

STRUKTURA CZASOWA WYBRANYCH SERII POMIAROWYCH ZINTEGROWANEGO MONITORINGU ŚRODOWISKA PRZYRODNICZEGO

Alfred Stach

Stach A., 2002: Struktura czasowa wybranych serii pomiarowych Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego, (*Time structure of selected Integrated Monitoring of Environment data series*), Regionalny Monitoring Środowiska Przyrodniczego, Nr 3, s. 61–68, Kieleckie Towarzystwo Naukowe, Kielce.

Zarys treści: W niniejszym opracowaniu zastosowano analizę semiwariancji do identyfikacji ukrytej struktury czasowej trzech typów danych monitoringowych: średniej dobowej temperatury gleby na głębokości 50 cm, dobowej skumulowanej średniej koncentracji gazowych i aerozolowych zanieczyszczeń powietrza oraz ważonej średniej miesięcznej zanieczyszczeń opadów atmosferycznych. Dane te różnią się istotnie skalą zmienności czasowej mierzonego parametru, frekwencją pomiarów i stopniem przetworzenia surowych danych pomiarowych. Zmienność czasowa temperatury gleby była zdominowana składową sezonową, którą modelowano przy użyciu funkcji cyklicznej czasu. Analiza semiwariancji wykonana na resztach z modelu cyklicznego ujawniła krótkookresową strukturę autokorelacji o zasięgu 12 i 51 dni. Jest to efekt przewodnictwa cieplnego gleby i zróżnicowania tempa nagrzewania i ochładzania gleby. Połączenie podejścia deterministycznego (funkcja sezonowa) i probabilistycznego (semivariogram) umożliwia szacowanie brakujących danych na poziomie precyzji $0,1^{\circ}\text{C}$, a więc zbliżonym do dokładności samego pomiaru. Dane pomiarów składników rozpuszczonych w opadach atmosferycznych wykazują trzy typy struktur czasowych: sezonowość, trend lub brak autokorelacji (zmienne „chaotyczne”). W przypadku składników zanieczyszczeń powietrza stwierdzono bardzo podobne, silne, krótkookresowe zależności w zakresie 3,1 do 3,9 i 7,5 do 10 dni. Jest to najprawdopodobniej efekt typowej frekwencji zmian pogody w Polsce. Średnio co trzy, cztery dni (100 razy w roku) przechodzi nad danym miejscem front atmosferyczny i napływają nowe, różniące się właściwościami fizyko-chemicznym masy powietrza. Całkowita wymiana powietrza na danym terenie następuje po dwóch przejściach frontu atmosferycznego. Zmienność w trakcie krótszym od odstępu próbkowania (co dzień) stanowi od 25 do 35% całkowitej zmienności mierzonych parametrów zanieczyszczeń powietrza. Analiza semiwariancji może być również pomocna przy wybieraniu optymalnej frekwencji pomiarów, redukując ilość danych nadmiarowych.

Alfred Stach, Instytut Badań Czwartorzędu i Geoekologii UAM, ul. Fredry 10, 61-701 Poznań.
frdstach@amu.edu.pl

1. Wprowadzenie

Charakterystyczną cechą większości zjawisk przyrodniczych, które są opisywane za pomocą pomiarów wybranych parametrów, jest istnienie autokorelacji (ryc. 1). Wyniki pomiarów które sąsiadują ze sobą w czasie są zazwyczaj bardziej do siebie podobne, niż wyniki pomiarów bardziej odległych. Zmniejszanie się podobieństwa ma najczęściej charakter wykładniczy (ryc. 1). Jest to skutkiem „bezwładności” i „samoregulacji” systemów przyrodniczych, które na bodziec reagują z pewnym opóźnieniem i stosunkowo powoli. Wyniki pomiarów nie można traktować zatem jakby to były niezależne zdarzenia losowe.

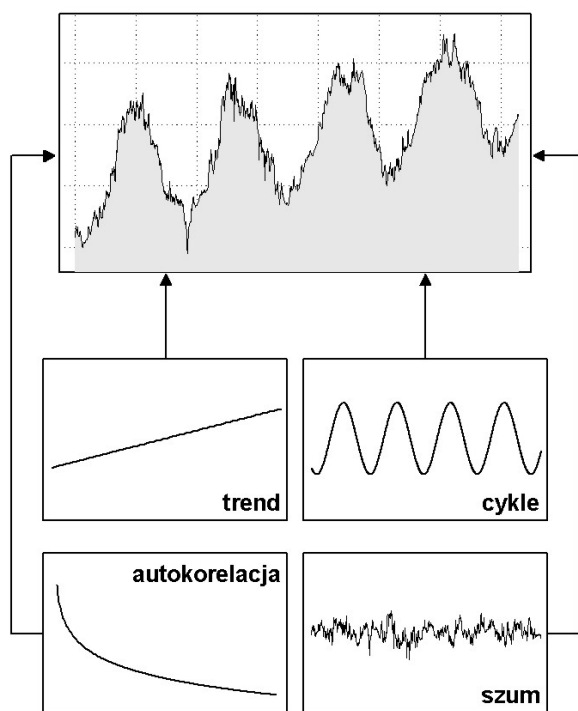
Zjawisko autokorelacji czasowej często współlistnieje z cyklicznością w różnych skalach czasu. Temperatura powietrza, na przykład, zmierzona o godzinie 12 jest bar-

dziej zbliżona do tej którą zmierzono o godzinę wcześniej, niż do tej którą zmierzono o 4 godziny wcześniej. Lecz ta sama wartość wykazuje najczęściej większe podobieństwo do wyniku pomiaru wcześniejszego o dobę, niż o 8 – 14 godzin.

Istnienie autokorelacji czasowej jest oczywiste w stosunku do najczęściej mierzonych parametrów stanu fizycznego atmosfery i hydrosfery, takich jak ciśnienie atmosferyczne, temperatura powietrza, przepływ i temperatura wody w ciekach. Są to parametry zjawisk mających charakter ciągły. Znacznie większe wątpliwości budzi istnienie autokorelacji w przypadku zjawisk nieciągłych czasowo (np.: opady, pokrywa śnieżna itp.), oraz charakterystyk jakościowych, takich jak skład chemiczny.

Istnienie właściwości autokorelacji przebiegów czasowych może być wykorzystane do weryfikacji ciągów pomiarowych poprzez identyfikację wartości, które naruszają

ustalone kryterium podobieństwa do wyników pomiarów sąsiednich. Może być również podstawą szacowania wartości pomiarów brakujących, oraz ułatwiać wykrywanie ukrytej struktury przebiegów czasowych (trendów, cykliczności).



Ryc. 1. Dekompozycja serii pomiarowej na składowe: trend, cykliczność, autokorelację i szum (składnik losowy).
Fig. 1. Decomposition of measuring series into components: trend, cycle, autocorrelation and noise (random component)

2. Metodyka

Bardzo wartościowa, lecz stosunkowo mało wykorzystywana do badania związków czasowych, jest analiza semiwariancji (ETL 1997, Goovaerts 1997, Isaaks, Srivastava 1989, Oliver i in. 1989). Jej podstawą jest określenie wartości semiwariancji obliczanej jako połowa średniego kwadratu odchyłeń między wartościami parametru w momencie t i momencie $t+h$ [1]:

$$\hat{\gamma} = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [z(u_{\alpha}) - z(u_{\alpha} + h)]^2 \quad [1]$$

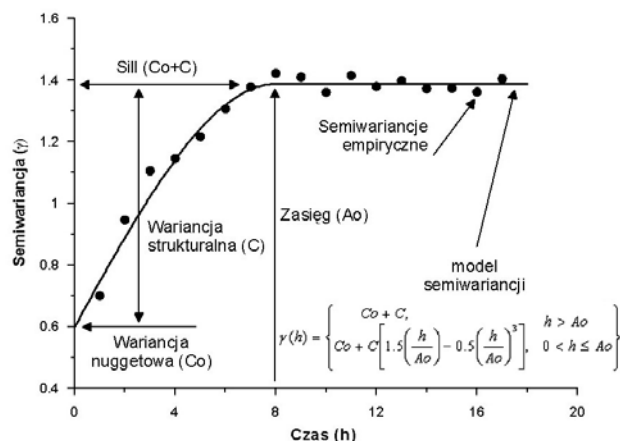
gdzie:

- $N(h)$ to liczba par danych dla danego odstępu czasu h między nimi,
- $z(u_{\alpha})$ dla $\alpha = 1, 2, \dots, n$ oznaczają zbiór n pomiarów danego parametru,
- u_{α} jest wektorem terminów wykonywanych pomiarów.

Wartość semiwariancji obliczana jest dla wszystkich par pomiarów występujących w odstępie czasu $h, 2h, 3h, \dots, nh$. Uzyskane wartości nanoszone są na wykres zależności $h-\gamma$ (odstęp - semiwariancja, ryc. 2). Najważniejsze informacje które można uzyskać z wykresu to:

- Zasięg (A_0), określający odcinek czasu w którym występuje autokorelacja między pomiarami,

- Wariancja nuggetowa (C_0), czyli teoretyczne różnica między pomiarami wykonywanymi w tym samym momencie czasu; składa się nań wartość błędu pomiarowego, oraz krótkookresowa zmienność występująca w skali czasu krótszej niż odstęp kolejnych pomiarów,
- Wariancja strukturalna (C), czyli wartość wzrostu semiwariancji od poziomu nuggetowego do górnej granicy zasięgu danych skorelowanych (sill, $C_0 + C$). Wariancje nuggetowa i strukturalne wyrażone są w jednostkach pomiarowych podniesionych do kwadratu.



Ryc. 2. Terminologia używana przy analizie semiwariancji.
Fig. 2. Nomenclature used in semivariance analysis

Zaletą analizy semiwariancji jest możliwość operowania na danych z pomiarów nieregularnych, a także danych jakościowych (danych kategoryzowanych lub wskaźnikowych). Możliwe jest również uwzględnianie drugiej, lub większej ilości zmiennych skorelowanych czasowo. Model semiwariancji jest podstawą metody estymacji zwanej krigingiem, a która może służyć oszacowania wartości pomiarów brakujących.

3. Analizowane dane pomiarowe ZMŚP

Do analizy wybrano przykłady 3 różnych typów danych pomiarowych zbieranych w ramach ZMŚP i gromadzonych w Centralnej Bazie Danych:

- Charakteryzujących się dużą bezwładnością, wysoką frekwencją pomiarów i niewielkim stopniem przetworzenia oryginalnych wyników pomiarów. Są to średnie dobowe temperatury gleby mierzone na głębokości 50 cm na Stacji Bazowej Storkowo w latach 1992-1997 (ryc. 3).
- Cechujące się, w przeciwieństwie do poprzednich, dużą zmiennością (chaotycznością), lecz podobną frekwencją pomiarów i brakiem przetworzenia oryginalnych wyników pomiarów (dane „surowe” z wyjątkiem O_3). Są to wyniki monitoringu stężeń gazowych i aerozolowych zanieczyszczeń powietrza ze Stacji Bazowej Borecka z lat hydrologicznych 1995-1998 (ryc. 4). Analizowane dane obejmują siarkę dwutlenku siarki ($S-SO_2$, gaz) i siarczanów ($S-SO_4$, aerozol), azot dwutlenku azotu ($N-NO_2$, gaz), azot azotanowy ogólny (HNO_3 , gaz i NO_3 , aerozol), azot amoniakalny ogólny (NH_3 , gaz i NH_4 , aerozol) oraz ozon przyziemny (O_3).

– Charakteryzujące się niską frekwencją pomiarów i dużym stopniem przetworzenia oryginalnych danych pomiarowych. Do tej grupy należą średnie ważone miesięczne stężenia składników rozpuszczonych w opadach atmosferycznych (opad całkowity) ze Stacji Bazowej Storkowo z okresu od grudnia 1993 do października 1998 (ryc. 5). W skład tego zbioru danych wchodzi stężenia jonów wodorowych (wyrażone w postaci pH), chlorkowych (Cl), siarki siarczanów (S-SO₄), azotu azotanów (N-NO₃), azotu amonowego (N-NH₄), fosforu fosforanów (P-PO₄), wapnia (Ca), magnezu (Mg), sodu (Na), potasu (K), manganu (Mn) i cynku (Zn), oraz przewodność elektrolityczna właściwa (CTY).

Metodyki pomiarowo-analityczne wyżej wymienionych parametrów ZMŚP są zawarte w publikacjach Janiszewskiego (1988), Kostrzewskiego i in. (1995) oraz Śnieżka i Degórskiej (1995). Na podkreślenie w tym kontekście wymaga różnica między pierwszym zbiorem danych, a pozostałymi. Pomiar temperatury gleby jest prosty, a używany zazwyczaj przyrząd pomiarowy – rtęciowy termometr kolankowy – nieskomplikowany. Błędne pomiary najczęściej mogą być spowodowane pomyłką obserwatora lub osoby archiwizującej dane. Grube błędy można ze względu na naturę mierzonych zjawisk łatwo zidentyfikować. W przypadku pozostałych dwóch zbiorów danych procedura pomiarowo-analityczna jest wielostopniowa, skomplikowana, wymagająca wiedzy fachowej i dużego doświadczenia. Źródłem błędów może być niewłaściwe pobranie i przechowywanie próbek, awarie aparatury, błędy personelu w trakcie analiz chemicznych

i archiwizacji danych. Duża naturalna zmienność badanych parametrów utrudnia identyfikację nawet znacznych błędów.

Charakterystykę statystyczną analizowanych serii danych zawarto w tabeli 1. Na uwagę zasługuje fakt, że oprócz stężeń ozonu wszystkie pozostałe serie wykazują asymetrię prawostronną (skośność większa od zera). Szczególnie asymetryczne (Sk>5) są rozkłady stężeń magnezu i potasu w opadzie atmosferycznym w Storkowie. Poza temperaturą gleby i stężeniami chlorków w opadach w Storkowie oraz stężeniami ozonu w powietrzu w Puszczy Boreckiej wszystkie pozostałe zbiory danych charakteryzują się rozkładami leptokurtycznymi (kurtoza większa od zera). Najbardziej skoncentrowane (kurtoza >10) są stężenia H⁺, Mg, K i Mn w opadach oraz N-NO₂ i HNO₃+NO₃ w powietrzu.

Jako miarę zmienności analizowanych serii pomiarowych wykorzystano Średni Względny Gradient (WSG) obliczany w postaci średniej różnicy między kolejnymi pomiarami wyrażonej w % maksymalnej amplitudy w całym zbiorze pomiarów [2]:

$$WSG = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n |x_i - x_{i-1}| \cdot 100 \quad (x_{\max} - x_{\min}) \quad [2]$$

gdzie:

WSG – względny średni gradient,
n – liczebność analizowanej serii pomiarowej,
x_{max}, x_{min} – maksimum i minimum analizowanej serii pomiarowej.

Tab. 1. Statystyki opisowe analizowanych serii pomiarowych.

Tab. 1. Descriptive statistics of analyzed measuring series

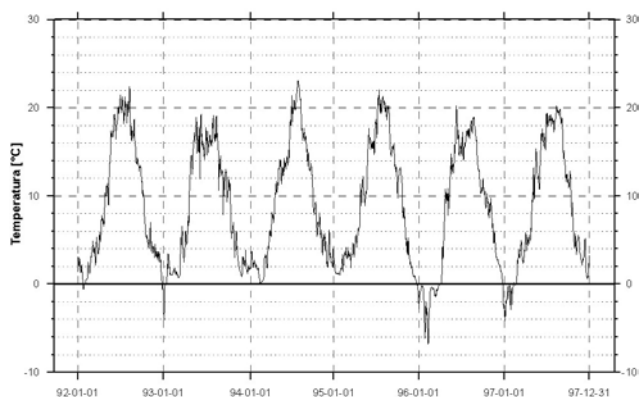
Seria	Jednostka	\bar{x}	Me	SD	Var	Sk	Ku	min.	max.	n	Średni gradient (a)	Względny średni gradient (b)
Średnia dobową temperatura gruntu na głębokości 50 cm w Storkowie (1992-1997)												
Tg50	°C	8,83	7,87	6,98	48,73	0,164	-1,282	-6,8	23,0	2192	0,43°C·d ⁻¹	1,45%·d ⁻¹
Średnie ważone miesięczne stężenia składników całkowitego opadu w Storkowie (1994-1998)												
pH (c)	[-]	4,52	4,63	2,98	8,91	2,988	11,453	3,77	6,10	59	0,41 pH·m ⁻¹	13,52%·m ⁻¹
CTY	mS·m ⁻¹	3,36	2,69	2,30	5,30	2,297	6,655	0,95	13,60	59	1,67mg·dm ⁻³ ·m ⁻¹	13,18%·m ⁻¹
Cl	mg·dm ⁻³	3,76	3,69	1,17	1,38	0,436	-0,063	1,9	7,1	58	0,93 mg·dm ⁻³ ·m ⁻¹	17,81%·m ⁻¹
S-SO ₄	mg·dm ⁻³	1,41	1,13	0,91	0,821	2,288	6,147	0,38	4,98	58	0,59 mg·dm ⁻³ ·m ⁻¹	12,90%·m ⁻¹
P-PO ₄	µg·dm ⁻³	16,92	10,09	17,94	321,7	2,236	5,933	0,0	91,0	53	14,19 µg·dm ⁻³ ·m ⁻¹	15,59%·m ⁻¹
N-NO ₃	mg·dm ⁻³	0,549	0,478	0,351	0,123	1,675	4,954	0,12	1,97	44	0,25 mg·dm ⁻³ ·m ⁻¹	13,35%·m ⁻¹
N-NH ₄	mg·dm ⁻³	0,908	0,767	0,535	0,286	2,862	9,523	0,35	3,04	46	0,33 mg·dm ⁻³ ·m ⁻¹	12,29%·m ⁻¹
Ca	mg·dm ⁻³	0,661	0,574	0,370	0,137	1,997	4,564	0,22	2,14	58	0,28 mg·dm ⁻³ ·m ⁻¹	14,71%·m ⁻¹
Mg	mg·dm ⁻³	0,145	0,089	0,251	0,063	6,523	45,75	0,03	1,89	55	0,10 mg·dm ⁻³ ·m ⁻¹	5,53%·m ⁻¹
Na	mg·dm ⁻³	0,782	0,553	0,855	0,731	1,917	4,199	0,0	4,02	55	0,52 mg·dm ⁻³ ·m ⁻¹	12,88%·m ⁻¹
K	mg·dm ⁻³	0,216	0,130	0,418	0,175	6,261	43,18	0,0	3,09	55	0,19 mg·dm ⁻³ ·m ⁻¹	6,16%·m ⁻¹
Mn	µg·dm ⁻³	10,05	5,54	19,07	363,5	4,787	26,23	0,0	127,0	59	9,93 µg·dm ⁻³ ·m ⁻¹	7,82%·m ⁻¹
Zn	µg·dm ⁻³	67,0	60,18	43,26	1872	2,070	5,142	15,03	221,0	59	33,72 µg·dm ⁻³ ·m ⁻¹	16,37%·m ⁻¹
Średnie dobowe stężenia gazów i aerozoli w powietrzu ze Stacji Puszcza Borecka (1995-1998)												
S-SO ₂	µg·m ⁻³	2,034	0,972	2,518	6,339	2,199	5,586	0,083	15,91	1053	1,12 µg·m ⁻³ ·d ⁻¹	7,06 %·d ⁻¹
N-NO ₂	µg·m ⁻³	1,124	0,575	1,634	2,669	3,876	20,834	0,005	15,18	1421	0,59 µg·m ⁻³ ·d ⁻¹	3,86 %·d ⁻¹
HNO ₃ +NO ₃	µg·m ⁻³	0,661	0,444	0,618	0,382	2,692	11,018	0,061	5,704	1391	0,33 µg·m ⁻³ ·d ⁻¹	5,77 %·d ⁻¹
NH ₃ +NH ₄	µg·m ⁻³	1,512	1,230	1,109	1,230	1,787	4,903	0,022	7,992	1434	0,68 µg·m ⁻³ ·d ⁻¹	8,57 %·d ⁻¹
S-SO ₄	µg·m ⁻³	1,334	1,016	1,162	1,349	2,212	7,319	0,080	10,15	1418	0,68 µg·m ⁻³ ·d ⁻¹	6,73 %·d ⁻¹
O ₃	µg·m ⁻³	55,99	56,36	21,01	441,3	-0,003	-0,219	2,80	124,2	709	10,07 µg·m ⁻³ ·d ⁻¹	8,29 %·d ⁻¹

Oznaczenia: \bar{x} – średnia arytmetyczna, Me – mediana, SD – odchylenie standardowe, Var – wariancja, Sk – skośność, Ku – kurtoza, min. – minimum, max. – maksimum, n – liczebność próbki.

(a) – średnia zmiana z pomiaru na pomiar wyrażona w jednostkach pomiaru na jednostkę czasu (d – doba, m – miesiąc).

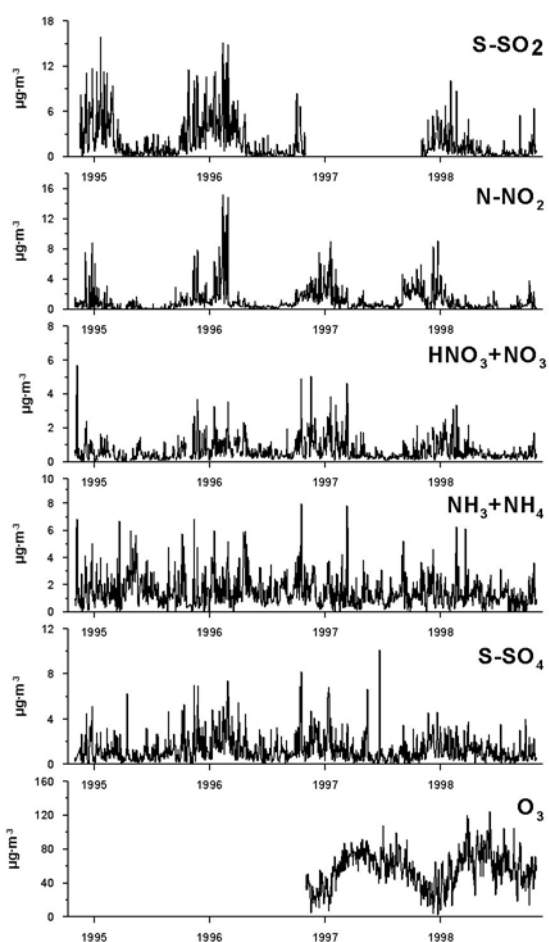
(b) – względna zmiana z pomiaru na pomiar wyrażona w % całkowitego zakresu zmienności na jednostkę czasu [4].

(c) – obliczenia statystyczne dokonane po przeliczeniu na stężenia H⁺. Odchylenie standardowe wyrażone jako stężenie H⁺ ×10⁻⁵, a wariancja – ×10⁻¹⁰.



Ryc. 3. Średnia dobowa temperatura gleby na głębokości 50 cm w Storkowie w latach 1992-97.

Fig. 3. Average daily temperature of soil in the depth of 50 cm in Storków in the years 1992-97



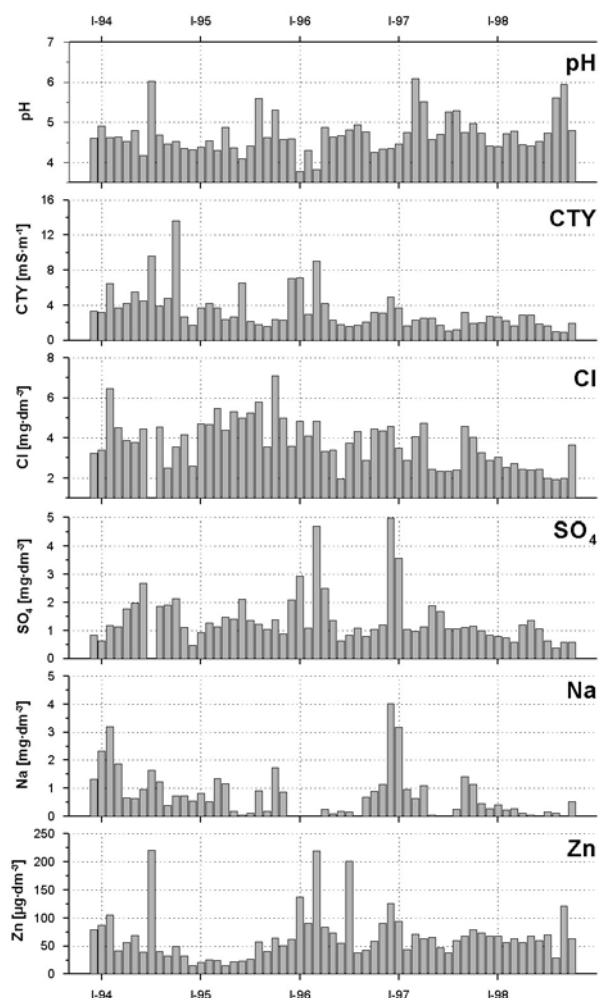
Ryc. 4. Średnie dobowe stężenia gazów i aerozoli atmosferycznych na stacji Puszcza Borecka w latach hydrologicznych 1995-1998.

Fig. 4. Average daily concentration of gases and atmospheric aerosols in the Borecka Forest station in hydrological years 1995-1998

Tak jak można było oczekiwać, najmniejszą zmiennością charakteryzowała się temperatura gleby (tab. 1). Średnia różnica między kolejnymi pomiarami (średnie dobowe) stanowiła zaledwie 1,45% całkowitego zakresu zmienności. Znacznie wyższe WSG obliczono w zbiorze danych parametrów jakości powietrza ze Stacji Puszcza Borecka – wahał się od 3,86% dla N-NO₂ do 8,57%

w przypadku NH₃+NH₄. Najwyższe jednak względne zróżnicowanie stwierdzono dla średnich ważonych miesięcznych stężeń składników rozpuszczonych w opadach atmosferycznych na Stacji Bazowej Storkowo. Nie są to dane pod tym względem jednak jednorodne. Serie pomiarowe trzech składników opadu – Mg, K i Zn – wykazywały WSG na poziomie 5,53 do 7,82%, a więc zbliżone do omawianych poprzednio. Dla pozostałych składników obliczone WSG wahały się od 12,29% do 17,81%. Stwierdzone w analizowanych danych zróżnicowanie względnego średniego gradientu (WSG) jest oczywiście odbiciem natury mierzonego zjawiska, ale także do pewnego stopnia, charakteru pomiaru i stopnia przetworzenia „surowych” wyników.

Oprócz danych z pomiarów temperatury gleby w Storkowie w pozostałych seriach występują luki. W przypadku parametrów jakości powietrza z Puszczy Boreckiej ubytki nie przekraczają 5%, zaś parametrów jakości opadów ze Storkowo – 10%. Wyjątkiem są stężenia azotu azotanowego i amonowego w wodach opadowych których wartości określono dla 75 i 78% terminów pomiarowych (pomiaru rozpoczęto z opóźnieniem).

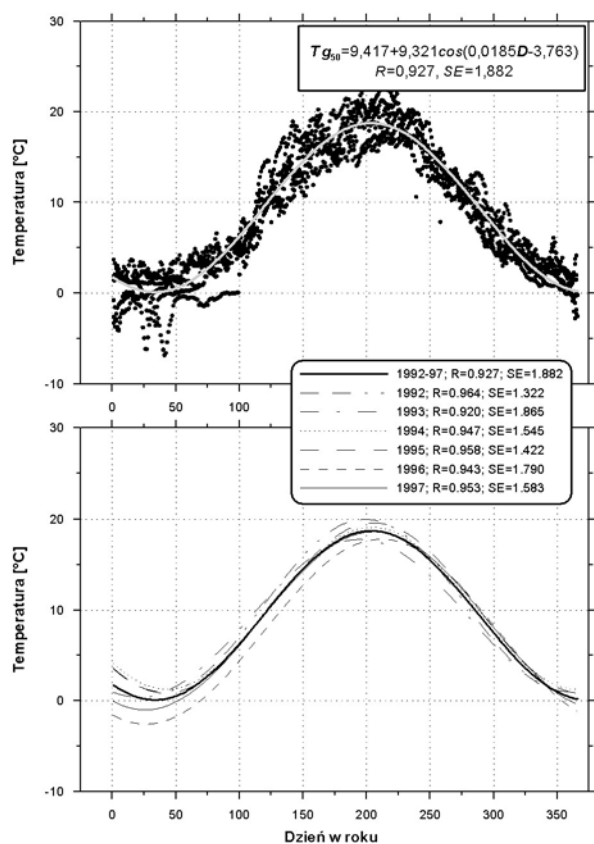


Ryc. 5. Średnie ważne miesięczne stężenia wybranych składników rozpuszczonych w opadach w Storkowie, grudzień 1993 – październik 1998.

Fig. 5. Average weighed monthly concentration of chosen dissolved components in rainfalls in Storków, December 1993 – October 1998

4. Wyniki

Najbardziej charakterystyczną cechą serii pomiarów temperatury gleby (ryc. 3), jest silnie zarysowana, bardzo regularna okresowość i niewielka rola składnika losowego (szumu). Można podejrzewać, że ze względu naturę zjawiska, duża bezwładność zmian temperatury wpływa na wysoką autokorelację tych danych. Naniesienie wyników pomiarów z poszczególnych lat na jeden wykres w funkcji czasu od 1 stycznia (ryc. 6) wykazuje, że cykliczność temperatury gleby nie ma charakteru regularnej sinusoidy. Największe odchylenia występują w pierwszym półroczu. Początkowy wzrost temperatury po zimowym minimum jest wolniejszy, a później szybszy niż dla najlepiej dopasowanej funkcji cyklicznej. Przed osiągnięciem maksimum tempo wzrostu temperatury znowu maleje. W efekcie mamy do czynienia z asymetrycznym przebiegiem zjawiska – nagrzewanie w pierwszej połowie roku jest nieco wolniejsze, niż ochładzanie w drugiej.



Ryc. 6. Modele cykliczne przebiegu rocznego średniej temperatury dobowej gleby na głębokości 50 cm w Storkowie w poszczególnych latach i w całym analizowanym okresie (lata 1992-1997).

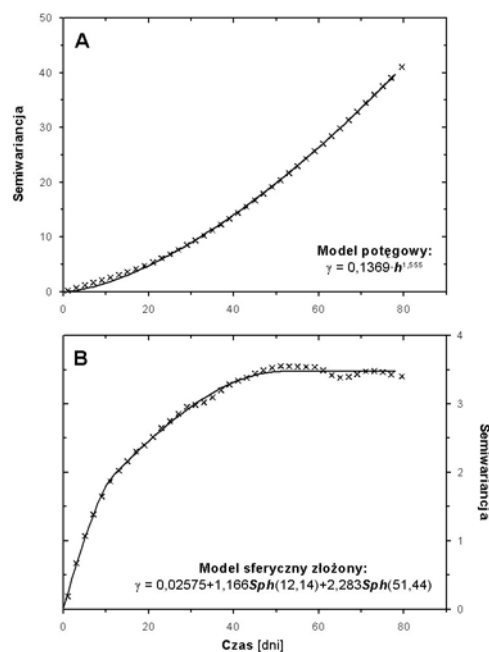
Fig. 6. Cycle models of the annual course of average daily soil temperature in the depth of 50 cm in Storków in particular years and in the whole of the analyzed period (years 1992-1997)

Dopasowana regularna funkcja cykliczna (ryc. 6) w 93% objaśnia obserwowaną zmienność przebiegu temperatury gleby. Błąd standardowy estymacji, czyli inaczej odchylenie standardowe reszt, jest jednak wysokie, bo wynosi 1,9°C. Zastosowanie modelu takiego samego typu osobno do serii pomiarowych z poszczególnych lat (ryc. 6) w niewielkim tylko stopniu zmniejsza błąd estymacji – waha się on od 1,3 do prawie 1,9°C. Model cykliczny nada się więc jedynie – z naszego punktu widzenia – do uży-

skiwania bardzo „grubego” szacunku. Jego zaletą jest jednak, że zmienną niezależną dysponuje się zawsze – jest nią bowiem czas.

Ponieważ dane temperatury gleby charakteryzują się bardzo dużą bezwładnością do uzupełniania ewentualnych luk w pomiarach można użyć funkcji autoregresyjnej. Model umożliwiający przewidywanie temperatury gleby w czasie t na podstawie znanych wartości pomiarów z czasu $t - 1$ i $t + 1$ ma współczynnik determinacji 99,7% i błąd standardowy estymacji 0,4°C. Uzyskany wzór ma charakter prostej interpolacji liniowej pomiędzy sąsiadującymi pomiarami. Może on jednak służyć wyłącznie do uzupełniania pojedynczych brakujących pomiarów i nie ma żadnej siły prognostycznej.

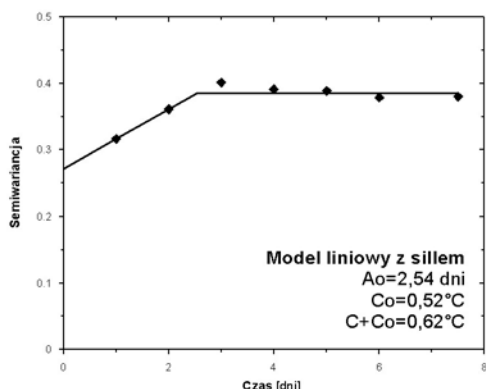
Połączenie podejścia deterministycznego (model cykliczny) i probabilistycznego (autokorelacja zmiennej losowej) umożliwia znacznie szerszą interpretację, a także bardziej precyzyjne estymacje danych brakujących. Pierwszym etapem analizy było przeprowadzenie analizy semiwariancji danych oryginalnych (ryc. 7A). Semiwariancja rośnie tutaj bez ograniczenia co jest efektem dominacji cyklicznej składowej regularnej. Jeśli jednak przeprowadzimy tą samą analizę na resztach modelu cyklicznego (ryc. 7B), to okaże się, że są one silnie sprzężone w obrębie dwóch zakresów czasu: 12 i 51 dni. Odbija się w tym fizyczna natura zjawiska, to znaczy wpływ przewodnictwa cieplnego gleby na opóźnienie impulsów nagrzewania i ochładzania. Wykorzystanie tego faktu umożliwi podniesienie precyzji estymacji z 1,9°C w przypadku korzystania wyłącznie z modelu cyklicznego, do około 0,1°C (wartość nuggetowa modelu na rycinie 7B) przy połączeniu obu modeli. Należy podkreślić, że w przeprowadzeniu precyzyjnych szacunków nie są przeszkodą nawet kilkudniowe przerwy w ciągach pomiarowych.



Ryc. 7. Semiwariogram średniej temperatury dobowej gleby na głębokości 50 cm w Storkowie (A), oraz reszt z modelu cyklicznego (B). Aby zwiększyć czytelność rysunku zaznaczono co drugi punkt semiwariancji empirycznych.

Fig. 7. Semiariogram of average daily soil temperature in the depth of 50 cm in Storków (A), and as rest from the cycle model (B). In order to improve legibility of the diagram, every second point of empirical semivariance was marked

Nawet reszty modelu autoregresyjnego wykazują niewielkie reszkowe skorelowanie (ryc. 8) umożliwiające redukcję standardowego błędu estymacji z poprzednich $0,4^{\circ}\text{C}$ do około $0,3^{\circ}\text{C}$, a więc poziomu niewiele już wyższego niż błąd samego pomiaru.



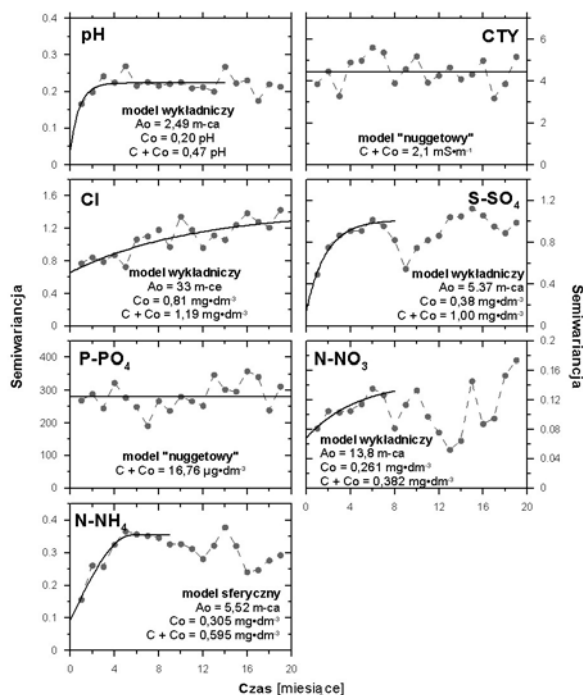
Ryc. 8. Semiwariogram reszt modelu autoregresyjnego średniej temperatury dobowej gleby na głębokości 50 cm w Storkowie.

Fig. 8. Semivariogram of the rests of the autoregressive model of average daily soil temperature in the depth of 50 cm in Storków

Podobną procedurę przeprowadzono w stosunku do pozostałych serii pomiarowych (ryc. 9 - 13). Ponieważ jednak nie zawierają one tak silnego składnika regularnego (trendu lub cykliczności), analizę prowadzono na danych oryginalnych. W odniesieniu do parametrów charakteryzujących jakość wód opadowych w Storkowie na wynikach obliczeń zaciążyła mocna mała liczebność dostępnego zbioru danych (ryc. 9 i 10). Wiele jednak z uzyskanych modeli semiwariancji jest wysoce istotne statystycznie wskazując, że mimo małej frekwencji pomiarów i wysokiego stopnia przetworzenia oryginalnych danych pomiarowych istnieje silna autokorelacja (Ca, Mg, Na, S-SO₄, N-NH₄). Druga grupa obejmująca między innymi stężenia K, Zn, pH, Cl i N-NO₃ wykazuje istnienie autokorelacji, choć jest ona słabsza. I wreszcie trzecia grupa w której znalazło się między innymi przewodnictwo elektrolityczne (CTY) stężenia Mn, P-PO₄ wykazuje jedynie istnienie składnika losowego (wariancja nuggetowa). W pierwszej grupie zakres czasowy podobieństwa pomiarów waha się od ponad czterech do siedmiu i pół miesiąca, generalnie jest jednak zbliżona do pół roku. Są to zatem parametry jakości opadów wykazujące (w tej skali analizy) wyraźny cykl sezonowy. Semiwariancje stężeń Zn i Cl charakteryzuje słaby, lecz istotny statystycznie, nieograniczony wzrost. W tym wypadku mamy do czynienia w badanym okresie z trendami: malejącym w przypadku chlorków, rosnącym - cynku.

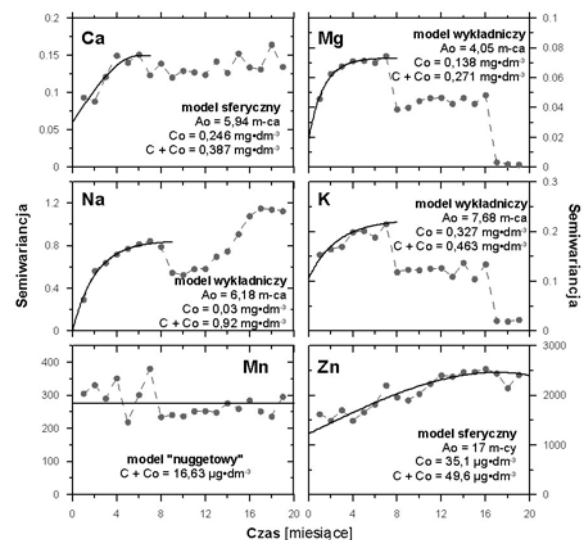
Stężenia gazów i aerozoli pomierzone w Stacji Puszcza Borecka mimo pozornej chaotyczności wykazują stosunkowo silną i regularną autokorelację czasową (ryc. 11). Mimo, że względny poziom wariancji nuggetowej i „końcowego” silu różnią się znacznie w przypadku poszczególnych parametrów, to jednak w każdym analizowanym przykładzie mamy do czynienia z identyczną strukturą - podwójnym modelem sferycznym semiwariancji - i zbliżonymi zakresami czasowymi autokorelacji: 3,1 - 3,9 dnia i 7,5 - 10 dni. Świadczy to że mechanizm determinujący ich dynamikę jest taki sam. Jest to prawdopodobnie odbicie typowej frekwencji zmian typu pogody w Polsce.

Średnio co 3,5 dnia, a więc ponad 100 razy w ciągu roku, następuje zmiana pogody. Wiąże się ona najczęściej z napływem nowej masy powietrza, różniącej się składem i właściwościami fizycznymi od dotychczas zalegającej nad danym obszarem.



Ryc. 9. Semiwariancje empiryczne i modele średnich miesięcznych ważonych stężeń składników w wodach opadowych w Storkowie w latach 1994-1998.

Fig. 9. Empirical semivariations and models of average monthly weighed concentrations of components in rainfall waters in Storków in the years 1994-1998

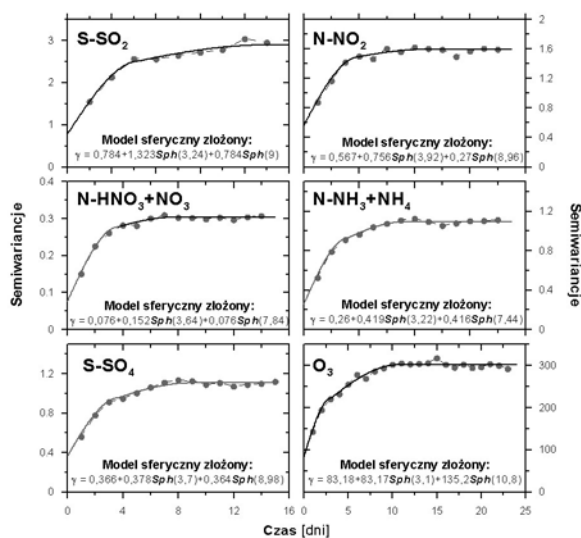


Ryc. 10. Objaśnienia analogiczne jak w przypadku ryciny 9.

Fig. 10. Analogous explanations as in the case of Fig. 9

Całkowita „wymiana” powietrza dokonuje się po dwóch cyklach zmiany pogody, a więc po 7 - 10 dniach. Świadczy o tym całkowity brak autokorelacji wyników pomiarów po takim interwale czasu. Powyższa interpretacja modeli semiwariancji parametrów jakości powietrza ze Stacji

Puszcza Borecka z całego okresu pomiarowego znajduje potwierdzenie w analizie serii kwartalnych. Wykazują one bowiem bardzo różny charakter układu semiwariancji empirycznych poczynając od układu losowego (nuggetowego - brak autokorelacji) do jedno- i dwuskładnikowego układu o odmiennych wartościach wariancji nuggetowej i silu oraz zasięgu. W krótkich okresach bowiem występują zarówno przypadki długotrwałego utrzymywania się jednego typu pogody, jak i ich zmian po czasie odbiegającym od średniej wieloletniej.



Ryc. 11. Semiwariancje empiryczne i modele stężeń gazów i aerozoli atmosferycznych w stacji Puszcza Borecka w latach hydrologicznych 1995-1998.

Fig. 11. Empirical semivariations and models of concentrations of gases and atmospheric aerosols in the Borecka Forest Station in hydrological years 1995-1998

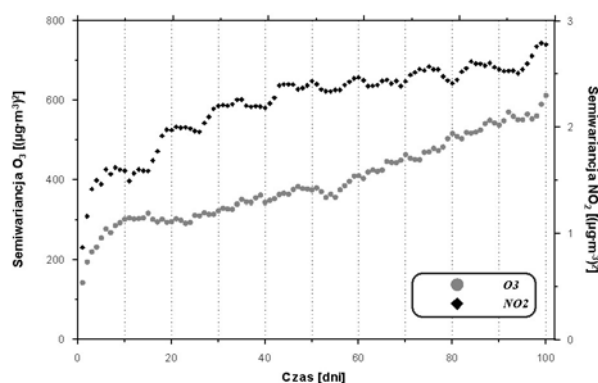
Interesujące jest również porównanie, dla poszczególnych mierzonych parametrów jakości powietrza, wartości wariancji nuggetowej oraz wariancji dwóch wyżej wymienionych składników strukturalnych o zasięgu 3,1 - 3,9 dnia i 7,5 - 10 dni (tab. 2). Daje ono bowiem pogląd o wielkości elementu losowego związanego zmiennością w okresie krótszym niż frekwencja pomiarów oraz z błędami pomiarowymi w stosunku do dwóch składników zmienności systematycznej. Z tego punktu widzenia można wskazać S-SO₂, N-NO₂ i N-HNO₃+NO₃ jako te parametry, w których zmienności dominuje zdecydowanie 1 składowa strukturalna, a O₃ - 2 składowa. W pozostałych przypadkach (N-NH₃+NH₄ i S-SO₄) udział obu składowych jest wyrównany. Udział składowej losowej waha się od 25 do 35% całej wariancji modelu. Wartość błędu pomiarowego i krótkookresowych fluktuacji jest znacząca, lecz nie różnicuje analizowanych parametrów pomiarowych. Można powiedzieć, że jakkolwiek dwukrotna zmiana pogody powoduje całkowitą „wymianę” powietrza nad Puszcza Borecka, to w przypadku dwutlenku siarki, dwutlenku azotu i azotanów większe znaczenie ma pierwszy „front”, ozonu - drugi, a pozostałych parametrów - oba mają podobny wpływ. Na taki obraz rzeczy wpływ ma niewątpliwie specyfika powstawania, rozprzestrzeniania się i zaniku poszczególnych analizowanych zanieczyszczeń powietrza.

Tab. 2. Procentowy udział wariancji nuggetowej i składników strukturalnych w całkowitej wariancji modeli stężeń gazów i aerozoli atmosferycznych w stacji Puszcza Borecka w latach hydrologicznych 1995-1998 (por. ryc. 12).

Tab. 2. Proportional part nugget variance and structural components in total variance of the models of concentrations of gases and atmospheric aerosols in the Borecka Forest Station in hydrological years 1995-1998 (cf. Fig. 12)

Parametr	S-SO ₂	N-NO ₂	N-HNO ₃ +NO ₃	N-NH ₃ +NH ₄	S-SO ₄	O ₃
Nugget	27.1	35.6	25.0	23.7	33.0	27.6
1 struktura	45.8	47.5	50.0	38.3	34.1	27.6
2 struktura	27.1	16.9	25.0	38.0	32.9	44.8

Przedłużenie zakresu analizy semiwariancji poza 10-24 dni jak to zrobiono na rycinie 12 ujawnia również istnienie innych regularnych struktur które muszą mieć wyjaśnienie w mechanizmie zjawiska. Należy do nich nieregularna okresowość w przypadku serii pomiarowej N-NO₂, oraz wyraźne załamania przebiegu semiwariancji empirycznych ozonu przy dystansie około 25 i 50 dni.



Ryc. 12. Semiwariancje empiryczne średnich dobowych stężeń O₃ i NO₂ w powietrzu ze stacji Puszcza Borecka.

Fig. 12. Empirical semivariations of average daily concentrations of O₃ and NO₂ in the air from the Borecka Forest

5. Wnioski

Przeprowadzona w niniejszym opracowaniu analiza wybranych serii pomiarowych ZMŚP potwierdziła, że mimo dużego zróżnicowania frekwencji pomiarów i stopnia przetworzenia „surowych” danych metody geostatystyczne umożliwiają:

- rozpoznanie ukrytej struktury zjawiska, szczególnie w przypadku dużej ilości pomiarów charakteryzujących się dużą losową zmiennością krótkookresową (dane jakości powietrza z Puszczy Boreckiej), ale także w przypadku istnienia silnej cykliczności lub trendu (dane temperatury gleby ze Storkowa),
- uzupełnianie brakujących pomiarów wraz z dokładnym oszacowaniem błędu estymacji,
- identyfikację pomiarów odstających wymagających potwierdzenia lub usunięcia z serii pomiarowej.

Należy również podkreślić, że „ubocznym” efektem określenia zasięgu autokorelacji jest również możliwość ustalenia optymalnej frekwencji pomiarów. Słowa optymalna rozumiane jest tutaj jako kompromis pomiędzy kosztami prowadzenia pomiarów, a ilością i jakością uzyskiwanych danych. Pomiarów, których frekwencja jest większa niż zasięg autokorelacji zawierają ze względu na podobieństwo kolejnych wyników, informację nadmiarową.

Bez znacznej straty informacji można by zatem pomiary temperatury gleby na głębokości 50 cm w Storkowie prowadzić co 5 – 10 dni, a parametrów jakości powietrza w Puszczy Boreckiej co 2 dni.

6. Literatura

- ETL 1110-1-175, 1997: *Practical aspects of applying geostatistics at hazardous, toxic, and radioactive waste sites*. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000, Technical Letter No. 1110-1-175, 1-99.
- Goovaerts P., 1997: *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, 1-483.
- Isaaks E.H., Srivastava R.M., 1989: *Applied Geostatistics*. An Introduction. Oxford University Press, 1-561.
- Janiszewski F., 1988: Wskazówki dla posterunków meteorologicznych. Wydanie II uaktualnione, IMGW, Warszawa, 1-242.
- Kostrzewski A., Mazurek M., Stach A., 1995: *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Zasady organizacji, system pomiarowy, wybrane metody badań*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa, 1-255.
- Oliver M., Webster R., Gerrard J., 1989: *Geostatistics in physical geography. Part I: theory. Part II: applications*. Transactions Institution of British Geographers N.S., 14, 259-269, 270-286.
- Śnieżek T.R., Degórska A.M., 1995: *Metodyka pomiarów zanieczyszczeń atmosferycznych w ramach Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego*. W: Kostrzewski, A., Mazurek, M., Stach, A., *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Zasady organizacji, system pomiarowy, wybrane metody badań*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, 177-195.

TIME STRUCTURE OF SELECTED INTEGRATED MONITORING OF ENVIRONMENT DATA SERIES

Summary

Semivariogram analysis was applied to detect hidden time structure of three types of data: daily mean soil temperature at 50 cm depth, daily cumulative average of gas/aerosol pollutants concentrations and monthly weighted mean precipitation pollutants concentrations. The first data set are of high time inertia, high measurement frequency and low level of processing of original measurements. The second one differs by high time variability, looks even chaotic and lacks of any processing of original measurements data. The third data set comes from much less frequent measurements and was highly processed. Soil temperature time pattern is dominated by seasonal component. Subtracting seasonal component exposes short time autocorrelation structure with 12 and 51 days range. It's effect of soil thermal conductivity and reflects time delay in heating and cooling at 50 cm depth. Combining deterministic (seasonal sine function) and probabilistic (semivariogram) approach yields prediction of missing data at 0.1°C precision level so it is comparable with measurement error. Monthly precipitation solute data shows three kinds of time pattern: seasonal (Ca, Mg, Na, S-SO₄, N-NH₄), long time tendency (trend, Cl, Zn) or lack of autocorrelation (CTY, Mn, P-PO₄). Gas/aerosol pollutants time series shows similar, strong, short time autocorrelation structure, with 3.1-3.9 and 7.5-10 days ranges. It is the effect of typical frequency of weather changes in Poland. Each three for four days (100 times in the year) new air masses flowing in and weather changes. This data shows that complete air replacement (and lack of similarity in its

physical and chemical properties) take place after two weather front shiftings. Pollutants variability in the time shorter than sampling interval (1 day) accounts 25 to 35% of total variability. Semivariogram analysis can also be an aid in choosing optimal measurement frequency, losing some redundant information.