

Janusz Łomotowski, Joanna Skwarek

Zastosowanie metod geostatystycznych do analizy zmienności składu wody w systemach wodociągowych

Skład wody w systemie wodociągowym ulega zmianie pod wpływem procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych. Stąd też stabilność chemiczna i biologiczna wody jest przedmiotem licznych badań i publikacji [1–17].

Jakość wody u odbiorcy zależy przede wszystkim od stanu technicznego i wieku systemu dystrybucji wody [2–4,12,17], materiału zastosowanego do budowy przewodów wodociągowych [1–5,6,8–12,14–17], chropowatości ścianek wewnętrznych rur [2,8–11,14,16–17], rodzaju zastosowanych powłok ochronnych [3,8,16,17], a także szczelności armatury [12]. Bardzo duże znaczenie ma jakość wód ujmowanych i poddawanych uzdatnianiu, sprawność technologiczna zakładu wodociągowego [2,15,17] oraz rodzaj zastosowanych reagentów chemicznych w poszczególnych procesach uzdatniania wody (rodzaj i dawki koagulantów oraz środków dezynfekcyjnych) [2,3,16,17], przede wszystkim ze względu na możliwość powstawania szkodliwych produktów ubocznych [2,16,17]. Na zmienność składu wody wpływają takie wskaźniki jej jakości, jak pH [3,7,8,10,14–16], zasadowość [3,7,8,15] i twardość [15,16], zawartość wolnego i agresywnego dwutlenku węgla [3,14,16], stężenia związków żelaza i manganu [12,15], miedzi [2,8,10,15], cynku [8,10], ołowiu [8,10,15], kadmu, molibdenu, amoniaku [2,15], azotanów [2,16], azotanów [2,3,16], fosforanów [3,8,12,15], chlorków [2,3,8,15,16], siarczanów [2,3,8,14–16], wapnia [3,15,16], sodu [16], tlenu rozpuszczonego [1,3,8,16], biodegradowalnych związków organicznych [2,3,6,8,11,14,16], a także potencjał redoks [3,14], przewodność elektryczna i temperatura [3,6–8,11,16].

Znaczącą rolę odgrywa czas przebywania wody w systemie wodociągowym, zwany umownie wiekiem wody, ze względu na notowany wzrost stężeń poszczególnych wskaźników zanieczyszczeń na końcówkach sieci, czego powodem jest najczęściej wydłużenie czasu kontaktu wody z instalacją wewnętrzną [2,3,6,12,15,16]. Zmiany składu biologicznego wody związane są na ogół z obecnością substancji organicznych i nieorganicznych, takich jak węgiel organiczny [6,11,16], siarkowodór, siarczki, tiosiarczany [2,3], dwuwartościowe żelazo i mangan [14], azot amonowy i azotyny [16], chlor pozostały [6–9,11,15–17]. Niemalą rolę odgrywa sposób eksploatacji sieci wodociągowych [3,12,16,17], w tym warunki hydrauliczne, tj. prędkość przepływu wody [2,8,9], ciśnienie [6,12,16], zużycie wody i jej dobowy rozbiór [3,12,14,17], obecność stref mieszania [3,15,16] itp. Tak duża liczba czynników wskazuje na złożoność procesów wpływających na kształtowanie się jakości wody wodociągowej podczas jej przepływu przez system dystrybucji.

Przedmiotem niniejszego artykułu nie są rozważania teoretyczne nad oddziaływaniem poszczególnych czynników na zmiany jakości wody w sieci wodociągowej, lecz możliwości wykorzystania bogatych zasobów danych, obejmujących wyniki badań wskaźników fizyczno-chemicznych i bakteriologicznych wody, które są systematycznie wykonywane przez stacje sanitarno-epidemiologiczne oraz laboratoria przedsiębiorstw wodociągowych. Woda do analiz pobierana jest w wybranych punktach zlokalizowanych na całej sieci wodociągowej (przewody wodociągowe, instalacje domowe) danego miasta lub obszaru zasilanego przez określony wodociąg, z mieszkań prywatnych, punktów usługowych, zakładów i innych obiektów infrastruktury, wybranych losowo lub wytypowanych do tego celu na skutek skarg mieszkańców na niewłaściwą jakość wody. Uzyskane wyniki są analizowane tylko w zakresie przekroczenia obowiązujących norm sanitarnych dla poszczególnych wskaźników jakości wody, a następnie archiwizowane. Nie zwraca się przy tym uwagi na fakt, że stanowią one ważne źródło informacji o zmienności wartości wskaźników jakości wody w danym systemie wodociągowym, w różnych przedziałach czasu. Dane te mogą być pomocne przy ocenie stanu technicznego sieci wodociągowej i poprawności jej eksploatacji. Na podstawie ich szczegółowej analizy można też wnioskować o procesach i zjawiskach zachodzących na poszczególnych odcinkach sieci wodociągowej.

Metoda krigingu

Do oszacowania rozkładu zmienności wskaźników chemicznych jakości wody na obszarze sieci wodociągowej wybrano metodę krigingu, która należy do geostatystycznych metod przestrzennej interpolacji danych.

Geostatystyka jest stosowana do analizy zmienności parametrów oraz szacowania ich rozkładu na danym obszarze. Służy ona do interpolacji zmiennych przestrzennych zregionalizowanych, o rozkładzie ciągłym. Początkowo metody geostatystyczne były stosowane w badaniach i ocenie zmienności przestrzennej rud i złóż minerałów. Obecnie, ze względu na dużą dokładność metod oraz możliwość szybkiej oceny rozmieszczenia badanych parametrów w przestrzeniach wielowymiarowych, znalazły one również zastosowanie w innych dziedzinach nauki, m.in. w ochronie środowiska. Dzięki rozwojowi technik komputerowych metody te mogą być stosowane do analizy ogromnej liczby danych [18–20].

Metoda krigingu opiera się na założeniu, że badana zmienna jest stacjonarnym procesem stochastycznym, tj. na badanym obszarze rozkład prawdopodobieństwa zmiennej nie ulega zmianie. Jest to jednoznaczne ze stwierdzeniem, że wartość oczekiwana zmiennej, a także wariancja procesu jest stała,

niezależnie od analizowanej części obszaru. W wypadku gdy zmienna zregionalizowana na badanym obszarze nie jest stacjonarnym procesem stochastycznym, poszukuje się funkcji deterministycznej, najczęściej za pomocą analizy trendu analizowanego parametru, w celu uzyskania stacjonarności zmiennej losowej. Najważniejszą konsekwencją założenia stacjonarności jest to, że wariancja różnic pomiędzy wartościami zmiennych dwóch punktów pomiarowych nie zależy od położenia punktów na badanej powierzchni, lecz wyłącznie od odległości między nimi. Tę właściwość stacjonarnego procesu losowego opisuje równanie:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z(x_i+h) - z(x_i)]^2 \quad (1)$$

w którym:

$2\gamma(h)$ – wartość wariogramu

n – liczba par analizowanych punktów

h – odległość pomiędzy analizowanymi punktami

$z(x_i)$, $z(x_i+h)$ – wartość zmiennej zregionalizowanej (po eliminacji składnika deterministycznego) w punkcie x_i lub x_i+h

Graficzną prezentacją tej funkcji stanowi wariogram, który odwzorowuje przestrzenną zmienność zmiennych zregionalizowanych. Wykresy wariogramów umożliwiają analizę głównych cech zmienności badanych parametrów. W praktyce oblicza się semiwariogram $\gamma(h)$, który stanowi miarę połowy średniokwadratowego błędu wynikającego z porównania wartości funkcji $z(x+h)$ i $z(x)$ (jest on połową wariancji przyrostów zmiennej zregionalizowanej). Kriging wykorzystuje informacje z semiwariogramu do określenia wag dla danego obszaru i konfiguracji danych. Wagi zostają przydzielone tak, że błąd estymacji (wariancja krigingu) zostaje zminimalizowany. W celu znalezienia wag krigingu trzeba rozwiązać pewien układ równań dla każdej szacowanej pozycji, przy czym próbki powinny zostać uporządkowane w regularny schemat, ze stałą odległością pomiędzy nimi. Standardowy błąd szacunku w metodzie krigingu wzrasta wraz ze wzrostem odległości punktów kontrolnych od punktu szacowanego. Wartość w dowolnym punkcie stanowi ważoną liniową kombinację dostępnych analiz. Dokładny matematyczny opis metody krigingu można znaleźć m.in. w pracy Kitanidisa [21].

Metodyka badań

W mieście A, w okresie od marca 2001 r. do października 2002 r. (co dwa miesiące), pobrano próbki wody surowej i uzdatnionej z zakładu wodociągowego oraz z sieci wodociągowej w 19 wytypowanych punktach kontrolnych. Poboru próbek wody dokonano w godzinach przedpołudniowych, między godzinami 9 i 13. Badania objęły takie wskaźniki jakości wody, jak pH, zasadowość, twardość, wapń, magnez, chlorki, siarczany, azot amonowy, azotyny, azotany, utlenialność, sucha pozostałość, żelazo, mangan, wolny dwutlenek węgla, sól, potas, potencjał redoks, miedź, ołów, nikiel, chrom, cynk, kadm, arsen i rtęć.

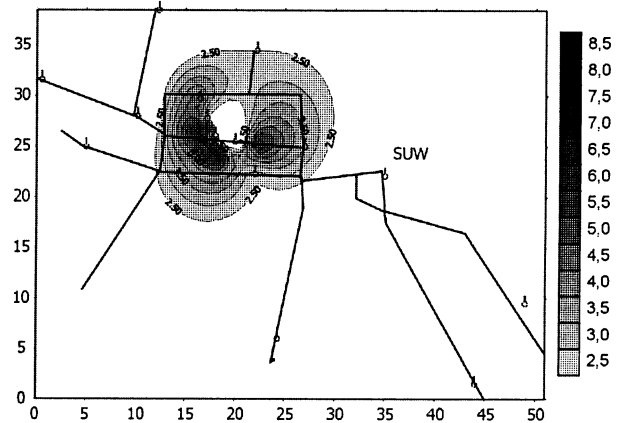
W mieście B zebrano archiwalne wyniki analiz fizyczno-chemicznych wody z lat 1998–2000, wykonane przez przedsiębiorstwo wodociągowe w 33 punktach pomiarowych, zlokalizowanych na sieci wodociągowej. Objęły one następujące wskaźniki jakości wody: pH, twardość, chlorki, siarczany oraz związki żelaza i manganu. Sieć wodociągowa tego miasta jest zasilana z dwóch zakładów wodociągowych wodami o różnym składzie chemicznym.

Do opracowania danych wykorzystano program SURFER [22], wykonując w nim schematy sieci wodociągowych obu miast, na które naniesiono punkty kontrolne. Przy pomocy tego programu sporządzono mapy izolinii wartości analizowanych wskaźników jakości wody.

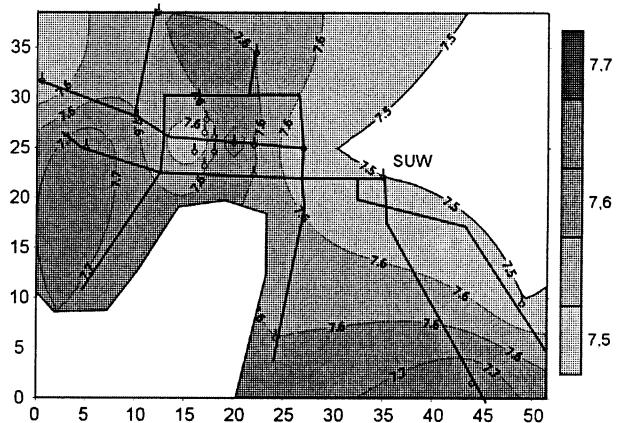
Dyskusja wyników

Na rysunkach 1+5 przedstawiono wybrane mapy krigingowe izolinii stężenia agresywnego dwutlenku węgla, pH, zawartości związków żelaza i manganu, a także zasadowości ogólnej, dla jednego dnia pomiarowego w mieście A, natomiast rysunki 6 i 7 przedstawiają izolinie średnich stężeń siarczanów i chlorków w wodzie wodociągowej na obszarze miasta B. Przedstawione mapy pozwalają zlokalizować obszary, na których następuje pogorszenie jakości wody. Na ich podstawie można wnioskować o procesach i zjawiskach zachodzących w systemie wodociągowym.

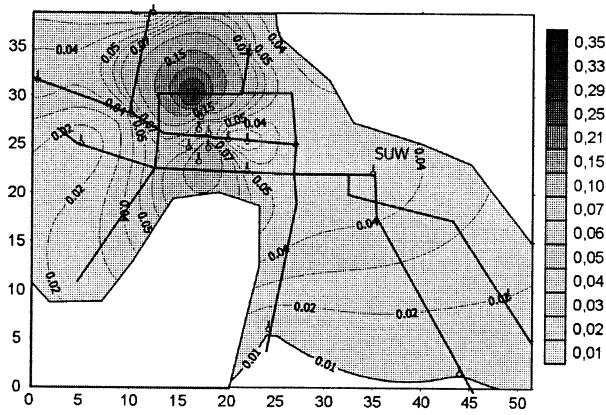
O procesie korozji może świadczyć wzrost stężeń związków żelaza i manganu w wodzie w danej części sieci, szczególnie na obszarach, na których eksploatowane są rurociągi stalowe (czasem żeliwne), o niewłaściwym stanie technicznym i długim okresie eksploatacji. Dochodzi wtedy do rozpuszczania i wymywania produktów korozji zgromadzonych w postaci żelazowo-manganowych osadów pod wpływem przepływającej wody. Przykładem tego zjawiska może być obszar starówki miasta A. Pod wpływem agresywnego dwutlenku węgla (rys. 1) i przy niskim pH wody (rys. 2) z powierzchni przewodów wymywane są tlenki żelaza i manganu, które w postaci rozpuszczalnych wodorowęglanów przechodzą do wody (rys. 3–4).



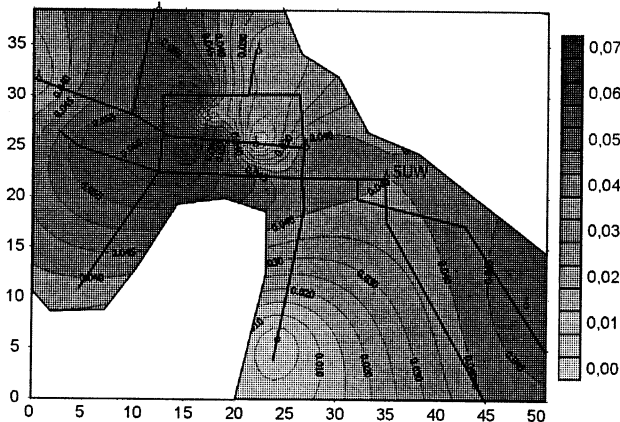
Rys. 1. Rozkład stężeń agresywnego dwutlenku węgla w wodzie w sieci wodociągowej (miasto A)



Rys. 2. Rozkład pH wody w sieci wodociągowej (miasto A)



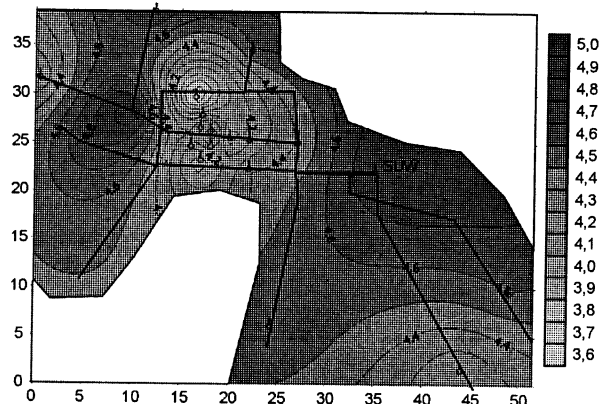
Rys. 3. Rozkład stężeń związków żelaza w wodzie w sieci wodociągowej (miasto A)



Rys. 4. Rozkład stężeń związków manganu w wodzie w sieci wodociągowej (miasto A)

Równoczesny wzrost stężenia związków manganu jest wywołany jego redukcją przez związki żelaza do form bardziej rozpuszczalnych. Występuje duże prawdopodobieństwo wtórnego zanieczyszczenia wody w wyniku wymywania chemicznych i biologicznych cząstek osadów zgromadzonych na wewnętrznych ściankach przewodów podczas długiego okresu eksploatacji, a szczególnie przy nagłej zmianie prędkości przepływu wody lub zmianie jej składu fizyczno-chemicznego. Przy nagłej zmianie składu wody rozpuszczane są trudno rozpuszczalne w wodzie składniki osadów.

Na rysunku 5 przedstawiono rozkłady zmian zasadowości wody w systemie wodociągowym miasta A. W obrębie starówki zaobserwowano znaczący spadek wartości tych wskaźników. Przyczyną obniżenia zasadowości wody w systemach wodociągowych mogą być zjawiska korozji, wytrącanie

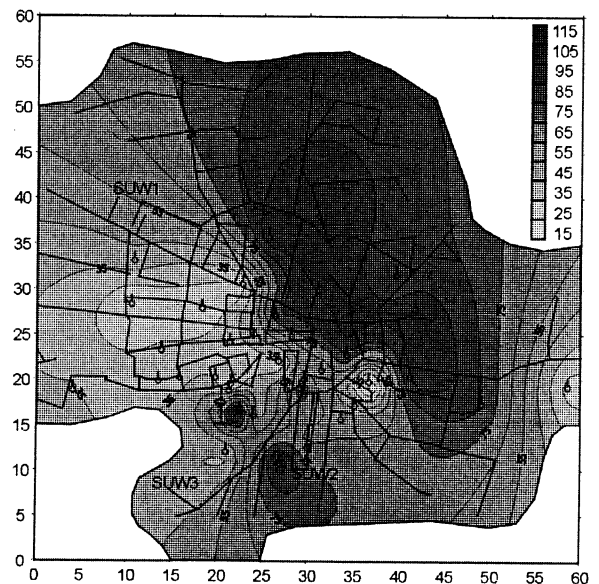


Rys. 5. Rozkład zasadowości wody w sieci wodociągowej (miasto A)

węglanów wapnia lub też oddziaływanie bakterii chemoautotroficznych. Przy wytrącaniu węglanów wapnia obserwuje się obniżenie zasadowości i twardości wody, natomiast w dwóch pozostałych wypadkach twardość wody nie ulega zmianie.

Analizując wyniki wskazujące na zmiany pH, zasadowości i twardości wody oraz zawartości wolnego dwutlenku węgla można ustalić hipotetyczne przyczyny obserwowanych zmian jakości wody w sieci wodociągowej. Mapy zmian składu wody na terenie miasta A świadczą o tym, że w obrębie części starówki występowało wytrącanie węglanów, a w innej części miały miejsce zjawiska korozji i rozpuszczania jej produktów zgromadzonych w rurociągu.

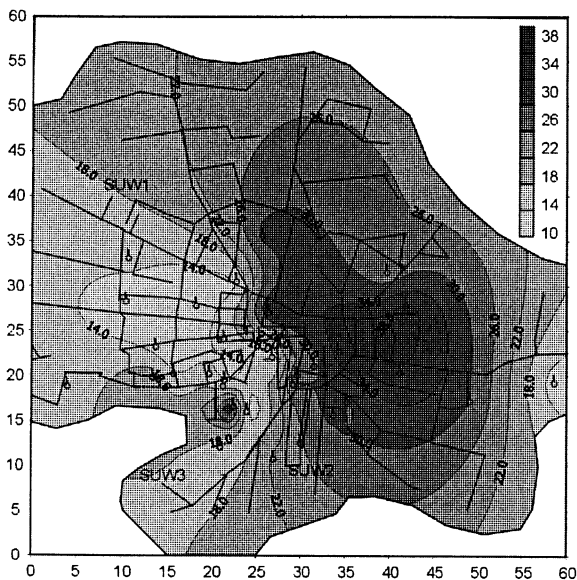
Na podstawie map izolinii stężeń można określić wpływ czasu przebywania wody w sieci na jej jakość. Wiek wody wzrasta wraz ze spadkiem rozbioru, co jest obserwowane w ostatnich latach praktycznie we wszystkich wodociągach w Polsce. Wydłuża się wtedy czas kontaktu wody z materiałem przewodu, co wpływa na zainicjowanie procesów chemicznych i biochemicznych. Na przebieg tych zjawisk mają wpływ temperatura i skład chemiczny wody. Wykorzystując mapy izolinii stężeń można porównywać zmiany składu wody w systemie wodociągowym w różnych warunkach jego eksploatacji. W wypadku systemów wodociągowych zasilanych wodami o różnym składzie, mapy izolinii pozwalają określić zasięg oddziaływania poszczególnych stacji uzdatniania wody (SUW). W obszarach, w których dochodzi do mieszania się wód, może okresowo pogorszyć się jakość wody wskutek indeksów stabilności i wytrącania węglanu wapnia. W mieście B zjawisko mieszania wód można zaobserwować na przykładzie stężenia siarczanów i chlorków (rys. 6 i 7). Zawartości tych jonów różniły się w obrębie oddziaływania obu zakładów. Mniej zasolone były wody pochodzące z SUW nr 1.



Rys. 6. Rozkład stężenia siarczanów w wodzie w sieci wodociągowej (miasto B)

Podsumowanie

Metoda krigingu wykorzystywana jest do interpolacji danych na powierzchniach ciągłych. Sieć wodociągowa jest ciągłym obiektem linowym i z tego powodu powstające obrazy wizualizujące izolinie stałych stężeń na danym obszarze nie mogą być interpretowane jako rzeczywisty obraz jakości wody wodociągowej. Obraz ten będzie dobrze oddawał



Rys. 7. Rozkład stężenia chlorków w wodzie w sieci wodociągowej (miasto B)

zmienność składu wody na obszarach o gęstej, zwartej zabudowie, z rozbudowaną siecią wodociągową oraz z gęsto i równomiernie rozmieszczonymi punktami pomiarowymi. Wiarygodność uzyskanych wyników estymacji wzrasta w miarę zwiększania liczby punktów kontrolnych.

Mimo tak istotnych ograniczeń, metoda krigingu pozwala określić obszary, w których następuje pogorszenie jakości wody wodociągowej. Jest także pomocna w ustaleniu przyczyn zmian jakości wody oraz w bieżącej eksploatacji dużych i średnich systemów wodociągowych.

LITERATURA

1. R. ADRIEN, M. ELLAWAY, J. LIN: Study of corrosion material accumulated on the inner wall of steel water pipe. *Corrosion Science*, 2001, Vol. 43, No. 11, pp. 2065–2081.
2. W. BALCERZAK, K. KNAPIK, K. KUBALA: Modelowanie zjawiska zanieczyszczenia wody w sieci wodociągowej. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 1999, nr 6, ss. 201–205.
3. W. BALCERZAK: Zmiany jakości wody w systemie jej dystrybucji. *Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę i jakość wód”*, PZITS, Gdańsk 2002.
4. J. BEBEE *et al.*: Physico-chemical characteristics of corrosion scales in old iron pipes. *Water Research*, 2001, Vol. 35, No. 12, pp. 2961–2969.
5. B. BERGHULT *et al.*: Iron corrosion in drinking water distribution systems – surface complexation aspects. *Wat. Res.*, 1997, Vol. 39, No. 12, pp. 77–93.
6. J. C. BLOCK *et al.*: Dynamic modeling of bacteria in a pilot drinking-water distribution system. *Wat. Res.*, 1997, Vol. 31, No. 12, pp. 3146–3156.
7. V. DIYAMANDOGLU, W. W. FABER, D. JOLIS: Biological stability of drinking water in New York City. *Water Science and Technology*, 1998, Vol. 38, No. 6, pp. 181–190.
8. E. DUNDORE, M. LECHEVALLIER, J. SCHIERMANN, C. VOLK: Practical evaluation of iron corrosion control in a drinking water distribution system. *Wat. Res.*, 2000, Vol. 34, No. 6, pp. 1967–1974.
9. R. G. J. EDYWEAN *et al.*: Biofilms, mains water and stainless steel. *Wat. Res.*, 1998, Vol. 32, No. 7, pp. 2187–2201.
10. R. G. J. EDYWEAN *et al.*: Biofilm development on stainless steel in mains water. *Wat. Res.*, 1998, Vol. 32, No. 1, pp. 243–253.
11. C. F. FORSTER *et al.*: The potential for biofilm growth in water distribution systems. *Wat. Res.*, 2001, Vol. 35, No. 17, pp. 4063–4071.
12. B. GAMROT i in.: Wpływ eksploatacji i stanu technicznego sieci na jakość wody wodociągowej. *Ochrona Środowiska*, 2001, nr 3, ss. 17–20.
13. P. M. HUCK, P. J. OLLOS, R. M. SLAWSON: Bench scale investigations of bacterial regrowth in drinking water distribution systems. *Water Science & Technology*, 1998, Vol. 38, No. 8–9, pp. 275–282.
14. D. K. JAIN: Microbial colonization of surface of stainless steel coupons in a deionized water system. *Wat. Res.*, Vol. 29, No. 8, pp. 1869–1876.
15. A. L. KOWAL: Ochrona sieci wodociągowej przed korozją i zarastaniem. *Ochrona Środowiska*, 1997, nr 4, ss. 3–6.
16. K. OLAŃCZUK-NEYMAN, M. M. SOZAŃSKI: Technologia uzdatniania wody jako współczesna dyscyplina nauki. *Mat. Konf. „Zaopatrzenie w wodę i jakość wód”*, PZITS, Gdańsk 2002.
17. M. TATARA: Wtórne zanieczyszczenie wody wodociągowej podczas jej dystrybucji w aspekcie pogorszenia fizykochemicznej jakości wody. *GWITS*, 2001, nr 6, ss. 201–205.
18. B. NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA: Zmienność złóż rud miedzi w monoklinie przedsudeckiej w świetle badań geostatystyki. *Wyd. Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 1993.
19. B. NAMYSŁOWSKA-WILCZYŃSKA, A. WILCZYŃSKI: Badania geostatystyczne zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi w wybranych rejonach Górnego Śląska. *Ochrona Środowiska*, 1997, nr 2, ss. 9–18.
20. J. ZAWADZKI: Badania korelacji przestrzennych zawartości wybranych pierwiastków śladowych w glebach Warszawy i okolic. *Ochrona Środowiska*, 2002, nr 4, ss. 17–26.
21. P. K. KITANIDIS: *Introduction to Geostatistics. Application in Hydrogeology*, Cambridge University Press, Cambridge 1997.
22. T. TAŃSKI: *Surfer*. Wyd. PLJ, Warszawa 1991.

Łomotowski, J., Skwarek, J. Application of the Kriging Method to the Analysis of Water Composition Variations in the Water Distribution System. *Ochrona Środowiska* 2003, Vol. 25, No. 4, pp. 61–64.

Abstract: It is a well-established fact that in a water distribution system water quality undergoes some undesired changes. Our study shows that monitoring the composition of the tap

water and making use of the kriging method it is possible to plot maps visualizing the variability of water quality indexes in the area fed by a given water distribution system. In spite of some methodological drawbacks, the kriging maps can be of utility in assessing the phenomena that occur in water distribution systems.

Keywords: water quality index, geostatistics, kriging, water distribution system.