

Modelowanie parametrów hydrogeologicznych i geotermicznych oraz automatyzacja obliczeń zasobów geotermalnych w skali regionalnej na przykładzie konstrukcji współczynnika mocy

Marek Hajto¹



Modelling of hydrogeological and geothermal parameters and automation of geothermal resources calculation on a regional scale, example of the power factor construction. Prz. Geol. 62: 852–855.

Abstract. This paper presents proposals for application of methodology of evaluation of geothermal resources on a regional scale, focusing on economic efficiency of heat recovery through the analysis of the power factor distribution. The concept of the power factor design by Gosk (1982) is discussed according to the present conditions of socio-economic development in our country, including the prices of alternative fuel (coal), the current cost of drilling, etc. In the paper a solution for automation of geothermal resources calculation, based on complex operations on the three-dimensional spatial models (grids) using the specialized software for interpretation of geological data's of Landmark Graphics Corporation – ZMap Plus package is presented. Attention is drawn to the possibility of using specialized programming macro language ZCL (Zycor Command Language) to perform complex, often repetitive, mathematical procedures, what significantly speeds up the calculation procedures and may reduce the computational errors.

Keywords: geothermal resources, power factor, hydrogeothermal parameters

Ocena zasobów energii geotermalnej w Polsce bywa często tematem dyskusji i nieporozumień nie tylko wśród osób nie zajmujących się zawodowo problematyką wykorzystania odnawialnych źródeł energii, ale również w środowisku naukowym.

Podstawową przyczyną jest zapewne niewielka świadomość zagadnień związanych z możliwościami wykorzystania ciepła wód geotermalnych oraz sposobów i metod szacowania zasobów energii geotermalnej. Często przyczyną jest również brak odpowiedniego „warsztatu” pozwalającego na dokonanie weryfikacji podawanych wielkości uzyskanych zasobów geotermalnych. W literaturze pojawiają się niesprawdzone, bądź nieprawdziwe informacje dotyczące zarówno wielkości zasobów, jak i błędnej interpretacji możliwości praktycznego ich wykorzystania.

W Polsce brak jest niestety uregulowań w zakresie klasyfikacji oraz metodologii regionalnej oceny zasobów energii geotermalnej. Ośrodki naukowe stosują różne metody szacowania zasobów, co sprawia, że uzyskane wyniki nie są porównywalne. Autorzy sięgają często po literaturę z zakresu oceny zasobów wód zwykłych, co oczywiście ma uzasadnienie przy eksploatacji wód geotermalnych jednym otworem. W przypadku, gdy mamy do czynienia z wodami wysokomineralizowanymi – eksploatacja zwykle odbywa się systemem wielootworowym (np. dubletowym), a wody geotermalne po oddaniu ciepła są zatłaczane do warstwy wodonośnej – stosowanie powyższej metody nie do końca jest uzasadnione. Analizując literaturę krajową z zakresu metodyki oceny zasobów geotermalnych, można stwierdzić, że funkcjonują jedynie poradniki metodyczne, m.in.: Górecki i in., 1993; Kapuściński i in., 1997. Równoległe są dostępne podręczniki oraz poradniki hydrogeologii, m.in.: Macioszczyk & Szestakow, 1983; Pazdro & Kozerski, 1990; Dowgiałło i in., 2002; Dąbrowski & Górski, 2004; Dąbrowski & Przybyłek, 2005; Pacyński & Sadurski, 2007 i inne,

które nie dają gotowych rozwiązań oceny zasobów wód geotermalnych.

Metodykę oceny zasobów geologicznych energii geotermalnej oparto więc na formułach obliczeniowych oraz wzorach stosowanych w literaturze zagranicznej, w szczególności: Nathenson & Muffler, 1975; Muffler & Cataldi, 1978; Muffler, 1979; Hochstein, 1990; Haenel & Staroste, 2002. Eksperci krajów zrzeszonych w Unii Europejskiej, opierając się na znanych klasyfikacjach zasobów i terminologii stosowanej w przemyśle naftowym oraz surowców mineralnych, stosują podział zasobów geotermalnych, który jest oparty na diagramie McKelvey'a. Do tego właśnie podziału dostosowano metodykę ilościowej oceny zasobów energii nagromadzonej w wodach geotermalnych. Podział ten uwzględnia stopień rozpoznania geologicznego obszarów perspektywicznych oraz uwarunkowania środowiskowe, techniczne i ekonomiczne udostępnienia, eksploatacji i wykorzystania potencjalnych zasobów geotermalnych.

Większość autorów oraz publikacji, w tym obszernie opracowania monograficzne dotyczące zasobów geotermalnych w skali Europy (Haenel & Staroste, 2002), skupia się na zasobach geologicznych. Podają one wielkości energii zakumulowanej w skałach i wodach stosownie do wydzielonych klas zasobów: dostępnych, statycznych oraz statycznych-wydobywalnych.

Wobec trudności w ocenie zasobów hydrogeotermalnych pewnym rozwiązaniem jawi się tzw. współczynnik mocy.

KONSTRUKCJA ORAZ AUTOMATYZACJA OBLICZEŃ WSPÓŁCZYNNIKA MOCY

W roku 1982 Gosk zaproponował, żeby przy ocenie regionalnych zasobów energii geotermalnej wykonać również wstępną ocenę ekonomiczną pozyskania ciepła wód geotermalnych do celów grzewczych, która uwzględniałaby

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Surowców Energetycznych, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; mhajto@agh.edu.pl.

trzy podstawowe czynniki, a mianowicie: parametry zbiorników hydrogeotermalnych, sposób zagospodarowania uzyskanego ciepła oraz uwarunkowania otoczenia społeczno-gospodarczego.

Zgodnie z koncepcją autora właściwości zbiorników hydrogeotermalnych na danym obszarze zależą od czynników geologicznych i hydrogeologicznych – są one wielkościami o charakterze obiektywnym i niezmiennym. Elementy dwóch następujących grup jedynie częściowo i pośrednio są uzależnione od właściwości zbiorników, a w większości są od nich niezależne. Przyjmując jednak określone założenia i znajdując odpowiednie relacje między zmiennymi, określając np. koszt wiercenia dubletu geotermalnego w funkcji głębokości otworów (głębokości zalegania warstw wodonośnych), ekonomiczną efektywność eksploatacji zasobów energii geotermalnej danego zbiornika można przedstawić jako zależną jedynie od parametrów geologicznych, hydrogeologicznych i termicznych.

Podobne relacje można określić również w celu powiązania wysokości niezbędnych do poniesienia nakładów kapitałowych oraz kosztów eksploatacji instalacji geotermalnych a właściwościami udostępnianych zbiorników hydrotermalnych, co w konsekwencji umożliwi określenie kryterium wstępnej oceny zasadności eksploatacji wód geotermalnych danego zbiornika.

Transpozycja realizowana przez zależności matematyczne dotyczy tych właściwości zbiorników, których wpływ na rozważane elementy jest szczególnie istotny. Do nich można zaliczyć: przewodność hydrauliczną skał, która determinuje zdolność skał do przewodzenia wody oraz od której zależy moc użytych pomp eksploatacyjnych i zatłaczających, temperaturę eksploatowanej wody geotermalnej (wpływa na moc cieplną ujęcia) i głębokość występowania formacji wodonośnej (ma decydujący wpływ na koszt wierceń – podstawowy składnik nakładów kapitałowych).

W celu oceny zasobów zbiorników hydrogeotermalnych wymienione właściwości można ująć w formę bezwymiarowego wskaźnika, tzw. współczynnika mocy, zdefiniowanego następująco (Gosk, 1982):

$$F = \frac{\text{efektywna moc wyjściowa}}{\text{efektywna moc wejściowa}} = \frac{P_{wy}}{P_{we}} [-] \quad [1]$$

Współczynnik mocy jest wskaźnikiem mówiącym, ile razy moc cieplna ujęcia geotermalnego przewyższa moc cieplną stanowiącą ekwiwalent nakładów kapitałowych i kosztów eksploatacji tego ujęcia. Tak zdefiniowany współczynnik mocy odpowiada kryterium efektywności, tj. stosunkowi uzyskanych efektów do poniesionych nakładów. Im wyższa wartość tego ilorazu, tym wyższa jest efektywność. Współczynnik mocy niższy od 1 ($F > 1$) wskazuje, że „wartość energetyczna” poniesionych środków finansowych na przedsięwzięcie jest wyższa od uzyskanych efektów energetycznych. Jest to zatem wskaźnik wyrażający wartość energetyczną zasobów geotermalnych oraz ekonomiczny sens ich eksploatacji. Współczynnik mocy ma charakter wskaźnika quasi-ekonomicznego. Ujmuje on syntetycznie aspekt ekonomiczny i energetyczny eksploatacji ciepła wód podziemnych.

Przyjmuje się, że efektywna moc wyjściowa odpowiada średniej rocznej mocy cieplnej ujęcia geotermalnego, a ponoszona moc wejściowa odpowiada nakładom kapi-

tałowym na wybudowanie ujęcia geotermalnego oraz kosztom jego eksploatacji wyrażonym w ekwiwalencie mocy cieplnej. Można ją zinterpretować jako ilość ciepła możliwą do uzyskania w jednostce czasu przy alternatywnym sposobie wykorzystania środków finansowych. Szczegóły dotyczące metodyki szacowania zasobów dyspozycyjnych, w tym konstrukcji współczynnika mocy, przedstawiono m.in. w pracach Kuźniaka & Hajto (2006) oraz Góreckiego i innych (2011).

Oszacowanie niezbędnych nakładów kapitałowych na budowę ujęcia geotermalnego wymaga określenia wydatków na podstawowe jego elementy, takie jak: otwory wiertnicze (produkcyjny i chłonnny), wymienniki ciepła, pompy, rurociąg przesyłowy oraz budynki i prace inżynierskie. Dodatkowo należy uwzględnić nakłady kapitałowe fazy przedprodukcyjnej oraz nakłady nieprzewidziane. Wszystkie wymienione pozycje szacuje się, opierając się na kosztorysach oraz stosując wykładnicze i czynnikowe metody interpolacji nakładów, a następnie przedstawia je w funkcji właściwości zbiorników hydrogeotermalnych.

W celu uproszczenia szacunku kosztów eksploatacji ujęć wód geotermalnych przyjmuje się ich podział na: koszty określone jako procent od wysokości nakładów inwestycyjnych na budowę tych ujęć (koszty remontów i konserwacji, koszty ogólne i administracyjne) oraz koszty proporcjonalne do skali eksploatacji wód tymi ujęciami (koszty zużywanej na pompowanie energii elektrycznej). Podobnie jak nakłady kapitałowe także koszty eksploatacji wyraża się w funkcji właściwości zbiorników hydrogeotermalnych.

Metodyka wskaźnikowej oceny ekonomicznej zbiorników wód geotermalnych, z wykorzystaniem analizy współczynnika mocy rozwijana jest w Katedrze Surowców Energetycznych AGH od lat 90. XX w. Kryterium to posłużyło do wyodrębnienia i usystematyzowania korzystnych ekonomicznie granic zbiorników geotermalnych w obszarach perspektywicznych, w rejonach Polski Niżowej (Górecki, 1990, 1995; 2006a, b), Karpat Zachodnich (Górecki, 2011) oraz zapadliku przedkarpackim (Górecki, 2012). Obecnie trwają prace nad oceną potencjału geotermalnego Karpat Wschodnich.

Reasumując, na podstawie omówionych wcześniej wzorów i założeń określono następującą zależność współczynnika mocy (F) od podstawowych właściwości zbiorników hydrogeotermalnych:

$$F = \frac{P_{wy} = 1,14 \cdot LF \cdot Q \cdot (T_s - 25)}{P_{we} = 0,77 \cdot 10^{-3} \cdot \{46590 \cdot H^{0,702} + 825 \cdot [Q \cdot (T - 25)]^{0,6} + 2,55 \cdot \left[\frac{Q^2}{(k \cdot m)} \right]^{0,6} + 3 \cdot 10^5\} + 1,033 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{Q^2}{(k \cdot m)}} \quad [2]$$

gdzie:

k – współczynnik filtracji [m/s],

m – miąższość formacji wodonośnej [m],

H – głębokość występowania formacji wodonośnej [m],

LF – średni roczny współczynnik obciążenia ujęcia (0–1) [-],

Q – nominalny wydatek eksploatacyjny ujęcia wody geotermalnej [m³/h],

T_s – temperatura w stopnie warstwy wodonośnej [°C].

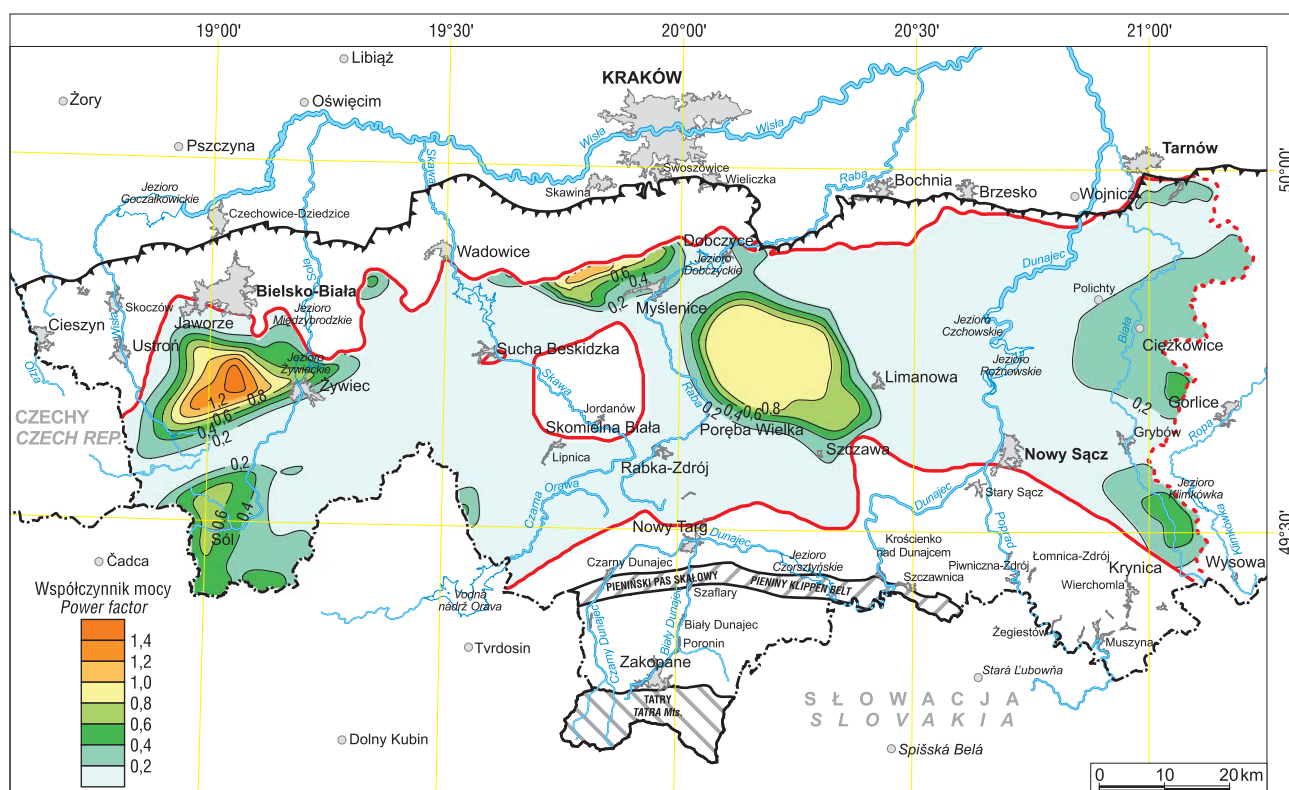
Jak widać z powyższych rozważań, konstrukcja współczynnika mocy jest dosyć skomplikowana. Wskaźnik ten łączy podstawowe parametry hydrogeologiczne zbiorników w postaci modeli 3D (gridów) ze wskaźnikami ekonomicznymi. Współczynnik mocy jest kombinacją sześciu podstawowych parametrów hydrogeotermalnych, opisanych w postaci modeli matematycznych – gridów, są to: współczynnik filtracji, miąższość formacji wodonośnej, głębokość zalegania warstw wodonośnych, wydajność eksploatacyjna ujęcia, temperatura wód geotermalnych. Dodatkowo wartości parametrów określających ponoszoną moc wejściową (współczynniki w mianowniku wzoru nr 2) nie są stałe, lecz uzależnione od czynników otoczenia społeczno-gospodarczego, w tym: cen paliwa alternatywnego², kosztów wiercenia, etc., w związku z powyższym wymagają okresowej aktualizacji. Współczynnik mocy, przy zastosowaniu końcowego wzoru (wzór nr 2) obliczany jest dla każdego zbiornika z osobna i wykreślany w postaci mapy (ryc. 1).

Do modelowania parametrów hydrogeotermalnych oraz kalkulacji zasobów geotermalnych, w tym obliczanie rozkładu współczynnika mocy oraz wizualizacji wyników obliczeń, wykorzystano oprogramowanie firmy Landmark Graphics Corporation, a w szczególności pakiet programów ZMap Plus. Program ten umożliwia interpretację przestrzennej zmienności parametrów geologicznych, hydrogeologicznych oraz termicznych, przy wykorzystaniu zintegrowanej bazy danych. Oprogramowanie jest wyposażone w rozwinięte narzędzia interpretacyjne oraz szereg

narzędzi programistycznych, które mogą być rozwijane w miarę umiejętności i potrzeb interpretatora. Do narzędzi ułatwiających wykonywanie licznych, często powtarzających się procedur matematycznych można zaliczyć język programowania makropoleceń ZCL (*Zycor Command Language*).

Konstrukcja oraz wykorzystanie systemu makropoleceń pozwala na znaczne przyspieszenie procesów iteracyjnych, a w konsekwencji ograniczenie możliwości popełnienia błędów obliczeniowych i omyłek. Dla przykładu konstrukcja wzoru opisującego współczynnik mocy (wzór nr 2) wymaga wykonania 21 kroków obliczeniowych. Automatyzacja procesu obliczeniowego, przy wykorzystaniu wspomnianych makropoleceń, sprowadza się jedynie do uruchomienia makropolecenia oraz podążania za kolejnymi sugestiami wykonywanego programu, w szczególności definiowania odpowiednich zmiennych wejściowych przechowywanych w systemie. Wykorzystanie makropoleceń daje możliwość testowania alternatywnych rozwiązań oraz optymalizację obliczeń parametrów hydrogeologicznych i geotermicznych w krótkim czasie, a w konsekwencji znaczną poprawę końcowych modeli rozkładu powyższych parametrów w skali regionalnej.

Przykładowy rozkład wartości współczynnika mocy dla interwału głębokościowego 1000–1500 m p.p.m. dla utworów fliszowych jednostek zewnętrznych Karpat Zachodnich przedstawiono na rycinie 1.



Ryc. 1. Mapa rozkładu współczynnika mocy dla utworów fliszowych jednostek zewnętrznych w interwale głębokościowym 1000–1500 m p.p.m. w Karpatach Zachodnich

Fig. 1. Distribution of the power factor for flysch sediments of outer units within the depth interval of 1 000–1 500 m b.s.l. in the Western Carpathians

² Jako paliwo alternatywne – przyjęto węgiel kamienny o wartości opałowej 6 000 kcal/kg; cenę 1 tony węgla przyjęto na poziomie 70 USD/t.

WNIOSKI

Metodyka regionalnej analizy parametrów hydrogeologicznych oraz metodyka kalkulacji zasobów geotermalnych wymagają przeprowadzenia szeregu operacji matematycznych oraz zastosowania złożonych procedur obliczeniowych wykonywanych na przestrzennych modelach rozkładu parametrów (gridach). Zastosowanie nowoczesnych metod kartografii geologicznej, komputerowych technik przetwarzania numerycznego, realizowane przez wykorzystanie profesjonalnego oprogramowania do interpretacji danych geologicznych, np. ZMap Plus firmy Landmark Graphics Corporation wpływają na znaczne przyspieszenie oraz optymalizację procesów obliczeniowych.

Analizy i modelowania współczynnika mocy zostały wykonane za pomocą zintegrowanego systemu przetwarzania danych geologicznych OpenWorks firmy Landmark Graphics Corporation, użytkowanego na podstawie grantu akademickiego (2003-COM-020272 i 2003-COM-020273) – udzielonego Katedrze Surowców Energetycznych, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

Artykuł przygotowano w ramach prac statutowych Katedry Surowców Energetycznych AGH nr 11.11.140.321.

Autor składa podziękowania Recenzentom niniejszego artykułu.

LITERATURA

DĄBROWSKI S. & PRZYBYŁEK J. 2005 – Metodyka próbnych pompowań w dokumentowaniu zasobów wód podziemnych. Poradnik metodyczny. Min. Środ.
 DĄBROWSKI S., GÓRSKI J., KAPUŚCIŃSKI J., PRZYBYŁEK J. & SZCZEPAŃSKI A. 2004 – Metodyka określania zasobów eksploatacyjnych ujęć zwykłych wód podziemnych. Poradnik metodyczny. Min. Środ.
 DOWGIAŁŁO J., KLECZKOWSKI A., MACIASZCZYK T. & RÓŻKOWSKI A., (red.) 2002 – Słownik Hydrogeologiczny. Min. Środ.
 GOSK E. 1982 – Geothermal resources assesment. [W:] Čermak V. & Haenel R. (red.) Geothermics and geothermal energy. Schweizerbartsh Verlagbuchhandlung, Stuttgart.
 GÓRECKI W. (red.) 1990 – Atlas wód geotermalnych Niżu Polskiego. Inst. Sur. Energ. AGH Kraków. Okręgowe Przeds. Geodez.-Kartogr., s. 368.

GÓRECKI W. (red.) 1995 – Atlas zasobów energii geotermalnej na Niżu Polskim. Tow. Geosynoptyków „Geos”, Kraków, s. 37.
 GÓRECKI W. (red.) 2006a – Atlas zasobów geotermalnych na Niżu Poskim – formacje mezozoiku. Ministerstwo Środowiska. Zakł. Sur. Energ. Akad. Gór.-Hutn., Kraków, s. 484.
 GÓRECKI W. (red.) 2006b – Atlas zasobów geotermalnych na Niżu Poskim – formacje paleozoiku. Ministerstwo Środowiska. Zakł. Sur. Energ. Akad. Gór.-Hutn., Kraków, s. 240.
 GÓRECKI W. (red.) 2012 – Atlas geotermalny zapadliska przedkarpackiego. Wyd. Katedra Sur. Energ. Akad. Gór.-Hutn., Kraków.
 GÓRECKI W. i in. 1993 – Metodyka oceny zasobów energii wód geotermalnych w Polsce. Ministerstwo Ochrony Środowiska Zasobów Naturalnych i Leśnictwa. Arch. Zakł. Sur. Energ. Akad. Gór.-Hutn., Kraków.
 GÓRECKI W., KUŹNIAK T. & HAJTO M. 2011 – Klasyfikacja i metodyka oceny zasobów energii geotermalnej. [W:] Górecki W. (red.) Atlas zasobów wód i energii geotermalnej Karpat Zachodnich. Katedra Sur. Energ. Akad. Gór.-Hutn., Kraków: 352–367.
 HAENEL R. & STAROSTE E. (red.) 2002 – Atlas of geothermal resources in Europe. Hannover, s. 93.
 HOCHSTEIN M.P. 1990 – Classification and assessment of geothermal resources. [W:] Dickson M.H. & Fanelli M. (red.) Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization, Unitar, New York: 31–57.
 KAPUŚCIŃSKI J., NAGY S., DŁUGOSZ P., BIERNAT H., BENTKOWSKI A., ZAWISZA L., MACUDA J. & BUJAKOWSKA K. 1997 – Zasady i metodyka dokumentowania zasobów wód termalnych i energii geotermalnej oraz sposoby odprowadzania wód zużytych. Poradnik metodyczny. Min. Ochrony Środ. Zas. Natur. i Leśnic., Warszawa.
 KUŹNIAK T. & HAJTO M. 2006 – Metodyka oceny ekonomicznej dokumentowanego zbiornika hydrogeotermalnego oraz szacowanie jego zasobów dyspozycyjnych. [W:] Górecki W. (red.) Atlas zasobów geotermalnych Niżu Polskiego – formacje mezozoiczne. Katedra Sur. Energ. Akad. Gór.-Hutn., Kraków: 163–165.
 MACIOSZCZYK T. & SZESTAKOW W.M. 1983 – Dynamika wód podziemnych – metody obliczeń. Wyd. Geol., Warszawa.
 MUFFLER L.P.J. 1979 – Assessment of geothermal resources of the United States, 1978. U.S. Geol. Surv. Circular, 790, s. 163.
 MUFFLER L.J.P. & CATALDI R. 1978 – Methods for regional Assessment of Geothermal Resources. Geothermics, 7 (2/4): 53–89.
 NATHENSON M. & MUFFLER L.J.P. 1975 – Geothermal Resources in hydrothermal convection systems and conduction – dominated areas. [W:] D.E. White & D.L. Williams (red.) Assessment of geothermal resources of the United States – 1975: U.S. Geol. Surv. Circular, 726: 104–121.
 PACZYŃSKI B. & SADURSKI A. (red.) 2007 – Hydrogeologia regionalna Polski. Tom I. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
 PAZDRO Z. & KOZERSKI B. 1990 – Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., Warszawa.