніх 100 точок ряду

Пост	NN	r
6 (Сопот)	80	0,951
	180	0,963
	200	0,964
9 (Гдиня)	30	0,959
	210	0,973
	230	0,974

Як зазначено вище, коефіцієнт кореляції зростає зі збільшенням числа точок NN і досягає певного значення, після чого його зміни неістотні. Оскільки кількість даних у часових рядах за нашими розрахунками велика, максимуму коефіцієнт кореляції може досягти за дуже великої кількості найближчих сусідніх точок, однак брати їх усі для побудови моделі прогнозу не має сенсу, тому що якість прогнозу при цьому істотно не поліпшиться. Тому для подальших розрахунків було обрано $NN = 180$ для NO_2 на посту 6 і $NN = 210$ для NO_2 на посту 9.

На рис. 2 наведено фактичні й прогностичні на 12 годин концентрації досліджуваної домішки на посту 6. Як можна бачити, незважаючи на те, що практично всі піки на фактичній кривій повторюються на прогностичній, різниця між прогнозом і фактичними даними за підвищених концентрацій інгредієнтів може бути досить великою. Тим не менше результати такого прогнозу можна вважати цілком задовільними.

У табл. 3 наведено оцінки деяких характеристик успішності прогнозу. Можна бачити, що зі зменшенням завчасності поліпшується якість прогнозу, тобто результати методу дуже подібні до тих, що можуть

бути отримані іншими методами. Для того щоб перевірити, наскільки правильно побудована модель відображає увесь часовий ряд, прогноз був зроблений і для 900 випадково обраних термінів. Виявилось, що успішність прогнозу трохи поліпшилася.

Наведені результати можна розглядати як приклад цілком задовільного короткострокового прогнозу концентрацій домішок в атмосфері. Слід зазначити також, що метод нелінійного прогнозу досить добре працює, якщо концентрації збільшуються, принаймні, практично всі тенденції до такого збільшення виявлені при прогнозуванні. Останнє дає змогу використовувати цей метод як альтернативу для звичайних методів. Крім того, у дослідженні застосований найпростіший підхід до апроксимації функціональної залежності. Можна сподіватися, що використання складніших методик поліпшить якість прогнозу.

Висновки. Запропонований підхід, як показали дослідження, дає досить високу ефективність і перспективність при вивченні динаміки концентрацій забруднювальних речовин у повітряному басейні промислового міста. Важливою особливістю такого підходу є та обставина, що викладена методика не потребує обов'язкового

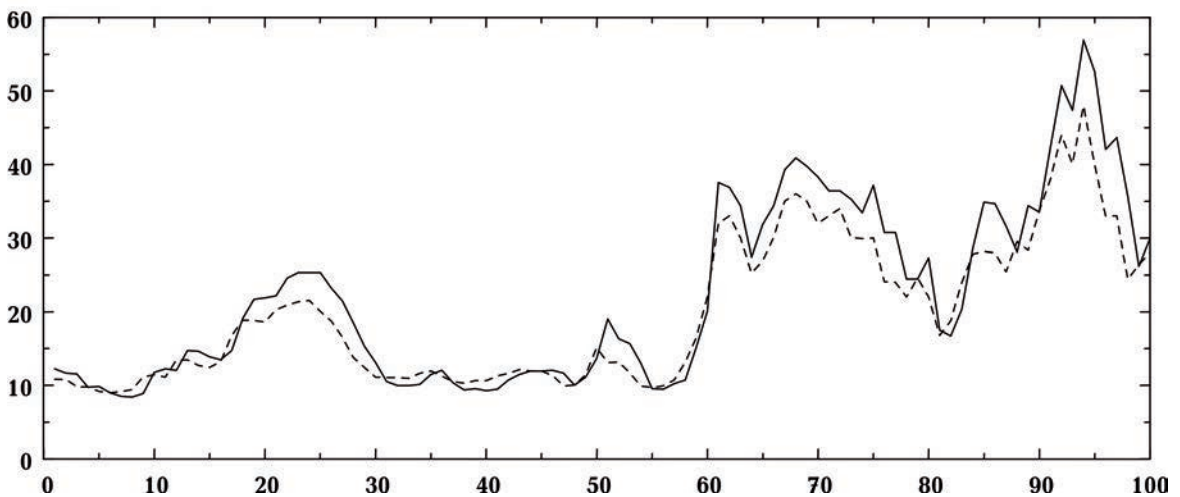


Рис. 2. Фактичні (суцільні) та прогностичні на 12 годин (штрихова) криві концентрацій NO_2 на посту 6 для останніх ста членів часових рядів, показаних на рис. 1. Вісь X — порядковий номер терміну.

Fig. 2. Actual (solid) and 12 hour forecast (dotted) NO_2 concentration curves at post 6 for the last hundred terms time series shown in Fig. 1. The X -axis is the sequence number of the term.

Т а б л и ц я 3 . Коефіцієнт кореляції (r) між фактичним і прогностичним рядами й середньоквадратична помилка прогнозу (σ) за різної завчасності концентрацій NO_2 на постах Гданського регіону

Час, год	Пост 6 (Сопот)		Пост 9 (Гдиня)	
	r	σ	r	σ
Останні 100 точок ряду				
6	0,98	3,825	0,99	3,611
12	0,98	4,019	0,99	3,938
18	0,97	5,233	0,98	4,839
24	0,96	6,025	0,97	5,636
900 випадково обраних точок ряду				
6	0,99	3,711	0,99	3,567
12	0,99	3,891	0,99	3,899
18	0,98	4,338	0,99	4,287
24	0,98	5,011	0,98	4,978

кількісного опису і знання відповідних фізичних механізмів, що лежать в основі тих або інших процесів у розглянутій екологічній системі.

Ключовим фактором для реалізації запропонованої методики є наявність вихідних екологічних даних (у розглянутому випадку — значень концентрацій забруднювальних речовин). Разом з тим завдяки ви-

користанню сучасних алгоритмів теорії хаосу й нелінійних методів аналізу немає потреби у наявності надмірно деталізованих наборів екологічних даних. Утім мінімальний набір досить надійних даних спостережень необхідний, оскільки це принципово важливе на етапі побудови моделі прогнозу — відновленні параметрів хаотичного атратора.

Список літератури

- Бунякова Ю.Я. Аналіз та прогнозування змін концентрацій діоксиду сірки в атмосфері промислового міста (на прикладі Гданського регіону, Польща) методом теорії хаосу. *Вісник Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Географія*. 2015. Вип. 1(63). С. 37—40.
- Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. Москва: Изд. Ин-та компьютерных исследований, 2002. 656 с.
- Brock, W.A., Hsieh, D.A., & LeBaron, B. (1991). *Nonlinear dynamics, chaos, and instability: statistical theory and economic evidence*. MIT Press, 346 p.
- Bunyakova, Yu.Ya., Glushkov, A.V., & Dudinov, A.A. (2011). *Short-range forecast of atmospheric pollutants using non-linear prediction method*. Abstracts of the European Geosciences Union General Assembly. Vienna, Austria. P. A3.4.
- Glushkov, A.V., Khokhlov, V.N., Loboda, N.S., & Bunyakova, Yu.Ya. (2010). Modeling greenhouse gas concentration fields using chaos theory. *18th Intern. Symp. Transport and Air Pollution. May 18—19, 2010*. Dubendorf, Switzerland. P06.
- Chelani, A.B. (2005). Predicting chaotic time series of PM10 concentration using artificial neural network. *International Journal of Environmental Studies*, 62(2), 181—191. <https://doi.org/10.1080/0020723042000285906>.

- European program «Air pollution observation data: Gdansk region, 2003». (2004). Institute of Chemistry and Environmental Protection, Technical University of Szczecin. Poland.
- Islam, M.N., & Sivakumar, B. (2002). Characterization and prediction of runoff dynamics: a nonlinear dynamical view. *Advances in Water Resources*, 25(2), 179—190. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(01\)00053-7](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(01)00053-7).
- Khokhlov, V.N., Glushkov, A.V., Loboda, N.S., & Bunyakova, Yu.Ya. (2008). Short-range forecast of atmospheric pollutants using non-linear prediction method. *Atmospheric Environment*, 42(31), 7284—7292. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.06.023>.
- Lanfredi, M., & Machhiato, M. (1997). Searching for low dimensionality in air pollution time series. *Europhysics Letters*, 40(6), 589—594.
- Paluš, M., Pelikán, E., Eben, K., Krejčíř, P., & Juruš, P. (2001). Nonlinearity and prediction of air pollution. Artificial neural nets and genetic algorithms. In: V. Kurkova, N.C. Steele, R. Neruda, & M. Karny (Eds.), *Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms* (pp. 473—476). Springer Verlag, Vienna, Austria.
- Rusov, V.D., Glushkov, A.V., Vaschenko, V.N., Myhalus, O.T., Bondartchuk, Yu.A., Smolyar, V.P., Linnik, E.P., Mavrodiev, S.Cht., & Vachev B.I. (2010). Galactic cosmic rays-clouds effect and bifurcation model of the earth global climate. Part 1. Theory. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72, 398—408. doi: 10.1016/j.jastp.2009.12.007.
- Sprott, J.C., Vano, J.A., Wildenberg, J.C., Anderson, M.B., & Noel, J.K. (2005). Coexistence and chaos in complex ecologies. *Physics Letters A*, 335(2-3), 207—212. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2004.12.068>.

Analysis and prediction of anthropogenic impact on the atmospheric air of an industrial city with the use of new geographic and mathematical approaches

Yu. Ya. Bunyakova, A. V. Glushkov, 2020

Odessa State Ecological University, Odessa, Ukraine

In the last two decades, there have been quite successful implementation of various mathematical and cybernetic approaches to solving geographic and ecological problems. It is important to note that the ecological dynamic system is nonlinear, the use of linear methods of analysis, Fourier transform, etc. can not always give a satisfactory result, as in the case of a linear system. This is due to the fact that the processes that lead to the chaotic regime are fundamentally multidimensional. These circumstances are characteristic of the dynamics of the distribution of harmful impurities in the air pool of an industrial city. The article is devoted to the development of in-depth, improved analysis, modeling and forecasting of time dynamics of concentrations of pollutants for specific industrial cities. A new method of analysis and prediction of the field structure of the concentrations of ingredients in the atmosphere of an industrial city is proposed, based on the provisions of chaos theory. Hourly observations of nitrogen dioxide at monitoring posts in Gdańsk — Gdynia and Sopot (Poland) throughout the year were used for the analysis. Stochastic features and chaos effect in dynamics and structure of time series of impurity concentrations are revealed on the basis of the analysis of empirical data of concentrations of pollutants in the air basin. The results presented here can be considered as an example of a quite satisfactory short-term prediction of concentrations of pollutants in the atmosphere. It may be noted here that the nonlinear prediction method works quite well in cases where there is an increase in concentrations, at least, almost all tendencies to such an increase are detected in the prediction. The latter allows it to be used as an alternative to traditional methods.

Key words: chaos theory, time series of concentrations, atmospheric pollution, nitrogen dioxide, analysis and prediction, method of correlation dimension.

References

- Bunyakova, Yu.Ya. (2015). Analysis and prediction of changes in concentrations of sulfur dioxide in the atmosphere of an industrial city (on the example of Gdansk region, Poland) by chaos theory. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu im. Tarasa Shevchenka. Heohrafiya*, (1), 37—40 (in Ukrainian).
- Mandelbrot, B. (2002). *Fractal geometry of nature*. Moscow: Ed. of the Institute for Computer Research, 656 p. (in Russian).
- Brock, W.A., Hsieh, D.A., & LeBaron, B. (1991). *Nonlinear dynamics, chaos, and instability: statistical theory and economic evidence*. MIT Press, 346 p.
- Bunyakova, Yu.Ya., Glushkov, A.V., & Dudinov, A.A. (2011). *Short-range forecast of atmospheric pollutants using non-linear prediction method*. Abstracts of the European Geosciences Union General Assembly. Vienna, Austria. P. A3.4.
- Glushkov, A.V., Khokhlov, V.N., Loboda, N.S., & Bunyakova, Yu.Ya. (2010). Modeling greenhouse gas concentration fields using chaos theory. *18th Intern. Symp. Transport and Air Pollution. May 18—19, 2010*. Dubendorf, Switzerland. P06.
- Chelani, A.B. (2005). Predicting chaotic time series of PM10 concentration using artificial neural network. *International Journal of Environmental Studies*, 62(2), 181—191. <https://doi.org/10.1080/0020723042000285906>.
- European program «Air pollution observation data: Gdansk region, 2003». (2004). Institute of Chemistry and Environmental Protection, Technical University of Szczecin. Poland.
- Islam, M.N., & Sivakumar, B. (2002). Characterization and prediction of runoff dynamics: a nonlinear dynamical view. *Advances in Water Resources*, 25(2), 179—190. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(01\)00053-7](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(01)00053-7).
- Khokhlov, V.N., Glushkov, A.V., Loboda, N.S., & Bunyakova, Yu.Ya. (2008). Short-range forecast of atmospheric pollutants using non-linear prediction method. *Atmospheric Environment*, 42(31), 7284—7292. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.06.023>.
- Lanfredi, M., & Machiato, M. (1997). Searching for low dimensionality in air pollution time series. *Europhysics Letters*, 40(6), 589—594.
- Paluš, M., Pelikán, E., Eben, K., Krejčíř, P., & Juruš, P. (2001). Nonlinearity and prediction of air pollution. Artificial neural nets and genetic algorithms. In: V. Kurkova, N.C. Steele, R. Neruda, & M. Karny (Eds.), *Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms* (pp. 473—476). Springer Verlag, Vienna, Austria.
- Rusov, V.D., Glushkov, A.V., Vaschenko, V.N., Myhalus, O.T., Bondartchuk, Yu.A., Smolyar, V.P., Linnik, E.P., Mavrodiev, S.Cht., & Vachev B.I. (2010). Galactic cosmic rays-clouds effect and bifurcation model of the earth global climate. Part 1. Theory. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72, 398—408. doi: 10.1016/j.jastp.2009.12.007.
- Sprott, J.C., Vano, J.A., Wildenberg, J.C., Anderson, M.B., & Noel, J.K. (2005). Coexistence and chaos in complex ecologies. *Physics Letters A*, 335(2-3), 207—212. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2004.12.068>.

Анализ и прогнозирование антропогенного влияния на атмосферный воздух промышленного города с применением новых географо-математических подходов

Ю.Я. Бунякова, А.В. Глушков, 2020

Одесский государственный экологический университет, Одесса, Украина

Последние два десятилетия характеризуются достаточно успешным внедрением различных математических и кибернетических подходов к решению географических и экологических задач. Важно отметить, что экологическая динамическая система является нелинейной, применение линейных методов анализа, преобразования Фурье и тому подобное не всегда может дать удовлетворительный результат, как в случае линейной системы. Связано это с тем, что процессы, которые приводят к хаотическому режиму, являются фундаментально многомерными. Именно данные обстоятельства характерны для динамики распределения вредных примесей в воздушном бассейне промышленного города. Рассмотрено развитие углубленного усовершенствованного анализа, моделирования и прогнозирования часовой динамики концентраций загрязняющих атмосферу веществ для конкретных индустриальных городов. Предложен новый метод анализа и прогнозирования структуры полей концентраций ингредиентов в атмосфере промышленного города, который базируется на положениях теории хаоса. Для анализа использованы данные ежечасных наблюдений за концентрацией диоксида азота на постах мониторинга Гданьского региона — Гдыня и Сопот (Польша) на протяжении года. На основе анализа эмпирических данных концентраций загрязняющих веществ в воздушном бассейне выявлены стохастические особенности и эффект хаоса в динамике и структуре часовых рядов концентраций примесей.

Представленные результаты можно рассматривать как пример полностью удовлетворительного краткосрочного прогноза концентраций загрязняющих веществ в атмосфере. Метод нелинейного прогноза достаточно хорошо работает в случаях, когда концентрации увеличиваются, практически все тенденции к такому увеличению выявлены при прогнозировании. Последнее позволяет использовать метод как альтернативу обычным методам.

Ключевые слова: теория хаоса, временные ряды концентраций веществ, загрязняющих атмосферу, диоксид азота, анализ и прогнозирование, метод корреляционной размерности.