

## ZASTOSOWANIE SIECI NEURONOWYCH W OCENIE PROCESU ZATRUWANIA ROGACZY FLUOREM

ZYGMUNT MACHOY<sup>1</sup>, VIOLETTA DZIEDZIEJKO<sup>1</sup>, JERZY STRASZKO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pomorska Akademia Medyczna, Zakład Biochemii, Szczecin, Powstańców Wielkopolskich 72

<sup>2</sup>Politechnika Szczecińska, Zakład Chemii Fizycznej i Podstaw Ochrony Środowiska, Szczecin, Al. Piastów 42

Keywords: fluorine accumulation in bones, fallow deers population, Western Pomerania neural networks.

### NEURAL NETWORKS APPLICATION IN ESTIMATION OF FALLOW DEERS FLUORINE POISONING PROCESS

Research results of fluorine accumulation in fallow deers bones in Western Pomerania were presented. Fluorine contents denotation was made by potentiometer method with ionoselective electrode use. Dependence of fluorine accumulation on age and individual features of animals, regions properties of investigated area and distances from emission sources of fluorine compounds were examined. Dependences characteristic for probabilistic variables were obtained. For measurements results description were used neural networks MLP, RBP, GRNN.

#### Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań akumulacji fluoru w kościach rogaczy na Pomorzu Zachodnim. Oznaczenia zawartości fluoru wykonano metodą potencjometryczną z zastosowaniem elektrody jonoselektywnej. Badano zależność akumulacji fluoru od wieku i cech indywidualnych zwierząt, właściwości rejonów rozpatrywanego obszaru oraz odległości od źródeł emisji związków fluoru. Otrzymano zależności o charakterze zmiennych losowych. Do opisu wyników pomiarów zastosowano sieci neuronowe MLP, RBF i GRNN.

#### WSTĘP

Na obszarach skażanych emisjami przemysłowymi zwierzęta wolno żyjące są narażone na działanie rozmaitych substancji toksycznych. Celem badań było opracowanie metody oceny oddziaływania emisji przemysłowych na populację zwierząt przebywających w ich zasięgu. Za zanieczyszczenia modelowe, ze względu na specyficzne działanie, przyjęto związki fluoru. Badano akumulację fluoru w kościach rogaczy na Pomorzu Zachodnim. Związki fluoru, na tym obszarze, są emitowane głównie przez Zakłady Chemiczne Police i Elektrownię Dolna Odra [10].

Akumulacja fluoru w kościach zwierząt wolno żyjących zależy od stężenia związków fluoru w powietrzu, czasu ekspozycji utożsamianego z wiekiem zwierząt, właściwości rejonów (określających warunki bytowania) oraz wrażliwości indywidualnej.

Stężenie fluoru w powietrzu zależy od wielkości emisji i transportu atmosferycznego [16]. Wielkość emisji fluoru w rozważanym okresie można przyjąć za stałą [14]. W przedstawionym opisie za zmienną określaną przyjęto zawartość fluoru w kościach rogaczy, a jako zmienne określające: rejon, odległość od źródeł emisji, kąty wyznaczające położenie rejonów względem źródeł emisji (dla uwzględnienia kierunku wiatru), wiek zwierząt i ich cechy osobnicze.

Stężenie fluoru w kościach rogaczy zależy od wielu czynników. W sposób tradycyjny istotność każdej zmiennej ocenia się na podstawie testów statystycznych. Stwierdzono, że przy tak złożonym procesie z jakim mamy do czynienia tradycyjnymi metodami nie można uzyskać w pełni wiarygodnych rezultatów. Znacznie większe możliwości posiadają sieci neuronowe [12]. Przyjęto, że stosując je będzie można otrzymać właściwy opis badanych procesów.

## CZĘŚĆ OGÓLNA

Fluorki przedostają się do ustroju przez płuca i przewód pokarmowy [5]. Na szybkość i ilość przyswajalnego fluoru wpływa nie tylko stopień dysocjacji danego związku na jony fluorkowe, ale również interakcje z innymi substancjami oraz wiek, stan odżywienia, rodzaj pokarmu, stopień kwasowości soku żołądkowego i wrażliwość indywidualna [4, 7]. Komórki tkanek miękkich w niewielkim stopniu kumulują fluorki. Jednak przy ciągłym ich dopływie są ustawnie przez nie nasycone [8].

Wiadomo, że fluorki działają szkodliwie wielokierunkowo. Mają one negatywny wpływ na gospodarkę mineralną ustroju. Powinowactwo fluorków do wielu dwuwartościowych metali (Ca, Mg, Mn, Fe, Cu, Zn) ma szczególne znaczenie w przypadkach, kiedy te metale są aktywatorami enzymów ustrojowych, lub wchodzi w skład ich cząsteczek. Stale aktualna jest też dyskusja nad mutagennym i kancerogennym oddziaływaniem związków fluoru [9].

Obserwacje dotyczące związków fluoru w organizmach żywych wykazały, że fluorki są sorbowane przede wszystkim przez tkanki twarde (kości, zęby) [6]. Kość jest zbudowana głównie z hydroksyapatytu. W drodze wymiany grupę  $\text{OH}^-$  częściowo zastępują jony  $\text{F}^-$ . Powstaje fluoroapatyt [1]. Ten proces zmienia właściwości fizykochemiczne tego zasadniczego budulca tkanki kostnej.

Przyjmuje się zwykle, że młode organizmy magazynują więcej wprowadzonych fluorków do organizmu niż stare [5]. Powinowactwo do wiązania fluoru jest odmienne dla różnego rodzaju kości. Najbardziej podatne na działanie fluoru są żebra, kości śródstopia, szczeka górna i dolna oraz kręgi [2].

Fluorki mogą być wypłukiwane z kości do krwi [3]. Wydalanie fluorków przebiega w dwóch fazach. W pierwszej, szybszej, odbywającej się w czasie tygodni i prawdopodobnie związanej z wymianą jonową w powłoce hydratacyjnej, oraz w drugiej, wynikającej z resorpcji komórek kościogrubej kości. Ponieważ proces przebudowy kości jest powolny, uwalnianie fluorków odbywa się również powoli, przy czym fluorki wydane są szybciej z kości bełczkowych niż z kości zbitych [5].

Zbyt duża ilość fluorków w kościach prowadzi do choroby zwanej fluorozą [9, 11]. Obraz kliniczny i morfologiczny fluorozy kostnej uwarunkowany jest, poza dawką,

czasem ekspozycji, wrażliwością osobniczą i zasobami aktywnej witaminy D<sub>3</sub> oraz wapnia, jakimi dysponuje organizm [1].

Fluorozę, mniej lub bardziej zaawansowaną, obserwuje się u ludzi i zwierząt na terenach z podwyższoną zawartością fluoru w powietrzu i wodzie oraz w mniejszym stopniu, w wyniku długotrwałego przyjmowania większej ilości fluorków z pożywieniem.

Nie należy oceniać tylko skutków negatywnego oddziaływania fluoru na organizm. Stomatolodzy zwrócili uwagę na znaczenie fluoru w zwalczaniu próchnicy. Natomiast ortopedzi wykazali dobre skutki leczenia fluorkami osteoporozy [9]. Wynika stąd, że fluor posiada wąski margines bezpieczeństwa między ilością niezbędną dla ustroju a dawką, powyżej której występują objawy szkodliwego działania [9].

## MATERIAŁ I METODA

Łatwo dostępnym materiałem badawczym kumulującym fluor są kości zwierząt. Zebrane do badań zuchwy rogaczy z terenu Pomorza Zachodniego pochodziły z planowanych odstrzałów myśliwskich w latach 1996–97. Wyodrębnione rejonu tego obszaru przedstawiono na rysunku 1.

Żuchwy, po odtłuszczeniu w acetonie i wysuszeniu, nawiercano wiertarką w odległości 3 cm od kąta zuchwy. Materiał pochodził z części korowej, z przestrzeni o wymiarach: długość 4 cm, szerokość 1 cm i głębokość 2–3 mm. Uzyskaną, sproszkowaną kość przechowywano w zamkniętych plastikowych próbkach.

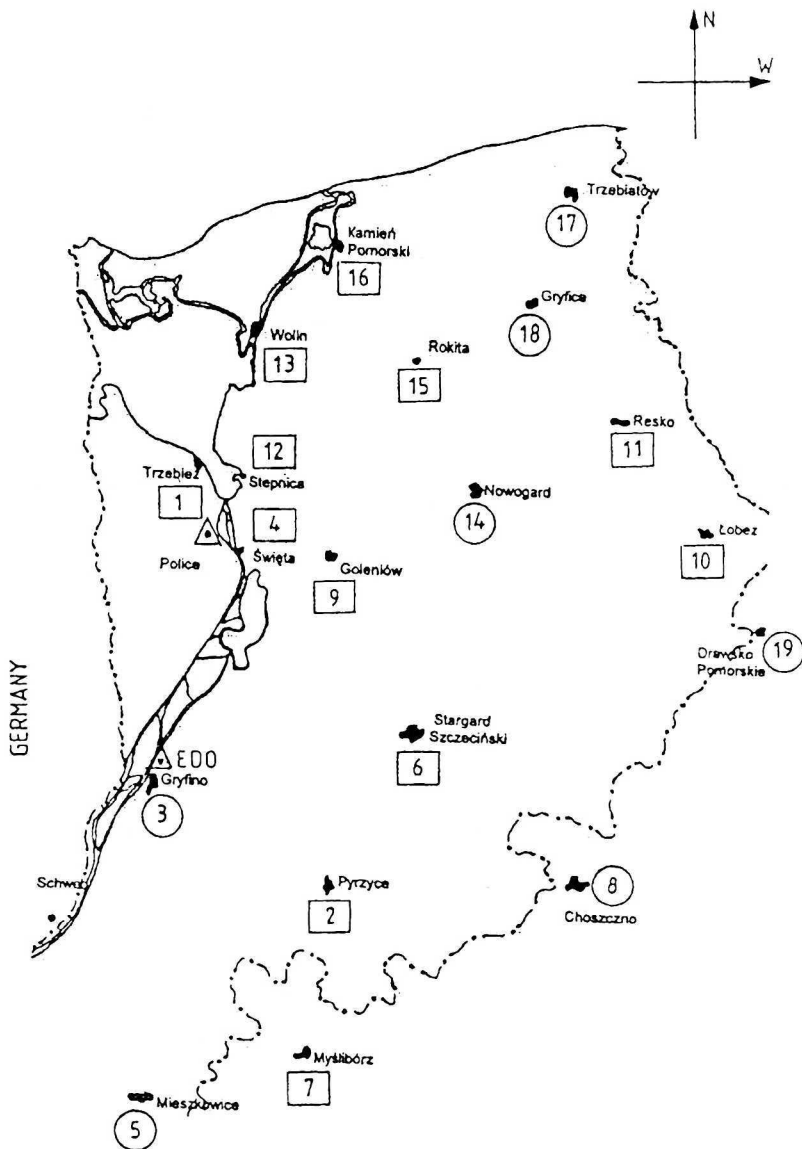
Dwie naważki po 10 mg każda rozpuszczano w 1 cm<sup>3</sup> 2 m HClO<sub>4</sub>. Próbkę wytrząsano w termomikserze w ciągu godziny w 95°C. Po ostudzeniu roztworu dodawano 4 cm<sup>3</sup> 1 m cytrynianu sodowego w celu obniżenia pH do 5,5. Z tak przygotowanego roztworu pobierano 1 cm<sup>3</sup> do polietylenowych kubeczków, dodawano 1 cm<sup>3</sup> buforu TISAB, mieszano plastikowym mieszadłem i oznaczano zawartość fluoru metodą potencjometryczną z zastosowaniem elektrody jonoselektywnej. Każdą próbkę oznaczano dwukrotnie, a w przypadku, gdy błąd był większy niż 10% oznaczenia powtarzano. Wynik końcowy stanowiła wartość średnia z dwóch oznaczeń.

Dla każdego rejonu wykonano serię pomiarów oznaczania fluorków w kości. Po statystycznej ocenie wyników rejonu uszeregowano według malejącej zawartości fluoru w kościach. W rezultacie otrzymano wykres przedstawiony na rysunku 2. Na osi x odłożono kolejne oznaczenia zawartości fluoru, a w opisie rysunku podano zbiory danych dla każdego rejonu. Linia ciągła pokazuje trend zmian zawartości fluoru w kościach rogaczy w uszeregowanych rejonach.

Widać, że wyniki pomiarów wyznaczają typową zmienną losową. Opisując je należy stosować właściwe metody matematyczne. Wykonanie obliczeń wymaga odpowiedniego przygotowania danych. Przykładowe dane do obliczeń matematycznych zestawiono w tabeli 1.

Zmiennymi określającymi są: rejon, któremu przypisano numer zgodnie z pokazanym na rysunku 2 porządkiem, odległość rejonu od źródła emisji fluoru w Policach (km) i położenie rejonu względem tego źródła emisji (kąt 1), odległość rejonu od EDO (km) i położenie względem Elektrowni Dolna Odra (kąt 2), wiek zwierząt (lata). Wraż-

liwość osobniczą w grupie wiekowej oznaczono numerami. Zmienną określaną jest zawartość fluoru w kościach.



Rys. 1. Obszar objęty badaniami

Δ – Źródła emisji związków fluoru

○ – Obszary z wysoką akumulacją fluoru u młodych osobników

□ – Obszary z niską akumulacją fluoru u młodych osobników

Area under examination.

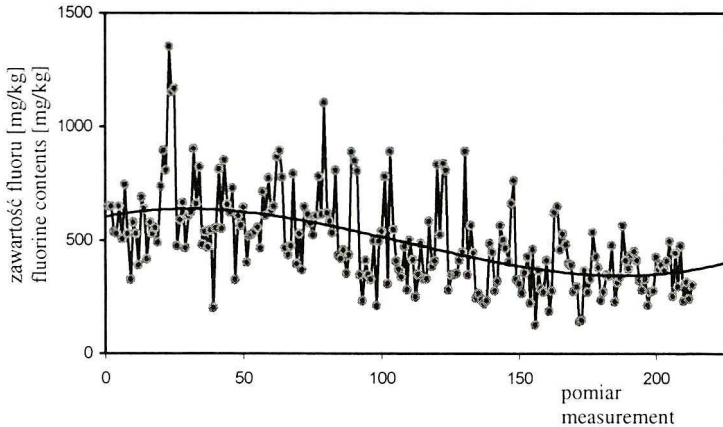
Δ – Sources of fluorine compounds emission.

○ – Areas with high fluorine accumulation of young individuals.

□ – Areas with low fluorine accumulation of young individuals.

Tabela 1. Przykładowe dane do obliczeń  
Example data for calculations

Lp.	Rejon Region	Odległość od Polic Distance from Police [km]	Kąt 1 Angle [stopnie] [degree]	Odległość Od EDO Distance from EDO [km]	Kąt 2 Angle [stopnie] [degree]	Wiek Age [lata] [years]	Osobnik Individual	Zawartość fluoru fluorine contents [mg/kg]
1	3	31	282	5	97	2	1	659,7
2	3	31	282	5	97	2	2	822,7
3	3	31	282	5	97	2	3	479,6
4	3	31	282	5	97	2	4	537,8
5	3	31	282	5	97	2	5	467,7
6	3	31	282	5	97	2	6	542,9
7	3	31	282	5	97	2	7	201,6
8	3	31	282	5	97	2	8	554,7
9	3	31	282	5	97	3	1	814,3
10	3	31	282	5	97	3	2	550,0
11	3	31	282	5	97	3	3	854,3
12	3	31	282	5	97	3	4	657,7
13	3	31	282	5	97	3	5	622,1
14	3	31	282	5	97	3	6	729,7
15	3	31	282	5	97	3	7	325,3
16	3	31	282	5	97	4	1	608,7
17	3	31	282	5	97	4	2	564,1
18	3	31	282	5	97	4	3	644,8
19	3	31	282	5	97	4	4	402,9
20	3	31	282	5	97	4	5	520,7
21	3	31	282	5	97	4	6	524,8
22	3	31	282	5	97	5	1	536,6
23	10	61	86	75,5	64	1	1	408,4
24	10	61	86	75,5	64	1	2	370,7
25	10	61	86	75,5	64	1	3	339,3
26	10	61	86	75,5	64	2	1	470,5
27	10	61	86	75,5	64	2	2	280,3
28	10	61	86	75,5	64	2	3	500,0
29	10	61	86	75,5	64	2	4	413,7
30	10	61	86	75,5	64	2	5	249,6
31	10	61	86	75,5	64	2	6	351,9
32	10	61	86	75,5	64	3	1	485,1
33	10	61	86	75,5	64	3	2	329,8
34	10	61	86	75,5	64	3	3	328,2
35	10	61	86	75,5	64	3	4	582,3
36	10	61	86	75,5	64	3	5	385,5
37	10	61	86	75,5	64	5	1	407,0
38	10	61	86	75,5	64	5	1	835,6
39	10	61	86	75,5	64	6	2	525,2
40	10	61	86	75,5	64	7	1	836,7
41	10	61	86	75,5	64	8	1	806,1



Rys. 2. Zawartość fluoru w kościach  
Fluorine contents in bones

## SIECI NEURONOWE JAKO METODA OBLICZEŃ

Pośród wielu rodzajów sieci neuronowych najczęściej są stosowane sieci jednokierunkowe wielowarstwowe MPL (Multilayer Perceptron), sieci o radialnych funkcjach bazowych (Radial Basis Function) oraz sieci GRNN (Generalized Regression Neural Networks). Sieci MLP, z punktu widzenia matematycznego, spełniają rolę aproksymacji stochastycznej funkcji wielu zmiennych, odwzorując zbiór zmiennych wejściowych  $x \in \mathbb{R}^N$  w zbiór zmiennych wyjściowych  $y \in \mathbb{R}^M$ .

W sieciach radialnych zbiór danych wejściowy w wyjściowy odwzorowuje się przez dopasowanie funkcji aproksymującej wielu zmiennych do wartości żądanych, czyli rozciągnięcie nad zbiorem uczącym hiperpłaszczyzny wielowymiarowej najlepiej w sensie statystycznym dopasowującej się do wartości żądanych.

Sieci neuronowe GRNN najogólniej są stosowane do rozwiązywania problemów regresji. Mogą być użyte w przypadkach z dowolnym rodzajem zmiennej wyjściowej, a najczęściej z pojedynczym wyjściem wyrażonym numerycznie.

Podczas obliczeń stosowano program STATISTICA Neural Networks. W tej pracy zachowano oznaczenia przyjęte w tym programie. Pierwszym etapem obliczeń jest wygenerowanie sieci neuronowej. Sieć kreowano stosując narzędzie IPS (Intelligent Problem Solver). Podstawową cechą sieci neuronowej jest jej zdolność do uogólnienia. Uzyskuje ją podczas nauczania na podstawie zbioru danych. Zbiór danych wejściowych jest rozdzielany na dwa podzbiory: zbiór uczący  $Tr$ , z którego dodatkowo jest wydzielany podzbiór  $Ve$  stosowany do kontroli stopnia nauczania sieci, oraz zbiór testujący  $Te$ .

Sieć zostaje poddana uczeniu na zbiorze  $Tr$  z bieżącym sprawdzaniem stopnia nauczania na zbiorze  $Ve$ . Odzworowanie zbioru  $Tr$  przez sieć jest miarą zdolności zapamiętywania danych uczących, natomiast zdolność do generowania własnych rozwiązań, dla danych należących do zbioru  $Te$ , na których sieć nigdy nie pracowała jest miarą zdolności uogólnienia.

Mierniki określające jakość sieci wyznaczane są niezależnie dla każdego zbioru. W programie STNN, w arkuszu zawierającym statystyki regresyjne są podawane: Data Mean – wartość średnia wyznaczana na podstawie rzeczywistych wartości zmiennej opisywanej; Data S.D. – odchylenie standardowe wyznaczane na podstawie rzeczywistych wartości zmiennej opisywanej; Error Mean – błąd średni obliczany pomiędzy rzeczywistą i obliczoną wartością zmiennej opisywanej; Abs.E.Mean – wartość średnia z modułów błędów liczonych jako różnica pomiędzy wartością rzeczywistą i obliczoną zmiennej opisywanej; Error S.D. – odchylenie standardowe błędów; S.D. Ratio – iloraz odchylenia standardowego błędów i odchylenia standardowego wartości zmiennej opisywanej (tzn. Error S.D./Data S.D.); Correlation – współczynnik korelacji Pearsona liczony pomiędzy rzeczywistymi i obliczonymi przez model, tzn. wybraną sieć, wartościami zmiennej opisywanej.

Oceniając model szczególną uwagę należy zwrócić na S.D. Ratio i Correlation. Dla bardzo dobrego modelu pierwszy miernik przyjmuje wartości z zakresu  $0 \div 0,1$ , a drugi z przedziału  $0 \div 1$ . Wyższa wartość miernika drugiego świadczy o lepszej jakości modelu.

### ANALIZA WRAŻLIWOŚCI PARAMETRYCZNEJ

Każda składowa wektora danych wejściowych (określających) zawiera różną dawkę informacji, w zróżnicowany sposób wpływając na wartości sygnałów wyjściowych. Przy modelowaniu złożonych procesów, kiedy niejasny jest wpływ poszczególnych czynników, powstaje potrzeba selekcji tych, które są istotne i pominięcie nieistotnych. Taką decyzję podejmuje się na podstawie analizy wrażliwości parametrycznej. Podczas analizy wrażliwości parametrycznej następuje testowanie jak sieć neuronowa dałaby sobie radę jeżeli każda ze zmiennych określających byłaby nieznaną.

Podczas obliczeń zbiorów danych jest podawany na sieć po eliminacji kolejno zmiennych. Określany jest błąd dla każdego przypadku. Jeżeli zostanie usunięta ważna zmienna, wtedy błąd wzrasta znacznie. Program STNN szereguje automatycznie zmienne określające w porządku ważności. Należy zauważyć, że mamy tendencję wrażliwość parametryczną interpretować jako wskaźnik relatywnej ważności parametrów. W rzeczywistości ważność parametrów określana jest dla danej sieci. Zwykle trzeba stosować kilka sieci, aby właściwie ocenić ważność parametrów. Wnioski formułuje się na podstawie zgodnych wyników dla kilku sieci.

Trzeba podkreślić, że stosowanie sieci neuronowych wymaga licznych zbiorów danych doświadczalnych. Jest to szczególnie istotne przy dużej zmienności badanych funkcji. Dlatego często wyniki pomiarów trzeba rozszerzać. Przy liniowych zmianach w obszarze danego piksu odcinki pomiędzy wartością najwyższą i najniższą można podzielić na mniejsze. Sposób rozszerzenia zbioru danych opisano w pracy [15].

### WYNIKI I DYSKUSJA

Obliczenia rozpoczęto od badania wrażliwości parametrycznej. Zastosowano cały zbiór danych. Rozszerzano go czterokrotnie. Testowane podczas tych obliczeń sieci zestawiono w tabeli 2. Wyniki analizy wrażliwości parametrycznej podano w tabeli 3. Ten sam rezultat otrzymano dla trzech ostatnich sieci z tabeli 2. Widać, że w największym stopniu

na akumulację fluoru w kościach rogaczy wpływa wiek zwierząt, następnie rejon, (tzn. warunki bytowania), potem wrażliwość indywidualna. Pozostałe parametry mają ważne znaczenie dla identyfikacji największych źródeł emisji związków fluoru w badanym regionie. Znaczny wpływ na akumulację fluoru mają odległość od źródeł emisji i kąty obliczone względem źródeł emisji. Wskazuje to, że istotnie omawiane dwa zakłady są głównie odpowiedzialne za skażenie związkami tego pierwiastka obszarów Pomorza Zachodniego.

Tabela 2. Zestawienie testowanych sieci  
List of tested networks

Parametr Parameter	Typ Type	Błąd Error	Wejście Inputs	Neurony ukryte Hidden	Współczynnik S.D. Performance
21	GRNN	87,22072	7	421	0,459043
22	MLP	101,4599	2	1	0,625293
23	RBF	97,49175	6	11	0,600578
24	RBF	96,33763	6	12	0,593664
25	RBF	95,874	6	11	0,590735
26	MLP	91,20418	2	2	0,562081
27	MLP	89,87499	2	3	0,55387
28	MLP	86,69198	7	13	0,533084
29	GRNN	74,92732	7	354	0,456673
30	GRNN	74,45087	7	354	0,454065
31 *	GRNN	74,40618	7	354	0,455683

Tabela 3. Wyniki analizy wrażliwości parametrycznej  
Results of parametrical sensitivity analysis

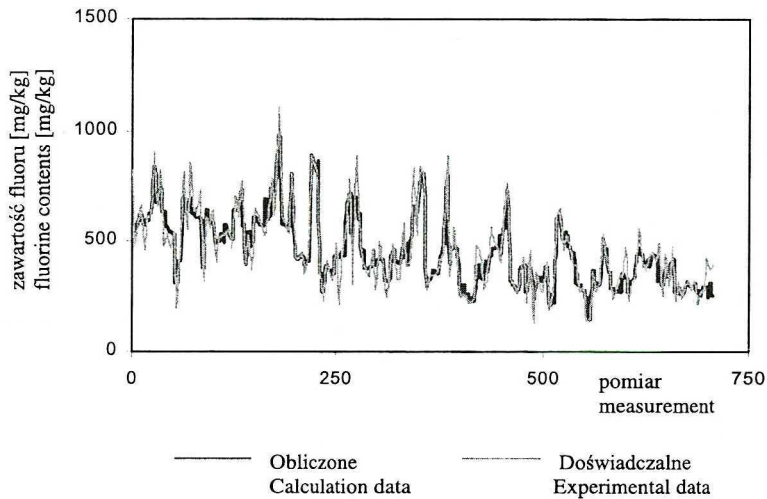
Parametr Parameter	Rejon Region	Police	Kąt 1 Angle	EDO	Kąt 2 Angle	Wiek Age	Osobnik Individual
Ranking Rank	2	5	4	7	6	1	3
Błąd Error	93,63	72,59	76,06	48,63	67,11	141,33	84,37
Współczynnik Ratio	2,32	1,79	1,88	1,20	1,66	3,50	2,09
Ranking Rank	2	4	5	6	7	1	3
Błąd Error	109,34	90,44	88,07	85,76	80,81	138,98	95,78
Współczynnik Ratio	1,469	1,215	1,183	1,152	1,086	1,867	1,287



W tabeli 4 zestawiono charakterystyki statystyczne dla wybranej, ostatniej sieci z tabeli 3, tzn. modelu najlepiej opisującego badany proces. Potwierdzają to dane przedstawione na rysunku 3, gdzie porównano wartości doświadczalne i obliczone. Otrzymano dobrą zgodność. To oznacza, że przyjętych siedem parametrów dobrze opisuje akumulację fluoru w kościach populacji rogaczy na obszarze Pomorza Zachodniego.

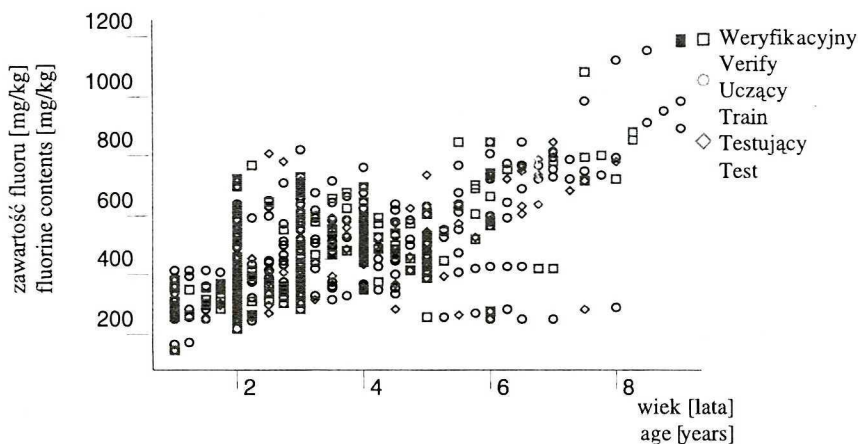
Tabela 4. Ocena statystyczna wyników  
Statistic estimate of results

Parametr Parameter	Tr.	Ve.	Te.
Wartość średnia Data Mean [mg/kg]	469,7	447,5	460,1
Odchylenie standardowe Data S.D.	166,7	162,7	166,2
Błąd średni Error Mean	-0,25	-8,32	-0,56
Odchylenie średnie błędów Error S.D.	40,4	74,1	61,3
Wartość średnia z modułu błędu Abs E. Mean	27,8	53,5	45,9
Współczynnik S.D. S.D. Ratio	0,2423	0,4556	0,3691
Korelacja Correlation	0,9709	0,8906	0,9293



Rys. 3. Porównanie wyników doświadczalnych i obliczonych  
Comparison of experimental and calculated results

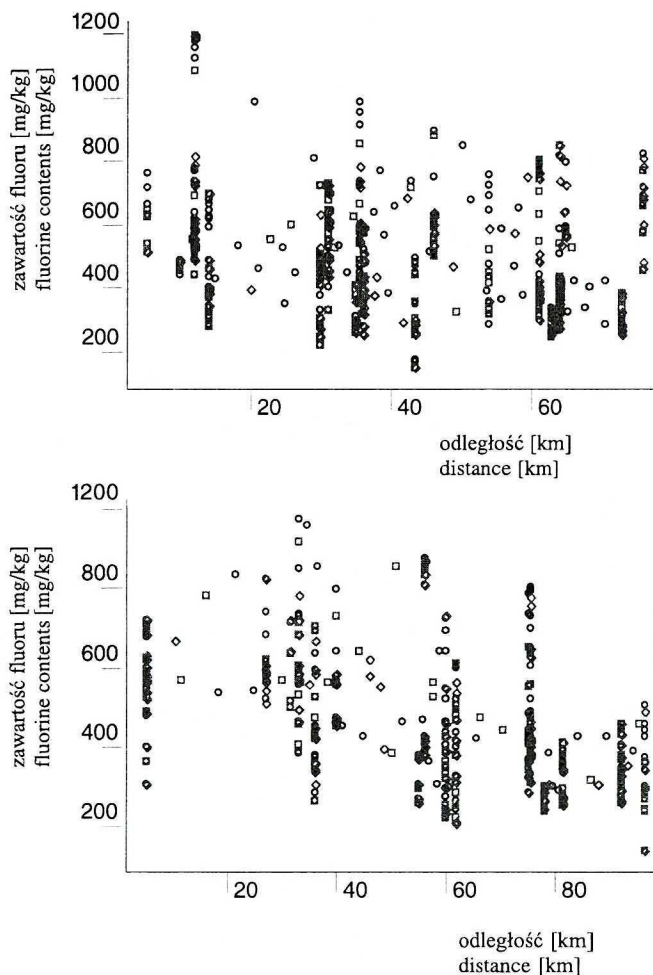
Przeprowadzone obliczenia umożliwiają także ocenę wpływu każdego parametru oddzielnie. Na rysunku 4 przedstawiono dla przykładu zależność zawartości fluoru w kościach od wieku rogaczy. Natomiast na rysunku 5 od odległości od źródeł emisji. Należy zauważyć, że rozmieszczenie punktów na wykresach nie wynika z rozrzutu, identyfikowanego z dokładnością opisu, ale jest rezultatem istotnego wpływu na opisywany proces pozostałych parametrów.



Rys. 4. Zależność zawartości fluoru w kościach rogaczy od wieku  
Dependence of fluorine contents in fallow deers bones on age

Analizując sposób rozmieszczenia punktów na rysunku 4 można stwierdzić, że akumulacja fluoru w kościach rogaczy wzrasta z wiekiem. Widać też, że już osobniki młode w znacznym stopniu przyswajają fluor. Natomiast z rysunku 5 wynika, że ze wzrostem odległości od źródeł emisji zawartość fluoru najpierw wzrasta, a potem maleje. Jest to zgodne z teorią rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym emitowanych ze źródeł punktowych [13].

Oceniając wyniki analizy zależności funkcji określanej od poszczególnych parametrów oddzielnie można odnieść wrażenie, że możliwości sieci w tym wypadku są ograniczone. Należy wyraźnie podkreślić, że zaobserwowane ograniczenia wynikają głównie ze sposobu prowadzenia obliczeń. Zilustrujemy to na przykładzie badania zależności akumulacji fluoru od wieku rogaczy. Z danych tabeli 1 widać, że dla każdego rejonu można badać zależność akumulacji fluoru tylko od wieku i wrażliwości indywidualnej rogaczy. W tabeli 5 przedstawiono dla przykładu wyniki analizy wrażliwości parametrycznej dla czterech wybranych rejonów. Podczas obliczeń zbiory danych rozszerzono. We wszystkich przypadkach otrzymano ten sam rezultat. Wskazuje on, że wiek i wrażliwość indywidualna mają istotne znaczenie dla procesu akumulacji fluoru. Na rysunkach 6, 7 przedstawiono wykresy ilustrujące, dla wybranych czterech rejonów, zależność akumulacji fluoru od wieku. Przebiegi funkcji są teraz dokładnie wyznaczane przez punkty.



Rys. 5. Zależność zawartości fluoru w kościach od odległości od źródeł emisji.  
Dependence of fluorine contents in bones on distance from emission sources.

Na podstawie uzyskanych rezultatów omawiane rejonu można podzielić na dwie grupy wiekowe. W pierwszej młode osobniki przyswajają znaczne ilości fluoru (do około 2,5 lat), potem następuje spadek zawartości fluoru w kościach, ponowny wzrost i spadek u starszych osobników. W drugiej grupie rejonów obserwuje się stały wzrost zawartości fluoru z wiekiem. Wykorzystując te wyniki na rysunku 1 obszary podzielono na dwie kategorie.

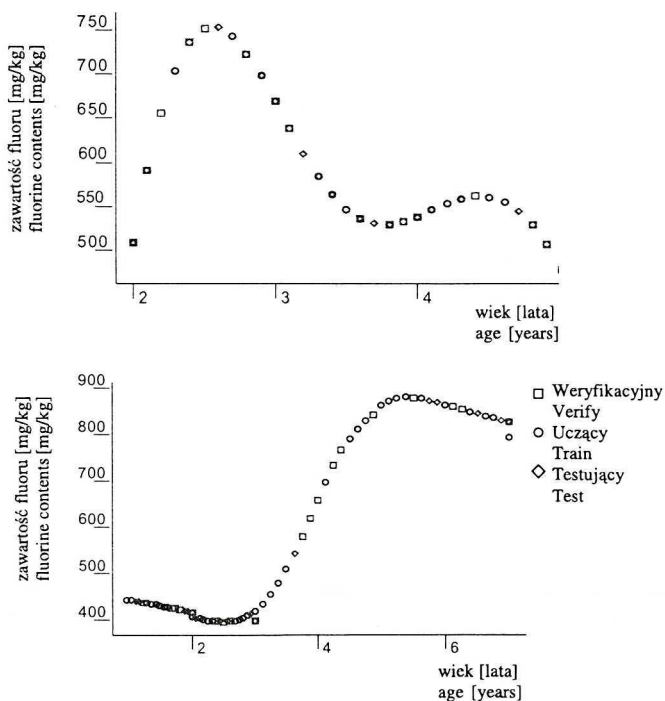
Ocenę statystyczną modeli uzyskanych dla rejonów zamieszczono w tabeli 6. Mierniki S.D. Ratio i Correlation pokazują, że opracowane modele dobrze ilościowo opisują zależność akumulacji fluoru od wieku i cech osobniczych zwierząt w rejonach. Interesująca jest także analiza wartości średnich. W tabeli 6 zestawiono rejonu w kolejności ustalonej na podstawie oceny statystycznej metodami tradycyjnymi. Natomiast

Tabela 5. Analiza wrażliwości parametrycznej dla wieku i cech osobniczych  
 Parametrical sensitivity analysis for age and features of individuals

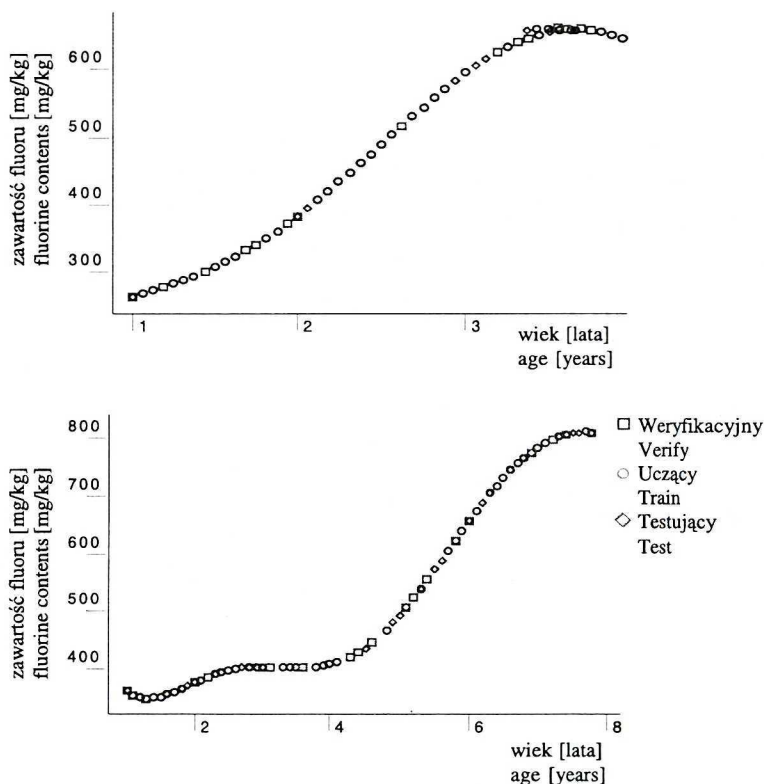
Parametr Parameter	Rejon District							
	Gryfino		Choszczno		Goleniów		Łobez	
	Wiek Age	Osobnik Individual	Wiek Age	Osobnik Individual	Wiek Age	Osobnik Individual	Wiek Age	Osobnik Individual
Ranking Rank	1	2	1	2	1	2	1	2
Błąd Error	153,36	106,65	226,98	27,69	168,05	133,29	144,29	99,51
Współczynnik Ratio	3,050	2,121	10,622	1,296	2,356	1,868	5,080	3,503
Ranking Rank	1	2	1	2	1	2	1	2
Błąd Error	165,9	146,2	219,12	24,58	164,51	152,70	154,50	97,72
Współczynnik Ratio	2,05	1,81	14,87	1,67	1,73	1,61	4,92	3,11
Sieć Network	GRNN 2/169*		MLP 2/8		GRNN 2/97		GRNN 2/145	

\* liczba danych wejściowych / liczba neuronów ukrytych

\* the numbers of inputs data/ the numbers of hidden neurons



Rys. 6. Zależność zawartości fluoru w kościach rogaczy od wieku  
 Dependence of fluorine contents in fallow deer bones on age



Rys. 7. Zależność zawartości fluoru w kościach rogowca od wieku  
Dependence of fluorine contents in fallow deer bones on age

Tabela 6. Zestawienie wyników analizy regresji dla rejonów. Parametry, wiek i cechy osobnika  
List of regression analysis results for regions. Parameters, age and individual features

Lp.	Rejon, sieć Region, network	Wartość średnia Data mean [mg/kg]			Współczynnik S.D. S.D. Ratio			Korelacja Correlation		
		Tr	Ve	Te	Tr	Ve	Te	Tr	Ve	Te
1	Trzebież; MPL2/13*	635,8	683,1	676,0	0,471	0,294	0,413	0,8823	0,9564	0,9104
2	Pyrzyce; RBF2/8	623,4	611,4	575,1	0,106	0,355	0,275	0,9943	0,9476	0,9629
3	Gryfino; GRNN2/169	562,7	579,3	585,5	0,433	0,619	0,473	0,9010	0,7850	0,8890
4	Choszczno; MLP2/8	569,2	587,0	572,8	0,105	0,076	0,111	0,9944	0,9971	0,9938
5	Goleniów; GRNN2/97	452,9	477,8	446,2	0,422	0,564	0,581	0,9066	0,8308	0,8494
6	Łobez; GRNN2/145	452,0	478,0	464,4	0,189	0,204	0,231	0,9819	0,9789	0,9729
7	Trzebiatów; GRNN2/113	374,2	364,8	369,9	0,217	0,310	0,272	0,9758	0,9534	0,9653

\* wejście / neurony ukryte  
input / hidden neurons

według danych otrzymanych z zastosowaniem sieci neuronowych rejon czwarty powinien być umieszczony przed rejonem trzecim. Oznacza to, że sieci neuronowe pozwalają precyzyjniej klasyfikować zbiory danych.

## PODSUMOWANIE

Emisje przemysłowe narażają ludzi i zwierzęta na działanie rozmaitych substancji toksycznych. W tej pracy badano wpływ emisji związków fluoru na Pomorzu Zachodnim na podstawie oceny zawartości fluoru w kościach rogaczy. Otrzymano zależności w postaci zmiennych losowych. Do ich opisu zastosowano sieci neuronowe MLP, RBF i GRNN. Za zmienne określające przyjęto wiek i cechy indywidualne zwierząt, właściwości rejonów określające warunki ich bytowania oraz położenie rejonów względem źródeł emisji. Na podstawie analizy wrażliwości parametrycznej ustalono, że wszystkie wymienione zmienne określające w sposób istotny wpływają na badany proces. Otrzymano także dobry model, w postaci sieci neuronowej, opisujący ilościowo zależność akumulacji fluoru w kościach rogaczy od parametrów.

Sposób oceny wpływu poszczególnych zmiennych przedstawiono na przykładzie badania zależności akumulacji fluoru od wieku zwierząt. Wykazano przydatność sieci neuronowych do opisu oddziaływania emisji przemysłowych na populację zwierząt wolnożyjących, pozostających w ich zasięgu. Wyrażamy przekonanie, że zaproponowana metoda będzie użyteczna przy ocenie wpływu procesów skażenia środowiska wywołanych emisjami przemysłowymi na ludzi i zwierzęta zasiedlające obszary pozostające w ich zasięgu.

## LITERATURA

1. Białas B.: *Wpływ wody skażonej fluorem o stężeniu 10 mg F/dcm<sup>3</sup> na kośćiec szczura w różnych okresach życia*, Pol. Tyg. Lek., **19**, 545–548 (1985).
2. Bratter P., D. Gawlik, J. Lansch, U. Rosik: *On the distribution of trace elements in human skeleton*, Journal of Radioanalytical Chemistry, **37**, 393–403 (1977).
3. Gumińska M.: *Wpływ fluoru na metabolizm*, Czasopismo Stomatologiczne, **369**, 669–673 (1983).
4. Gumińska M.: *Biochemiczne mechanizmy działania fluoru na żywy organizm*, Folia Med. Cracoviensa, **23**(3–4), 305–316 (1981).
5. Indulski J.: *Kryteria zdrowia środowiska*, t. 36 – Fluor i fluorki, PZWL, Warszawa 1989.
6. Krook I., R. Minor: *In vitro adsorbance of fluoride by bone*, Fluoride, **29**, 3, 135–138 (1996).
7. Machoy Z., M. Poczatek, E. Dąbkowska: *Czy można prognozować, które z enzymów podlegają interakcji z fluorem*, Materiały XIX Zjazdu Polskiego Towarzystwa Biochemicznego, Szczecin 1988.
8. Machoy Z.: *Czy istnieje głód fluorowy u ludzi*, Materiały Sympozjum Metabolizm Fluoru'88, Polskie Towarzystwo Biochemiczne, Szczecin 1988.
9. Machoy Z.: *Fluor i jego wpływ na zwierzęta i człowieka. Szkodliwość zanieczyszczeń chemicznych dla człowieka i zwierząt*, Wydawnictwo PAN, Wrocław-Warszawa-Kraków, 1990.
10. Machoy Z., J. Straszko: *Accumulation of bone fluoride in fallow deer from areas near a coal power plant*, Environ Sci., **3**, 149–167 (1987).
11. Nowicka W.: *Zawartość fluoru, wapnia i magnezu w zuchwie jelenia europejskiego (cervus elaphus) z wybranych terenów Polski*, Praca magisterska wykonana w Wyższej Szkole Pedagogicznej w Słupsku, Słupsk 1988.
12. Osowski S.: *Sieci neuronowe*, WNT Warszawa 1996.
13. Paterkowski W., A. Wolnowska: *Ocena wybranych modeli rozprzestrzeniania zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym*, Ochrona Powietrza, **2**, 34–44 (1997).

14. P a u l o L. A.: *Analiza pól imisji zespołów źródeł punktowych*, praca doktorska wykonana w Politechnice Szczecińskiej, Szczecin 1996.
15. S t r a s z k o J., D. D z i u b a k i e w i c z: *Analiza danych z automatycznych stacji monitoringu powietrza*, Inż. Chem. i Proc., **21**, 769–781 (2000).
16. Z a n n e t t i P.: *Air pollution modeling. Theories computational metod and avoible soffware*, Van Nostrad Reinhal, New York 1990.

Wpłynęło: 13 lutego 2001, zaakceptowano do druku: 26 czerwca 2001.