

Anna SOWIŹDŹAŁ
Wojciech GÓRECKI
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska
Katedra Surowców Energetycznych
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel. (+48 12) 617 38 43, (+48 12) 617 23 60
ansow@agh.edu.pl, wgorecki@agh.edu.pl

Technika Poszukiwań Geologicznych
Geotermia, Zrównoważony Rozwój nr 2/2013

MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA ENERGII GEOTERMALNEJ W REJONIE ZAPADLIKA PRZEDKARPACKIEGO

STRESZCZENIE

W roku 2012 w Katedrze Surowców Energetycznych na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH wydano „Atlas geotermalny zapadliska przedkarpackiego” (Górecki (red. nauk.) i in. 2012), którego celem było rozpoznanie obszarów perspektywicznych pod kątem wykorzystania wód i energii geotermalnej w rejonie zapadliska przedkarpackiego. Szczegółowej analizie poddano jedenaście zbiorników hydrogeotermalnych znajdujących się na obszarze zapadliska. Zostały one scharakteryzowane pod kątem budowy geologicznej, zasięgu, głębokości zalegania i miąższości poziomów wodonośnych, temperatur i mineralizacji wód, wydajności otworów wiertniczych, a także parametrów skał zbiornikowych. Efekty prac interdyscyplinarnego zespołu badawczego wskazują na możliwość ich zagospodarowania do różnorodnych celów. Rejon zapadliska przedkarpackiego posiada znacznie większy potencjał związany z wykorzystaniem wód geotermalnych do celów rekreacyjnych i/lub balneoterapeutycznych niż do celów ciepłowniczych. W niektórych rejonach możliwe jest ich zagospodarowanie także do celów ciepłowniczych, w tym także za pomocą pomp ciepła. Perspektywiczne są przede wszystkim zbiorniki cenomanu, jury górnej, dewonu – karbonu i miocenu.

SŁOWA KLUCZOWE

Wody geotermalne, zapadlisko przedkarpackie, wykorzystanie, balneoterapia

* * *

WPROWADZENIE

Energia geotermalna stanowi naturalne bogactwo danego regionu posiadające szereg korzystnych cech, do których należą m.in. praktyczna nieograniczoność i odnawialność, powszechność występowania w pobliżu użytkownika, niezależność od zmiennych warunków klimatycznych i pogodowych, a także możliwość użytkowania bez powodowania

zakłóceń w środowisku naturalnym. Zaletą wykorzystywania energii geotermalnej jest również duże spektrum możliwości jej wykorzystania. Podstawowym i najbardziej pożądanym kierunkiem jest stosowanie wód i energii geotermalnej w ciepłownictwie, ale ich wykorzystanie do innych celów może także przynieść wymierne efekty. Na opłacalność inwestycji geotermalnej wpływa szereg czynników, jednak podstawowym zagadnieniem jest dobre rozpoznanie parametrów hydrogeotermalnych. Określenie rejonów o gospodarczym znaczeniu dla zagospodarowania wód geotermalnych jest przyczynkiem do efektywnego ich wykorzystania na danym terenie dla potrzeb lokalnych (np. budowa kąpielisk, wykorzystanie ciepła do ogrzewania) oraz ponadlokalnych (turystyka, udział w ochronie środowiska poprzez redukcję emisji szkodliwych substancji do atmosfery).

W Katedrze Surowców Energetycznych na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH prowadzi się od wielu lat badania podstawowe i prace wdrożeniowe obejmujące wybór optymalnych stref do wykorzystania wód i energii geotermalnej dla celów praktycznych. Analizowane są geologiczne uwarunkowania występowania wód i zasobów energii geotermalnej oraz technologie ich zagospodarowania w obrębie jednostek geologicznych Polski Niżowej, Karpat i zapadliska przedkarpackiego. Efekty analiz zostały opublikowane w serii *Atlasów geotermalnych* dotyczących rozpoznania warunków geotermalnych Niżu Polskiego (Górecki (red. nauk.) i in. 1990, 1995, 2006) i Karpat Zachodnich (Górecki (red. nauk.) i in. 2011). W roku 2012 wydano *Atlas geotermalny zapadliska przedkarpackiego* (Górecki (red. nauk.) i in. 2012), stanowiący wszechstronne źródło informacji o występowaniu oraz możliwościach eksploatacji wód geotermalnych na obszarze zapadliska przedkarpackiego.

Obecnie na obszarze zapadliska przedkarpackiego brak jest obiektów bazujących na wodach geotermalnych (zakładów geotermalnych, kąpielisk, ośrodków typu spa). Rozpoznane i udokumentowane na tym terenie wody mineralne, solanki oraz wody geotermalne występują w piętnastu miejscowościach. Są one wykorzystywane do celów leczniczych w sześciu uzdrowiskach statutowych. Są to: Horyniec Zdrój, Solec Zdrój, Busko Zdrój, Kraków-Swoszowice, Goczałkowice Zdrój i Ustroń. W przeszłości w kilku innych miejscowościach zapadliska przedkarpackiego funkcjonowały zakłady lecznictwa uzdrowiskowego opierające swoją działalność na występujących w ich granicach lub bliskim sąsiedztwie źródłach wód leczniczych bądź potencjalnie leczniczych – w Nieborowie, Straszędzie, Lubenii, Jaworzu, Jastrzębiu Zdroju (Jasnos 2012).

Atlas geotermalny zapadliska przedkarpackiego – wskazując kierunki i możliwości zagospodarowania wód geotermalnych – zawiera informacje przydatne zarówno dla studentów czy nauczycieli akademickich, jak i dla inwestorów zainteresowanych wykorzystaniem potencjału wód geotermalnych tego regionu.

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ZAPADLISKA PRZEDKARPACKIEGO

Zapadlisko przedkarpackie, genetycznie związane z najmłodszą jednostką geologiczną Polski – Karpatami fliszowymi – jest strukturą asymetryczną, wypełnioną osadami molas

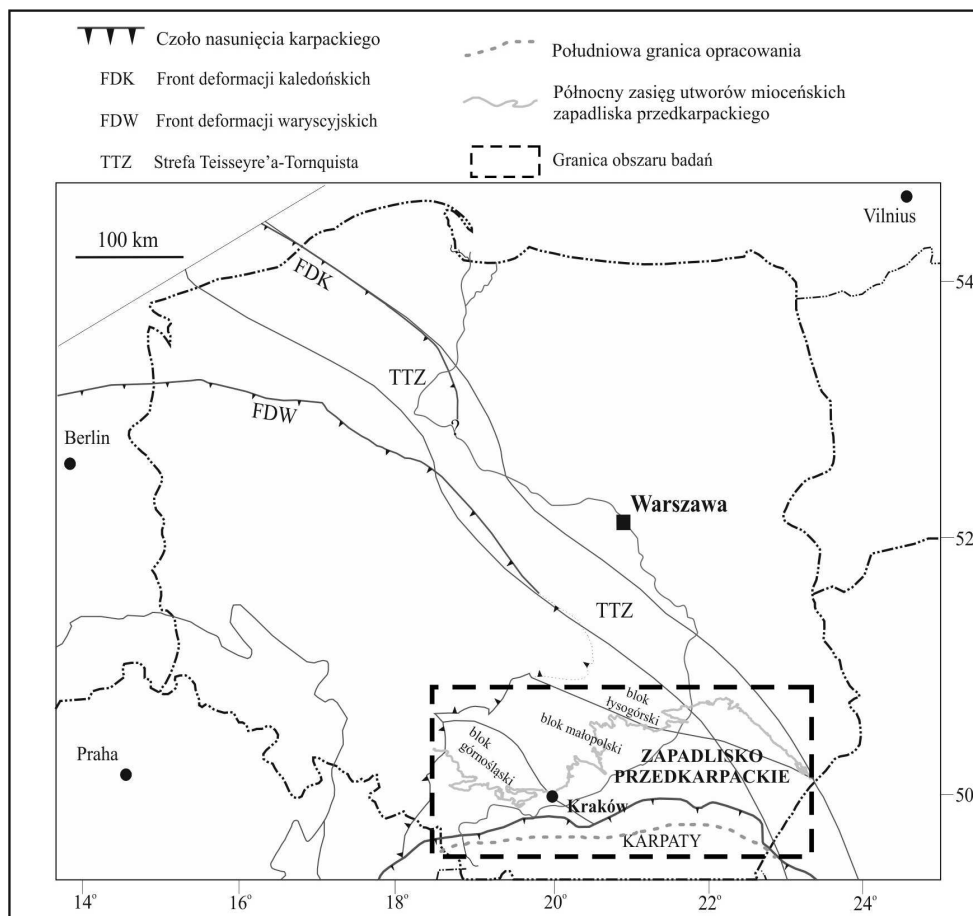
miocenijskich o miąższości od kilkuset do około 3 000 metrów, w postaci sekwencji łupków, mułowców i piaskowców. Kompleks ten określany jest jako tzw. miocen autochtoniczny, a jego osady pochodzą głównie z erozji sfałdowanych osadów fliszu karpackiego. Wyraźna, południowa granica zapadliska przedkarpackiego wyznaczona jest przez krawędź nasuniętych Karpat, chociaż zróżnicowane miąższości miocenu występują również pod nasunięciem karpackim. Z tego względu południowa granica obszaru analizowanego w wymienionym *Atlasie* (Górecki (red. nauk.) i in. 2012) występuje około 15 km na południe do granicy tego nasunięcia.

W granicach Polski rozciągłość równoleżnikowa zapadliska przedkarpackiego liczy ponad 300 km, a maksymalna szerokość nie przekracza 100 km. Asymetryczność tej struktury zaznacza się zarówno w jej przekroju poprzecznym (południkowym) – maksymalne miąższości utworów miocenu występują na południu, u czoła nasunięcia karpackiego, i maleją ku północy, jak i w przekroju podłużnym – gdzie podniesienie podłoża prekambryjsko-paleozoicznego (tzw. rygiel krakowski) dzieli je na nierówne części: większą jako zapadlisko wschodnie i mniejszą – zapadlisko zachodnie. Podłożem zapadliska w jego części wschodniej są ścięte erozyjnie i zróżnicowane wiekowo utwory platformy zachodnioeuropejskiej wieku prekambryjsko-paleozoik (strefa miechowsko-rzeszowska) oraz mezozoik (niecka miechowska). W części zachodniej podłoże to stanowią kompleksy skał mezozoicznych oraz głównie paleozoicznych (karbońskich) niecki górnośląskiej spoczywające na prekambryjskich skałach metamorficznych bloku górnośląskiego. Analizowany w *Atlasie* obszar obejmuje około 24 400 km², co stanowi około 7,8% powierzchni kraju (Harasimiuk i in. 2012, z literaturą tam cytowaną) (rys. 1).

2. PRZEPROWADZONE PRACE ANALITYCZNE

Obszar zapadliska przedkarpackiego jest stosunkowo dobrze rozpoznany wiertniczo w związku z prowadzonymi od wielu lat poszukiwaniami złóż węglowodorów. Dla potrzeb realizacji *Atlasu* zgromadzono i przeanalizowano bogaty materiał faktograficzny, obejmujący informację geologiczną pochodzącą z 4169 otworów wiertniczych zlokalizowanych w obszarze badań. Materiał ten został poddany analizie i ocenie pod kątem możliwości występowania perspektywicznych formacji wodonośnych. Ze względu na wymogi nowoczesnych zasad interpretacji geologicznej oraz konieczność dokonania ilościowej analizy parametrów potencjalnych zbiorników geotermalnych, całość zgromadzonego materiału została poddana konwersji w format danych cyfrowych.

Prace badawcze zostały wykonane przy użyciu nowoczesnego zintegrowanego systemu interpretacji danych geologicznych i geofizycznych – pakietu firmy Landmark Graphics Corporation użytkowanego na podstawie grantu akademickiego nr 2003 – COM – 020272 i 2003 – COM – 020273, udzielonego Katedrze Surowców Energetycznych AGH oraz programu „Petrel” firmy Schlumberger udostępnionego Wydziałowi Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH w ramach umowy o wspieraniu działalności dydaktycznej i naukowej.



Rys. 1. Położenie zapadliska przedkarpackiego na tle szkicu tektonicznego Europy Środkowej (szkic tektoniczny wg Nawrockiego i Poprawy, 2006)

Fig. 1. Location of the Carpathian Foredeep shown in the background of Central Europe tectonic sketch (tectonic sketch by Nawrocki and Poprawa, 2006)

Szczegółowej interpretacji poddano jedenaście zbiorników hydrogeotermalnych znajdujących się w obrębie zapadliska. Były to zbiorniki: miocenijski, górnokredowy (bez cenomanu), cenomański, dolnokredowy, górnourajski, środkowourajski, górnotriasowy, środkowotriasowy (T_2+T_{P3}), dolnotriasowy ($T_{P1}+T_{P2}$), klastyczny karboński, a także węglanowy dewońsko-karboński. Prace zmierzające do oceny potencjału geotermalnego obejmowały charakterystykę budowy geologicznej zapadliska przedkarpackiego (Peryt 2012) wraz z budową modelu strukturalno-parametrycznego (Papiernik i in. 2012), interpretację parametrów hydrogeologicznych (Haładus i in. 2012), charakterystykę hydrochemiczną wód wgłębnych (Sowiżdżał, Jasnos 2012) oraz analizę termiczną (Hajto, Szewczyk 2012). Podstawą do budowy modelu parametrycznego były wyniki interpretacji ilościowej profilowań geofizyki wiertniczej (Czopek i in. 2012). W efekcie przeprowadzonych prac dokonano oceny za-

sobów geotermalnych w wydzielonych grupach zasobowych (Hajto, Kotyza 2012). Ocena zasobów geotermalnych została przeprowadzona z zastosowaniem ujednoczonych kryteriów klasyfikacji zasobów i metodyki obliczeniowej, którą opracowano w Katedrze Surowców Energetycznych Akademii Górniczo-Hutniczej.

Kluczowym zagadnieniem było określenie obszarów perspektywicznych do zagospodarowania wód geotermalnych do różnorodnych celów. Określenie możliwości zagospodarowania wód geotermalnych do celów ciepłowniczych umożliwiło zintegrowane podejście do wyników oceny zasobów geotermalnych w połączeniu z interpretacją parametrów zbiornikowych, hydrogeologicznych oraz termicznych w profilu geologicznym zapadliska przedkarpackiego.

W celu określenia rejonów perspektywicznych dla wykorzystania wód geotermalnych do celów balneoterapeutycznych lub/i rekreacyjnych wykreślono mapy wód geotermalnych poszczególnych zbiorników zapadliska przedkarpackiego, kwalifikujących się do tych właśnie celów. Mapy te powstały metodą superpozycji map potencjalnych wydajności otworów wiertniczych, temperatur i mineralizacji wód w stropach zbiorników geotermalnych. Wyznaczają one obszary, w których należy poszukiwać stref występowania wód o parametrach pożądanym w balneoterapii czy rekreacji. W zaznaczonych obszarach występują wody geotermalne, których temperatury i mineralizacje przy odpowiednich wydajnościach otworów wiertniczych umożliwiają ich zastosowanie do podanych celów. Pamiętać jednak należy, że konkretne lokalizacje mogą zostać wskazane jedynie po uwzględnieniu zawartości składników o szczególnej aktywności biochemicznej – zarówno leczniczej, jak i niekorzystnej (m.in. arsen, bar, bor, rad, radon). Mapy powstały przy założeniu granicznych wartości istotnych parametrów przedstawionych w tabeli 1. Pamiętano przy tym, że przydatność wód geotermalnych do kąpieli w celach rekreacyjnych lub leczniczych jest determinowana głównie przez takie parametry jak temperatura i mineralizacja oraz skład chemiczny wody i zawartość składników swoistych w ilościach przekraczających dolną granicę progu farmakodynamicznego i jednocześnie bezpiecznych dla zdrowia ludzi (np. F⁻) (Latour 2012). Do czynników warunkujących wykorzystanie wód geotermalnych do kąpieli balneologicznych i rekreacyjnych należy również zaliczyć wydajność ujęcia wody. Minimalna wydajność wody geotermalnej z ujęcia dostarczana dla jednego basenu rekreacyjnego powinna wynosić od 3 do 5 m³/h (Paczyński, Płochniewski 1996).

Tabela 1

Wymagania stawiane wodom stosowanym do kąpieli (Paczyński, Płochniewski 1996)

Table 1

Requirements for water used for bathing (Paczyński, Płochniewski 1996)

Wykorzystanie wód	Temperatura [°C]	Mineralizacja [g/dm ³]
Rekreacyjne	24–30	≤ 35
Rekreacyjno-lecznicze	28–32	≤ 40
Lecznicze	28–42	≤ 50

Ze względu na to, iż w strefie zapadliska przedkarpackiego zasoby energii geotermalnej cechują się raczej niewielkimi wydajnościami i prognozowanymi niskimi temperaturami na wypływach z otworów dla celów grzewczych zaproponowano wykorzystanie zasobów geotermalnych przy zastosowaniu pomp ciepła (Pająk, Kotyza 2012).

3. ZBIORNIKI GEOTERMALNE ZAPADLIKA PRZEDKARPACKIEGO

Podstawowym problemem w rejonie zapadliska przedkarpackiego są niskie prognozowane wydajności wód z otworów wiertniczych prawie we wszystkich analizowanych zbiornikach hydrogeotermalnych. Wyjątek stanowi zbiornik cenomanu, z którego w prawie całym obszarze jego występowania należy spodziewać się wysokich wydajności. Strefy o podwyższonych potencjalnych wydajnościach wód z otworów wiertniczych występują sporadycznie w zbiorniku środkowej i górnej jury oraz miocenu. Są to zatem zbiorniki, z którymi lokalnie należy łączyć największe perspektywy wykorzystania wód geotermalnych. Wody zakumulowane w klastycznych utworach karbonu oraz w węglanowych utworach karbonu i dewonu, w niektórych rejonach również mogą charakteryzować się korzystnymi parametrami. Parametry hydrogeotermalne zbiorników triasowych oraz kredowych (z wyłączeniem cenomanu) nie dają przesłanek co do możliwości efektywnego zagospodarowania zasobów geotermalnych.

Potencjalne zbiorniki wód geotermalnych w **miocenijskich formacjach** zapadliska przedkarpackiego usytuowane są ponad paleozoiczno-mezozoicznymi zbiornikami podłoża platformowego. Na północ od brzegu Karpat zbiorniki miocenijskie są otwarte i w ograniczony sposób hydraulicznie powiązane z czwartorzędowymi zbiornikami wód podziemnych, natomiast na południu ekranowane nasunięciem karpackim (Oszczypko 2011). Ze względu na znaczne miąższości miocenu (lokalnie powyżej 3 km), a także dużą zmienność wykształcenia poszczególnych wydziałów stratygraficznych w jego profilu, w celu określenia parametrów hydrogeotermalnych zbiornika miocenijskiego wydzielono interwały głębokościowe, dla których przeprowadzono prace analityczne. Zmienność parametrów wód geotermalnych poszczególnych interwałów zbiornika miocenu przedstawia tabela 2.

Cenomański zbiornik hydrogeotermalny występuje w centralnej części zapadliska przedkarpackiego. Najpełniej rozwinięte osady cenomanu występują wzdłuż centralnej strefy zbiornika, pokrywającej się z trendem największych miąższości utworów cenomanu wskazując, że była to również strefa największej subsydencji tej części basenu cenomańskiego. Wyraźna jest prawidłowość, że wraz ze wzrostem miąższości tych osadów wzrasta stopień ich zapieszczenia, a tym samym polepszają się parametry zbiornikowe. Cenomański zbiornik wód podziemnych jest zbiornikiem typu porowego. Niemal na całym obszarze występowania charakteryzuje się warunkami naporowymi i jedynie w strefie występowania tych utworów na powierzchni lub pod czwartorzędem (rejon monokliny-śląsko-krakowskiej) występują wody o zwierciadle swobodnym (Barbacki 2011a). Stosunkowo płytkie występowanie utworów cenomanu (na północ od nasunięcia strop zalega nie głębiej niż 1000 m

Tabela 2

Parametry wód geotermalnych zbiornika miocenu (na podstawie Górecki (red. nauk.) i in. 2012)

Table 2

Parameters of geothermal waters of Miocen aquifer (based on Górecki (eds.) et al. 2012)

Interwał głębokościowy	Temperatura	Mineralizacja	Wydajność
m ppm	°C	g/dm ³	m ³ /h
500–1000	30–40	50–>150	do ok. 100
1000–1500	40–60	do 150	do ok. 30
1500–2000	50–60	do około 200	niskie, sporadycznie 20–30
2000–2500	60–>70	do ponad 300	rzędu kilku
2500–3500	80–100	wysoka, lokalnie przekraczająca 300	do około 20

p.p.t.) determinuje niskie temperatury wód zakumulowanych w tym zbiorniku. W obszarze rozciągającym się na północ od nasunięcia Karpat temperatury w stropie utworów cenomanu kształtują się na poziomie 30–40°C. Wyższych temperatur (do około 100°C) można spodziewać się w strefie nasunięcia karpackiego, gdzie strop cenomanu zalega głębiej (ponad 1500 m p.p.m.). Mineralizacja wód w stropie zbiornika cenomańskiego wynosi najczęściej kilkadziesiąt g/dm³, przy czym w strefie nasunięcia obserwowany jest jej wzrost do ponad 150 g/dm³. Wzrost miąższości warstw wodonośnych jest zgodny z ogólnym rozkładem miąższości osadów cenomanu. Najbardziej miąższe warstwy wodonośne występują w centralnej części zbiornika. Tam ich sumaryczna miąższość przekracza 100 m. Zbiornik cenomanu charakteryzuje się znacznymi wydajnościami, lokalnie przekraczającymi nawet 250 m³/h. Pod tym względem jest to jeden z najlepszych zbiorników zapadliska przedkarpackiego. Analogiczny do rozkładu całkowitej miąższości utworów cenomanu jest także rozkład parametrów zbiornikowych. W strefie brzeżnej, zlepieńcowatej, porowatości efektywne wynoszą kilka procent, a przepuszczalności wahają się od zera do kilku mD. W osiowej części zbiornika porowatości przekraczają 20%, a przepuszczalności zmieniają się od kilkuset do ponad 1000 mD (Sowiżdżał i in. 2012).

Zbiornik górnojurajski charakteryzuje się zróżnicowanymi warunkami przepływu, niejednorodnością litologiczną ośrodka oraz dużą miąższością. Strefy zbiornikowe utworów węglanowych górnej jury wykazują nieregularny rozkład przestrzenny i związane są głównie ze strefami dolomityzacji (Kruczek 1972), skrasowienia oraz intensywnej tektoniki (Dudek 1980). Nieregularny rozkład wykazują również występujące tam zbiornikowe struktury biohermalne (Gliniak i in. 2001). Warstwy wodonośne o znacznych miąższościach występują przede wszystkim w centralnej części zapadliska, gdzie w rejonie Buska Zdroju ich sumaryczna miąższość przekracza 500 m (przy całkowitej miąższości warstw górnojurajskich około 1500 m). Miąższości warstw wodonośnych przekraczające 100 m spotykane są w obszarze pomiędzy Bochnią a Buskiem, a także w okolicach Tarnowa i Brzeska. Wartości parametrów zbiornikowych tych utworów pozostają często w sprzeczności

z wydajnościami uzyskiwanymi z horyzontów górnourajskich, szczególnie w strefach rozwoju krasu i złóż węglowodorów. Przyczyną są zjawiska krasowe i szczelinowatość, często trudne do oceny poprzez badania laboratoryjne. Z tego względu określoną potencjalną wydajność otworów wiertniczych w utworach jury górnej należy traktować jako szacunkową. Oprócz występowania w rejonie Brzeska strefy o podwyższonych wartościach wydajności (powyżej 30 m³/h) można spodziewać się również lokalnie występowania wyższych wydajności wynikających ze specyficznego charakteru skał budujących zbiornik górnourajski. Zakres zmian porowatości średnich utworów jury górnej jest nieduży i wynosi od kilku do około 10%, natomiast zakres zmian przepuszczalności średnich mieści się w granicach od 0 mD do około 100 mD. Lokalnie jednak porowatości mogą osiągać wartości powyżej 10%, a przepuszczalności powyżej 100 mD. Temperatury w stropie utworów jury górnej na przeważającym obszarze wynoszą poniżej 60°C. Jedynie w strefie głębszego zalegania utworów górnourajskich można spodziewać się wyższych temperatur, lokalnie przekraczających 100°C. Płytko zalegające osady wschodniej części zapadliska zawierają wody podziemne o temperaturach rzędu 20–40°C. Wody tej strefy charakteryzują się mineralizacją od kilku do kilkudziesięciu g/dm³. Wyższe wartości mineralizacji są obserwowane w wodach krążących w utworach górnourajskich, zalegających pod nasunięciem karpackim. Na północ od linii nasunięcia w centralnej części zapadliska mineralizacja wód rzadko przekracza 100 g/dm³ (Sowizdział i in. 2012).

Zbiornikowe utwory **jury środkowej** reprezentowane są przez osady bajosu górnego (kujawu), batonu i keloweju górnego (Oszyk, Tomasz 1978). Parametry zbiornikowe uzależnione są od wykształcenia litologiczno-facjalnego, a strefy podwyższonych porowatości związane są z kompleksami piaszczystymi. Zbiornik środkowourajski charakteryzuje się warunkami naporowymi i prawdopodobnie jedynie w strefie wychodni na zachód od Krakowa występują wody o zwierciadle swobodnym. Obszarami bezpośredniego zasilania zbiornika, kreuującymi jednocześnie warunki artezyjskie, są podczwartorzędowe i powierzchniowe wychodnie tych utworów w rejonie monokliny śląsko-krakowskiej i południowo-zachodniego obrzeżenia Gór Świętokrzyskich (Barbacki 2011b). W strefie rozciągającej się na północ od nasunięcia karpackiego temperatury w stropie zbiornika środkowourajskiego wynoszą od kilkunastu stopni Celsjusza w rejonie płytkiego zalegania stropu jury środkowej (Kraków, Busko Zdrój, Janów Lubelski) do około 60°C w rejonie Dębicy i Ropczyc. Pod nasunięciem karpackim temperatury utworów doggeru zwiększają się do ponad 120°C. Sumaryczna miąższość warstw wodonośnych utworów jury środkowej zmienia się w szerokim zakresie. Największe miąższości warstw wodonośnych występują we wschodniej części zapadliska, gdzie w rejonach na południe od Biłgoraja i Lubaczowa kształtują się na poziomie ponad 300 m. Mineralizacja wód zbiornika doggerskiego jest zróżnicowana i waha się od około 20 do stu kilkudziesięciu g/dm³. Wyraźnie zaznaczają się dwie strefy podwyższonych wartości wydajności (powyżej 100 m³/h): na północ od Biłgoraja oraz w okolicach Lubaczowa. Przepuszczalność utworów jury środkowej wynosi tam ponad 100 mD przy porowatości ponad 17,5%. Podobne parametry skał zbiornikowych zaznaczają się w okolicach Tarnowa (Sowizdział i in. 2012).

Klastyczny zbiornik karbonu budują utwory piaskowcowe należące wiekowo do karbonu górnego. Utwory karbonu dolnego nie przedstawiają większego znaczenia jako zbiorniki wód podziemnych. Najwyższe temperatury w stropie klastycznych utworów karbonu ($>100^{\circ}\text{C}$) związane są z utworami zalegającymi pod nasunięciem karpackim. Stropowe partie płytko zalegających utworów karbonu w rejonie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego cechują niskie temperatury ($20\text{--}30^{\circ}\text{C}$), jednak przy miąższościach utworów w tym rejonie rzędu kilku tysięcy metrów należy spodziewać się znacznie wyższych temperatur wód podziemnych w głębszych strefach zbiornika. Wyższe temperatury w stropie klastycznych utworów karbonu mogą występować w centralnej części zapadliska (około $70\text{--}80^{\circ}\text{C}$ w rejonie Dębicy czy Ropczyc). Maksymalne wartości miąższości warstw wodonośnych wynoszące około 800 m odnotowano pomiędzy Skawiną a Wadowicami oraz w obszarze na południe od Wadowic. W rejonie GZW miąższości warstw wodonośnych są niższe i kształtują się na poziomie do około 150 m, wzrastając w strefie zachodniej do ponad 250 m. Mineralizacja wód w stropie klastycznych utworów karbonu jest zmienna w szerokich granicach od kilku do ponad 250 g/dm^3 . Wyraźnie zaznaczają się dwie strefy. W rejonie GZW mineralizacja wód w stropie zbiornika na większości obszaru nie przekracza 50 g/dm^3 , podczas gdy lokalnie w centralnej części zapadliska mineralizacja wód podziemnych w przystropowych partiach zbiornika na ogół przekracza 100 g/dm^3 . Na całym obszarze występowania zbiornika hydrogeotermalnego karbonu klastycznego obserwowane są niskie potencjalne wydajności otworów wiertniczych, sporadycznie przekraczające $10\text{ m}^3/\text{h}$. Wynika to m.in. ze słabych właściwości petrofizycznych skał budujących ten zbiornik – przepuszczalności rzędu kilkudziesięciu mD i porowatości efektywnej lokalnie przekraczającej 12,5% (jedynie w obszarze na północ od Wadowic) (Sowizdzał i in. 2012).

Węglanowy zbiornik dewonu i karbonu budują wapienie i dolomity należące wiekowo do dewonu środkowego i górnego oraz karbonu dolnego (wizenu). W brzeżnej strefie Karpat utwory te ze względu na przynależność do trzech odmiennych struktur geologicznych, tj. masywu górnośląskiego, regionu krakowsko-lublinieckiego i masywu małopolskiego, w obrębie każdej z nich wykazują specyficzne cechy litologiczne, tektoniczne i hydrogeologiczne. Maksymalne temperatury w stropie węglanowych utworów karbonu i dewonu dochodzące do 200°C spodziewane są w rejonie Żor i są związane z dużymi głębokościami zalegania stropu zbiornika (ok. 5000 m p.p.m.). Pod nasunięciem karpackim (m.in. okolice Rzeszowa, Ropczyc) temperatury przekraczają najczęściej 70°C , podczas gdy w zachodniej części zapadliska rejestrowane są niższe temperatury rzędu $50\text{--}70^{\circ}\text{C}$. Szeroki zakres głębokości zalegania wodonośnych pięter dewonu i karbonu na obszarze zapadliska przedkarpackiego implikuje znaczne zróżnicowanie mineralizacji występujących tam wód złożowych. Mineralizacja wód na obszarze zapadliska przedkarpackiego zmienia się od około $0,5\text{ g/dm}^3$ do ponad 300 g/dm^3 (maksymalne wartości cechuje rejon nasunięcia karpackiego na południe od Dębicy). Warstwy wodonośne w obrębie analizowanego zbiornika (o sumarycznej miąższości przekraczającej 50 m) stwierdzono jedynie pod nasunięciem karpackim w okolicach Bielska-Białej i Andrychowa, gdzie lokalnie występują warstwy wodonośne o miąższości większej od 125 m. Występują tam skały zbiornikowe o najlepszych właści-

ciwościach petrofizycznych – porowatości efektywnej rzędu 10% i przepuszczalności dochodzącej do 100 mD. Potencjalna wydajność wód z otworów wiertniczych zwiększa się w tym rejonie do maksymalnie 60 m³/h. Na pozostałej części zapadliska przedkarpackiego miąższości warstw wodonośnych są znacznie mniejsze i sporadycznie przekraczają 25 m. Utwory te charakteryzują się gorszymi właściwościami zbiornikowymi oraz niską wydajnością (Sowiżdżał i in. 2012).

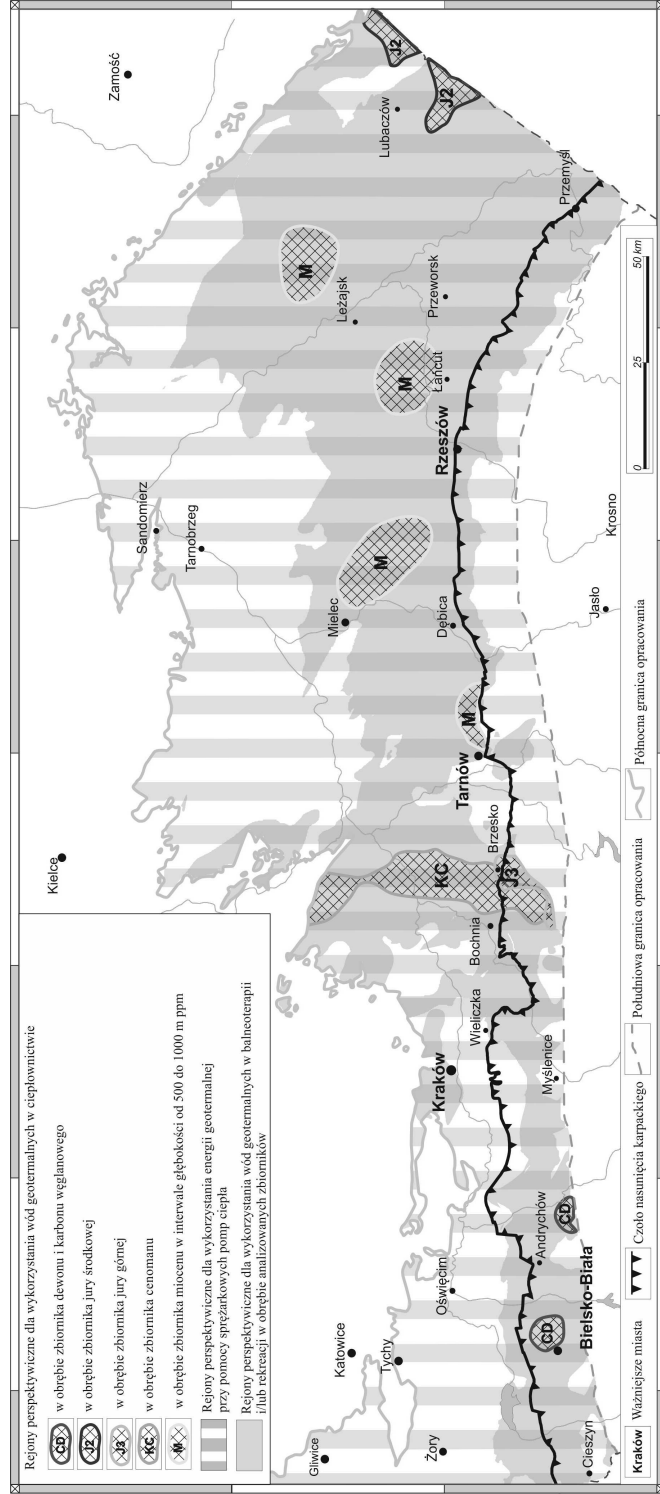
4. PERSPEKTYWY WYKORZYSTANIA ENERGII GEOTERMALNEJ W REJONIE ZAPADLISKA PRZEDKARPACKIEGO

Analiza uzyskanych wyników oceny zasobów geotermalnych w połączeniu z interpretacją parametrów zbiornikowych, hydrogeologicznych oraz termicznych w profilu geologicznym zapadliska przedkarpackiego umożliwiła określenie rejonów perspektywicznych dla zagospodarowania wód geotermalnych do różnorodnych celów.

Przeprowadzone analizy wskazują, że w rejonie zapadliska przedkarpackiego znacznie większy potencjał związany jest z wykorzystaniem wód geotermalnych do celów rekreacyjnych i/lub balneoterapeutycznych niż do celów ciepłowniczych. Wynika to zarówno z wartości parametrów wód geotermalnych (temperatura, wydajność), jak i korzystnych parametrów fizykochemicznych tych wód, potwierdzonych licznymi wierceniami na rozległych obszarach zapadliska przedkarpackiego.

Obszary zapadliska przedkarpackiego perspektywiczne do zagospodarowania wód geotermalnych do celów balneoterapeutycznych lub/i rekreacyjnych znajdują się na przeważającej części zapadliska przedkarpackiego, natomiast ich brak zauważalny jest w północnej części zapadliska. Na uwagę zasługują m.in. okolice Mielca, Rzeszowa, Jarosławia, Przeworska, Przemyśla, Bochni, Buska Zdroju, Kazimierzy Wielkiej, a także rejon rozciągający się na wschód od Lubaczowa i Biłgoraja, na południe od Wieliczki i na zachód od Dąbrowy Tarnowskiej. W utworach miocenu, cenomanu, jury górnej, jury środkowej bądź triasu dolnego w wymienionych rejonach należy spodziewać się występowania wód o korzystnych parametrach dla ich wykorzystania w balneoterapii bądź rekreacji. W okolicach Czechowic-Dziedzic do wymienionych celów będą natomiast przydatne wody występujące w klasycznych utworach karbonu oraz w węglanowych utworach karbonu i dewonu (rys. 2).

Najlepsze parametry dla wykorzystania do celów ciepłowniczych mają wody występujące w węglanowych utworach dewonu i karbonu w rejonie Bielska-Białej oraz Suchej Beskidzkiej, w piaskowcach jury środkowej w rejonie rozciągającym się na południowy i północny-wschód od Lubaczowa, w węglanowych utworach jury górnej (rejon na południe od Brzeska – pod nasunięciem Karpat), a także w piaskowcach cenomanu w rejonie Bochni i Brzeska. W zbiorniku miocenu największy potencjał geotermalny rozpoznano w przedziale głębokości od 500 do 1000 m p.p.m. W tym interwale utwory miocenu zajmują rozległy obszar centralnej i wschodniej części zapadliska przedkarpackiego. Od okolic Tarnowa po linię Przeworsk–Lubaczów na wschodzie zaznacza się kilka rejonów, w których potencjalne



Rys. 2. Mapa rejonów perspektywicznych dla wykorzystania wód geotermalnych do celów ciepłowniczych, leczniczych i rekreacyjnych w zapadlisku przedkarpackim

Fig. 2. Location of prospective areas for use of geothermal waters for heating, balneotherapeutic and recreation purposes in the Carpathians Foredeep

wydajności wód geotermalnych mogą osiągać 30–60 m³/h (do 100–130 m³/h lokalnie między Biłgorajem i Leżajskiem), przy wyrównanych temperaturach rzędu 30–40°C i mineralizacji wód 25–50 g/dm³. Są to: rejon na wschód od Tarnowa, rejon pomiędzy Biłgorajem i Leżajskiem, rejon na wschód od Mielca i północ od Ropczyc, a także rejon na północ od Łańcuta (rys. 2).

Praktycznie na całym analizowanym obszarze istnieje możliwość wykorzystania energii geotermalnej za pomocą pomp ciepła (rys. 2). Prognozowany zakres temperatur roboczych daje możliwość wykorzystania w tym terenie zarówno pomp sprężarkowych jak i absorpcyjnych.

Optymalne zagospodarowanie wód geotermalnych w niektórych przypadkach może obejmować kilka celów (m.in. rekreację/balneoterapię w połączeniu z różnorodnymi zastosowaniami grzewczymi), co służy ich wszechstronnemu („kaskadowemu”) wykorzystaniu (Kępińska i in. 2012).

W odniesieniu do niektórych rejonów wyróżnionych w formacjach mioceńskich należy zauważyć, że nawet jeśli są wskazywane jako perspektywiczne w skali regionalnej, to w przypadku wyboru ich fragmentów czy też konkretnych lokalizacji do bardziej szczegółowych analiz i prac projektowych należy brać pod uwagę fakt, że piaskowce mioceńskie jako skały zbiornikowe mają często formę soczew i wyklinowujących się warstw, zmienne miąższości, co może mieć znaczenie dla utrzymania stabilnych parametrów eksploatacyjnych w długoletniej perspektywie (zwłaszcza w przypadku eksploatacji dla celów grzewczych). Planując ewentualne badania i inwestycje należy zatem uwzględnić wykonanie odpowiednich badań i testów, które pomogą ocenić charakter hydrogeologiczny tych zbiorników, warunki ich zasilania, przepływu i odnawialność zasobów – dotyczy to zarówno zbiorników mioceńskich, jak i wszystkich wyróżnionych zbiorników i rejonów perspektywicznych w zapadlisku przedkarpackim (Kępińska i in. 2012).

PODSUMOWANIE

Perspektywiczne rejony występowania wód geotermalnych na obszarze zapadliska przedkarpackiego związane są głównie z brzeżną strefą nasunięcia karpackiego i obejmują swym zasięgiem takie miasta jak Bochnia, Brzesko i Tarnów. Podstawowym problemem w rejonie zapadliska przedkarpackiego są niskie wydajności wód z otworów wiertniczych zarówno w zbiornikach miocenu jak i podłoża mezozoiczno-paleozoicznego. Wyjątek stanowi zbiornik cenomanu, gdzie prawie na całym obszarze jego występowania należy spodziewać się wysokich wydajności. Zbiornik cenomański prezentuje się bardzo korzystnie, gdyż charakteryzują go znaczne wydajności i niska mineralizacja wód, bardzo korzystne parametry zbiornikowe w skali regionalnej, warunki artezyjskie i znaczny zasięg zbiornika umożliwiające wykorzystanie energii geotermalnej na dużym obszarze. Z drugiej strony niekorzystną cechą wód zbiornika cenomańskiego są niskie temperatury związane z niedużą głębokością zalegania poziomów wodonośnych, co jednak jednocześnie będzie obniżać

koszty ewentualnego udostępnienia złoża. Strefy o podwyższonych potencjalnych wydajnościach otworów wiertniczych ($>100 \text{ m}^3/\text{h}$) występują sporadycznie w zbiorniku środkowej i górnej jury oraz miocenu.

Na obszarze zapadliska przedkarpackiego (uwzględniając strefę nasunięcia karpackiego) najlepsze parametry do wykorzystania wód do celów ciepłowniczych mają wody w węglanowych utworach dewonu i karbonu w rejonie Bielska-Białej oraz Suchej Beskidzkiej, w piaskowcach jury środkowej w rejonie na południowy i północny-wschód od Lubaczowa, w węglanowych utworach jury górnej (rejon na południe od Brzeska – pod nasunięciem Karpat), a także w piaskowcach cenomańskich w rejonie Bochni i Brzeska. W zbiorniku miocenu największy potencjał geotermalny zidentyfikowano w przedziale głębokości od 500 do 1000 m p.p.m. Od okolic Tarnowa po linię Przeworsk–Lubaczów na wschodzie zaznacza się kilka rejonów, w których potencjalne wydajności wód geotermalnych mogą osiągać $30\text{--}60 \text{ m}^3/\text{h}$ (do $100\text{--}130 \text{ m}^3/\text{h}$ lokalnie między Biłgorajem i Leżajskiem), przy wyrównanych temperaturach rzędu $30\text{--}40^\circ\text{C}$ i mineralizacji wód $25\text{--}50 \text{ g}/\text{dm}^3$. Są to: rejon na wschód od Tarnowa, rejon pomiędzy Biłgorajem i Leżajskiem, rejon na wschód od Mielca i północ od Ropczyc, a także rejon na północ od Łańcuta .

Prace badawcze, których wyniki przedstawiono w niniejszym artykule wykonano w ramach Projektu rozwojowego własnego nr 0474/r/t02/2009/06: „Analiza możliwości zagospodarowania wód geotermalnych zapadliska przedkarpackiego do celów balneoterapeutycznych i rekreacyjnych oraz ciepłowniczych” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju realizowanego w latach 2009-2012 (nr umowy N R09 0003 06/2009).

LITERATURA

- BARBACKI A.P., 2011a — Zbiornik hydrogeotermalny w utworach cenomanu [W:] Górecki W. (red. nauk.) i in., 2012.
- BARBACKI A.P., 2011b — Zbiornik hydrogeotermalny w utworach środkowej jury [W:] Górecki W. (red. nauk.) i in., 2012.
- CZOPEK B., NOWAK J., SOWIŹDŹAŁ A., ZAJĄC A., 2012 — Zastosowanie metod geofizyki otworowej do określania poziomów zbiornikowych. [W:] Górecki W. (red. nauk.) i in., 2012.
- DUDEK J., 1980 — Warunki geologiczno-strukturalne pułapek i parametry złożowe górnej jury w zapadlisku przedkarpackim. Pr. IGNiG, 37.
- GLINIAK P., LASKOWICZ R., URBANIEC A., 2001 — Obecność skał zbiornikowych w późnojurajskich utworach węglanowych z uwzględnieniem ich rozwoju facjalnego w rejonie Zawada–Łękawica. Nafta – Gaz; 11, 597–606.
- GÓRECKI W. [red. nauk.], ADAMCZYK A. F., SZCZEPAŃSKI A., SZKLARCZYK T., NEY R., JUCHA S., STRZETELSKI W., PLEWA M., ŁAPINKIEWICZ A., P., SOBOŃ J., BANAŚ J., GŁOWNIA J., STYPUŁA B., KUZNIAK T., ZDŹYŁOWSKI W., CHYLARECKI R., 1990 — Atlas wód geotermalnych Niżu Polskiego. ISE AGH, Kraków.
- GÓRECKI W. (red. nauk.), KUZNIAK T., ŁAPINKIEWICZ A. P., MAĆKOWSKI T., STRZETELSKI W., SZKLARCZYK T., 1995 — Atlas zasobów energii geotermalnej na Niżu Polskim. ZSE AGH, Towarzystwo Geosynoptyków „Geos”, Kraków.

- GÓRECKI W. (red. nauk.), SZCZEPAŃSKI A., SADURSKI A., HAJTO M., PAPIERNIK B., KUŹNIAK T., KOZDRA T., SOBOŃ J., SZEWCZYK J., SOKOŁOWSKI A., STRZETELSKI W., HAŁADUS A., KANIA J., KURZYDŁOWSKI K., GONET A., CAPIK M., ŚLIWA T., NEY R., KĘPIŃSKA B., BUJAKOWSKI W., BANAŚ J., SOLARSKI W., MAZURKIEWICZ B., PAWLIKOWSKI M., NAGY S., RAJCHEL L., FELDMAN-OLSZEWSKA A., SZAMAŁEK K., WAGNER R., KOZŁOWSKI T., MALENTA Z., SAPIŃSKA-ŚLIWA A., SOWIŹDŻAŁ A., KOTYZA J., LESZCZYŃSKI K. P., GANCARZ M., 2006 — Atlas zasobów energii geotermalnej na Niżu Polskim – formacje mezozoiczne i paleozoiczne. ZSE AGH, Kraków.
- GÓRECKI W. (red. nauk.), SZCZEPAŃSKI A., OSZCZYPKO N., HAJTO M., OSZCZYPKO-CLOWES M., PAPIERNIK B., KĘPIŃSKA B., CZOPEK B., HAŁADUS A., KANIA J., BANAŚ J., KURZYDŁOWSKI K., ROŹNIATOWSKI K., SOLARSKI W., MAZURKIEWICZ B., KUŹNIAK T., MACHOWSKI G., MICHNA M., SOBOŃ J., LUBOŃ W., PEŁKA G., RAJCHEL L., SOWIŹDŻAŁ A., KOTYZA J., CAPIK M., HAŁAJ E., HARASIMUK M., BUJAKOWSKI W., BARBACKI A., HOŁOJUCH G., KASZTELEWICZ A., PAJĄK L., TOMASZEWSKA B., CHOWANIEC J., ZUBER A., MALATA T., AUGUSTYŃSKA J., OPERACZ T., FREIWALD P., PATORSKI R., WITEK K., CZERWIŃSKA B., GAŚIOREK E., ŚLIMAK C., WARTAK W., SKUPIEŃ M., GORYL M., CICHON K., KUDREWICZ R., BUDZISZ P., ZASTRZEŻYŃSKA J., DOWGIAŁŁO J., 2011 — Atlas wód i energii geotermalnej Karpat Zachodnich. Wyd. KSE AGH, Kraków.
- GÓRECKI W. (red. nauk.), SOWIŹDŻAŁ A., JASNOS J., PAPIERNIK B., HAJTO M., MACHOWSKI G., KĘPIŃSKA B., CZOPEK B., KUŹNIAK T., KOTYZA J., LUBOŃ W., PEŁKA G., ZAJĄC A., SZCZEPAŃSKI A., HAŁADUS A., KANIA J., BANAŚ J., SOLARSKI W., MAZURKIEWICZ B., ZUBRZYCKI A., LUBOŃ K., PERYT T., 2012 — Atlas geotermalny zapadliska przedkarpackiego. Wyd. KSE AGH, Kraków.
- HAJTO M., KOTYZA J., 2012 — Ocena zasobów wód i energii geotermalnej w zapadlisku przedkarpackim [W:] Górecki [red. nauk.] i in., 2012.
- HAJTO M., SZEWCZYK J., 2012 — Analiza termiczna obszaru zapadliska przedkarpackiego. [W:] Górecki (red. nauk.) i in., 2012.
- HAŁADUS A., KANIA J., SOWIŹDŻAŁ A., 2012 — Opracowanie podstawowych parametrów hydrogeologicznych w zapadlisku przedkarpackim. [W:] Górecki (red. nauk.) i in., 2012.
- HARASIMIUK M., SOWIŹDŻAŁ A., ZUBRZYCKI A., 2012 – Ogólna charakterystyka rejonu zapadliska przedkarpackiego. [W:] Górecki (red. nauk.) i in., 2012.
- JASNOS J., 2012 — Charakterystyka występowania wód mineralnych, swoistych, leczniczych oraz solanek [W:] Górecki (red. nauk.) i in., 2012.
- KĘPIŃSKA B., HAJTO M., SOWIŹDŻAŁ A., KUŹNIAK T., 2012 — Perspektywy wykorzystania wód geotermalnych w zapadlisku przedkarpackim [W:] Górecki (red. nauk.) i in., 2012.
- KRUCZEK J., 1972 — Dolomityzacja wapieni malmu a możliwości poszukiwawcze profilu Dąbrowa Tarnowska–Tarnów. Nafta, Katowice, 2, 49–54.
- LATOURET T., 2012 — Zastosowanie wód geotermalnych w balneoterapii i/lub rekreacji [W:] Górecki (red. nauk.) i in., 2012.
- NAWROCKI J., POPRAWA P., 2006 — Development of Trans-European Suture Zone in Poland: from Ediacaran rifting to Early Palaeozoic accretion. Geological Quarterly; 50, 59–76.
- OSZCZYPKO N., 2011 — Zbiornik hydrogeotermalny w utworach miocenu [W:] Górecki [red. nauk.] i in., 2011.
- OSZCZYPKO N., TOMAŚ A., 1978 — Charakterystyka własności zbiornikowych osadów jurajskich na przedgórzu Karpat środkowych. Kwart. Geol., 22, 3, 585–600.

- PACZYŃSKI B., PŁOCHNIEWSKI Z., 1996 — Wody mineralne i lecznicze Polski. PIG, Warszawa, 108.
- PAJAŁ L., KOTYZA J., 2012 — Analiza możliwości wykorzystania wód geotermalnych w zapadlisku przedkarpaccim przy zastosowaniu pomp ciepła [W:] Górecki (red. nauk.) i in., 2012.
- PAPIERNIK B., MACHOWSKI G., KOTYZA J., 2012 — Model strukturalno-parametryczny utworów miocenu i podłoża zapadliska przedkarpacciego [W:] Górecki (red. nauk.) i in., 2012.
- PERYT T., 2012 — Zarys budowy geologicznej zapadliska przedkarpacciego. [W:] Górecki (red. nauk.) i in., 2012.
- SOWIŹDŻAŁ A., JASNOS J., 2012 — Charakterystyka hydrochemiczna wód wglębnych. [W:] Górecki (red. nauk.) i in., 2012.
- SOWIŹDŻAŁ A., PAPIERNIK B., HAJTO M., MACHOWSKI G., JASNOS J., BARBACKI A., 2012 — Charakterystyka podstawowych parametrów zbiorników hydrogeotermalnych w zapadlisku przedkarpaccim [W:] Górecki (red. nauk.) i in., 2012.

POSSIBILITIES OF GEOTHERMAL ENERGY APPLICATIONS IN THE CARPATHIAN FOREDEEP

ABSTRACT

In 2012 the “Geothermal Atlas of the Carpathian Foredeep” (Górecki (eds.) et al., 2012) was published by specialist from the Department of Fossil Fuels, Faculty of Geology, Geophysics and Environment Protection, AGH University of Science and Technology. It constitute a comprehensive and exhaustive source of information on the occurrence and prospects of use of geothermal waters and energy in the Carpathian Foredeep. Detailed analysis was carried out for eleven hydrogeothermal aquifers occurring in the Carpathian Foredeep. The selected geothermal aquifers were characterized from the point of view of geological setting, extent, depths and thicknesses of the aquifers, water temperatures and mineralizations, discharge of wells and reservoir properties. Results of the interdisciplinary, constructive cooperation of specialists from various fields of science. allowed to calculate geothermal resources and indicate the best locations for a variety of utilization: balneoterapeutic, recreation and heating. The carried out analyses indicate that the geothermal potential related to the use of geothermal waters of the Carpathian Foredeep for recreation and/or balneotherapy is much higher than that related to applications for heating purposes. In some regions it is possible to develop the groundwater also for heating purposes, including heat pumps. The aquifers of the Cenomanian, Upper Jurassic, Devonian-Carboniferous and Miocene are most prospective.

KEY WORDS

Geothermal waters, Carpathian Foredeep, geothermal uses, balneotherapy

