

## ХАОС ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ (Г. ОДЕССА)

*Метод нелинейного прогноза применяется к временным рядам концентраций атмосферной пыли на двух постах г. Одессы. Восстановлен спектр размерностей Ляпунова и на его основе рассчитаны размерность Каплана-Йорка и энтропия Колмогорова, которая обратно пропорциональна пределу предсказуемости. Показано, что даже простая методика построения модели дает удовлетворительные результаты прогноза.*

**Ключевые слова:** временные ряды концентраций, загрязняющие вещества, прогноз, хаос

**Введение.** В современной теории прогнозов временной ряд рассматривается как реализация случайного процесса, когда случайность является результатом сложного движения с многими независимыми степенями свободы. Альтернативой случайности является хаос, который имеет место в очень простых детерминистических системах. Хотя хаос устанавливает фундаментальное ограничение на долгосрочный прогноз, он может использоваться для краткосрочного прогноза: данные, выглядящие случайными, могут содержать в себе простые детерминистические взаимосвязи, имеющие только несколько степеней свободы. Такой подход с успехом использовался при анализе многих гидрометеорологических характеристик [1-19], в т.ч. и временных рядов составляющих атмосферного воздуха. В предыдущих работах, в частности, [5,19], метод нелинейного прогноза применялся к анализу временных рядов концентраций атмосферной пыли, двуокиси азота и сернистого ангидрида на двух постах Гданьского региона. Далее был восстановлен спектр размерностей Ляпунова и на его основе рассчитаны размерность Каплана-Йорка и энтропия Колмогорова, которая обратно пропорциональна пределу предсказуемости. Показано, что даже простая методика построения модели дает удовлетворительные результаты прогноза. Целью настоящего исследования является проведение аналогичной программы исследований для атмосферной пыли в г. Одессе и оценка предела предсказуемости краткосрочного и применение нелинейного метода прогноза.

**Данные и методика исследования.** Перед тем, как представить некоторые результаты расчетов методами теории хаоса по данным концентраций пыли в Одессе [19], сделаем некоторые замечания, относящиеся к качеству этих данных. Как уже отмечалось выше, для того, чтобы использование методов теории хаоса дало адекватные результаты, необходим достаточно длинный ряд наблюдений (в случае Гданьского региона [5,19] длина ряда составляла 8760 значений), причем в этом ряду должны отсутствовать «белые пятна», связанные остановкой приборов для измерения концентраций на профилактику или какими-нибудь другими причинами. Естественно, что для восстановления недостающих исходных данных может быть использован некоторый метод интерполяции. Однако такой подход не может дать удовлетворительного результата в случае хаотической системы. Дело в том, что применение интерполяции приводит к появлению либо стохастических, либо регулярных участков орбиты (в зависимости от используемого метода интерполяции), а это, в свою очередь нарушает хаотичность аттрактора. По сути, единственным методом интерполяции в этом случае может быть использование самих методов теории хаоса для восстановления недостающих данных, например, метода нелинейного прогноза. Действительно, если ряд непрерывных наблюдений достаточно велик (несколько тысяч значений) и он прерывается не очень длинным (не более предела предсказуемости)

периодом, для которого наблюдения отсутствуют, то методы теории хаоса позволяют с достаточной точностью, как, например, показано в [5,19] восстановить недостающие данные. В этом случае, сначала восстанавливается аттрактор для части временного ряда, затем осуществляется прогноз, после чего полученные прогностические величины в дальнейшем используются в качестве «реальных» данных для восстановления аттрактора по всему ряду.

Теоретически, длина временного ряда среднесуточных концентраций диоксида серы, двуоксида азота и пыли за период с 1976 по 2002 год должна составлять 9862 значений, что является вполне достаточным для адекватного восстановления аттрактора в случае, если наблюдается хаотический режим. Однако для такого временного ряда характерно большое количество недостающих данных, причем восстановление их методами теории хаоса не представляется возможным. Более того, некоторое количество отсутствующих значений присутствует также и во временном ряду средних за неделю величин концентраций, длина которого составляет 1408 значений. Лишь временные ряды средних значений за половину месяца и месяц могут считаться полностью непрерывными, однако длина этих рядов (648 и 324 соответственно) не является вполне достаточной для восстановления аттрактора. Тем не менее, в этом разделе представлены результаты (табл. 1) для временного ряда пыли на посту 18 в Одессе с осреднением в одни сутки, неделю, половину месяца и месяц. Для этого ряда при достаточно небольших размерностях вложения был достигнут так называемый критерий 3% ближайших соседних точек [5,19].

**Результаты исследования и их анализ.** Как видно табл. 1, показатель  $K$ , ненулевые значения которого определяют наличие хаотического режима в динамической системе, для временных рядов с осреднением в одни сутки и неделю, некоторые значения в которых были проинтерполированы, имеет крайне небольшие значения. Размерность Каплана-Йорка для этих же рядов больше, чем выбранная нами размерность аттрактора, определенная по методу Грассбергера-Прокаччия [19], а это также говорит о не совсем удовлетворительном восстановлении аттрактора по методу корреляционной размерности.

Для того чтобы проверить, насколько хорошо было определено наличие хаотического режима во временных рядах, применим так называемый метод «замещенных данных» [5], суть которого может быть коротко описана следующим образом. В этом методе используются суррогатные данные, созданные таким образом, чтобы сохранялась вероятностная структура, лежащая в основе оригинального набора данных. Это означает, что суррогатные данные обладают некоторыми свойствами, такими как среднее значение, среднеквадратическое отклонение, функция

Таблица 1 – Временная задержка ( $\tau$ ), корреляционная размерность ( $d_2$ ), размерность пространства вложения ( $d_E$ ), размерность Каплана-Йорка ( $d_L$ ), предел предсказуемости ( $Pr_{\max}$ , сутки), показатель  $K$ , коэффициент корреляции ( $r$ ) между фактическим и прогностическим рядами и среднеквадратическая ошибка прогноза ( $\sigma$ ) на один срок вперед для концентрации пыли на посту 18 в г. Одессе для рядов с осреднением в сутки, неделю, половина месяца и месяц за период с 1976 по 2002 г.

Период осреднения	$\tau$	$d_2$	$d_E$	$d_L$	$Pr_{\max}$	$K$	$r$	$\sigma$
Сутки	18	2,72	3	3,83	4	0,12	0,72	0,10
Неделя	16	3,42	4	4,71	14	0,25	0,69	0,09
половина месяца	10	4,15	5	4,95	15	0,43	0,76	0,12
месяц	8	5,92	6	5,32	30	0,46	0,80	0,10

распределения вероятностей, спектральная функция и т.д., что и исходные данные, но на них накладывается ограничение их случайности. Последнее может быть соблюдено, если выполняется конкретная нулевая гипотеза. В нашем случае, нулевая гипотеза заключается в возможности линейного процесса и целью является отклонение гипотезы, что исходные данные порождены линейным стохастическим процессом. Отклонение нулевой гипотезы можно сделать, например, основываясь на результатах расчета корреляционной размерности. Если полученная для суррогатных данных корреляционная размерность существенно отличается от полученной по исходным данным, то это и может быть причиной отклонения нулевой гипотезы. Это, в свою очередь, означает, что исходный ряд может рассматриваться как хаотический. Рассмотрим показатель, который может служить критерием отклонения нулевой гипотезы. Пусть  $Q_{orig}$  относится к корреляционной размерности, рассчитанной по исходному ряду, а  $Q_{si}$  – рассчитанной по  $i$ -му суррогатному ряду, полученному при нулевой гипотезе. Пусть, также,  $\mu_s$  и  $\sigma_s$  обозначают, соответственно, среднюю величину и среднеквадратическое отклонение для  $Q_s$ . Тогда степень значимости  $S$  задается посредством

$$S = \frac{|Q_{orig} - \mu_s|}{\sigma_s}.$$

Если величина  $S$  приблизительно равна 2, то она не может рассматриваться как очень значительная, тогда как  $S \sim 10$  является весьма значительной [19]. Наиболее часто используемым вариантом нулевой гипотезы такой, что суррогатные данные являются автокоррелированным Гауссовым шумом. На рис. 1 видно, что в среднем для тридцати реализаций суррогатных рядов не происходит насыщения корреляционной размерности,

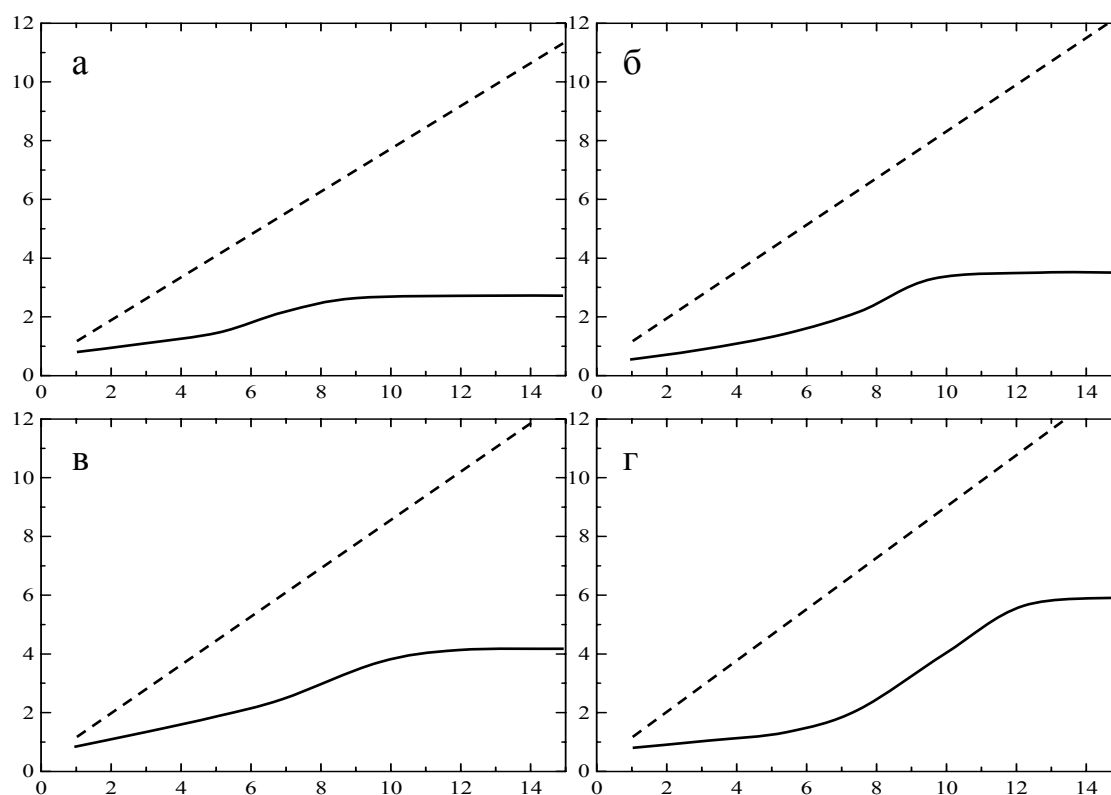


Рис. 1 – Связь корреляционной размерности (ось  $Y$ ) и размерности вложения (ось  $X$ ) для временных рядов концентрации пыли на посту 18 г. Одесса, осредненных за сутки (а), неделю (б), половину месяца (в) и месяц (г) (сплошные линии – исходные ряды, пунктирные – суррогатные данные)

что наблюдается для исходных временных рядов.

Другими словами, рассматриваемые здесь временные ряды концентраций пыли с различным осреднением могут рассматриваться как хаотические. В табл. 2. приведены величины параметра  $S$  для различных размерностей вложения; данные этой таблицы подтверждают, что полученные нами результаты являются значимыми. Таким образом, даже несмотря на не вполне удовлетворительные результаты по восстановлению аттрактора для временных рядов концентраций пыли, хаотический режим в них, тем не менее, присутствует.

Таблица 2 – Параметр значимости ( $S$ ) для временных рядов концентрации пыли на посту 18 осредненных за разные периоды для некоторых размерностей вложения  $m$

Период осреднения	$m=2$	$m=4$	$m=6$	$m=8$	$m=9$	$m=10$	$M=1$	$m=1$
						0	1	2
сутки	12.3	25.7	41.4	50.6	48.1	47.0	45.6	42.1
неделя	11.8	20.3	28.4	39.6	45.2	48.3	47.6	44.2
половина месяца	12.6	15.6	20.3	28.4	33.7	39.0	44.5	41.9
месяц	12.1	16.2	22.7	26.1	30.0	32.1	35.2	38.9

**Выводы.** Представленные результаты могут являться подтверждением того, что применение методов теории хаоса к временным рядам концентраций загрязняющих веществ в атмосфере вполне оправдано как с теоретической, так и практической точек зрения. Во-первых, полученные фрактальные размерности аттракторов говорят о том, что появляется уникальная возможность адекватного решения задачи восстановления, прогноза в долгосрочном плане динамики колебания и эволюционных изменения полей концентрации вредных примесей. Это особенно большое значение это имеет для тех промышленных городов и мегаполисов, где данные по загрязнению воздушного бассейна практически отсутствуют. Использование теории фрактальных множеств позволяет надежно предсказать и рассчитать динамику эволюционных изменения полей концентраций загрязняющих веществ. Разумеется, для полной реализации искомой программы, помимо знания искомого фрактальных свойств прогноза, потребуется применение также аппарата конформных отображений соответствующих модифицированных рядов изменения концентрации примесей в рамках, скажем, нейросетевого подхода. Во-вторых, становится возможным непосредственное применение хорошо зарекомендовавших себя в других областях науки методов теории хаоса (например, метода нелинейного прогноза) для краткосрочного прогноза концентраций загрязняющих веществ. Пример такого, вполне удачного прогноза приведен в [19]. Естественно, что одним из главных условий при реализации этой методики является высокоточные и надежные данные наблюдений, которые необходимы, тем не менее, на первом этапе построения модели прогноза – восстановлении параметров хаотического аттрактора. Как показано выше, вполне достаточным является проведение непрерывных наблюдений в течение года с дискретностью один час.

Список литературы

1. *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. – V. 65. – P. 1331-1392.
2. *Sivakumar B.* Chaos theory in geophysics: past, present and future // *Chaos, Solitons & Fractals*, 2004. – V. 19. – P. 441-462.
3. *Chelani A.B.* Predicting chaotic time series of PM10 concentration using artificial neural network // *Int. J. Environ. Stud.*, 2005. – V. 62. – P. 181-191.
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 Electronics and Microsystem Technologies*, 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. – №4. – С. 337-348.
6. *Lorenz E.N.* Deterministic nonperiodic flow // *J. Atmos. Sci.*, 1963. – V. 20. – P. 130-141.
7. *Песин Я.Б.* Характеристические показатели Ляпунова и гладкая эргодическая теория // *Успехи мат. наук*, 1977. – Т. 32. – № 1. – С. 55-112.
8. *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.
9. *Оседец В.И.* Мультипликативная эргодическая теорема. Характеристические показатели Ляпунова динамических систем // *Тр. Мос. мат. об-ва*, 1968. – Т. 19. – № 2. – С. 179-210.
10. *Sano M., Sawada Y.* Measurement of the Lyapunov spectrum from a chaotic time series // *Phys. Rev. Lett.*, 1985. – V. 55. – P. 1082-1085.
11. *Rissanen J.* Stochastic complexity in statistical inquiry. Singapore: World Scientific, 1989. – 177 p.
12. *Schreiber T.* Interdisciplinary application of nonlinear time series methods // *Phys. Rep.*, 1999. – V. 308. – P. 1-64.
13. *Хохлов В.Н.* Хаос и предсказуемость концентраций парниковых газов в атмосфере // *Вестник Одесск. гос. эколог. ун-та*, 2005. – Вып. 1. – С. 11-19.
14. *Tsonis A.A., Elsner J.B.* Global temperature as a regulator of climate predictability // *Physica D*, 1997. – V. 108. – P. 191-196.
15. *Islam M.N., Sivakumar B.* Characterization and prediction of runoff dynamics: a nonlinear dynamical view // *Adv. Water Res.*, 2002. – V. 25. – P. 179-190.
16. *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 // *Atmos. Res.*, 2005. – Vol. 77. – P. 100-113.
17. *Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Tsenenko I.A.* Atmospheric teleconnection patterns and eddy kinetic energy content: wavelet analysis // *Nonlin. Processes Geophys.*, 2004. – V. 11. – P. 285-293.
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. – P. 219-223.

19. *Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Loboda N.S., Bunyakova Yu.Ya.* Short-range forecast of atmospheric pollutants using non-linear prediction method // *Atmos. Environ.*, 2008. – Vol. 42. – P. 7284-7292.

**Хаос у часових рядах концентрацій забруднюючих речовин в атмосфері (м. Одеса). Глушков О.В., Серга Е.М., Бунякова Ю.Я.**

*Метод нелінійного прогнозу застосовано до часових рядів концентрацій пилі на двох постах Одеського регіону. Відбудовано спектр розмірностей Ляпунова і на його основі розраховані розмірності Каплана-Йорка та ентропія Колмогорова, яка обернено пропорційна ліміту передбаченості. Показано, що навіть проста методика побудови моделі дає задовільні результати прогнозу.*

**Ключові слова:** часові ряди концентрацій, забруднюючі речовини, прогноз, хаос, Одеса

**Chaos in time series of concentrations of the pollution substances in an atmosphere (c. Odessa). Glushkov A.V., Serga E.N., Bunyakova Yu.Ya.**

*The method of non-linear forecast is applied to the time series of concentrations of the dust on two sites of the Odessa region. The Lyapunov dimensions spectrum is reconstructed and on its basis there are calculated the Kaplan-York dimensions and Kolmogorov entropy, which is reversely proportional to a limit of the prediction. It is shown that already simple method for the model construction provides the satisfactory results of the forecast.*

**Keywords:** time series of concentrations, pollution substances, forecast, chaos, Odessa