

## Dominika Dąbrowska<sup>1</sup>, Marek Sołtysiak<sup>1</sup>, Jan Waligóra<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec; e-mail: ddabrowska@us.edu.pl;  
soltysiak.marek@gmail.com

<sup>2</sup>Uzdrowisko Ustroń, ul. Sanatoryjna 1, 43-450 Ustroń; e-mail: janiceq@wp.pl

# MODELE WYGŁADZANIA WYKŁADNICZEGO W OCENIE JAKOŚCI WÓD PODZIEMNYCH NA PRZYKŁADZIE UZDROWISKA USTRÓŃ

Домбровска Д., Солтысяк М., Валигура Я. Модели экспоненциального сглаживания для оценки химического состава подземных вод на примере санатория „Ustroń” (Устронь). Для лечебных целей санаторий „Ustroń” (Устронь) использует минеральную воду, добытую из слоя средне- и верхнедевонских известняков и доломитов. Эксплуатируются две скважины – U-3 и U-3A, пробуренные в начале 1970-х годов. Целью данного исследования является оценка изменения качества минеральной воды на основе содержания хлоридов в образцах из скважины U-3A. Набор данных включает в себя результаты ежемесячных анализов содержания хлоридов за период 2005–2015 гг. Для расчетов были использованы четыре различные модели тройного экспоненциального сглаживания. Наилучшие результаты были получены с моделью ANN.

Dąbrowska D., Sołtysiak M., Waligóra J. **The exponential smoothing models in groundwater chemical status assessment on the example of the Ustroń Health Resort.** "Ustroń" S.A. Health Resort uses mineral waters taken from Middle and Upper Devonian limestones and dolomites for curative purposes. Two boreholes – U-3 and U3-A drilled in the early 1970s are exploited. The aim of this study is to estimate changes of mineral water quality based on chloride content in the water from the U-3A borehole. The data set include the results of monthly analyses of chlorides from ten years (2005-2015). Four different models of the triple exponential smoothing (ETS) were used for the calculations. The best results were obtained with ANN model.

**Słowa kluczowe:** wody mineralne, Uzdrowisko Ustroń, wygładzanie wykładnicze

**Ключевые слова:** минеральные воды, курорт Устронь, экспоненциальное сглаживание

**Key words:** mineral water, the Ustroń Health Resort, exponential smoothing

## ZARYS TREŚCI

Przedsiębiorstwo Uzdrowiskowe „Ustroń” S. A. wykorzystuje do celów leczniczych solanki jodkowo-bromkowe o mineralizacji 110–130 g/dm<sup>3</sup> eksploatowane z wapieni i dolomitów środkowego i górnego dewonu. Eksploatowane są dwa otwory U-3 oraz U3-A odwiercone na początku lat 70. XX wieku. W pracy zastosowano wybrane modele wygładzania wykładniczego i wybrano najbardziej z nich do oceny zmian jakości wód mineralnych Uzdrowiska Ustroń biorąc pod uwagę zawartość chlorków w wodach podziemnych ujmowanych otworem U3-A na podstawie średniomiesięcznych danych z lat 2005–2015.

## WSTĘP

Dokładne metody prognozowania szeregów czasowych pozwalają na lepszą ocenę stanu chemicznego

wód podziemnych, co jest niezwykle ważne przy określaniu właściwości fizykochemicznych wód stosowanych w uzdrowiskach do celów leczniczych.

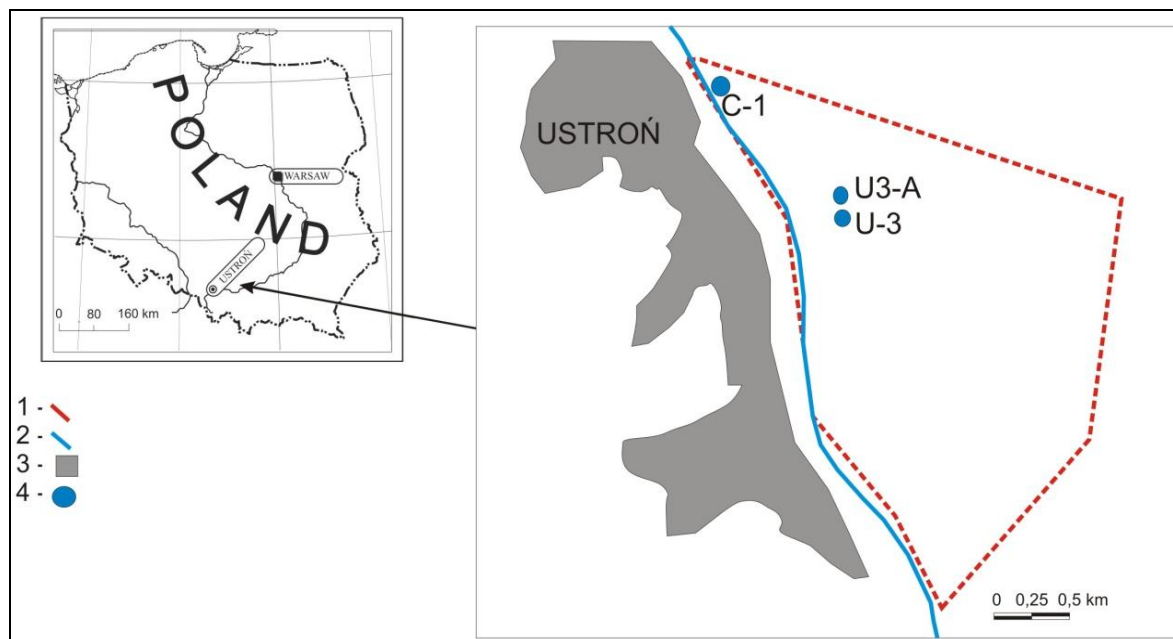
Jedną z metod służących do analizy szeregów czasowych są modele wygładzania wykładniczego (BALAGUER et al., 2008). Wygładzanie wykładnicze polega na tym, że szereg wygładzany jest za pomocą ważonej średniej ruchomej.

W zależności od wniosków wynikających z dekompozycji szeregu dostosowujemy odpowiednią metodę wyrównywania wykładniczego (HYNDMAN, ATHANASOPOULOS, 2014). Do oceny zmian stężenia chlorków w wodach leczniczych uzdrowiska Ustroń wraz z prognozą na najbliższe dwa lata zostały zastosowane cztery modele potrójnego wygładzania wykładniczego (MALINA, 1994). W niniejszej pracy przedstawione zostały wyniki najdokładniejszego z nich.

## OBSZAR BADAŃ

Uzdrowisko Ustroń zlokalizowane jest w południowej części Polski (rys. 1), w obrębie Beskidu Śląskiego będącego częścią Karpat (KONDRACKI, 2011). Ustroń, choć zaliczany jest do grupy najmłodszych uzdrowisk w Polsce, ma tradycje balneologiczne sięgające początków XIX wieku (RAJCHEL, ŚLIWA, WALIGÓRA, 2007). Uzdrowisko posiada koncesję na wydobycie wód leczniczych od 1994 roku. Eksploatacja odbywa się

tutaj za pomocą dwóch otworów U-3 oraz U3-A odwierconych odpowiednio w 1971 i 1978 roku (WALIGÓRA, SOŁTYSIAK, 2011). W 1992 roku odwiercono otwór chłonny C-1 – pierwszy w Polsce otwór służący do zatłaczania do górotworu wód pozabiegowych. W dotychczasowych dokumentacjach hydrogeologicznych przyjmuje się, że obszar zasobowy jest tożsamy z obszarem górniczym „Ustroń”. Ma on powierzchnię 5,4 km<sup>2</sup> (rys. 1).



Rys. 1. Lokalizacja obszaru badań:

1 – obszar górniczy, 2 – Wisła, 3 – obszary zabudowane, 4 – otwory eksploatacyjne

Рис. 1. Местоположение исследуемой территории:

1 – шахтное поле, 2 – р. Висла, 3 – застроенные территории, 4 – скважины

Fig. 1. Location of the study area:

1 – the mining area, 2 – Vistula river, 3 – built-up areas, 4 – the exploitation wells

W podłożu Karpat Zachodnich występują prekambryjsko-paleozoiczne utwory platformowe, przykryte molasowymi utworami neogeńskimi. W profilu geologicznym w rejonie Ustronia występują utwory prekambryjskie – gnejsy łuszczkowe, utwory dewońskie – skrasowiałe wapienie i dolomity, karbońskie kompleksy iłowców, łupków, mułowców i piaskowców o miąższości w przedziale, utwory fliszowe (naprzemianległe warstwy łupków, iłolupków, wapieni, margli, piaskowców i mułowców oraz czwartorzędowe gliny zwietrzelinowe (WALIGÓRA, SOŁTYSIAK, 2011).

Na terenie gminy Ustroń, w celu rozpoznania warunków hydrogeologicznych oraz ustalenia zasobów wód podziemnych, wykonano ogółem 52 otwory badawcze oraz 5 poszukiwawczych. Stwierdzono występowanie dwu stref hydrogeochemicznych: dolnej

oraz środkowej (CHOWANIEC, 1993; KOWALSKA, 2003). Dolną strefę budują piętra neogeńskie, karbońskie i dewońskie, strefę środkową natomiast piętro kredowo-paleogeńskie (SOLECKI, 2007).

Najważniejsze w tym regionie jest szczelinowo-krasowe dewońskie piętro wodonośne. Jest ono związane z utworami węglanowymi dewonu górnego i środkowego wykształconymi w postaci wapieni szarych i ciemnoszarych, przeławiconych dolomitami, marglami lub ciemnymi łupkami ilastymi. Woda ujęta otworem U-3 to termalna woda mineralna o mineralizacji 100–120 g/dm<sup>3</sup>. Otwór U-3A ujmuje termalną wodę o mineralizacji 110–130 g/dm<sup>3</sup> i temperaturze wahającej się od 18–22°C, ściśle zależnej od wydajności eksploatacji (WALIGÓRA, 2012). Wody te są wykorzystywane w balneologii do kąpieli leczniczych.

## CEL I METODYKA

Utrzymywanie dobrego stanu wód podziemnych jest bardzo ważne ze względów środowiskowych. W przypadku wód leczniczych, utrzymywanie stabilnych warunków fizykochemicznych, jest niezbędne również w celach balneologicznych. Wykonywane przez zakład przyrodolecniczy analizy fizykochemiczne dają możliwość prognozowania zmian stężenia poszczególnych składników i tym samym możliwość zapobiegania potencjalnym negatywnym konsekwencjom pogarszania się stanu wód.

Funkcje prognozowania szeregu czasowego umożliwiają przewidywanie przyszłych wartości na podstawie danych historycznych. Zbiór danych, który ma służyć prognozowaniu, należy poddać zlogarytmowaniu, a następnie dekompozycji addytywnej. Pozwoli to na wyznaczenie poszczególnych komponentów szeregu – określenia sezonowości i wyznaczeniu linii trendu (GUZIK, 2005).

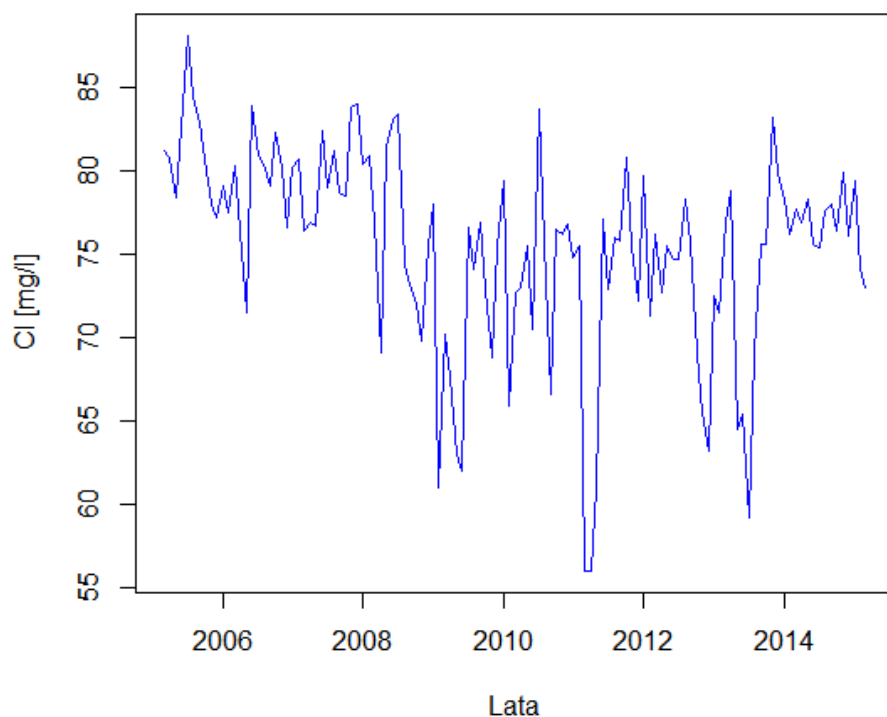
Obliczenia zostały wykonane w środowisku R (*R Core Team*, 2015). Wykorzystano tu pakiety *forecast* oraz *tseries*, w tym funkcję *ets* pozwalającą wyestymować parametry modelu wygładzania wykładniczego. Funkcja ta używa zaawansowanych algorytmów

uczenia maszynowego, takich jak potrójne wygładzanie wykładnicze. Funkcja *ets* w pakiecie R pozwala na wybór właściwego modelu spośród 20 dostępnych.

Wybrany model pozwoli na wyznaczenie miesięcznej prognozy punktowej i przedziałowej. Prognozy przedziałowe wyznaczyć można na wielu poziomach ufności (najczęściej 0,95 oraz 0,8). Wyestymowane w ten sposób wartości poddaje się weryfikacji z zastosowaniem 6 mierników, takich jak: błąd średni (*mean error*), średni moduł błędu (*mean absolute error*), średni błąd kwadratowy (*root mean squared error*), błąd procentowy (*percentage error*), średni moduł błędu procentowego (*mean absolute percentage error*), średni moduł błędu skalowanego (*mean absolute scaled error*).

## WYNIKI

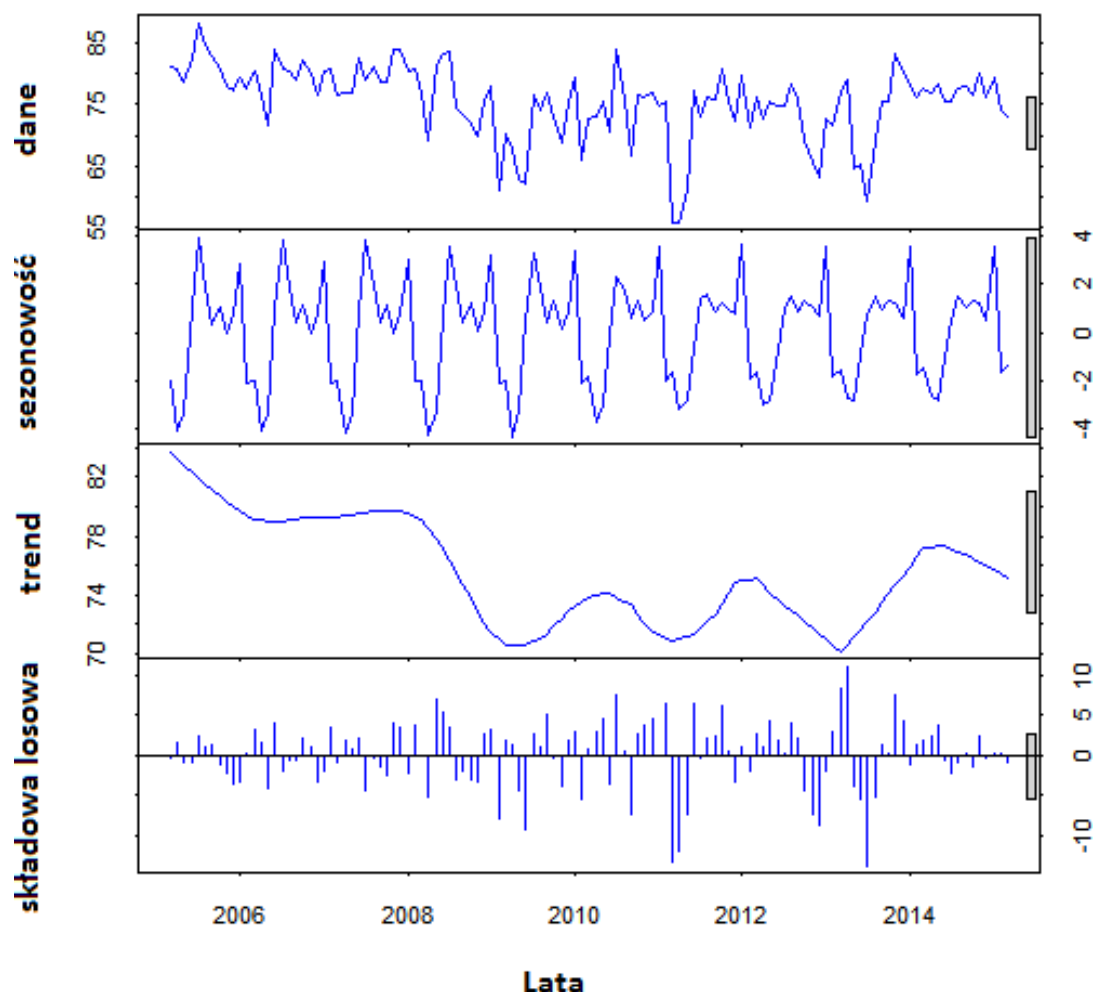
Prognozie zmian zawartości chlorków poddano wody lecznicze Uzdrowiska Ustroń z otworu U-3A. Okres badań obejmował średnie miesięczne wyniki analiz chemicznych dla okresu kwiecień 2005 roku – marzec roku 2015 (rys. 2).



Rys. 2. Stężenie chlorków w otworze U-3A w okresie 04.2005–03.2015  
Рис. 2. Концентрация хлоридов в скважине U-3A за период 04.2005–03.2015  
Fig. 2. Concentration of chlorides in the U-3A borehole in the period of April 2005 to March 2015

Do oceny zmian stężenia chlorków i wykonania 24-miesięcznej prognozy użyto funkcji *ets*. Wszystkie obliczenia zostały wykonane w środowisku programistycznym R (*R Core Team* 2015).

Zbiór danych poddano dekompozycji addytywnej. Wyznaczono w ten sposób poszczególne komponenty szeregu: sezonowość i linię trendu (rys. 3).



Rys. 3. Dekompozycja addytywna badanego szeregu czasowego  
 Рис. 3. Аддитивная декомпозиция исследуемой временной серии  
 Fig. 3. The additive decomposition of the time series studied

Jak można zauważyć, w latach 2005–2009 mamy do czynienia z malejącym trendem stężenia chlorków w otworze U-3A, na lata 2009–2013 przypadają największe w całym okresie badawczym fluktuacje, a od roku 2013 występuje trend rosnący. Dane z początku roku 2015 mogą wskazywać na zmianę trendu.

Przy wyborze najdokładniejszej funkcji *ets* w pakiecie R testowano cztery modele wygładzania wykładniczego: prosty model wygładzania wykładniczego Browna, model Holta, model addytywny Win-

tersa i model multiplikatywny Wintersa. Ostatecznie wybrano prosty model Browna, jako model, który wykazał najniższą wartość kryteriów informacyjnych AIC, AICc, BIC (tab. 1).

Prosty model wygładzania wykładniczego Browna jest stosowany w przypadku występowania prawie stałego poziomu zmiennej prognozowanej oraz niewielkich wahań przypadkowych.

Obliczenie prognozy odbywa się dla tego modelu z zastosowaniem wzoru:

Tabela 1. Wartości kryteriów AIC, AICc, BIC dla różnych modeli wygładzania  
 Таблица 1. Значения критериев AIC, AICc, BIC для различных моделей сглаживания  
 Table 1. AIC, AICc, BIC criteria values for the different smoothing models

Rodzaj modelu	AIC	AICc	BIC
Prosty model wygładzania Browna	986.9120	987.0137	992.5036
Model Holta	991.0433	991.3881	1002.2264
Model addytywny Wintersa	997.5708	1002.8016	1042.3035
Model multiplikatywny Wintersa	1012.241	1017.472	1056.973

$$\hat{y}_{T+1} := ay_T + (1 - a)\hat{y}_T = \hat{y}_T + ae_T$$

gdzie:

$T$  – okres,  $y_T$  – wartość zmiennej objaśnianej,  $\hat{y}_T$  – wartość prognozy,  $e_T = y_T - \hat{y}_T$  – błąd bezwzględny *ex post* prognozy z poprzedniego okresu  $T-1$ ,  $a$  – stała wybierana w drodze minimalizacji błędu *ex post* MSE dla prognoz wygasłych.

Sprawdzono także dokładność estymacji poprzez określenie wartości błędów (tab. 2).

Wartość średniego błędu powinna być bliska zeru, zatem w tym przypadku występuje niewielkie niedoszacowanie.

Wartości oszacowanej stałej  $a$  dla prostego modelu jest równa 0,3821. Po dokonaniu wyboru modelu, wykorzystano go do prognozowania zmian stężenia chlorków. Za okres prognozy przyjęto 24 miesiące. Wykonano prognozę punktową i przedziałową, przy czym tę ostatnią na dwóch poziomach ufności: 0,95 oraz 0,8 (tab. 3).

Tabela 2. Wartości błędów

Таблица 2. Значения погрешностей

Table 2. Error values

Błąd	Wartość
Błąd średni	-0,13143
Średni błąd absolutny	3,954799
Pierwiastek błędu średniokwadratowego	5,27893
Błąd procentowy	-0,6182308
Średni absolutny błąd procentowy	5,474439
Średni absolutny błąd skalowany	0,6613971

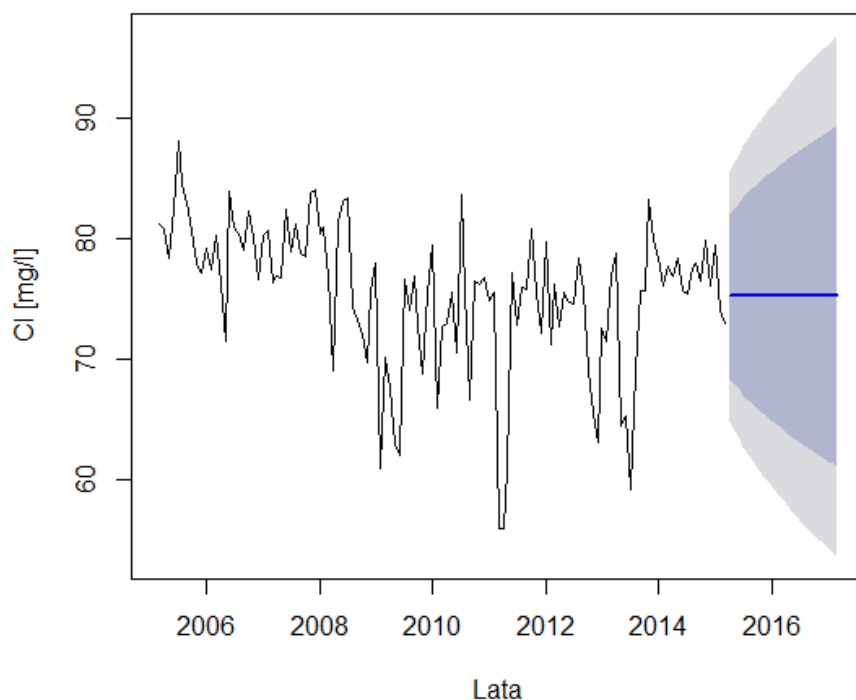
Tabela 3. Wartości prognozy zmian zawartości chlorków w wodach otworu U-3A

Таблица 3. Значения прогноза изменений содержания хлоридов в водах скважины U-3A

Table 3. The forecast values of the chloride content in waters from U-3A borehole

Data	Min. 0.8	Max. 0.8	Min. 0.95	Max. 0.95
kwiecień 2015	68.43983	81.97028	64.85853	85.55158
maj 2015	67.96272	82.44739	64.12886	86.28125
czerwiec 2015	67.51516	82.89495	63.44437	86.96573
lipiec 2015	67.09225	83.31786	62.79759	87.61251
sierpień 2015	66.69032	83.71978	62.18290	88.22721
wrzesień 2015	66.30653	84.10358	61.59594	88.81417
październik 2015	65.93861	84.47148	61.03326	89.37684
listopad 2015	65.58476	84.82533	60.49209	89.91801
grudzień 2015	65.24347	85.16662	59.97013	90.43996
styczeń 2016	64.91350	85.49660	59.46548	90.94462
luty 2016	64.59377	85.81632	58.97650	91.43359
marzec 2016	64.28341	86.12669	58.50184	91.90826
kwiecień 2016	63.98162	86.42848	58.04030	92.36980
maj 2016	63.68774	86.72236	57.59084	92.81925
czerwiec 2016	63.40117	87.00892	57.15258	93.25752
lipiec 2016	63.12140	87.28870	56.72470	93.68539
sierpień 2016	62.84796	87.56214	56.30651	94.10358
wrzesień 2016	62.58044	87.82966	55.89738	94.51272
październik 2016	62.31847	88.09162	55.49673	94.91336
listopad 2016	62.06173	88.34837	55.10407	95.30602
grudzień 2016	61.80990	88.60020	54.71894	95.69116
styczeń 2017	61.56272	88.84737	54.34091	96.06919
luty 2017	61.31994	89.09015	53.96961	96.44048
marzec 2017	61.08134	89.32876	53.60470	96.80540

Prognozy zmian zawartości chlorków z użyciem funkcji *ets* przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Prognoza zmian wartości chlorków z zastosowaniem funkcji *ets* na okres kwiecień 2015–kwiecień 2017

Рис. 4. Прогноз изменений содержания хлоридов с применением функции *ets* на период апрель 2015–апрель 2016 гг.

Fig. 4. Forecast of changes in chloride content in the period between April 2015 and April 2017 using the *ets* function

Uzyskane wyniki prognoz wskazują, że nie zachodzi zmiana trendu, a zawartość chlorków będzie się utrzymywać na stałym poziomie lub lekko wzrastać.

## PODSUMOWANIE

Uzdrowisko Ustroń wykorzystuje w celach leczniczych solanki dewońskie o mineralizacji dochodzącej do 130 g/l, eksploatowane z otworów U-3 oraz U-3A. Solanki te charakteryzują się dużą stabilizacją składu fizykochemicznego w całym okresie badawczym, obejmującym lata 2005–2015.

W przypadku wód stosowanych w lecznictwie ważna jest ocena dotychczasowych zmian ich składu chemicznego oraz wykonywanie prognozy. Dla średniomiesięcznych danych dotyczących stężenia chlorków w otworze U-3A wykonano analizę szeregów czasowych z wykorzystaniem funkcji *ets*, a konkretnie – prostego modelu wygładzania Browna.

Uzyskany model wygładzania wskazuje na niewielkie wahania stężenia chlorków w prognozie na 24 miesiące. Biorąc jako przykład chlorki i odnosząc wynik analizy za pomocą wspomnianego modelu wygładzania do mineralizacji ogólnej badanych wód, potwierdza się stabilność i wysoka jakość składu chemicznego wód leczniczych Uzdrowiska Ustroń.

## LITERATURA

Balaguer E., Palomares A., Sorie E., Martin-Guerrero J. D., 2008: Predicting service request in support centers

based on nonlinear dynamics, ARMA modeling and neural networks. *Expert Syst. App.* 34: 665–672.

Chowaniec J., 1993: Budowa geologiczna i warunki hydrogeologiczne okolic Ustronia z uwzględnieniem wyników otworu chłonnego Ustroń C-1. *Archiwum Uzdrowiska Ustroń*. (npubl).

Guzik B., 2005: *Ekonometria*. AE, Poznań: 290 s.

Hyndman R., Athanasopoulos G., 2014: *Forecasting: principles and practice*. University of Western Australia, Perth: 291 s.

Kondracki J., 2011: *Geografia regionalna Polski*. PWN, Warszawa: 441 s.

Kowalska M., 2003: Stan rozpoznania geologicznego Ustronia na tle powiatów: bielskiego, cieszyńskiego i żywieckiego. *Przyrodnik Ustroński*, 2: 5–10.

Malina A., 1994: The Forecasting of Economic Phenomena on the Basis of the Methods of Exponential Smoothing of Time Series. *Cracow Review of Economics and Management*, 440: 15–29.

Rajchel L., Śliwa T., Waligóra J., 2007: Uwagi o wodach leczniczych Ustronia. W: *Współczesne problemy hydrogeologii*, 13, 3. AGH, Kraków: 969–976.

R Core Team, 2015: *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna URL, <http://www.R-project.org/>.

Solecki T., 2007: Application of boreholes in the environment protection on the example of the Ustron health resort. *Drilling, oil, gas*, 24: 465–473.

Waligóra J., 2012: Projekt zagospodarowania złoża wody leczniczej „Ustroń” z utworów dewonu, w granicach obszaru górniczego „Ustroń”. *Archiwum Uzdrowiska Ustroń, Ustroń*. (npubl.).

Waligóra J., Sołtysiak M., 2011: Zatlaczanie wód pozabiegowych w utwory serii węglanowej dewonu w uzdrowisku Ustroń. *Biul. PIG*, 445: 701–708.