

Strefy perspektywiczne występowania niekonwencjonalnych złóż węglowodorów w kambryjskich, ordowickich, sylurskich i karbońskich kompleksach skalnych Polski – integracja wyników badań

Teresa Podhalańska¹, Maria I. Waksmundzka¹, Anna Becker¹, Joanna Roszkowska-Remin¹, Ireneusz Dyrka¹, Anna Feldman-Olszewska¹, Andrzej Głuszyński¹, Izabella Grotek¹, Marcin Janas¹, Przemysław Karcz¹, Grzegorz Nowak², Jolanta Paczeńska¹, Michał Roman¹, Magdalena Sikorska-Jaworowska¹, Marta Kuberska¹, Aleksandra Kozłowska¹, Katarzyna Sobień¹

Prospective zones for unconventional hydrocarbon resources in Cambrian, Ordovician, Silurian and Carboniferous rocks of Poland – integration of the research results. *Prz. Geol.*, 64: 1008–1021.

Abstract. The paper presents the characteristics of prospective zones identified for the first time within the lower Palaeozoic shale formations occurring in the Baltic-Podlasie-Lublin Basin and within the Carboniferous shale, sandstone, and mixed shale-sandstone complexes (the so-called hybrid complexes) in the basin of south-western Poland. The lateral and vertical ranges of these zones are determined based on specific criteria using the results of various research methods and analyses, i.e.: stratigraphic, sedimentological, mineralogical, petrological and geochemical of organic matter, petrographic and petrophysical, including interpretation of well logs. Archived geological materials and those coming from the boreholes drilled recently in the concession areas were also used.

Four prospective zones have been distinguished in the lower Palaeozoic of the so-called shale belt: SP1, SP2, SP3 and SP4. The most prospective area for the occurrence of unconventional hydrocarbon deposits in shale formations is the Baltic region – the Leba Elevation, where there are all four prospective zones, only partially covering the range of potentially prospective formations. In each of these zones, both liquid and gas hydrocarbons can be expected in this area. Due to the low percentage of organic matter, the lowest hydrocarbon generation potential is attributed to the Lublin region. However, the low values of this parameter are compensated by other parameters, i.e. the considerable thickness and lateral extent of zone SP4 corresponding partly to the Pelplin Formation.

In the Carboniferous rocks of south-western Poland, seven prospective zones have been distinguished in four borehole sections. Four of them are “tight” zones in compact sandstones, while the other three zones represent a hybrid type in complexes with mixed lithology. No prospective zones have been defined in complexes with homogeneous shale lithologies. Determination of lateral extents of the identified zones has not been possible due to the scarcity of data on the geological structure and stratigraphy of the Carboniferous succession in the study area.

Keywords: unconventional hydrocarbon resources, prospective zones, lower Palaeozoic, Carboniferous, Baltic-Podlasie-Lublin basin, Carboniferous basin of SW Poland

Po raz pierwszy wykonana integracja szerokiego spektrum nowych i archiwalnych wyników badań pozwoliła na wyznaczenie i charakterystykę stref potencjalnego występowania niekonwencjonalnych złóż węglowodorów w formacjach łupkowych niższego paleozoiku basenu bałtycko-podlasko-lubelskiego oraz w utworach karbonu basenu południowo-zachodniej Polski, spełniających przyjęte kryteria perspektywiczności. Obiektem badań były skały łupkowe (iłowce, mułowce, mułowce piaszczyste) i piaszkowcowe, jak również kompleksy mieszane łupkowo-piaszkowcowe tzw. hybrydowe (występujące wśród utworów karbonu Polski południowo-zachodniej), w których wyznaczono pakiety skalne posiadające parametry najbardziej korzystne dla generowania i akumulacji węglowodorów.

Celem artykułu jest kompleksowa charakterystyka wydzielonych stref perspektywicznych w wybranych interwałach stratygraficznych kambru, ordowiku i syluru w północnej, północno-wschodniej i południowo-wschodniej Polsce (obniżenia bałtyckie i podlaskie, obszar lubelski, w tym obszar Biłgoraj–Narol), jak również w utworach karbonu Polski południowo-zachodniej.

Na podstawie rozpoznania literaturowego, dostępnych materiałów archiwalnych oraz bieżącego stanu wiedzy, przyjęto w obszarze bałtycko-podlasko-lubelskim w niższym

paleozoiku jako potencjalnie perspektywiczne następujące formacje: piasznicą górnego kambru, iłowców z Sasina ordowiku środkowego i górnego, jej regionalny odpowiednik – iłowców Udała, następnie iłowców z Pasłęka landoweru, jej dolną część wydzieloną jako ogniwo iłowców bitumicznych z Jantaru oraz formację iłowców z Pelplina wenloku (i niższego ludlowu).

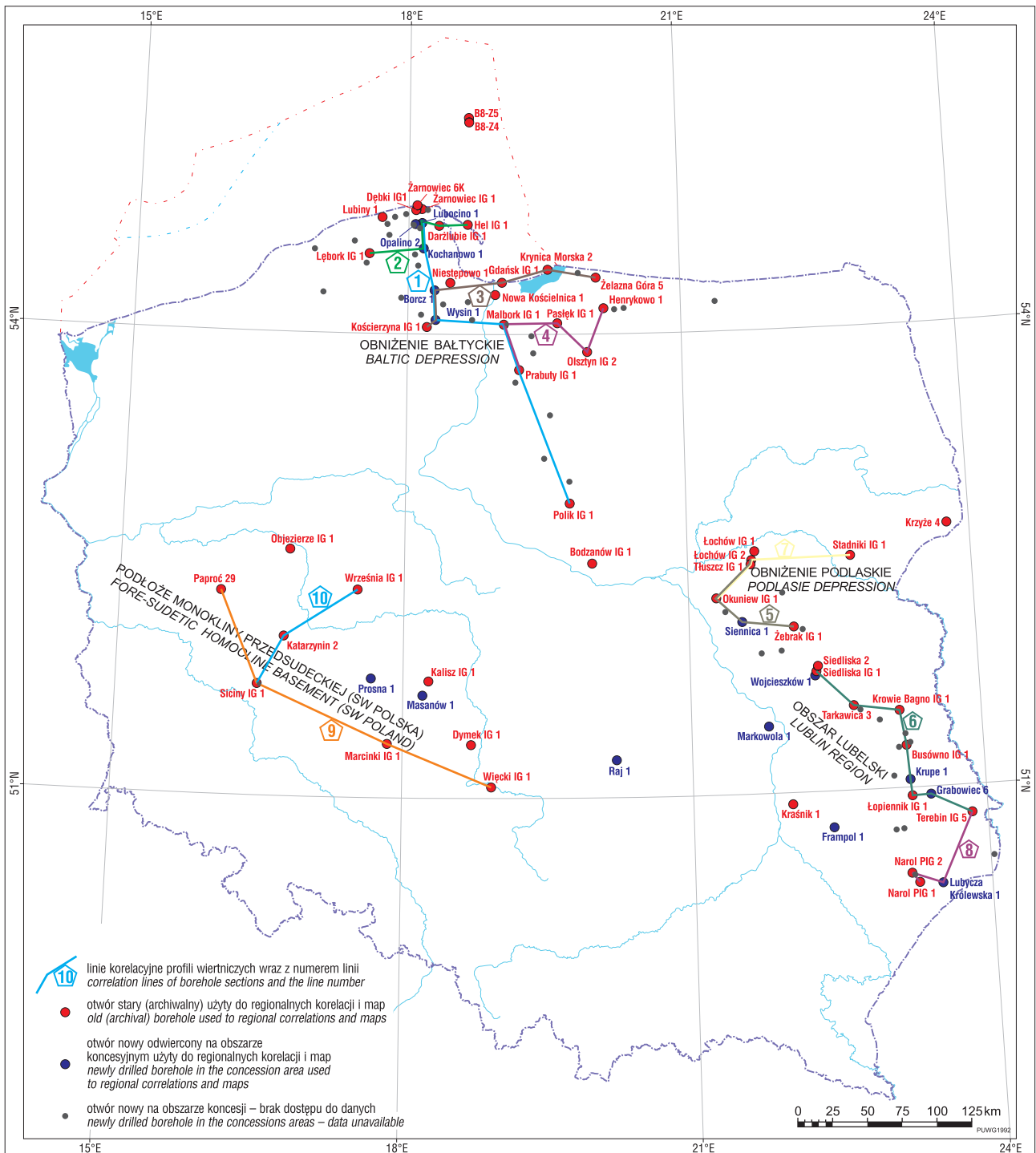
Formacje te jak również karbońskie kompleksy skalne zostały poddane szczegółowym badaniom. W celu wyznaczenia w ich obrębie stref perspektywicznych wykorzystano wyniki różnorodnych badań i analiz: stratygraficznych, sedymentologicznych, mineralogicznych, petrograficznych, petrologicznych i geochemicznych skał i materii organicznej, petrofizycznych, oraz interpretację krzywych geofizyki otworowej (m.in. do wyznaczenia zawartości węgla organicznego metodą Carbolog i Heslopa). Znaczną część analiz laboratoryjnych oraz interpretacji krzywych karotażowych wykonał Instytut Nafty i Gazu – PIB (Opracowanie..., 2015). Najważniejsze wyniki badań i analiz, służące określeniu perspektywiczności kompleksów skalnych niższego paleozoiku i karbonu, zostały przedstawione w pozostałych artykułach zamieszczonych w tym tomie Przeglądu Geologicznego.

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; teresa.podhalanska@pgi.gov.pl.

² Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Dolnośląski, al. Jaworowa 19, 53-122 Wrocław; grzegorz.nowak@pgi.gov.pl.

Dla integracji wyników wykorzystano informację geologiczną uzyskaną na podstawie indywidualnych pozwoleń od firm posiadających koncesje na rozpoznanie i poszukiwanie węglowodorów, jak również wyniki archiwalne pochodzące ze starszych opracowań i literatury (m.in. Tomczyk, 1968, 1990; Grotek, 2006; Karnkowski i in., 2010; Kosakowski i in., 2010, 2016; Poprawa, 2010; Więclaw i in., 2010; Kiersnowski & Dyrka, 2013; Podhalańska, 2013; Porębski i in., 2013). Uzyskanie od firm poszukiwawczych i wykorzystanie nowych danych było w wielu przypadkach najważniejsze dla rozpoznania stref perspektywicznych.

W ramach integracji wyników badań wykonano korelacje stref perspektywicznych w badanych otworach wzdłuż ośmiu linii. Strefy te wydzielono w utworach syluru, ordowiku i kambriu na obszarze basenu bałtycko-podlasko-lubelskiego (ryc. 1). Przykładowe korelacje międzyotworowe stref perspektywicznych są przedstawione w dalszej części artykułu oraz na ryc. 1A i B w pracy Romana, (2016). Zostały także sporządzone mapy tych stref. Dla profili utworów karbonu z obszaru basenu południowo-zachodniej Polski wykonano dwa zestawienia otworowe (Rozpoznanie ..., 2016), z których jedno zaprezentowano w dalszej części artykułu. Ze względu na niewystarczające rozpoznanie



Ryc. 1. Lokalizacja obszarów badań (zestawił A. Głuszyński)
Fig. 1. Location of the investigated areas (compiled by A. Głuszyński)

geologiczno-strukturalne utworów karbonu, strefy perspektywiczne w tym systemie wydzielono w profilach pionowych badanych otworów. Dla określenia lateralnego rozprzestrzenienia tych stref niezbędne jest przeprowadzenie badań uzupełniających oraz uzyskanie nowych wyników z odwierconych w ostatnich latach otworów wiertniczych na obszarach koncesyjnych. Planowana jest dalsza kontynuacja badań zarówno w utworach niższego paleozoiku, jak i karbońskich w celu doprecyzowania granic wydzielonych stref, ich zasięgów stratygraficznych i lateralnych oraz perspektywiczności.

Niniejszy artykuł zawiera najważniejsze, podsumowujące wnioski z realizacji projektu „Rozpoznanie stref perspektywicznych dla występowania niekonwencjonalnych złóż węglowodorów w Polsce, etap I”. Przedstawiono charakterystykę wyróżnionych stref perspektywicznych, a ryciny prezentujące korelacje między otworami wiertniczymi (wykonane w dużo większej skali z użyciem specjalistycznego oprogramowania Techlog) ze względu na duże zmniejszenie mają charakter poglądowy. Szczegółowe wyniki badań, będące podstawą wydzielenia stref perspektywicznych w kontekście przyjętych kryteriów perspektywiczności, są przedstawione w opracowaniu archiwalnym projektu (Rozpoznanie..., 2016).

METODYKA WYZNACZANIA STREF PERSPEKTYWICZNYCH

Metodyka określenia stref perspektywicznych polegała na wyznaczeniu, w pierwszej kolejności, potencjalnie perspektywicznych kompleksów litologicznych. Na obszarze basenu bałtycko-podlasko-lubelskiego celem badań były formacje łupkowe (iłowce, mułowce) kambriu, ordowiku i syluru. W utworach karbonu basenu południowo-zachodniej Polski wyróżniono trzy typy kompleksów litologicznych – łupkowe (iłowce, mułowce i mułowce piaszczyste), piaskowcowe (piaskowce i zlepieńce) oraz mieszane łupkowo-piaskowcowe, tzw. hybrydowe (iłowce, mułowce, mułowce piaszczyste i piaskowce). Z tego względu niezbędne jest opracowanie kryteriów i metodyki określenia perspektywiczności nie tylko dla złóż w formacjach łupkowych (ang. *shale gas*) i w zwięzłych skałach zbiornikowych (ang. *tight gas*), ale również dla złóż w formacjach o mieszanej litologii.

Wytypowane kompleksy skalne po weryfikacji stratygraficznej, przeprowadzonej na podstawie profilowania rdzeni wiertniczych, danych z dokumentacji wynikowych otworów, literatury oraz interpretacji geofizyki otworowej, zostały poddane różnorodnym badaniom laboratoryjnym (Rozpoznanie..., 2016) pod względem ich potencjału jako skał macierzystych i/lub zbiornikowych w systemach węglowodorowych. Na podstawie zmienności parametrów litologiczno-sedymentologicznych (Feldman-Olszewska & Roszkowska-Remin, 2016; Waksmundzka & Becker, 2016) określono litofacje najbardziej predestynowane do występowania w nich węglowodorów. W kolejnym etapie badań opracowano kryteria petrofizyczno-geochemiczne jakimi powinny charakteryzować się skały, żeby uznać je za perspektywiczne.

Do wyznaczenia stref perspektywicznych występowania niekonwencjonalnych złóż węglowodorów typu *shale* – węglowodory z łupków, oraz *tight* – gaz w zwięzłych skałach zbiornikowych, przyjęto niżej przedstawione kryteria. Karbońskie piaskowcowo-łupkowe (hybrydowe) kom-

pleksy litologiczne były rozpatrywane na obecnym etapie badań w kontekście kryteriów opracowanych dla obu typów złóż.

Przyjęte kryteria perspektywiczności występowania niekonwencjonalnych złóż węglowodorów typu *shale*

1. Całkowita zawartość procentowa węgla organicznego (ang. *total organic carbon*, TOC):

1–2% wag. – kryterium minimalne,

>2% wag. – kryterium optymalne

(Wójcicki i in., 2015 na podstawie kompilacji: Jarvie, 2012; Poprawa, 2015);

2. Dojrzałość termiczna materii organicznej (*Ro*):

okno ropne – 0,6–1,1%,

okno gazu mokrego/kondensatu – 1,1–1,4%,

okno gazu suchego – 1,4–3,5%

(Wójcicki i in., 2015 na podstawie kompilacji: Jarvie, 2012; Andrews, 2013, 2014; Poprawa, 2015);

3. Porowatość efektywna:

>4%

(Wójcicki i in., 2015 na podstawie kompilacji: Andrews, 2013, 2014).

4. Miąższość:

dla TOC >2% wag. – 10 m,

dla TOC 1–2% wag. – 30 m

(Wójcicki i in., 2015 na podstawie kompilacji: Jarvie, 2012; Raport PIG-PIB, 2012; Andrews, 2013, 2014; Poprawa, 2015; Dz.U. 2015 poz. 968);

5. Zawartość minerałów ilastych (zailenie)

<60%

(Wójcicki i in., 2015 na podstawie kompilacji: Andrews, 2013 i 2014; Poprawa, 2015; Dz.U. 2015 poz. 968).

Jako optymalną graniczną zawartość minerałów ilastych początkowo uznano 35% (Andrews, 2013, 2014), dopuszczając jej przesunięcie w górę w zależności od składu mineralnego. W przypadku niewielkiej zawartości wśród minerałów ilastych fazy pęczniącej (smektytu), która destrukcyjnie wpływa na rezultaty szczelinowania, uzasadnione jest zaakceptowanie wyższej zawartości frakcji ilastej, nawet do 60%.

6. Kruchość – zawartość krzemionki oraz sumaryczna zawartość kwarcu, skaleni i węglanów (Q+Sk+węg):

zawartość krzemionki: >10%

(na podstawie kompilacji: Jarvie, 2008; Andrews, 2013, 2014; Poprawa, 2015; EIA, 2013; Dz.U. 2015 poz. 968)),

zawartość Q+Sk+węg. >40 %

(Wójcicki i in., 2015 na podstawie kompilacji: Jarvie, 2008; Andrews, 2013, 2014; Poprawa 2015; EIA, 2013).

Przyjęte kryteria perspektywiczności występowania niekonwencjonalnych złóż węglowodorów typu *tight*

Dla skał karbonu południowo-zachodniej Polski rozpatruje się jedynie potencjał gazonośności ze względu na nie stwierdzenie występowania skał o dojrzałości termicznej odpowiadającej oknu ropnemu. Poniższe kryteria przedstawiono na podstawie raportu PIG-PIB, pt.: „Prognozy zasoby gazu ziemnego w wybranych zwięzłych skałach zbiornikowych Polski” (Wójcicki i in., 2014).

1. Niska przepuszczalność, poniżej 0,1 mD;

[Zakres rozdzielczości wykonanych badań petrofizycznych (por. Dyrka, 2016a, ten tom) nie pozwalał na wyznaczenie

bardzo małych przepuszczalności rzędu setnych lub tysięcznych mD. W kolejnym etapie badań zaplanowano wyższą rozdzielczość pomiarów przepuszczalności.]

2. Obniżona, aczkolwiek wciąż zachowana, porowatość całkowita, nie mniejsza niż 3% (efektywna nie mniejsza niż 2%);

3. Zawartość minerałów ilastych (zailenie) nie większa niż 55%;

4. Zwięźłość i skonsolidowanie;

5. Dojrzałość termiczna materii organicznej R_o :

okno gazowe – 1,1–3,5 %.

Wyniki badań laboratoryjnych wykonanych w poszczególnych profilach otworów zostały przeanalizowane pod kątem przyjętych kryteriów perspektywiczności.

Daną strefę kompleksu skalnego uznawano za perspektywiczną jeśli przeważająca liczba wyników badań analitycznych lub analiz pomiarów geofizyki otworowej z tej strefy spełniała zdefiniowane kryteria.

Z uwagi na stosunkowo małą zmienność parametrów petrograficznych (Sikorska-Jaworowska i in., 2016) oraz petrofizycznych (Dyrka, 2016a) w wydzielonych formacjach perspektywicznych niższego paleozoiku, przy przeważającej liczbie zgodnych z kryteriami oznaczeń, kluczowymi parametrami dla ustalenia perspektywiczności były: całkowita zawartość węgla organicznego (TOC), dojrzałość termiczna materii organicznej (R_o) i miąższość. Parametry te zostały określone na podstawie wyników analiz geofizyki otworowej, dających ciągły profil TOC oraz wyników analiz przeprowadzonych na rdzeniu. Zaobserwowano dobrą korelację punktowych wyników laboratoryjnych oraz uzyskanych z analiz karotaży. Zaktualizowano mapy dojrzałości termicznej materii organicznej dla poszczególnych wydziałów litostratygraficznych uznawanych za perspektywiczne (Rozpoznanie..., 2016). Mapa dojrzałości termicznej materii organicznej dla formacji z Sasina jest zamieszczona w pracy Grotek (2016).

Zasięgi stref perspektywicznych przedstawione na mapach (ryc. 2–5) wyznaczano, opierając się na kryteriach w dwóch wariantach – 1) podstawowym, w którym przyjęto sumaryczną minimalną miąższość utworów o TOC >2% równą 10 m, oraz 2) uzupełniającym, o sumarycznej minimalnej miąższości utworów o TOC pomiędzy 1–2% wynoszącej 30 m. W celu wyznaczenia zasięgów stref perspektywicznych ograniczono mapy miąższości formacji perspektywicznych (np. ryc. 4 w Podhalańska i in., 2016) i mapy średnich zawartości substancji organicznej (patrz ryc. 1–4 w Karcz & Janas, 2016) do wskazanych kryteriów, zestawiono je ze sobą i zawężono do wspólnych obszarów. Następnie obszary te ograniczono do stref potencjalnego występowania węglowodorów (0,6–3,5% R_o), wyznaczając tym samym sugerowany zasięg stref perspektywicznych.

Korelacje międzyotworowe wyróżnionych stref perspektywicznych wzdłuż wyznaczonych linii przeprowadzono, korzystając z programu Techlog. Przykładowe porównanie profili z wydzielonymi strefami perspektywicznymi w skałach łupkowych niższego paleozoiku przedstawiono w dalszej części artykułu (patrz także zał. 29–36 w Rozpoznanie..., 2016 oraz ryc. 1A i B Roman, 2016). Na cytowanych rycinach zamieszczono większość rozpatrywanych parametrów przy wydzielaniu stref, tj.: chronostratygrafię, profilowania gamma i oporności, oznaczenia/profilowania TOC, porowatość efektywną i całkowitą, profil nasycenia przestrzeni porowej wodą złożową/węglowodoraми, w przypadku niektórych otworów wyniki

kompleksowej interpretacji litologiczno-porowatościowej, litostratygrafię, wydzielone strefy perspektywiczne.

Na obszarze basenu karbońskiego południowo-zachodniej Polski strefy perspektywiczne zostały wyznaczone w pięciu najbardziej szczegółowo przeanalizowanych otworach (ryc. 1). Ze względu na stosunkowo słabo rozpoznaną stratygrafię sukcesji karbońskiej, jej złożoną budowę tektoniczną, a także duże odległości pomiędzy badanymi otworami, korelacja tych stref na obecnym etapie badań nie jest możliwa. Nie mniej jednak, metodyka wyznaczania stref perspektywicznych w poszczególnych otworach pod względem występowania gazu w systemach niekonwencjonalnych była taka sama jak scharakteryzowana powyżej.

Wiek karbońskich kompleksów perspektywicznych skompilowano głównie na podstawie wyników badań palinologicznych Góreckiej-Nowak (2007, 2008, 2009). W odcinkach profili, których te wyniki nie obejmowały, stratygrafię uzupełniono, opierając się na starszej literaturze (Korejwo-Teller, 1973; Cebulak & Dembowski, 1973; Parka & Ślusarczyk, 1988), danych z dokumentacji wynikowych otworów oraz z Centralnej Bazy Danych Geologicznych PIG-PIB. Upady i deformacje tektoniczne scharakteryzowano na podstawie dokumentacji wynikowych otworów oraz wyników badań Jarosińskiego (1997) oraz Mazura i in. (2010).

Prezentowane w dalszej części artykułu zestawienie otworowe z obszaru basenu karbońskiego południowo-zachodniej Polski przebiega w kierunku NW–SE i obejmuje otwory Paproć 29, Siciny IG 1, Marcinki IG 1 i Więcki IG 1. Na zestawieniu przedstawiono cały profil karbonu nawierconego danym otworem zgodnie z przyjętą w projekcie stratygrafią. Zestawienia te pozwalają na prześledzenie lateralnej zmienności litologicznej i stratygraficznej skał karbońskich w analizowanych otworach. Ze względu na skomplikowaną, nierozpoznaną szczegółowo budowę tektoniczną sukcesji, nie jest możliwe poprowadzenie jakichkolwiek linii korelacyjnych pomiędzy zestawionymi profilami otworów. Na obecnym etapie rozpoznania stratygraficznego zestawionych profili w żadnym z nich nie rozpoznano granicy sąsiadujących ze sobą wiekowych pięter lub podpięter. W związku z tym nie jest możliwa precyzyjna korelacja stratygraficzna odcinków profili o takim samym wieku (np. namur A), gdyż nie ma pewności, czy odpowiadają one tej samej części danego wydzielenia stratygraficznego. Jediną możliwą do prześledzenia w badanych otworach granicą stratygraficzną jest strop karbonu.

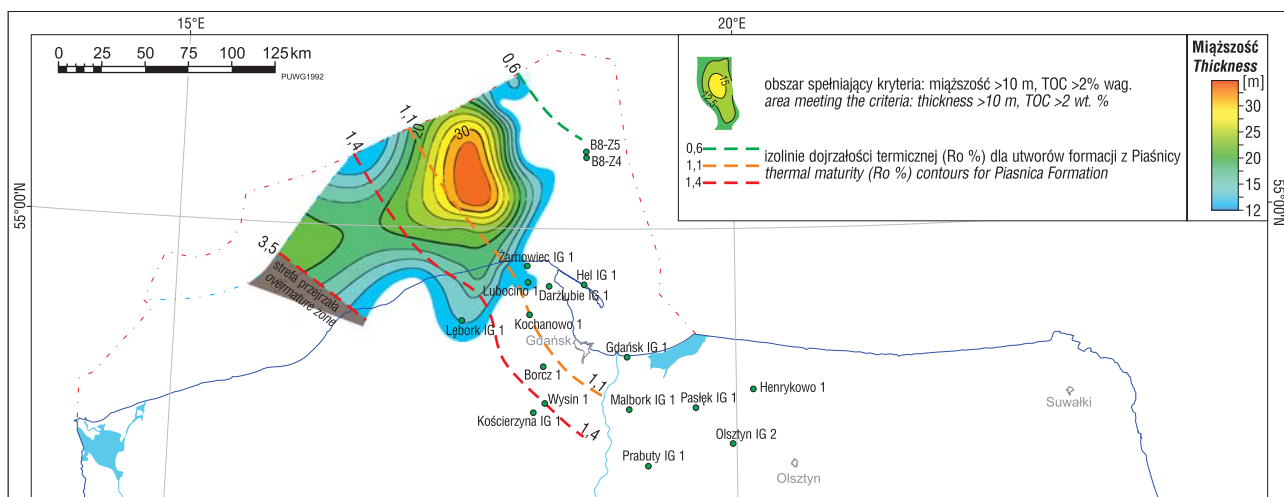
CHARAKTERYSTYKA STREF PERSPEKTYWICZNYCH NA OBSZARZE BASENU BAŁTYCKO-PODLASKO-LUBELSKIEGO

W utworach niższego paleozoiku wydzielono i wyznaczono zasięg stratygraficzny i lateralny 4 stref perspektywicznych określonych jako SP1, SP2, SP3 i SP4.

Strefa perspektywiczna SP1

Strefa ta została wydzielona tylko w bałtyckiej części basenu (ryc. 2). Obejmuje górną część kambru (górną część furongu) oraz miejscami najniższy tremadok i odpowiada pełnemu zasięgowi stratygraficznemu formacji łośców z Piaśnicy, a tylko jej częściowemu zasięgowi lateralnemu.

Przyjęte kryteria perspektywiczności są spełnione w północnej części obszaru lądowego wyniesienia Łeby oraz w strefie morskiej, odpowiadającej depocentrum formacji



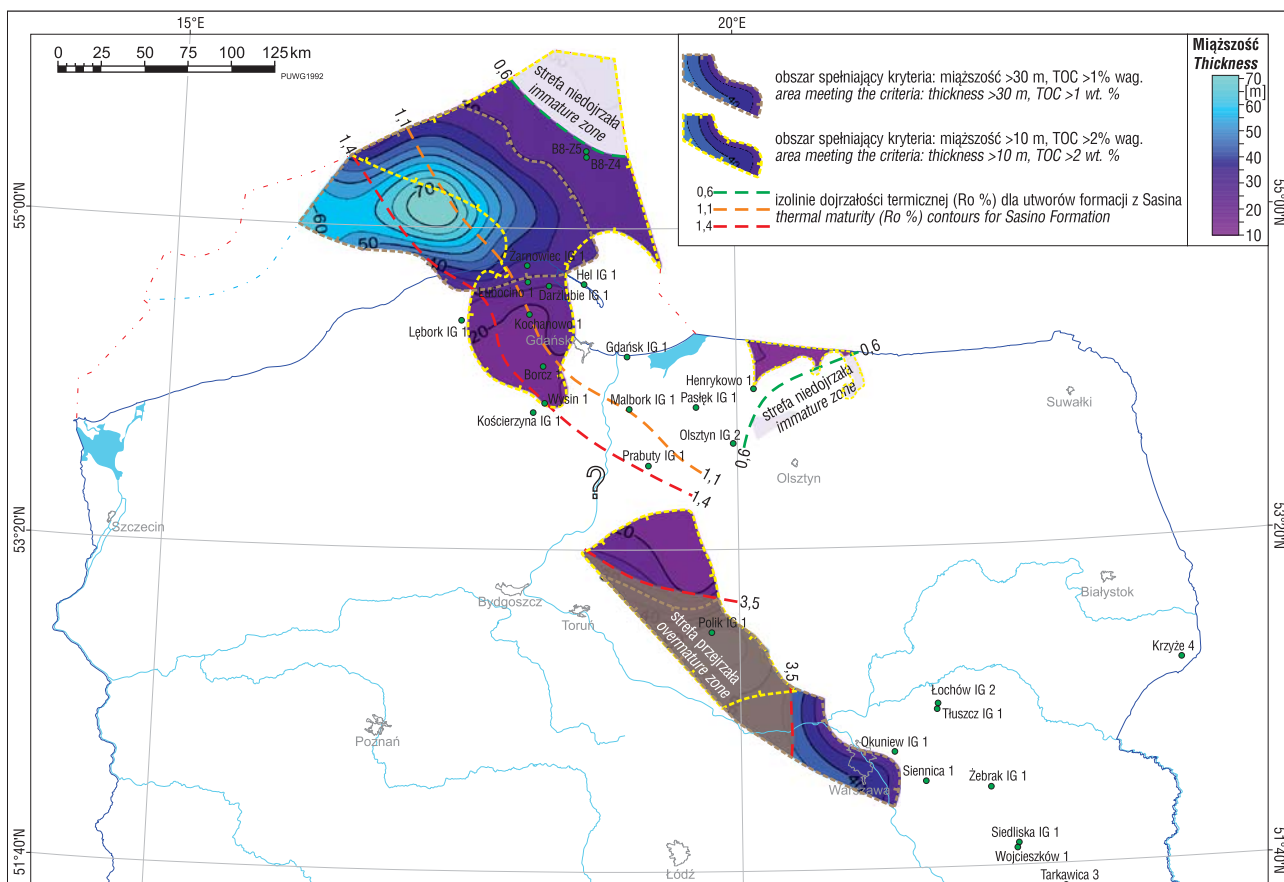
Ryc. 2. Mapa strefy perspektywicznej SP1 (zestawił A. Głuszyński)
 Fig. 2. Map of SP1 zone (compiled by A. Głuszyński)

piaśnickiej. Strefę SP1 tworzą charakterystyczne czarne iłowce bitumiczne uznane za główną skałę macierzystą w systemie węglowodorowym niższego paleozoiku basenu bałtyckiego, bogate w materię organiczną (średnie wartości wskaźnika TOC wynoszą od 3,5–12,0% wag.). Dojrzałość termiczna materii organicznej wzrasta z NE ku SW w stronę krawędzi platformy wschodnioeuropejskiej, przechodząc od głównej fazy generowania ropy naftowej przez fazę kondensatu i gazu mokrego po główną fazę gazu suchego (ryc. 2). Miąższość bitumicznych iłowców strefy SP1 wynosi od 10 m na jej obrzeżach do ponad 30 m w morskiej strefie ekonomicznej Bałtyku w kierunku NNW

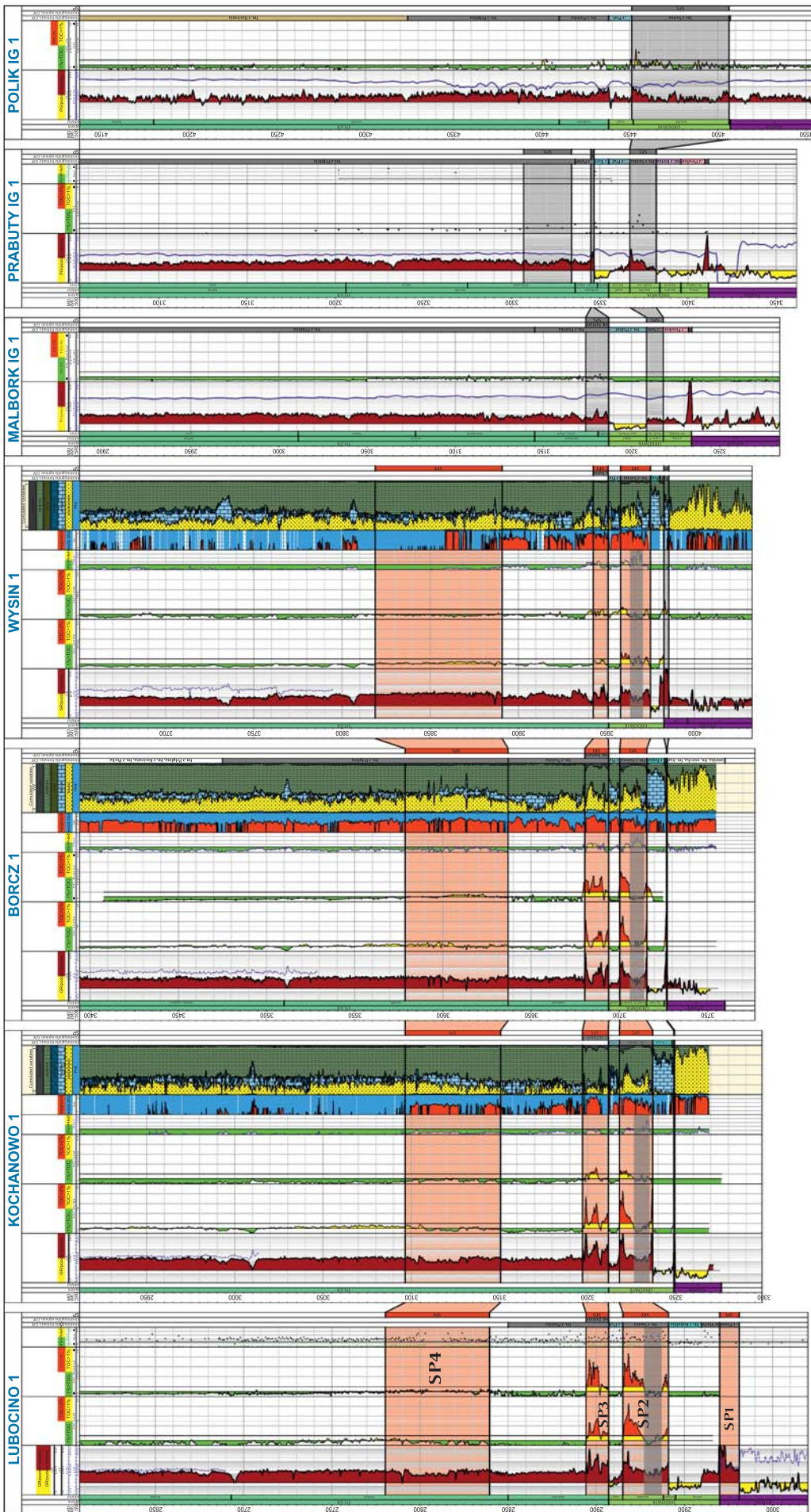
od otworu Żarnowiec IG 1. Strefę tę wyróżniono w obszarze lądowym m.in. w otworach nadmorskiej części wyniesienia Łeby oraz w odwierconym w ostatnich latach otworze Lubocino 1.

Strefa perspektywiczna SP2

Strefa SP2 zasięgiem pionowym obejmuje formację z Sasina, natomiast nie występuje, ze względu na przyjęte kryteria, na całym obszarze rozprzestrzenienia tego wydzielenia litostratygicznego. Formacja z Sasina i jej regionalne odpowiedniki w obszarze lubelskim (formacje Udala



Ryc. 3. Mapa strefy perspektywicznej SP2 (zestawił A. Głuszyński)
 Fig. 3. Map of SP2 zone (compiled by A. Głuszyński)



Ryc. 4. Korelacja stref perspektywicznych (SP) wzdłuż linii korelacyjnej 1 (basen bałtycki) wykonana w programie Techlog. Zależnie od posiadanych danych w każdym otworze zachowano następujący porządek kolumn (od lewej do prawej): chronostratygrafia, profilowanie gamma i oporności, oznaczenia laboratoryjne i profilowania TOC, oznaczenia laboratoryjne i profilowania porowatości efektywnej i całkowitej, nasycenie przestrzeni porowej (kolor czerwony – węglowodory, niebieski – woda złożowa), objętościowy model litologiczno-porowatościowy, litostratygrafia, wydzielone strefy perspektywiczne. Wydzielenie stref SP1, SP2, SP3, SP4 – czerwone podświetlenie pod krzywyymi; szary kolor – warstwy w obrębie formacji perspektywicznych, niespełniające wszystkich kryteriów perspektywiczności (wyk. M. Roman)

Fig. 4. Demonstrative picture (Techlog program) showing the correlation of the prospective zones (SP) for line 1 (Baltic basin). Depending on available data for each borehole, the columns were segregated in the following order (from left to right): chronostratigraphy, gamma ray and resistivity, laboratory analysis and profile of the TOC, laboratory analysis and profile of the effective and total porosities, content of the porous media (red – hydrocarbon saturation, blue – water saturation), volumetric model of the lithology and porosity, lithostratigraphy, prospective zones. The separated prospective zones (SP1, SP2, SP3, SP4) are highlighted in red, the zones that not meet all the prospectivity criteria are highlighted in grey (made by M. Roman)

i z Cieszanowa) to jedyny ordowicki poziom ciemnych łupków rozprzestrzeniony we wszystkich obniżonych jednostkach strukturalny obszar platformy prekambryjskiej w Polsce (patrz ryc. 4 w Podhalańska i in., 2016).

SP2 (ryc. 3) rozciąga się w północnej części obniżenia bałtyckiego, obejmując swym zasięgiem północną i środkową część wyniesienia Łeby w obszarze lądowym (z otw. Żarnowiec IG 1, Żarnowiec IG 4, Łeba 8, Białogóra 1, Białogóra 2, Dębki 2, Dębki 3 i in.). Strefa ta kontynuuje się na obszarze Bałtyku i występuje w profilach szeregu otworów morskich, w tym nowych B8-Z4 i B8-Z5 położonych na wschodzie polskiej strefy ekonomicznej Bałtyku. Strefa ta występuje także we wszystkich, analizowanych w ramach projektu, a odwierconych w ostatnich latach, otworach wiertniczych, tj.: Lubocino 1, Opalino 1, Kochanowo 1, Borcz 1, Wysin 1 (ryc. 3, 4).

Strefa SP2 w obszarze bałtyckim osiąga miąższość od 10 m we wschodniej części do powyżej 70 m na północ od Żarnowca i Łeby. Obszar maksymalnych miąższości strefy SP2 odpowiada depocentrum osadów formacji z Sasina na obszarze bałtyckim. Strefa ta reprezentuje cały karadok, od poziomu *Nemagraptus gracilis* do *Climacograptus styloideus* (*Pleurograptus linearis*) lub lanwiri i karadok, jak ma to miejsce np. w profilu Darzłubie IG 1 (Modliński & Szymański, 2011).

W pionowym zasięgu strefy SP2 zaobserwowano wyraźną trójdzielność podkreśloną charakterem osadu. Litofacje perspektywiczne z zespołu L-1 i L-3 to masywne i/lub laminowane ciemne ilowce i mułowce ilaste często z dużą zawartością drobnych kongregacji pirytowych lub rozproszonego pirytu, występują w spągowych i stropowych partiach profilu. W środkowej części zaś występują zbiorowiska mułowce lub silnie scementowane (krzemionka/dolomitem) mułowce wraz z licznymi wkładkami tuffitów i bentonitów (Feldman-Olszewska & Roszkowska-Remin, 2016). Trójdzielność litofacyjna jest obserwowana również na krzywych profilowania gamma i może sugerować wewnętrzne zróżnicowanie stopnia perspektywiczności tej strefy. Jest ona widoczna we wszystkich profilach wzdłuż linii 1, w których została wydzielona strefa SP2 (ryc. 4).

Skały reprezentujące SP2 są bardzo dobrą skałą macierzystą (średnie wartości wskaźnika TOC wynoszą od 1,0–3,0% wag.) o relatywnie wysokim potencjale węglowodorowym w przeważających częściach basenu bałtyckiego, niecki warszawskiej i północno-zachodniej części basenu podlaskiego. Na mapie zasięgu SP2 wyznaczono w tej strefie dwa obszary, przyjmując dwa warianty kryteriów TOC i miąższości: ≥ 30 m dla TOC $\geq 1\%$ wag. oraz ≥ 10 m dla TOC $\geq 2\%$ wag.

Dojrzałość termiczna osadów strefy SP2 wzrasta z kierunku NE ku SW wraz z głębokością pograżenia, przechodząc od głównej fazy generowania ropy naftowej, przez fazę generowania kondensatu i gazu mokrego (1,1–1,4% Ro) po główną fazę generowania gazu suchego ($\geq 1,4\%$ Ro) (ryc. 3).

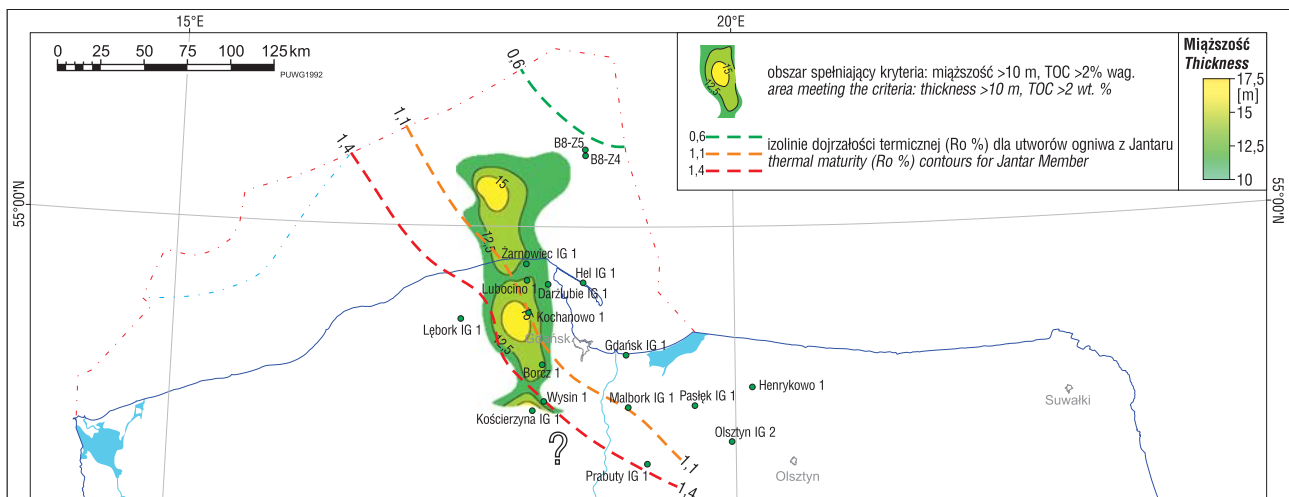
Wszystkie wartości poszczególnych parametrów petrofizycznych w strefie SP2 spełniają założone kryteria perspektywiczności (Dyrka, 2016; Opracowanie...2015). Porowatość efektywna w SP2 zmienia się w zakresie 4,88–6,56%. Kruchość jest charakteryzowana przez średnią zawartość krzemionki przekraczającą znacznie 10% w większości analiz oraz sumaryczną średnią zawartość kwarcu, skaleni i węglanów w zakresie 43,27–45,00%. Zawartość minerałów ilastych wynosi 50,79–47,68%. Dostępne wyniki interpretacji profilowań geofizyki otwo-

rowej pod względem porowatości w dostępnych, odwierconych w ostatnich latach na obszarach koncesyjnych otworach wiertniczych, wskazują na spełnienie warunku perspektywiczności (porowatość efektywna $>4\%$) w większej części SP2. We wszystkich otworach widać wyraźne zwiększenie porowatości w środkowym interwale profilu, zawierającym tufity.

Na zachodnim obrzeżeniu wyniesienia mazursko-suwalskiego strefa SP2 została wydzielona tylko na dwóch niewielkich obszarach (ryc. 3); jeden, w północnej części podłoża niecki płocko-warszawskiej, gdzie miąższość strefy wynosi od 15 do ok. 30 m oraz drugi, w północno-zachodniej części obniżenia podlaskiego w okolicach Warszawy, gdzie jej miąższość wynosi 30–45 m i zwiększa się ku południowemu zachodowi. Oba te obszary, na których SP2 spełnia wszystkie przyjęte kryteria perspektywiczności, rozdziela rejon okolic otworu Polik IG 1, gdzie mimo dużych miąższości, formacja z Sasina nie spełnia kryterium dojrzałości termicznej (ryc. 3). Strefa SP2 w okolicach Warszawy, na zachód i południowy zachód od otworu Okuniew IG 1, znajdującym się tuż poza strefą, obejmuje najprawdopodobniej utwory wyższej części karadoku. W otworze Okuniew IG 1, podobnie jak w otworach Tłuszcz IG 1 i Żebrak IG 1 do formacji z Sasina należą wyższe poziomy karadoku (dolny kat) od *Dicranograptus clingani* do *Climacograptus styloideus*. Dolna część karadoku jest tam wykształcona jako formacja pstrych wapieni z Kielna (Modliński & Szymański, 2008). SP2 z obszaru zachodniego obrzeżenia wyniesienia mazursko-suwalskiego to słabej jakości skały macierzyste (średnia wartość parametru TOC wynosi od 1,0 do 2,5% wag.), charakteryzujące się niskim potencjałem generacyjnym i węglowodorowym. Zawartość węgla organicznego w obrębie strefy SP2 w rejonie podlaskiej i lubelskiej części basenu maleje w kierunku wschodnim i jest największa w zachodniej i/lub północno-zachodniej części (średnia wartość parametru TOC wynosi 1,1–1,5% wag). Dojrzałość termiczna materii organicznej w obrębie obszaru podlaskiego odpowiada strefie występowania gazu suchego.

Strefa perspektywiczna SP3

Strefa ta zasięgiem stratygraficznym obejmuje ogniwo ilowców bitumicznych z Jantaru i rozciąga się tylko w północnej części obniżenia bałtyckiego na zachód od Gdańska, obejmując swym zasięgiem znaczną część wyniesienia Łeby w obszarze lądowym (z odwierconymi w ostatnich latach otworami Lubocino 1, Kochanowo 1, Wysin 1, Borcz 1 oraz starszymi odwiertami, takimi jak: Żarnowiec IG 1, Żarnowiec IG 4, Łeba 8, Białogóra 1, Białogóra 2, Dębki 2, Dębki 3). SP3 kontynuuje się ku północy na obszar Bałtyku (ryc. 5). Jej zasięg przestrzenny, określony spełnieniem kryteriów perspektywiczności, jest mniejszy od zasięgu przestrzennego ogniwa z Jantaru. Dolna granica strefy SP3 odpowiada dolnej granicy ogniwa, a tym samym dolnej granicy formacji z Pasłęka. Utwory spełniające kryteria perspektywiczności w strefie SP3 odpowiadają piętru rhuddan i częściowo aeronowi (poziomy graptolitowe *ascensus-triangulatus*). Największe miąższości strefa SP3 osiąga w rejonie otworu wiertniczego Kochanowa 1 oraz na północ od otworu Żarnowiec IG 1 w morskiej strefie ekonomicznej, gdzie jej miąższość wynosi 15,0–17,5 m. Nie stwierdzono obecności utworów tej strefy w podlaskiej i lubelskiej części basenu (ryc. 5).



Ryc. 5. Mapa strefy perspektywicznej SP3 (zestawił A. Głuszyński)
 Fig. 5. Map of SP3 zone (compiled A. Głuszyński)

W strefie SP3 występują ciemnoszare i czarne iłowce oraz iłowce pylaste najczęściej masywne, niezbioturbowane z dużą ilością drobnych konkrecji pirytowych. Dominującym zespołem litofacji jest zespół L-1 (Feldmann-Olszewska & Roszkowska-Remin, 2016).

SP3 stanowi trzeci (licząc od najstarszych) horyzont macierzysty systemu węglowodorowego niższego paleozoiku, jednak o ograniczonym zasięgu przestrzennym. Są to skały obfitujące w materię organiczną o średnich wartościach TOC od 2 do ok. 5% wag. Dojrzałość termiczna materii organicznej wzrasta z NE ku SW, przechodząc od głównej fazy generowania ropy naftowej przez fazę kondensatu i gazu mokrego po główną fazę generowania gazu suchego (ryc. 5). Dostępne wyniki interpretacji krzywych geofizyki wiertniczej pod względem porowatości z otworów Borcz 1 i Wysin 1 wskazują na spełnienie warunku perspektywiczności przy porowatości efektywnej >4%. Średnia porowatość efektywna pomierzona dla ogniwa z Jantaru, którego część zasięgu lateralnego obejmuje strefa SP3, wynosi 4,92% (Dyrka, 2016).

Strefa perspektywiczna SP4

Strefa ta charakteryzuje się największym zasięgiem przestrzennym ze wszystkich wydzielonych stref (ryc. 6). Udokumentowano ją na obszarze basenu bałtyckiego, podlaskiego i lubelskiego. W strefie SP4 dominują czarnoszare mułowce i iłowce laminowane litofacji L4. Charakterystyczna jest mała zmienność cech litologiczno-petrograficzno-sedymentologicznych. Wyjątkiem jest zawartość węglanów, których udział wyraźnie zwiększa się w kierunku wschodnim strefy.

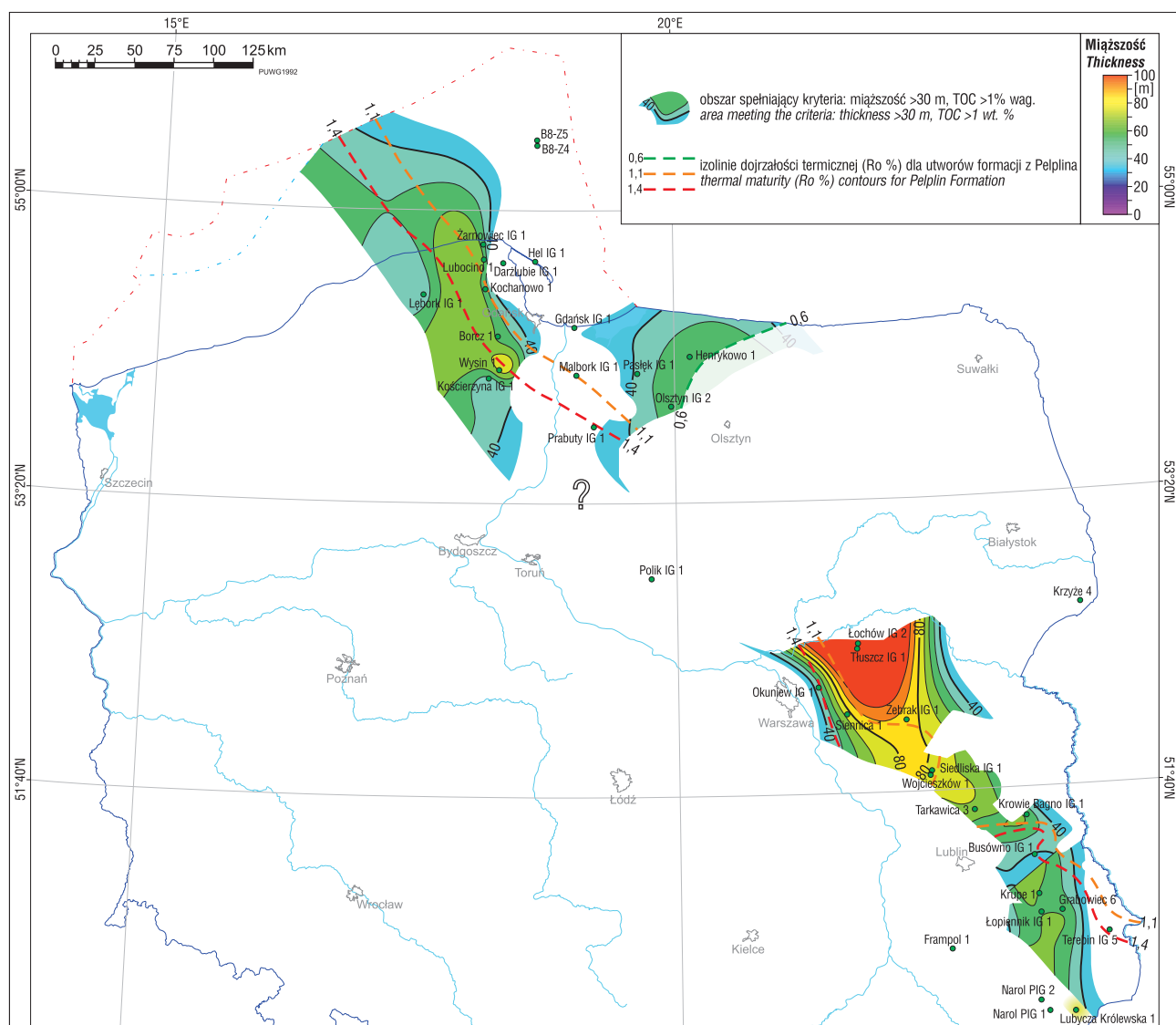
SP4 obejmuje niższą część formacji z Pelplina. Ponieważ osady tej formacji nie wykazują średnich zawartości substancji organicznej (TOC) >2% wag., zasięg strefy perspektywicznej SP4 został wyznaczony tylko dla wariantu uzupełniającego. Niezbędne okazało się wydzielenie w poszczególnych profilach głębokości, od których utwory części formacji z Pelplina wykazują podwyższoną macierzystość. Za punkt odcięcia dla tej analizy przyjęto graniczną wartość 1% wag. TOC. Dolna granica strefy jest analogiczna ze spągami formacji i odpowiada dolnej granicy wenloku. Górna granica przebiega heterochronicznie i sytuuje się w różnych poziomach biostratygraficznych wenloku (basen bałtycki) i wenloku lub niższego ludłowu

– gorstu (basen podlasko-lubelski). Przy wyznaczaniu górnej granicy SP4, przyjęto założenie, że wkładki skalne o zawartości TOC <1% wag. również mogą być włączone do formacji perspektywicznej, o ile powyżej nich znajdują się miąższe interwały o zawartości TOC co najmniej 1% wag. Dojrzałość termiczna materii organicznej rozproszonej w skałach strefy SP4 wzrasta z NE ku SW, przechodząc od głównej fazy generowania ropy przez fazę generowania gazów i kondensatów po główną fazę generowania gazów (ryc. 6).

W obszarze bałtyckim strefa ta rozciąga się z kierunku NNW ku SSE od granicy polskiej strefy ekonomicznej Bałtyku przez obszar wyniesienia Łeby i dalej w kierunku południowym od otworu Kościerzyna IG 1 (ryc. 6). W tym rejonie, m.in. ze względu na właściwości geochemiczne, takie jak niewysoka całkowita zawartość węgla organicznego (średnio ok. 1% wag.) czy relatywnie niski potencjał generacyjny i węglowodorowy, skały strefy SP4 mają podważalne znaczenie pod względem perspektywiczności w porównaniu z innymi wydzielonymi tu strefami (SP1–SP3). Wartości parametrów petrofizycznych w strefie SP4 w obniżeniu bałtyckim spełniają założone kryteria perspektywiczności z wyjątkiem zbyt niskiej zawartości krzemionki oraz sumarycznej zawartości kwarcu, skaleni i węglanów w otworze Żarnowiec IG 1 (Dyrka, 2016).

Na obszarze podlasko-lubelskim basenu strefa ta występuje od południowo-zachodniej granicy wyniesienia mazursko-suwalskiego i rozciąga się wzdłuż zachodniego skłonu kratonu wschodnioeuropejskiego aż do południowo-wschodnich granic Polski w okolicach otworu Lubycza Królewska 1 (ryc. 6). Obejmuje tu znaczną część formacji z Pelplina (wenlok, ludłow – gorst). W otworze Tłuszcz IG 1 jej górna granica przebiega w wyższym gorście (Rozpoznanie..., 2016). Miąższość zmienia się od 30 m w okolicach Terebina i Grabowca na południowym wschodzie obszaru do ponad 100 m w okolicach otworów Tłuszcz IG 1 i Łochów IG 2.

Skały strefy SP4 obszaru podlasko-lubelskiego wykazują perspektywiczność ze względu na znaczną miąższość pakietów o średniej całkowitej zawartości węgla organicznego powyżej 1% wag. (średnie wartości wskaźnika TOC dla basenu podlaskiego i lubelskiego wynoszą odpowiednio 1,24 i 1,33% wag.). Wartości poszczególnych parametrów w strefie SP4 spełniają tu założone kryteria perspektywiczności, z wyjątkiem zbyt niskiej porowatości



Ryc. 6. Mapa strefy perspektywicznej SP4 (zestawił A. Głuszyński)
 Fig. 6. Map of SP4 zone (compiled by A. Głuszyński)

efektywnej w otworach Krowie Bagno IG 1 i Tarkawica 3. Istnieje także ryzyko, że ze względu na wyczerpany potencjał węglowodorowy skały w części obszaru lubelskiego, wyznaczonej przez otwory Busówno IG 1 i Łopiennik IG 1 oraz na zachód i południowy zachód od nich, mogą charakteryzować się niższą perspektywicznością, mimo że spełniają jednocześnie przyjęte kryteria i zostały uwzględnione przy wyznaczaniu zasięgu strefy SP4. W związku z tym konieczne są dalsze badania, które pozwolą na uszczegółowienie zasięgu pionowego oraz lateralnego tej strefy i jej perspektywiczności.

CHARAKTERYSTYKA STREF PERSPEKTYWICZNYCH NA OBSZARZE BASENU KARBOŃSKIEGO POŁUDNIOWO-ZACHODNIEJ POLSKI

Na obszarze basenu karbońskiego południowo-zachodniej Polski wydzielono w czterech spośród badanych otworów siedem stref perspektywicznych – po jednej w profilach Paproć 29, Marcinki IG 1, Września IG 1 oraz cztery strefy w profilu Siciny IG 1 (ryc. 7). W profilu bada-

nego otworu Więcki IG 1, zlokalizowanym w południowo-wschodniej części obszaru, nie wyznaczono żadnej strefy perspektywicznej z powodu zbyt wysokiej dojrzałości termicznej materii organicznej.

Strefa perspektywiczna w otworze Paproć 29

W położonym najdalej na zachód profilu otworu Paproć 29 została wyznaczona strefa perspektywiczna typu *tight*, na głębokości 2511–2666 m (ryc. 7). Obecny stan badań nie pozwala na precyzyjne określenie stratygrafii utworów karbonu w tej strefie. Ich wiek obejmuje szeroki przedział odpowiadający namurowi–stefanowi.

W opisanych rdzeniach tego profilu występują głównie piaskowce drobnoziarniste masywne oraz o zdeformowane tektonicznie. Skały są wtórnie zabarwione na kolor jasnoczerwony lub czerwono-brązowo-fioletowy. Spotykane są liczne struktury tektoniczne. Upad warstw wynosi 5–50°.

Zmierzona laboratoryjnie porowatość efektywna piaskowców wynosi średnio 2,47%, natomiast porowatość całkowita – średnio 4,14%. Zawartość minerałów ilastych w przeważającej liczbie analiz wynosiła 25,1–62,9%

(śr. 44%). Analiza dojrzałości termicznej materii organicznej oparta na pomiarze refleksyjności wityryny w obrębie tej strefy nie była możliwa ze względu na zjawisko utlenienia skał. Najbliższy pomiar R_o na głębokości 2828,10 m wynosi 1,49%. W skałach karbonu występuje III typ kerogenu (Nowak, 2016).

Scharakteryzowane powyżej wartości poszczególnych parametrów spełniają założone kryteria dla stref typu *tight*.

Strefy perspektywiczne w otworze Siciny IG 1

W profilu karbonu otworu Siciny IG 1, zlokalizowanym również w zachodniej części obszaru, dalej w kierunku południowym w stosunku do otworu Paproć 29 (ryc. 1), zostały wyznaczone cztery strefy perspektywiczne, w tym trzy typu *hybrid* i jedna typu *tight* (ryc. 7).

W wyższej części profilu występuje strefa perspektywiczna typu *hybrid*, na głębokości 2097–2250 m. Górna część strefy do głębokości 2179,2 m jest datowana na przedział obejmujący westfal C–D, dolna część – na westfal C. W profilach rdzeniowych występują w przewodzie iłowce i mułowce masywne, laminowane faliście, soczewkowo, smużyście, riplemarkowo oraz zaburzone. Towarzyszą im mułowce piaszczyste. Mułowce i iłowce są przelawiczone cienkimi warstwami piaskowców mułowcowych lub piaskowców drobnoziarnistych. Od stropu karbonu do głębokości 2179 m skały są zabarwione na pstre kolory, poniżej dominuje barwa ciemnoszara. Często są spotykane zaburzenia tektoniczne oraz żyłki wypełnione dolomitami. Upad warstw wynosi 0°, sporadycznie może osiągać 10–15°.

Poniżej w profilu otworu Siciny IG 1 występują dwie strefy perspektywiczne, typu *hybrid*. Wyższa z nich wyznaczona na głębokości 2401,7–2452,5 m została wydatowana jako namur A, natomiast jej odcinek spągowy (2450,0–2452,5 m) – jako westfal C. Zaleganie skał starszych na młodszych w najniższej części profilu strefy jest związane z deformacjami tektonicznymi. W rdzeniach pochodzących z tej strefy występują cienkie warstwy szarych drobno-, średnio- i gruboziarnistych piaskowców masywnych przelawiczących się z ciemnoszarymi mułowcami i mułowcami piaszczystymi laminowanymi horyzontalnie lub iłowcami i mułowcami masywnymi. Niektóre piaskowce zawierają szczeliny tektoniczne wypełnione iłowcem i barytem oraz impregnacje hematytowe.

Niższa ze stref perspektywicznych typu *hybrid* występuje na głębokości 2530–2560 m. Wiek skał strefy, od stropu do głębokości 2546,7 m określono jako westfal C, a poniżej – jako namur A. Przypuszcza się, że ze względu na obecność deformacji tektonicznych (stwierdzonych na głębokości 2542 m) mogą również występować w tej strefie, podobnie jak wyżej, zaburzenia sukcesji stratygraficznej. W rdzeniach pochodzących z tej strefy opisano ciemnoszare i czarne iłowce oraz mułowce masywne z cienką warstwą szarego drobnoziarnistego piaskowca masywnego. Są tu spotykane liczne lustra tektoniczne, a upad warstw osiąga 50–65°.

Poniżej opisano wyniki analiz petrologicznych i geochemicznych materii organicznej, petrofizycznych oraz analiz geofizyki otworowej wykonane dla trzech scharakteryzowanych powyżej stref perspektywicznych typu *hybrid* w profilu karbonu otworu Siciny IG 1. Według analizy profili geofizyki otworowej zawartość materii organicznej wynosi 0,72–3,68% wag. TOC, natomiast w wyniku badania próbek metodą Rock Eval zawartość tę określono na 0,02–3,5% wag. Wyniki pomiarów refleksyjności wityryny

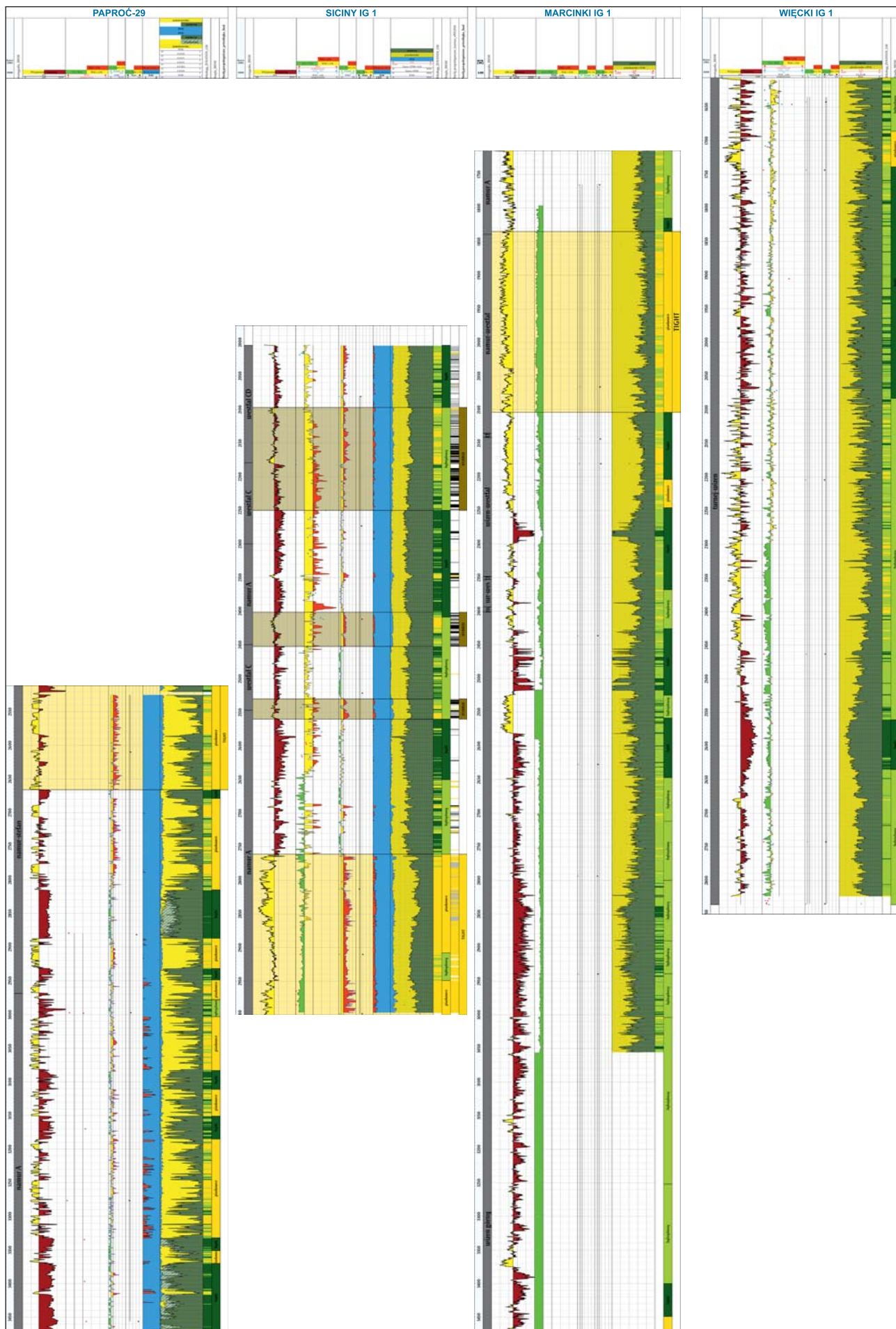
tu dla całego profilu otworu Siciny IG 1 wynoszą 1,49–1,90%, odpowiadając oknu gazowemu. Chociaż w otworze Siciny IG 1 przebadane próbki znajdują się w fazie generowania gazów suchych, ich zdolności generacyjne wydają się być wyczerpane; nie wyklucza to jednak potencjału gazonośnego, gdyż wygenerowany gaz w strefie hybrydowej miał szanse na akumulację.

Porowatość efektywna wyznaczona na podstawie analizy krzywych geofizyki otworowej we wszystkich trzech strefach zwykle przekracza 4%. Zauważalne jest zmniejszenie porowatości w utworach westfalu C w stosunku do westfalu C–D w najwyższej strefie. Na podstawie wyników analiz laboratoryjnych parametrów petrofizycznych i petrofizyczno-mineralogicznych wykonanych w dwóch niższych strefach, stwierdzono porowatość efektywną wynoszącą średnio 2,13%, natomiast porowatość całkowitą wynosi 5,36–5,6% (średnia 5,48%). Zailenie mieści się w przedziale 39,5–45,9% (średnio 42,7%), zawartość krzemionki – średnio 71% (wyższa strefa), natomiast sumaryczna zawartość kwarcu, skaleni i węglanów w obu strefach wynosi 52,3–58,8% (średnia 55,55%). Parametr kruchości w obu strefach jest na dobrym poziomie.

Scharakteryzowane powyżej wartości poszczególnych parametrów, przeanalizowane w dwóch niższych strefach perspektywicznych na podstawie badań próbek skalnych i interpretacji pomiarów geofizyki otworowej, spełniają założone kryteria dla stref perspektywicznych pod względem niekonwencjonalnych nagromadzeń węglowodorów. Dla najwyższej strefy wyznaczenie jej jako horyzontu perspektywicznego, pod względem cech petrofizycznych i stwierdzenie spełnienia założonych kryteriów, zostało wykonane na podstawie analizy krzywych geofizyki otworowej.

Najniżej w profilu karbonu otworu Siciny IG 1 występuje strefa perspektywiczna typu *tight*, na głębokości 2761–3000 m, wydatowana jako namur A. W rdzeniach występują głównie szare piaskowce grubo-, średnio- i rzadziej drobnoziarniste masywne, warstwowane horyzontalnie oraz o malejącym uziarnieniu frakcjonalnym. Często przelawiczą się z nimi szare zlepieńce i zlepieńce piaszczyste masywne lub o malejącym uziarnieniu frakcjonalnym. W zlepieńcach są spotykane okruchy kwarcowe, skaleniowe, iłowcowe i litytowe. Występują również cienkie wkładki ciemnoszarych i czarnych iłowców, mułowców i mułowców piaszczystych. Skały są zaburzone tektonicznie. Upad warstw w górnej części strefy wynosi 5–20°, natomiast w dolnej warstwy zalegają poziomo.

Porowatość efektywna wyznaczona na podstawie interpretacji pomiarów geofizyki otworowej w całej tej strefie spełnia kryteria perspektywiczności, a niemal w całej przekracza 4%, osiągając wartości do 15%. Pomiar laboratoryjny na próbkach skalnych wykazały porowatość efektywną w przedziale 0,53–0,64% (średnio 0,58%), a porowatość całkowitą w przedziale 3,02–6,07% (średnio 4,54%). Niskie wartości porowatości efektywnej uzyskane metodą laboratoryjną nie spełniają założonego kryterium perspektywiczności. Porównując je z wynikami uzyskanymi metodą analizy karotaży, można przyjąć, że są one zaniżone i niereprezentatywne. Z tego względu diagnoza dotycząca perspektywiczności opierała się na analizie krzywych geofizyki otworowej. Laboratoryjnie oznaczona sumaryczna zawartość minerałów ilastych w przeważającej liczbie analiz wynosi 30,6–55,0% (śr. 45,36%). Wartości poszczególnych parametrów spełniają założone



Ryc. 7. Zestawienie danych oraz kompleksy perspektywiczne w otworach Paproć 29, Siciny IG 1, Marcinki IG 1, Więcki IG 1 z rejonu basenu karbońskiego SW Polski. Opis poszczególnych kolumn jak dla ryc. 4, poza litostratygrafia – z uwagi na brak możliwości jej wyznaczenia została ona zastąpiona przez warstwy i kompleksy litologiczne oraz warstwy perspektywiczne (wyk. M. Roman)

Fig. 7. Juxtaposition of the data available and prospective complexes in Paproć 29, Siciny IG 1, Marcinki IG 1, Więcki IG 1 wells from the Carboniferous basin of the SW Poland. The description of the particular columns is similar to those in the Fig.4, despite the lithostratigraphy – due to the impossibility of the subdivision it was replaced by the lithology layers, lithology complexes and perspective layers (made by M. Roman)

←

kryteria perspektywiczności dla stref typu *tight* z uwzględnieniem powyższej dyskusji wyników analiz i pomiarów porowatości efektywnej.

Strefa perspektywiczna w otworze Marcinki IG 1

W profilu otworu Marcinki IG 1, położonym w centralnej części obszaru badań, została wyznaczona strefa perspektywiczna typu *tight*, na głębokości 1835–2104 m. Wiek skał określono w najwyższej części strefy (od stropu do głębokości 1839 m) jako namur A, natomiast poniżej – jako zawierający się w szerokim przedziale namur–westfal. W strefie tej występują głównie szare drobnoziarniste piaskowce, czasami średnio- i gruboziarniste, rzadko z wkładkami szarych zlepieńców, klastami ilastymi i mułowcowymi oraz impregnacjami hematytowymi głównie wzdłuż spękań. Jako cienkie przeławiczenia w piaskowcach występują ciemnoszare mułowce i mułowce piaszczyste laminowane horyzontalnie lub masywne. Miejscami są spotykane szczeliny wypełnione dolomitem oraz nieliczne lustra tektoniczne. W górnej części strefy występuje płaskie zaleganie warstw natomiast w dolnej – upad rzędu 30–50°.

Porowatość efektywna przebadanych piaskowców wynosi średnio 2,19%, porowatość całkowita – 4,61%. Zailenie osiąga średnią wartość 35,1%. Pomiar refleksyjności wityrynytu na głębokości 2143,7 m wyniósł 2,23%, co wskazuje na położenie omawianej strefy perspektywicznej w fazie przejrzalej względem generacji węglowodorów; nie wyklucza to możliwości ich akumulacji w strefach hybrydowych.

Wartości poszczególnych parametrów w wyznaczonej strefie perspektywicznej spełniają założone kryteria dla stref typu *tight*.

Strefa perspektywiczna w otworze Września IG 1

W profilu karbonu otworu Września IG 1, zlokalizowanego w północno-wschodniej części obszaru badań, wyznaczono jedną strefę perspektywiczną typu *tight*, na głębokości 4982,6–5012,7 m, której wiek określono na westfal D–stefan. W strefie tej dominują szare drobnozrzedziej średnioziarniste piaskowce masywne, niekiedy warstwowane horyzontalnie lub przekątnie małowatowo. W mniejszej ilości stwierdzano szare piaskowce żwirowe masywne, w których pojawiają się żwir kwarcowy, skaleńowy oraz ciemne okruchy skał. Jako cienkie przeławiczenia w obrębie piaskowców występują ciemnoszare ilowce i mułowce masywne. W niektórych piaskowcach są spotykane szczeliny wypełnione kalcytem i/lub hematytom. Obserwuje się również impregnacje hematytowe w sąsiedztwie spękań. Upad warstw wynosi 10°.

Porowatość efektywna zbadanych piaskowców mieści się w przeważającej liczbie analiz w zakresie 1,67–3,64%

(śr. 2,5%), a porowatość całkowita wynosi 3,7–7,16% (śr. 5,13%). Zawartość minerałów ilastych określono w większości analiz w zakresie 38,1–70,2% (śr. 46,03%). Pomiar dojrzałości termicznej materii organicznej, wykonany w obrębie omawianej strefy na głębokości 4988,5 m, wyniósł 1,82% *Ro*, co wskazuje na jej położenie w zakresie okna gazowego.

Wartości poszczególnych parametrów w wyznaczonej strefie perspektywicznej spełniają założone kryteria dla stref typu *tight*.

PODSUMOWANIE

1. Po raz pierwszy w obrębie formacji łupkowych niższego paleozoiku występujących na obszarze basenu bałtycko-podlasko-lubelskiego wyznaczono strefy perspektywiczne SP1, SP2, SP3, SP4 występowania niekonwencjonalnych złóż węglowodorów oraz siedem stref w obrębie utworów karbońskich w basenie południowo-zachodniej Polski, spełniających przyjęte kryteria perspektywiczności.

2. Największe rozprzestrzenienie lateralne i miąższościowe, wśród stref wyróżnionych w utworach niższego paleozoiku na obszarze basenu bałtycko-podlasko-lubelskiego, mają strefy SP2 i SP4, jednak charakteryzująca je średnia zawartość procentowa węgla organicznego (TOC) jest na ogół niższa niż w strefach SP1 i SP3. Analiza parametrów geochemicznych określających macierzystość, tj.: całkowita zawartość węgla organicznego, potencjał węglowodorowy, potencjał generacyjny czy zawartość węgla produktywnego, wykazała, że mają one dużą zmienność w profilach otworów oraz w poziomie w skali regionalnej. Na podstawie analizy rozkładu dojrzałości termicznej można spodziewać się występowania w obrębie wszystkich wyróżnionych stref obszarów potencjalnego występowania ropy naftowej, gazu kondensatowego/gazu mokrego i gazu suchego w formacjach łupkowych.

3. Najbardziej perspektywiczny dla występowania niekonwencjonalnych złóż węglowodorów w formacjach łupkowych jest obszar bałtycki. Stwierdzono tu najwięcej horyzontów macierzystych o odpowiedniej miąższości, zawartości materii organicznej i dojrzałości termicznej.

4. Strefa perspektywiczna SP2, pokrywająca się w znacznym zakresie z formacją z Sasina, mimo zróżnicowanego stopnia macierzystości w profilu pionowym charakteryzuje się największą możliwością występowania niekonwencjonalnych nagromadzeń gazu z łupków w basenie bałtyckim. Wiele czynników, jak miąższość, charakterystyka geochemiczna oraz dotychczasowe wyniki prac poszukiwawczych, wskazuje, że najlepsze właściwości formacji, a także szanse na eksploatację gazu ziemnego i gazokondensatu, ma część lądowa basenu bałtyckiego w strefie okna gazu mokrego i suchego. Podobne szanse istnieją w słabo rozpoznanej wiertniczo części morskiej basenu w tych samych

zakresach dojrzałości termicznej (okno gazu mokrego i suchego).

5. Mieszana, piaskowcowo-lupkowa litologia skał karbonu może być rozpatrywana zarówno jako potencjalnie perspektywiczna dla złóż typu lupkowego, jak i dla złóż w zwięzłych piaskowcach. Na dalszym etapie badań niezbędne jest opracowanie szczegółowej metodologii określania perspektywiczności tego typu kompleksów litologicznych oraz analiza ich potencjału węglowodorowego z dużą większą rozdzielczością.

6. Obszar basenu karbońskiego południowo-zachodniej Polski można podzielić na dwie części, mniej i bardziej dojrzałe termicznie. Mniej dojrzały jest obszar zachodni, w którym występują otwory wiertnicze Paproć 29 oraz Siciny IG 1. Natomiast bardziej dojrzały termicznie jest obszar północno-wschodni i wschodni reprezentowany przez profile otworów Września IG 1, Marcinki IG 1 oraz Więcki IG 1.

7. Duża zmienność litologiczna utworów karbonu oraz różnice w dojrzałości termicznej materii organicznej determinują rozkład i charakter wyróżnionych kompleksów perspektywicznych. W profilu otworu Siciny IG 1 wyznaczono cztery strefy perspektywiczne – trzy typu *hybrid* (hybrydowego) i jedną typu *tight* (zwięzłych piaskowców) oraz po jednej strefie typu *tight* (zwięzłych piaskowców w najwyższych częściach profili otworów Paproć 29, Września IG 1 oraz Marcinki IG 1). W najdalej na wschód położonym otworze Więcki IG 1 nie wyznaczono żadnych stref perspektywicznych ze względu na zbyt wysoką dojrzałość termiczną materii organicznej.

8. W utworach karbonu nie wyróżniono stref perspektywicznych typu *shale* ze względu na nie spełnianie przez kompleksy lupkowe ustalonych kryteriów.

9. Uzyskane wyniki badań wskazują na celowość ich uszczegółowienia i uzupełnienia. Obiecujące wyniki projektu wyrażające się wskazaniem stref perspektywicznych, spełniających wszystkie przyjęte kryteria, sugerują konieczność wprowadzenia nowych metod badawczych pozwalających na doprecyzowanie zasięgów tych stref, jak również jeszcze dokładniejszą ocenę ich perspektywiczności.

10. Na dalszym etapie prac można także rozważyć możliwość istnienia stref perspektywicznych powstałych z połączenia interwałów potencjalnie perspektywicznych, które obecnie nie spełniają kryterium miąższości. Takim przykładem może być próba łączenia formacji z Sasina, formacji z Prabut wraz z ogniwem z Jantaru na obszarach, które aktualnie są poza zasięgiem wydzielonych stref perspektywicznych.

11. W kolejnym etapie badań podjęte zostaną starania pozyskania większego zasobu danych pochodzących z nowych otworów, na których będą prowadzone szczegółowe analizy. Istnieje także potrzeba rozszerzenia bazy danych TOC, utworzenia bazy danych dojrzałości termicznej materii organicznej *Ro* oraz analiz, zmierzających do modelowania systemu węglowodorowego – historii pograżenia osadów w powiązaniu z ich historią termiczną oraz analizą generacji węglowodorów.

Dziękujemy recenzentowi dr. hab. Piotrowi Suchowi (INiG-PIB) za zrecenzowanie pracy. Instytutowi Nafty i Gazu – PIB składamy podziękowania za współpracę przy realizacji projektu. Firmom, tj.: PGNiG S.A., Chevron Polska Energy Resources Sp. z o.o., Lotos Petrobaltic S.A., ExxonMobil Exploration and Production Poland Sp. z o.o., RWE DEA AG S.A., które udzieliły zezwoleń na wykorzystanie swoich wyników badań do

realizacji projektu chcemy w tym miejscu wyrazić nasze podziękowania. Dziękujemy także PGNiG S.A. za wyrażenie zgody na zamieszczenie w artykule informacji geologicznej pochodzącej z wybranych nowych otworów wiertniczych i zamieszczenie ich lokalizacji na mapach. Firmie Schlumberger Information Solutions dziękujemy za udostępnienie PIG-PIB programu Techlog w celu prowadzenia prac naukowo-badawczych. Redakcji Przeglądu Geologicznego za profesjonalne i szybkie przygotowanie tekstu artykułu i rycin do druku. Badania, których wyniki przedstawiono w artykule, zostały wykonane w ramach projektu „Rozpoznanie stref perspektywicznych dla występowania niekonwencjonalnych złóż węglowodorów w Polsce, etap I” i były finansowane przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

LITERATURA

- ANDREWS I.J. 2013 – The Carboniferous Bowland Shale gas study: geology and resource estimation. British Geological Survey for Department of Energy and Climate Change, London, UK.
- ANDREWS I.J. 2014 – The Jurassic shales of the Weald Basin: geology and shale oil and shale gas resource estimation. British Geological Survey for Department of Energy and Climate Change, London, UK.
- BIELEŃ W. & MATYASIK I. 2013 – Shaleoil – nowy aspekt poszukiwania niekonwencjonalnych złóż węglowodorów w formacjach lupkowych. Nafta-Gaz, 69 (12): 879–886.
- CEBULAK S. & DEMBOWSKI Z. 1973 – Karbon. Stratygrafia i litologia. [W:] Gajewska I.(red.), Marcinki IG 1. Profile Głęb. Otw. Wiert. Inst. Geol., 8: 37–39.
- DYRKA I. 2016 – Badania petrofizycznych właściwości skał – opracowanie wybranych wyników badań petrofizycznych i petrofizyczno-mineralogicznych właściwości wyznaczonych kompleksów perspektywicznych. [W:] Podhalańska T. (red.), Rozpoznanie stref perspektywicznych dla występowania niekonwencjonalnych złóż węglowodorów w Polsce, etap I. Nar. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- DYRKA I. 2016a – Charakterystyka petrofizyczno-mineralogiczna wyznaczonych perspektywicznych kompleksów węglowodorowych na podstawie wybranych wyników badań laboratoryjnych. Prz. Geol., 64 (12): 982–986.
- Dz.U. 2015 poz. 968 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 lipca 2015 r. w sprawie dokumentacji geologiczno-inwestycyjnej złoża węglowodorów.
- EIA (U.S. Energy Information Administration) 2013 – Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the United States. June 2013. Washington DC.
- FELDMAN-OLSZEWSKA A., ROSZKOWSKA-REMIN J. 2016 – Litofacje formacji perspektywicznych dla gazu i ropy w łupkach w utworach ordowiku i syluru na obszarze bałtyckim i podlasko-lubelskim. Prz. Geol., 64 (12): 968–975.
- GROTEK I. 2006 – Dojrzałość termiczna materii organicznej z utworów pokrywy osadowej pomorskiego odcinka TESZ, basenu bałtyckiego oraz obszarów przyległych. [W:] Matyja H. & Poprawa P. (red.), Ewolucja facjalna, tektoniczna i termiczna pomorskiego segmentu szwu transeuropejskiego oraz obszarów przyległych. Pr. Państw. Inst. Geol., 186: 253–269.
- GÓRECKA-NOWAK A. 2007 – Palynological constraints on the age of Carboniferous clastic succession of western Poland, Geol. Quart., 51 (1): 39–56.
- GÓRECKA-NOWAK A. 2008 – New interpretations of the Carboniferous stratigraphy of SW Poland based on miospore data. Bull. Geosci., 83 (1): 101–116.
- GÓRECKA-NOWAK A. 2009 – Palynological data from Siciny IG 1 and Marcinki IG 1 boreholes and their significance in the recognition of the Carboniferous succession of SW Poland. Geol. Quart., 53 (2): 167–186.
- JAROSIŃSKI M. 1997 – Badania tektoniczne i geodynamiczne w otworze Paproć 29. [W:] Lipiec M. (red.), Analiza utworów karbonu w otworze rozpoznawczym Paproć 29 (aneks do tematu: Budowa geologiczna strefy waryscydy w podłożu monokliny przedsudeckiej), III.1–III.27, nr inw. 134191. Nar. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- JARVIE D.M. 2008 – Unconventional shale resource plays: shale-gas and shale-oil. Opportunities. Fort Worth Business Press Meeting, June 19. (www.barnettshalenews.com/documents/dan_jarvie.pdf).
- JARVIE D.M. 2012 – Shale resource systems for oil and gas: Part I – Shale gas resources systems. [W:] Breyer J.A. (red.), Shale reservoirs – Giant resources for the 21st century. AAPG Memoir, 97: 69–87.

- KARNKOWSKI P.H., PIKULSKI L. & WOLNOWSKI T. 2010 – Petroleum geology of the Polish part of the Baltic region – an overview. *Geol. Quart.*, 54 (2): 143–158.
- KARCZ P. & JANAS M. 2016 – Materia organiczna łupków kambru, ordowiku i syluru w basenie bałtycko-podlasko-lubelskim Polski. *Prz. Geol.*, 64 (12): 995–999.
- KIERSNOWSKI H. & DYRKA I. 2013 – Potencjał złożowy ordowiko-sylurskich łupków gazonożnych w Polsce: omówienie dotychczasowych raportów i propozycje udoskonalenia metodyki oceny zasobów gazu w raporcie w 2014 r. *Prz. Geol.*, 61: 354–373.
- KOREJWO K. & TELLER L. 1973 – Stratygrafia serii karbonu (głęb. 3402,0–1734,1 m). [W:] Gajewska I. (red.), *Marcinki IG 1. Profile Głęb. Otw. Wiert. Inst. Geol.*, 8: 35–36.
- KOSAKOWSKI P., WRÓBEL M. & POPRAWA P. 2010 – Hydrocarbon generation and expulsion modelling of the lower Paleozoic strata in the Polish part of the Baltic Region. *Geol. Quart.*, 54 (2): 241–256.
- KOSAKOWSKI P., KOTARBA M., PIETRZYŃSKI A., SHOGENOVA A. & WIĘCŁAW D. 2016 – Petroleum source rock evaluation of the Alum and Dictyonema Shales (upper Cambrian–Lower Ordovician) in the Baltic Basin and Podlasie Depression (eastern Poland). *Intern. J. Earth Sci. (GeolRundsch)*, 05: 1–19. DOI: 10.1007/s00531-016-1328-x.
- MAZUR S., ALEKSANDROWSKI P., TURNIAK K., KRZEMIŃSKI L., MASTALERZ K., GÓRCKA-NOWAK A., KUROWSKI I., KRZYWIEC P., ŻELAŹNIEWICZ A. & FANNING M.C. 2010 – Uplift and late orogenic deformation of the Central European Variscan Belt as revealed by sediment provenance and structural record in the Carboniferous foreland basin of western Poland. *Intern. J. Earth Sci.*, 99: 47–64.
- MODLIŃSKI Z. & SZYMAŃSKI B. 2008 – Litostratygrafia ordowiku w obniżeniu podlaskim i w podłożu niecki płocko-warszawskiej (wschodnia Polska). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 430: 79–112.
- MODLIŃSKI Z. & SZYMAŃSKI B. 2011 – Ordowik, litologia i stratygrafia. [W:] Modliński Z. (red.), *Darżlubie IG 1. Prof. Głęb. Otw. Wiert.*, 128: 85–87.
- NOWAK G. 2016 – Rozpoznanie petrologiczne rozproszonej materii organicznej skał karbonu podłoża monokliny przedsudeckiej. *Prz. Geol.* 64 (12): 1005–1007.
- OPRACOWANIE INFORMACJI GEOLOGICZNEJ zawierającej charakterystykę zmienności składu mineralnego, geochemicznego i petrofizycznych właściwości skał na podstawie badań laboratoryjnych oraz oceny ich macierzystości przeprowadzonej na podstawie analizy pomiarów geofizyki otworowej i ich korelacji z wynikami analiz przeprowadzonej w rdzeniu wiertniczym w oparciu o analizy z 15 otworów wiertniczych. *INiG-PIB 2015*. [W:] Podhalańska T. (red.), *Rozpoznanie stref perspektywicznych dla występowania niekonwencjonalnych złóż węgłowodórów w Polsce, etap I*. 2016. *Nar. Arch. Geol. PIB-PIB, Warszawa*.
- PARKA Z. & ŚLUSARCZYK S. 1988 – Stratygrafia osadów podłoża monokliny przedsudeckiej. *Pr. Nauk. Inst. Gór. PWr.*, 43, ser.: Monografie, 20: 1–47.
- PODHALAŃSKA T. 2013 – Graptolity – narzędzie stratygraficzne w rozpoznaniu stref perspektywicznych dla występowania niekonwencjonalnych złóż węgłowodórów. *Prz. Geol.*, 61: 460–467.
- PODHALAŃSKA T., WAKSMUNDZKA M., I., BECKER A. & ROSKOWSKA-REMIN J. 2016 – Rozpoznanie stref perspektywicznych występowania niekonwencjonalnych złóż węgłowodórów w Polsce – nowe wyniki oraz dalsze kierunki badań. *Prz. Geol.*, 64 (12): 953–962.
- POPRAWA P. 2010 – Potencjał występowania złóż gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku w basenie bałtyckim i lubelsko-podlaskim. *Prz. Geol.*, 58: 226–249.
- POPRAWA P. 2015 – Weryfikacja kryteriów perspektywiczności występowania złóż gazu i ropy w łupkach oraz gazu zamkniętego na potrzeby szacowania zasobów (krytyczna analiza dostarczonego dokumentu w oparciu o informacje z dostępnych publikacji – opracowanie tekstowe) i porównanie z analogicznymi kryteriami występowania konwencjonalnych złóż węgłowodórów. Niepublikowana ekspertyza zlecona przez PIB-PIB w ramach tematu „Szacowanie złóż węgłowodórów – zadania ciągle PSG”.
- POREBSKI SZ., PRUGAR W. & ZACHARSKI J. 2013 – Łupki sylurskie platformy wschodnioeuropejskiej w Polsce – wybrane problemy poszukiwawcze. *Prz. Geol.*, 61: 468–477.
- RAPORT PIB-PIB. 2012 – Ocena zasobów wydobywalnych gazu ziemnego i ropy naftowej w formacjach łupkowych dolnego paleozoiku w Polsce (basen bałtycko-podlasko-lubelski). *Raport pierwszy*. Państw. Inst. Geol., Warszawa, s. 29.
- ROMAN M. 2016 – Interpretacja i wizualizacja danych otworowych w utworach niższego paleozoiku obszaru kratonu wschodnioeuropejskiego i karbonu podłoża monokliny przedsudeckiej. *Prz. Geol.*, 64 (12): 976–982.
- ROZPOZNANIE stref perspektywicznych dla występowania niekonwencjonalnych złóż węgłowodórów w Polsce, etap I, kier. Teresa Podhalańska. *Opracowanie końcowe z realizacji projektu 2016*. *Nar. Arch. Geol. PIB-PIB, Warszawa*.
- SIKORSKA-JAWOROWSKA M., KUBERSKA M. & KOZŁOWSKA A. 2016 – Petrografia i mineralogia łupków niższego paleozoiku kratonu wschodnioeuropejskiego oraz piaskowców karbonu podłoża monokliny przedsudeckiej. *Prz. Geol.*, 64 (12): 963–967.
- TOMCZYK H. 1968 – Stratygrafia sykuru na obszarze nadbałtyckim Polski na podstawie wierceń. *Kwart. Geol.*, 12: 15–34.
- TOMCZYK H. 1990 – Sylur: Budowa Geologiczna Polski, t. 3. *Atlas skamieniałości przewodnich i charakterystycznych, cz. 1a – Paleozoik starszy (z proterozoikiem górnym)*. Inst. Geol., Wyd. Geol. Warszawa: 272–279.
- WAKSMUNDZKA M.I. & BECKER A. 2016 – Charakterystyka wydzieli litofajalnych i kompleksów litologicznych obszaru SW Polski (BKSW). [W:] Podhalańska T. (red.), *ROZPOZNANIE stref perspektywicznych dla występowania niekonwencjonalnych złóż węgłowodórów w Polsce, etap I*. *Nar. Arch. Geol. PIB-PIB, Warszawa*.
- WIĘCŁAW D., KOTARBA M. J., KOSAKOWSKI P., KOWALSKI A. & GROTEK I. 2010 – Habitat and hydrocarbon potential of the Lower Paleozoic source rocks in the Polish part of the Baltic region. *Geol. Quart.*, 54 (2): 159–182.
- WÓJCICKI A., KIERSNOWSKI H., DYRKA I., ADAMCZAK-BIAŁY T., BECKER A., GŁUSZYŃSKI A., JANAS M., KOZŁOWSKA A., KRZEMIŃSKI L., KUBERSKA M., PACZEŚNA J., PODHALAŃSKA T., ROMAN M., SKOWROŃSKI L. & WAKSMUNDZKA M.I., 2014 – Prognostyczne zasoby gazu ziemnego w wybranych zwięzłych skałach zbiornikowych Polski. *PIB-PIB, Warszawa*.
- WÓJCICKI A., KIERSNOWSKI H., ADAMCZAK-BIAŁY T., BECKER A., GŁUSZYŃSKI A., JANAS M., KARCZ P., KOZŁOWSKA A., KUBERSKA M., PACZEŚNA J., PODHALAŃSKA T., ROMAN M., SKOWROŃSKI L. & WAKSMUNDZKA M.I. 2015 – Prognostyczne zasoby gazu ziemnego i ropy naftowej w skałach łupkowych dolnego paleozoiku w basenie bałtycko-podlasko-lubelskim w Polsce. *PIB-PIB, Warszawa*. *Raport niepublikowany*.