

Е.П. Соляникова, асс.

Одесский государственный экологический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ (НИТРАТОВ) В ВОДНЫХ БАССЕЙНАХ МАЛЫХ КАРПАТ

Методы нелинейного стохастического анализа и теории хаоса применены к изучению стохастических аспектов и выявлению элементов хаоса во временных рядах концентраций загрязняющих веществ (нитратов) в водных бассейнах в районе Малых Карпат.

Ключевые слова: нелинейный стохастический анализ, временные ряды концентраций загрязняющих веществ, регион Малых Карпат

Введение. Проблема моделирования процессов загрязнения водных сред, включая, бассейны рек, относится к числу крайне важных и актуальных задач современной гидроэкологии и охраны окружающей среды. Между тем, несмотря на высокую актуальность подобного класса задач, можно констатировать отсутствие достаточно надежных и эффективных методов и моделей математического моделирования процессов загрязнения и распространения загрязняющих веществ в водных средах, включая, речные системы [1,2]. В последние годы весьма эффективным оказывается применение в решении указанных задач методов теории хаоса и динамики нелинейных стохастических систем [1-18]. К числу достаточно удачных примеров применения указанных методов можно отнести решение таких задач [9-16]: 1) детектирования структуры поля загрязнения воздуха в атмосфере промышленного города; 2) детектирование корреляции между атмосферными телеконнекционными паттернами и величиной морского ледового покрытия, базирующаяся на использовании данных наблюдений и ПК комплексе "GeoMath"; 3) задача о долговременных изменениях фаз антарктического колебания и их связи с содержанием озона в южном полушарии; 4) анализ кинетических особенностей энергообмена в смеси $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2\text{O}$ атмосферных газов при прохождении через атмосферу лазерного излучения в рамках 3-модовой кинетической модели для разных параметров лазерных импульсов; 5) физических 3D моделей гидрологического цикла; 6) анализ данных колебаний внутри сезонных расходов и временной эволюции флуктуаций загрязняющих веществ (ЗВ) в приустьевых зонах ряда рек и северо-западной части Черного моря. Фактически сравнение данных анализа колебаний речного стока и флуктуаций концентрации ЗВ в приустьевой зоне Дуная однозначно указывает на новое в гидроэкологии явление генезиса фрактальных размерностей в системе «речная система - прибрежная морская зона». Наконец, следует упомянуть также и новый подход к детектированию пространственно-временной структуры полей загрязнения воздуха в атмосфере промышленного города, базирующийся на методе распознавания образов и нейросетевом моделировании. Искомая схема была протестирована на данных по аэрозольным взвесям в атмосфере гг. Одессы, Гданьска. На основе анализа эмпирических данных в рамках метода корреляционной размерности Гроссбергера-Прокаччи были обнаружены стохастичность и эффекты хаоса в динамике и структуре поля загрязнения атмосферы промышленного города. В данной работе мы применим методы нелинейного стохастического анализа и теории хаоса [9] к изучению стохастических аспектов и выявлению элементов хаоса во временных рядах концентраций загрязняющих веществ (нитратов) в водных бассейнах Малых Карпат.

Доказав наличие стохастических структур в соответствующих флуктуационных зависимостях, затем можно перейти к построению моделей нелинейного краткосрочного прогноза [9, 13-16]. В любом случае подобная программа оказалась весьма успешной в случае временных рядах концентраций загрязняющих веществ в атмосфере промышленных городов.

Данные и методика исследования. В качестве исходных данных используем результаты эмпирических наблюдений, выполненных сотр. Института гидрологии Академии наук Словакии в 6 водосборах региона Малых Карпат (17-17°50' в.д. и 48°10'-48°40' с.ш.) [17]. В табл. 1 приведены некоторые статистические характеристики для измеренных величин концентраций нитратов в водных потоках Мало-Карпатского региона (в течение 991-1995гг). На рис.1 приведены эмпирические данные о временных вариациях измеренных концентраций нитратов в ряде водосборов региона Малых Карпат (в период с июля 1991г. по декабрь 1993г.).

Таблица 1 - Некоторые статистические характеристики для измеренных величин концентраций нитратов (в мг·л⁻¹) в водных потоках Мало-Карпатского региона (в течение 1991-1995гг)

Река Пост	Vydrica С.Мост	Vydrica Spariska	Blatina Pezinok	Gidra Main	Gidra Pila	Pama Majdan	Hlbocsky Smolenice
Ср. конц.	10,96	14,48	11,65	16,71	16,59	18,53	18,09
min	0,73	0,75	1,74	7,70	8,55	10,10	7,53
max	40,20	42,10	31,40	36,60	31,50	34,20	29,55
ск.откл.	10,41	11,09	8,05	6,66	5,61	5,22	5,89
c _s	1,03	0,70	0,79	1,08	0,75	0,62	0,70
c _v	0,95	0,77	0,69	0,40	0,34	0,28	0,37
c ₉₅	29,77	33,47	25,20	29,29	26,70	26,89	27,73
c ₉₀	28,00	32,56	22,97	26,72	25,93	25,61	24,74
c ₁₀	1,52	3,31	3,55	10,09	10,50	12,58	9,96

Первая задача состоит в том, чтобы на основе данных измерений восстановить фазовое пространство системы. Естественно, что восстановить бесконечное число степеней свободы только на основе наблюдений невозможно. Для восстановления фазового пространства системы можно использовать информацию, содержащуюся в наблюдениях $s(k)$ [15,16]. Этот процесс реконструкции приведет некоему набору d -мерных векторов $y(k)$, которые заменят наблюдаемые скалярные данные, и заключается в сочетании динамических концепций о нелинейных системах, как о генераторах информации, и геометрических представлений о том, как обнаружить аттрактор при помощи координат, определенных на основе их информационно-теоретического содержания. Тогда, используя совокупность временных задержек для создания вектора в d -мерном пространстве

$$y(k) = [s(k), s(k + \tau), s(k + 2\tau), \dots, s(k + (d-1)\tau)], \quad (1)$$

можно получить требуемые координаты. Если τ слишком мало, то координаты $s(k + j\tau)$ и $s(k + (j+1)\tau)$ будут так близки друг к другу, что их нельзя будет различить одна от другой. Аналогично, если τ слишком велико, то $s(k + j\tau)$ и $s(k + (j+1)\tau)$ будут полностью независимы друг от друга в статистическом смысле и проекция орбит на аттрактор будут направлены по двум совершенно несвязанным направлениям.

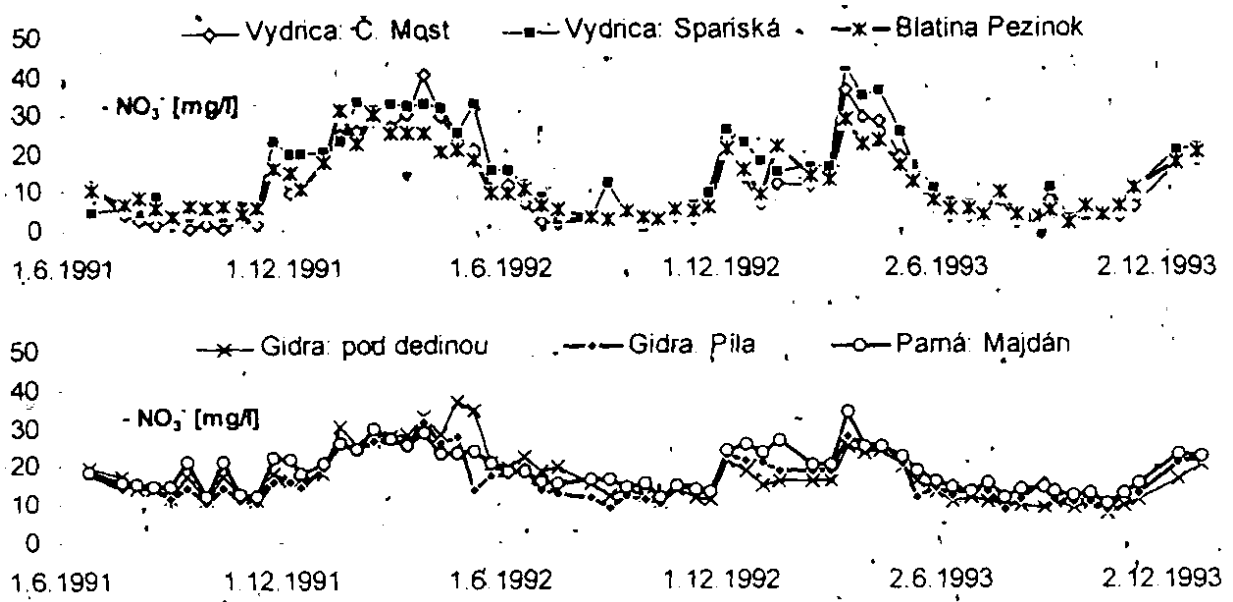


Рис. 1 – Временные вариации величин концентраций нитратов в ряде водосборов (Малые Карпаты; 1991-1993гг.).

Поэтому необходимо выбрать некое промежуточное положение между двумя упомянутыми случаями. Первым и наиболее простым подходом для выбора τ может быть расчет линейной автокорреляционной функции C_L и нахождение временной задержки, на которой C_L первый раз переходит через некое значение, что дает вполне допустимое, в принципе, значение τ , при котором $s(k+j\tau)$ и $s(k+(j+1)\tau)$ линейно независимы. По крайней мере, реализация этого подхода оказалась крайне эффективной в задаче моделирования временных вариаций загрязняющих веществ в атмосфере промышленных городов [9]. Следующим этапом восстановления аттрактора является нахождение его размерности. Одним из наиболее широко используемых при идентификации хаоса во временных рядах является подход, называемый методом корреляционной размерности. Этот метод использует корреляционный интеграл функции $C(r)$ для того, чтобы найти различия между хаотическими и стохастическими системами. Для расчета корреляционного интеграла наиболее часто используется алгоритм Грассбергера-Прокаччия [8], в соответствии с которым

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{N(N-1)} \sum_{\substack{i,j \\ (1 \leq i < j \leq N)}} H(r - \|y_i - y_j\|), \quad (2)$$

где H – ступенчатая функция Хевисайда, $H(u) = 1$ для $u > 0$ и $H(u) = 0$ для $u \leq 0$; r – радиус сферы с центром в y_i или y_j ; N – длина временного ряда. Если временной ряд характеризуется аттрактором, то корреляционный интеграл $C(r)$ соотносится с радиусом r посредством

$$d_2 = \lim_{\substack{r \rightarrow 0 \\ N \rightarrow \infty}} \frac{\log C(r)}{\log r}, \quad (3)$$

где d_2 – корреляционная размерность, которую можно определить как наклон линии в

координатах $\log C(r)$ и $\log r$ посредством среднеквадратического подбора прямой линии в некотором диапазоне r , называемом диапазоном масштабирования.

Если корреляционная размерность достигает насыщения на некотором значении размерности вложения, то динамика системы в целом рассматривается как хаотическая. Значение корреляционной размерности, при котором она достигает насыщения, определяется как корреляционная размерность аттрактора (d_A). Ближайшее целое число большее, чем d_2 , дает оптимальную (необходимую) размерность вложения d_E для реконструкции фазового пространства или количество переменных, необходимых для моделирования динамики системы. С другой стороны, если корреляционная размерность неограниченно увеличивается с ростом размерности вложения, динамика системы рассматривается как стохастическая.

Результаты исследования. Как указывалось ранее, первым шагом при восстановлении фазового пространства является нахождение временной задержки τ с помощью автокорреляционной функции или взаимной информации. Так как для восстановления фазового пространства важным является определение временной задержки τ , то только оптимальный выбор дает наилучшее разделение соседних траекторий внутри минимального фазового пространства вложения.

Теперь, приведем результаты численных экспериментов по восстановлению размерности фазового пространства (d_E), используя при этом метод корреляционной размерности. Для нахождения корреляционной размерности d_2 необходимо рассчитать корреляционные интегралы $C(r)$ для разных размерностей вложения. Корреляционная размерность аттрактора (d_A) определяется как значение корреляционной размерности, при котором она не изменяется при увеличении размерности вложения. На рис. 2 представлены соответствующие кривые, свидетельствующие о наличии хаоса в системе.

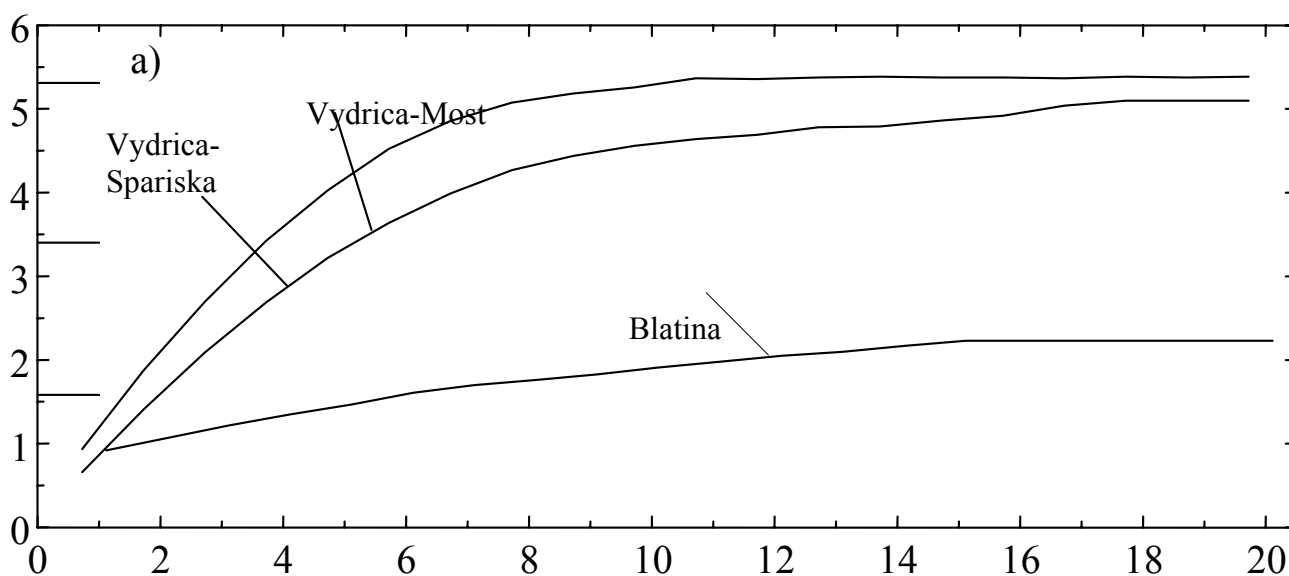


Рис. 2 - Зависимость корреляционной размерности от размерности вложения (ось X) для постов измерения Vydrica-S.Most, Vydrica-Spariska, Blatina-Pezinok величин концентраций нитратов в водных потоках Мало-Карпатского региона (в течение 1991-1995гг).

Выводы. Представленный в настоящей работе анализ данных о временных

зависимостях изменения концентраций некоторых загрязняющих веществ в водосборах Мало-Карпатского региона с помощью методов теории хаоса показал, что искомые временные ряды характеризуются хаосом. Результаты восстановления фазового пространства системы по данным наблюдений представляются очень важными. Дело в том, что следующая задача, заключающаяся в построении моделей и прогнозе будущих режимов системы, представляет крайне больший интерес и позволяет дать подход к предсказанию будущих изменений концентраций загрязняющих веществ на основе метода нелинейного прогноза [9,13-16]. Отметим, что при этом не требуются детальные данные о химии и физике процесса, а необходимы лишь данные о хаотической динамике системы, которая и была выявлена в настоящей работе.

Список литературы

1. *Wiggins S.* Introduction to applied nonlinear dynamical systems and chaos. New York: Springer-Verlag, 1997.-688 p.
2. *Ott E.* Chaos in dynamical systems. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.-490 p.
3. *Letellier C., Aziz-Alaoui M.A.* Analysis of the dynamics of a realistic ecological model // Chaos, Solitons & Fractals.-2002.-V.13, №1.-P.95-107.
4. *Sprott J.C., Vano J.A., Wildenberg J.C., Anderson M.B., Noel J.K.* Coexistence and chaos in complex ecologies // Phys. Lett. A.-2005.-V.335, № 2-3.-P.207-212.
5. *Islam M.N., Sivakumar B.* Characterization and prediction of runoff dynamics: a nonlinear dynamical view // Adv. Water Res.-2002.-V.25, № 2- P.179-190.
6. *Fraser A.M., Swinney H.L.* Independent coordinates for strange attractors from mutual information // Phys. Rev. A.-1986.-V.33, № 2- P.1134-1140.
7. *Schreiber T.* Interdisciplinary application of nonlinear time series methods // Phys. Rep.-1999. V.308,№1.-P.1-64.
8. *Grassberger P, Procaccia I.* Measuring the strangeness of strange attractors // Physica D.-1983.- V.9.,№1-2.-P.189-208.
9. *Глушков А.В., Хохлов В.Н., Сербов Н.Г., Балан А.К., Бунякова Ю.Я., Баланюк Е.П.,* Низкоразмерный хаос во временных рядах концентраций загрязняющих веществ в атмосфере и гидросфере// Вестник ОГЭКУ.-2007.-N4.-С.337-348
10. *Лобода Н.С.,* Формализм функций памяти и мультифрактальный подход в задачах моделирования годового стока рек и его изменений под влиянием факторов антропогенной деятельности// Метеорология, климатология и гидрология.-2002.-№45.-С.140-146.
11. *Глушков А.В., Хохлов В.Н., Препелица Г.П., Цепенко И.А.* Временная изменчивость содержания метана: влияние североатлантической осцилляции // Оптика атмосферы и океана.-2004.-Т.17,№7-С. 573-575.
12. *Глушков А.В., Балан А.К., Баланюк Е.П.,* Метод многофакторного системного и мультифрактального моделирования в задачах расчета экстремальных гидрологических явлений//Ecology of Siberia, the Far East and the Arctic.-2003.-V.2.-P.113-118.
13. *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. – No. 1-4. – P. 14-24
14. *Loboda N.S., Glushkov A.V., 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.-2005.-Vol.77.-P.100-113.

15. *Khokhlov V.N., Glushkov A.V., Loboda N.S., Bunyakova Yu.Y.*, Short-range forecast of atmospheric pollutants using non-linear prediction method//Atmospheric Environment (Elsevier; The Netherlands).-2008.-Vol.42.-P.7284–7292.
16. *Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Loboda N.S., Serbov N.G., Zhurbenko K.*, Signatures of low-dimensional chaos in hourly water level measurements at coastal site of Mariupol, Ukraine// Stoch Environ Res Risk Assess (Springer).-2008.-Vol.22,N6.-P.777-788.
17. *Pekarova P., Miklanek P., Konicek A., Pekar J.*, Water quality in experimental basins.- Nat. Rep.1999 of the UNESKO.-Project 1.1.-Intern.Water Systems.-1999.-98P.
18. *Schuster H.G.* Deterministic chaos: an introduction. New York: Wiley, 2005.-312 p.

Дослідження часових рядів концентрацій забруднюючих речовин (нітратів) у водних басейнах Малих Карпат. Соляникова О.П.

Методи нелінійного стохастичного аналізу і теорії хаосу застосовані до дослідження стохастичних аспектів та з'ясування елементів хаосу у часових рядах концентрацій забруднюючих речовин (нітратів) в водних басейнах в районі Малих Карпат.

Ключові слова: нелінійний стохастичний аналіз, часові ряди концентрацій забруднюючих речовин, регіон Малих Карпат

Studying temporal sets of concentrations of the pollution substances (nitrates) in water basins of Small Carpathian. Solyanikova E.P.

Methods of non-linear stochastic analysis and chaos theory are applied to studying stochastic aspects and manifestation of the chaos elements in the temporal sets of the pollution substances (nitrates) concentrations in water basins of Small Carpathian.

Kew words: non-linear stochastic analysis, temporal sets of pollution concentrations, Small Carpathian region