

Potencjał występowania złóż gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku w basenie bałtyckim i lubelsko-podlaskim

Paweł Poprawa¹



Shale gas potential of the Lower Palaeozoic complex in the Baltic and Lublin-Podlasie basins (Poland). Prz. Geol., 58: 226–249.

A b s t r a c t. The Lower Palaeozoic basin at the western slope of the East European Craton (EEC) (Fig. 1) is currently recognized as one of the most interesting areas for shale gas exploration in Europe. The Upper Ordovician and/or Lower Silurian graptolitic shale is here the major potential reservoir formation (Figs. 2, 3) (Poprawa & Kiersnowski, 2008; Poprawa, 2009). Moreover, the Upper Cambrian to Tremadocian Alum shale is an additional target locally in the northern part of the Baltic Basin. These sediments are often rich in organic matter (Klimusko, 2002; Poprawa & Kiersnowski, 2008; Więclaw et al., 2010; Skret & Fabiańska, 2009), as well as silica. Limited data from two wells in the western part of the Baltic Basin show silica contents up to 60–70% (Fig. 4) (Krzemiński

& Poprawa, 2006).

The advantage of the Lower Palaeozoic shale from the western slope of EEC is its broad lateral extend (Fig. 1) and relatively quiet tectonic setting. The later is particularly true in the case of the Baltic Basin and Podlasie Depression. Structural development becomes to some extent more complex in the case of the Lublin region, where the Lower Palaeozoic shale appears affected by late Famennian to early Viséan block tectonics.

Development of the organic rich Lower Palaeozoic shale at the western slope of EEC was controlled by several factors. Very important was here the rate of non-organic detritus deposition (Fig. 5). The other factors included organic productivity of the basin, its subsidence, relative sea level changes, basin bathymetry, geochemical conditions at the sea bottom (especially oxygenation), degree of bioturbation, presence of topographic barriers at the sea bottom, leading to development of isolated anoxic zones, sea currents configuration, and climate changes. Organic matter of the Lower Palaeozoic is characterized by presence of II type of kerogen.

Appearance of the organic-rich shale within the Lower Palaeozoic section at the western slope of the EEC is diachronic (Fig. 6). From NW towards east and SE, the intervals richest in organic appear related to systematically younger strata, starting from the Upper Cambrian to Tremadocian, as well as the Upper Llanvirn and Caradoc in the Łeba Elevation (northern onshore Baltic Basin; Fig. 7). In central parts of the Baltic Basin and Podlasie Depression as well as NW part of the Lublin region, the intervals richest in organic matter are found in the Llandovery section, while in the eastern part of the Baltic Basin and SE part of the Lublin region the highest TOC contents are found in the Wenlock. Therefore, depending on location at the western slope of EEC, different formations are recognized as the targets for shale gas exploration.

The Upper Cambrian to Tremadocian shale, present only in the northern part of the Baltic Basin, is characterized by very high contents of organic matter, with average value for individual sections usually ranging from 3 to 12% TOC. This shale formation is, however, of very limited thickness, not higher than several meters in the onshore part of the basin (Szymański, 2008; Więclaw et al., 2010).

In onshore part of the studied area, thickness of the Caradoc shale changes from a few meters up to more than 50 m (Modliński & Szymański, 1997, 2008). Contents of organic matter in these sediments are the highest in the Łeba Elevation zone and the basement of the Płock-Warszawa trough, where average TOC contents in individual well sections range from 1% to nearly 4%. Ashgill rocks are characterized by high TOC contents only in the Łeba Elevation zone, where average TOC values for individual well sections rise up to 4,5% at the most.

Llandovery shale has high TOC contents, particularly in its lower part, throughout vast parts of the western slope of EEC. The maximum measured TOC contents in those rocks in Podlasie Depression are nearly 20%. Average TOC values for individual sections of the Llandovery are usually equal 1% do 2,5%, except for the Podlasie Depression, where they may reach as much as 6%. Thickness of the Llandovery shale generally increases from east to west to approximately 70 m at the most. However, in the major part of that area it ranges from 20 to 40 m (Modliński et al., 2006).

Thickness of the Wenlock sediments is also highly variable laterally, from less than 100 m in SE part of the Lublin region to over 1000 m in western part of the Baltic Basin. Average content of organic matter in individual Wenlock sections in central and western parts of the Baltic Basin and the Podlasie Depression usually ranges from 0,5% to 1,3% TOC. In the eastern part of the Baltic Basin and in the Lublin region it is higher, rising to about 1–1,7% TOC.

The above mentioned TOC values show the present day content of organic matter, which is lower than the primary one. The difference between the present and primary TOC contents increases along with increasing thermal maturity. It is also highly dependant on genetic type of kerogen. Taking into account the II type of kerogen from the analyzed sediments, it may be stated that in the zones located in the gas window the primary TOC was at least one-half greater than indicated by laboratory measurements.

From the shale gas point of view, the basins at the western slope of EEC are characterized by a negative relation between depth at present day burial and thermal maturity (Poprawa & Kiersnowski, 2008). In the zones with burial depth small enough to keep exploration costs at very low level (Fig. 8), thermal maturity of shales is too low for gas generation (Figs. 9, 12a). Maturity increases westwards (Fig. 8) along with depth of burial (Fig. 9). Thus, the potential shale gas accumulations in the western part of the studied area occur at depths too high for commercial gas exploration and exploitation (Fig. 12b).

Between of the zone of maturity too low for shale gas development and that where depth of burial is too large for its exploration, there occurs a broad zone of the Lower Palaeozoic shale with increased shale gas exploration potential (Fig. 13) (Poprawa & Kiersnowski, 2008; Poprawa, 2009). In that area, there are shale intervals of relatively high thickness and average TOC exceeding 1–2% TOC (Fig. 7, 10, 12c). Thermal maturity of these rocks appears sufficient for generation of gas (Fig. 9, 10), and results of well tests for deeper-seated conventional reservoirs suggest good quality of dry gas with no nitrogen (Fig. 12c). It should be noted that some gas shows have been recorded in the Lower Palaeozoic shale. Moreover, depth of burial is not too large for commercial shale gas exploration (Fig. 8, 10).

¹Państwowy Instytut Geologiczny — Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; pawel.poprawa@pgi.gov.pl

Hydrocarbon shows and their composition in the Lower Palaeozoic are strictly related to thermal maturity of the source rock. In the zones of low maturity, these are almost exclusively oil shows documented. Further westwards, in the zone transitional to the gas window area, gas is wet and contains significant contribution of hydrocarbon gases higher than methane. Within the gas window zone, the records are almost exclusively limited to methane shows. Moreover, within the zones of low maturity high nitrogen contents were recorded (Poprawa, 2009).

In the zones characterized by thermal maturity in the range from 0,8 to 1,1% Ro and very high TOC contents (over 15% at the most), there is a potential for oil shale exploration. The zones with the highest oil shale potential include eastern Baltic Basin in SW Lithuania and NE part of the Podlasie Depression.

Some data necessary for entirely firm estimations of potential shale gas resources of the Lower Palaeozoic complex in Poland are still missing. However, preliminary estimates indicate that these shale gas resources may possibly be classified as gigantic (1,400–3,000 bln m³ of recoverable gas; Fig. 15). For comparison, resources of conventional gas in Poland are equal to 140,5 bln m³, and annual domestic gas consumption is at the level of 14 bln m³.

However, it should be noted that some characteristics of the Lower Palaeozoic complexes indicate increased exploration risk. The average TOC contents are here lower than in classic examples of gas shales, like e.g. Barnett shale. Moreover, in the zone of optimal burial depth (less than 3000–3500 m) thermal maturity is lower than in the case of the Barnett shale core area. An important risk factor is also both a limited amount and limited resources of conventional gas fields in the Lower Palaeozoic complex (Fig. 13). Amount and intensity of gas shows in the Lower Palaeozoic shale are also relatively low, and there is no evidences for presence of overpressure in this complex. In the eastern part of western slope of the EEC, there appears an additional risk factor — a relatively high content of nitrogen in gas.

Keywords: shale gas, Upper Ordovician, Lower Silurian, East European Craton

Kilka ostatnich lat przyniosło znaczący wzrost zainteresowania poszukiwaniami niekonwencjonalnych złóż węglowodorów, które stają się obecnie w Polsce jednym z najważniejszych wyzwań dla przemysłu naftowego. Poszukiwania te dotyczą złóż gazu zamkniętego — *tight gas* (Buniak i in., 2008, 2009; Poprawa & Kiersnowski, 2008), metanu pokładów węgla (Kotas, 1994), a przede wszystkim akumulacji gazu ziemnego w łupkach — *shale gas*.

Polska jest obecnie jednym z najbardziej atrakcyjnych rynków poszukiwań złóż gazu ziemnego w łupkach w Europie (np. Poprawa, 2010a). Wynika to z wielu czynników, m.in. takich, jak stabilność ekonomiczna i polityczna kraju, bardzo istotna dla produkcji z niekonwencjonalnych złóż gazu ziemnego w łupkach, która może trwać z pojedynczego otworu nawet 30–40 lat (np. Hadro, 2010). Duże znaczenie ma ponadto popyt na gaz ziemny w Polsce, jak również w krajach sąsiednich, a także istnienie w pełni rozbudowanej infrastruktury przesyłu gazu oraz technicznych możliwości jego eksportu. Proces pozyskiwania koncesji na poszukiwanie węglowodorów jest przejrzysty, a koszty uzyskania koncesji umiarkowane. Korzystne są też warunki fiskalne prowadzenia poszukiwań i ewentualnej produkcji gazu ziemnego, a ceny gazu są stosunkowo wysokie oraz stabilne. Ukształtowanie terenu nie utrudnia wierceń, a warunki hydrologiczne zapewniają dostęp do wody niezbędnej do szczelinowania. Jednak zdecydowanie najważniejszym czynnikiem jest sprzyjająca budowa geologiczna.

W basenach sedymentacyjnych Polski występują liczne formacje osadów ilastych i mułowcowych, bogatych w substancję organiczną, które można rozważać jako cele poszukiwań gazu w łupkach (Poprawa & Kiersnowski, 2008, Poprawa, 2009, 2010b). Wiele z nich nie spełnia jednak geologicznych i geochemicznych kryteriów, na podstawie których można by było wstępnie określić perspektywy występowania gazu ziemnego w łupkach. Wiąże się to zazwyczaj z niskim stopniem dojrzałości termicznej, małą zawartością TOC, małą miąższością bądź też ze złożoną budową tektoniczną. Największe nadzieje poszukiwawcze należy wiązać z łupkami dolnego paleozoiku (głównie górnego ordowiku i dolnego syluru), występującymi w basenach sedymentacyjnych na kratonie wschodnioeuropejskim (ryc. 1, 2) (Poprawa & Kiersnowski, 2008; Poprawa, 2009, 2010b).

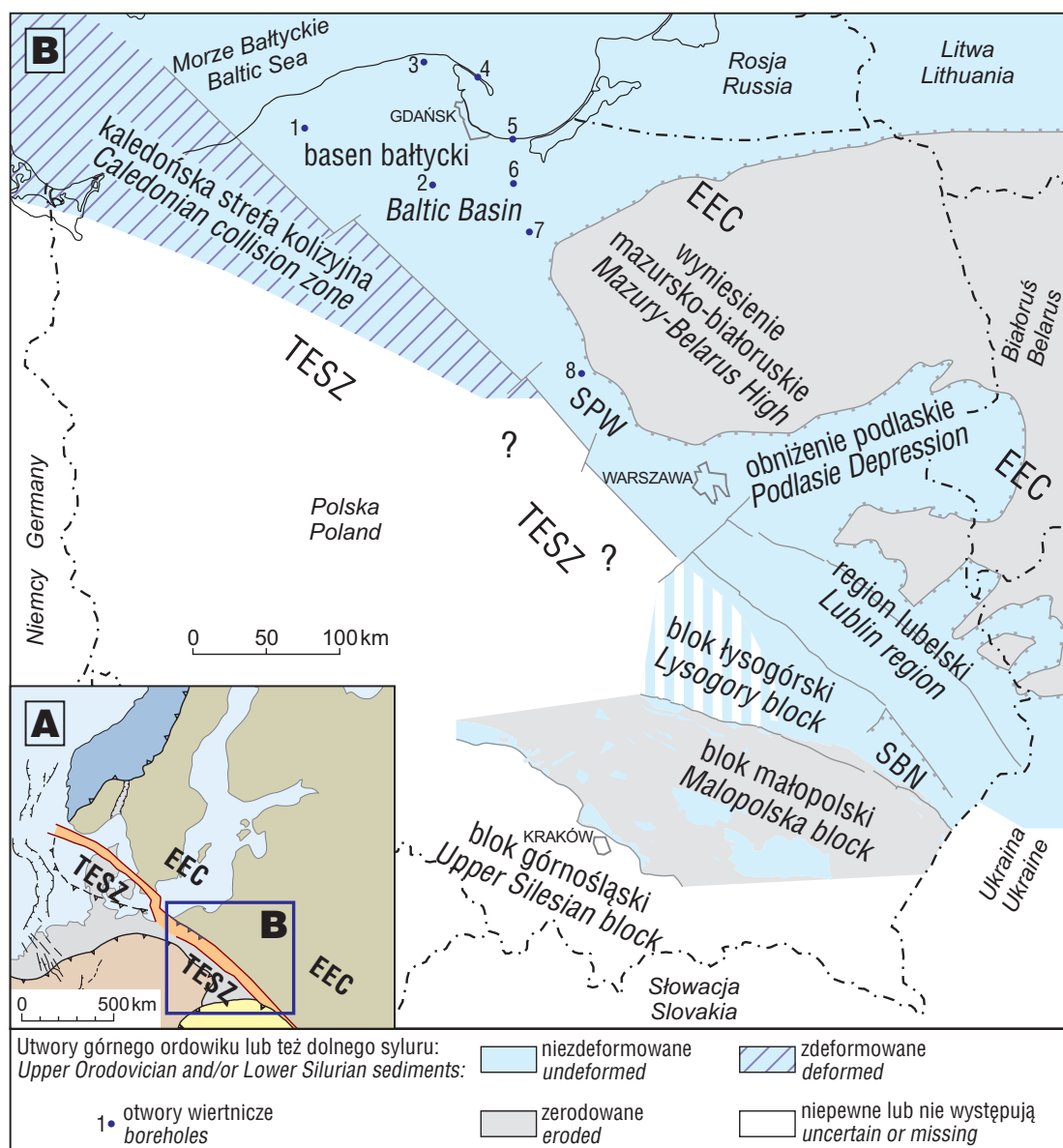
Celem niniejszego artykułu jest scharakteryzowanie łupków dolnego paleozoiku w kategoriach geologicznych i

geochemicznych oraz kryteriów występowania akumulacji gazu ziemnego typu *shale gas*. Jako główne kryteria przyjęto zawartość TOC, miąższość, dojrzałość termiczną, głębokość zalegania, historię pogrzebienia i wypiętrzenia, stopień deformacji tektonicznych, charakterystykę mineralogiczno-petrograficzną oraz obecność objawów węglowodorów i ich skład (np. Pollastro, 2007; Jarvie, 2009; Poprawa, 2010a).

Budowa geologiczna i charakterystyka naftowa basenów dolnopaleozoicznych na zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego

Łupki wzbogacone w substancję organiczną były deponowane w systemie basenów sedymentacyjnych rozwiniętych we wczesnym paleozoiku na zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego (EEC). W wyniku późniejszych procesów tektonicznych oraz erozji baseny te zostały rozdzielone na basen bałtycki (syneklizę perybałtycką), obniżenie podlaskie oraz region lubelski (ryc. 1). Zbliżone facjalnie utwory były deponowane również na bloku małopolskim, gdzie jednak uległy częściowo erozji, w efekcie czego występują tam jedynie w formie izolowanych płatów. Baseny te były dotychczas obiektami poszukiwań konwencjonalnych złóż węglowodorów, odkrytych i eksploatowanych jedynie w północnej części basenu bałtyckiego (Górecki i in., 1992; Karnkowski, 1993; Kanev i in., 1994; Domżański i in., 2004).

Poszczególne baseny dolnopaleozoiczne na zachodnim skłonie EEC mają zbliżone wykształcenie facjalne (ryc. 2). W neoproterozoiku zachodziła depozycja kontynentalno-marginalnomorskich i pełnomorskich osadów klastycznych oraz występowały wylewy zasadowych skał magmowych, które były ograniczone do basenu lubelsko-podlaskiego (Juskowiakowa, 1971; Areń i in., 1979). Tę fazę rozwoju basenu wiążano z ryftowaniem wzdłuż zachodniej krawędzi EEC — ryc. 2 (Poprawa & Paczeńska, 2002; Poprawa, 2006a). Począwszy od najwyższego ediakaru do środkowego kambru w basenie bałtyckim i basenie lubelsko-podlaskim trwała płytkomorska sedymentacja klastyczna (Lendzion, 1983; Jaworowski, 1997). Rozwój basenów na zachodnim skłonie EEC na tym etapie był kontrolowany przez regionalną, poryftową subsydencję termiczną (Poprawa i in., 1999; Poprawa & Paczeńska, 2002).



Ryc. 1. Lokalizacja dolnopaleozoicznych basenów sedimentacyjnych oraz obszarów występowania łupków górnego ordowiku i dolnego syluru: **A** — zachodni skłón kratonu wschodnioeuropejskiego (EEC) na tle głównych jednostek tektonicznych Europy środkowej i północnej; **B** — lokalizacja dolnopaleozoicznych basenów sedimentacyjnych oraz obszarów występowania łupków górnego ordowiku lub też dolnego syluru. Otwory wiertnicze: 1 — Słupsk IG-1, 2 — Kościerzyna IG-1, 3 — Żarnowiec IG-1, 4 — Hel IG-1, 5 — Gdańsk IG-1, 6 — Malbork IG-1, 7 — Prabuty IG-1, 8 — Polik IG-1. Skróty: SPW — strefa płocko-warszawska; SBN — strefa Biłgoraj-Narol; EEC — kraton wschodnioeuropejski; TESZ — strefa szwu transeuropejskiego

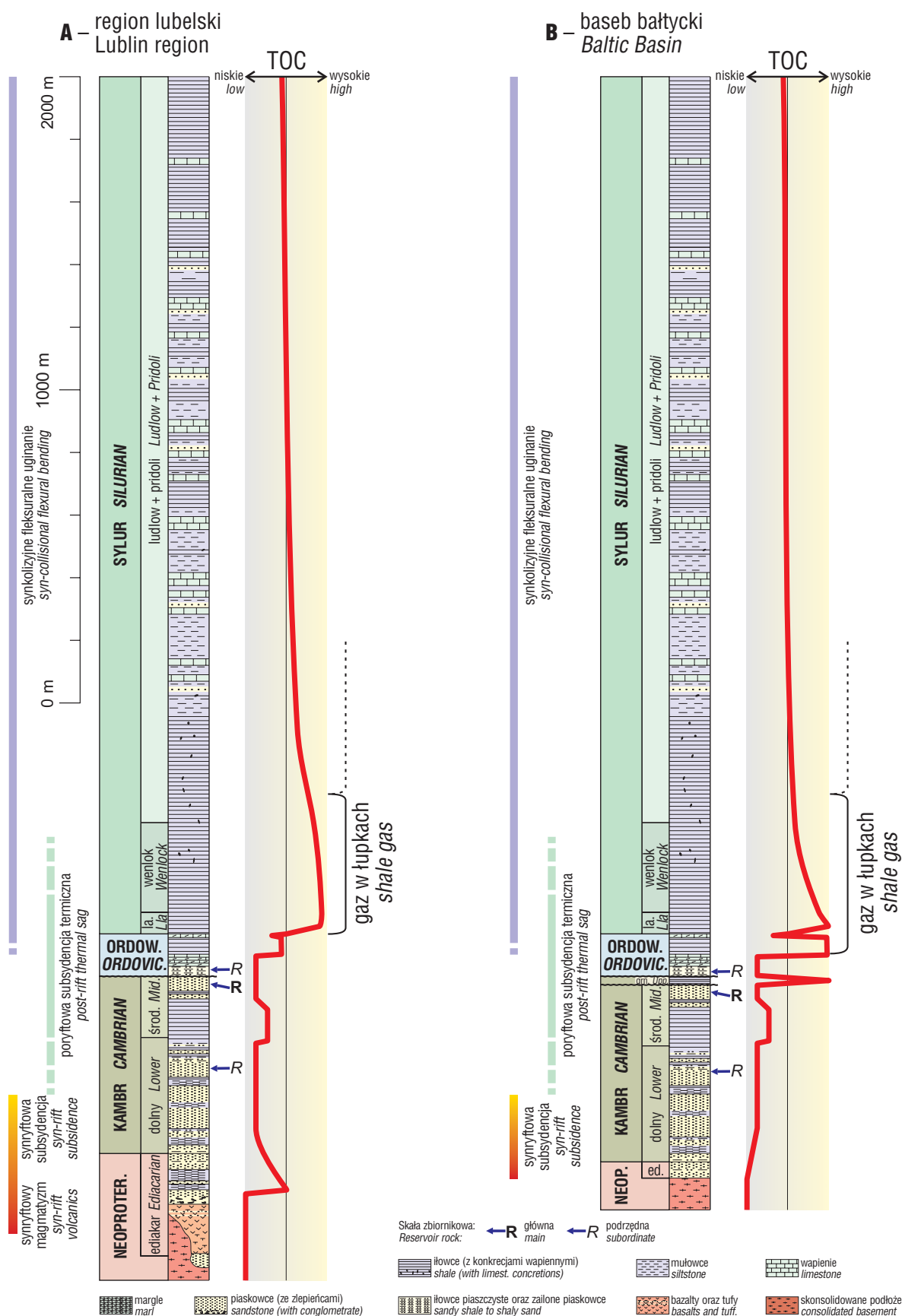
Fig. 1. Location of Lower Paleozoic sedimentary basins and lateral extend of the Upper Ordovician and/or Lower Silurian shale formations: **A** — western slope of the East European Craton (EEC) with the background of the main tectonic units of the central and northern Europe; **B** — location of the Lower Paleozoic sedimentary basins and lateral extend of the Upper Ordovician and/or Lower Silurian shale formations. Boreholes: 1 — Słupsk IG-1, 2 — Kościerzyna IG-1, 3 — Żarnowiec IG-1, 4 — Hel IG-1, 5 — Gdańsk IG-1, 6 — Malbork IG-1, 7 — Prabuty IG-1, 8 — Polik IG-1. SPW — Płock-Warsaw zone. SBN — Biłgoraj-Narol zone. EEC — East European Craton. TESZ — Trans-European Suture Zone

W obrębie dolnopaleozoicznego kompleksu EEC podstawową formacją zbiornikową węglowodorów są piaskowce środkowego kambru — ryc. 2 (Strzetelski, 1979; Górecki i in., 1992; Stolarczyk i in., 1997, 2004). W strefach głębiej pogrzebanych utwory te uległy silnej cementacji, głównie kwarcowej, destruktywnej dla właściwości zbiornikowych (Sikorska, 1998; Stolarczyk i in., 2004).

W późnym kambry lub też w tremadoku w północnej części basenu bałtyckiego (północna strefa lądowa oraz strefa morska) deponowane były czarne, bitumiczne łupki

ałunowe (ryc. 2), stanowiące skałę macierzystą konwencjonalnych złóż węglowodorów w utworach środkowego kambru (Górecki i in., 1992; Karnkowski, 1993; Schleicher i in., 1998; Więclaw i in., 2010). We wschodniej części obniżenia podlaskiego depozycja łupków bitumicznych kontynuowała się do późnego tremadoku (Modliński & Szymański, 2008).

W tremadoku i niższym arenigu we wschodniej i południowo-wschodniej części dolnopaleozoicznego basenu EEC osadzały się piaskowce i zlepieńce (Modliński,



Ryc. 2. Uproszczony profil litostratygraficzny dolnego paleozoiku w regionie lubelskim (A) oraz basenie bałtyckim (B) wraz z pozycją łupków wzbogaconych w substancję organiczną i potencjalnie zawierających gaz w łupkach. Mechanizmy subsydencji basenów według Poprawy i Pacześnej (2002) oraz Poprawy (2006a, 2006b)

Fig. 2. Simplified lithostratigraphic section of the Lower Palaeozoic in the Lublin region (A), and Baltic Basin (B) with position of organic rich shales, being potential shale gas formation. Mechanisms of basin subsidence after: Poprawa & Paczeńska (2002) and Poprawa (2006a, 2006b)

1982; Modliński & Szymański, 1997, 2008). W wyższej części profilu dolnego ordowiku oraz w górnym ordowiku dominują natomiast osady węglanowe, głównie wapienie (*op. cit.*). Na tym etapie rozwoju omawianych basenów nadal trwała, stopniowo coraz wolniejsza, poryftowa subsydenca termiczna (Poprawa & Paczeńska, 2002; Poprawa, 2006a).

Począwszy od późnego ordowiku do późnego syluru rozwój subsydenacji basenów sedymentacyjnych na zachodnim skłonie EEC był związany z jego fleksuralnym uginaniem, spowodowanym kaledońską, skośną kolizją Avalonii i Baltiki (Poprawa i in., 1999; Poprawa, 2006b). Okres ten cechuje stopniowo narastające tempo subsydenacji tektonicznej, a także narastające tempo depozycji materiału detrytycznego pochodzącego ze strefy kolizji (Poprawa, 2006b).

Osady górnego ordowiku cechuje znaczna oboczna zmienność facjalna (ryc. 3). W karadoku w basenach sedymentacyjnych w zachodniej i północno-zachodniej części zachodniego skłonu EEC przeważała depozycja iłowców, podczas gdy w części wschodniej i południowo-wschodniej dominowała sedymentacja margli lub wapieni (Modliński, 1982; Modliński & Szymański, 1997, 2008). W wyniku eustatycznego obniżenia poziomu morza, związanego ze zlodowaceniem na Gondwanie, w aszylu sedymentacja wapienno-marglista rozszerzyła się na większą część basenów na zachodnim skłonie EEC, a następnie doszło do lokalnego zwiększenia udziału materiału detrytycznego w osadzie, lokalnych rozmyć i niewielkich rozmiarów erozji oraz powstania hiatusów (Poprawa i in., 1999; Poprawa, 2006b; Podhalańska & Modliński, 2006).

Sylur rozpoczęła sedymentacja iłowców landoweru (Tomczyk, 1976; Modliński i in., 1994, 2006), których zasięg nie obejmuje jednak południowo-wschodniej części regionu lubelskiego (Tomczykowa, 1988). We wschodniej części basenu bałtyckiego w dolnym landowerze iłowce są lokalnie zastępowane przez wapienie gruzłowe (Jaworowski & Modliński, 1968). Sedymentacja drobnoklastyczna była kontynuowana w wenloku, ludlowie i pridolu, jednak z czasem wzrastał w profilu udział osadów mułowcowych oraz marglistych, a w zachodniej części omawianych basenów nawet piaszczystych (Jaworowski, 1971, 2000; Tomczykowa, 1988; Modliński i in., 2006). Tworzy sylur cechuje duży wzrost miąższości z NE ku SW.

Dla regionu lubelskiego charakterystyczne jest ciągłe przejście sedymentacji sylurskiej we wczesnodewońską (Tomczykowa, 1988). Erozja utworów dolnopaleozoicznych zachodziła tu tylko na tych obszarach, na których wypiętrzanie wczesnokarbońskie lub też późnokarbońsko-wczesnopermskie doprowadziło do usunięcia całego nadkładu górnopaleozoicznego.

Natomiast w basenie bałtyckim, a przypuszczalnie również w obniżeniu podlaskim, we wczesnym dewonie nastąpił okres erozji związany częściowo z izostatycznym wypiętrzaniem pokolizyjnym (Poprawa, 2006b). W jego efekcie profil górnego syluru jest w tych obszarach częściowo zredukowany erozyjnie, a miąższość zerodowanych osadów sylurskich wzrasta ku zachodowi.

Cechą charakterystyczną dolnopaleozoicznych basenów sedymentacyjnych na zachodnim skłonie EEC jest ich stosunkowo mało złożona budowa tektoniczna, sprzyjająca możliwościom poszukiwania i eksploatacji gazu z łupków. Nadrzędną cechą basenu bałtyckiego i obniżenia podlaskiego jest regionalne, fleksuralne ugięcie ku zachodowi i południowemu zachodowi. Typowa dla tych obsza-

rów jest również mała liczba uskoków, które charakteryzują się zazwyczaj niewielkimi zrzutami (np. Domżański i in., 2004; Poprawa i in., 2006). Cechy te można uznać za korzystne z punktu widzenia produkcji gazu z łupków. Mało skomplikowany układ strukturalny kompleksu łupków dolnego paleozoiku umożliwia utrzymanie długiego odcinka poziomego wiercenia w obrębie danej formacji. Brak silnego zaangażowania tego kompleksu przez uskoki pozwoli uniknąć przejmowania przez nie energii szczelinowania.

Nieco bardziej złożona jest budowa tektoniczna regionu lubelskiego, gdzie układ strukturalny utworów dolnopaleozoicznych jest skomplikowany przez tektonikę blokową, rozwijającą się od końca famenu do wczesnego wizenu (tzw. faza bretońska). Wykształcił się wówczas system bloków tektonicznych ograniczonych strefami uskokowymi, ulegających różnicowanemu wypiętrzaniu i erozji (Żelichowski & Kozłowski, 1983). Jednak w obrębie poszczególnych bloków stopień deformacji tektonicznych oraz zaangażowania uskokami jest umiarkowany.

Miąższość, wykształcenie facjalne i charakterystyka geochemiczna łupków dolnego paleozoiku

Charakterystyczny element profilu osadów dolnopaleozoicznych na kratonie wschodnioeuropejskim tworzą rozprzestrzenione na znacznych obszarach iłasto-mułowcowe osady ciemnych barw, wzbogacone w substancję organiczną (ryc. 1 i 2), które potencjalnie zawierają akumulacje gazu ziemnego (Poprawa & Kiersnowski, 2008; Poprawa, 2009). Są to głównie górnordowickie i dolnosylurskie łupki graptolitowe, w znacznie mniejszym stopniu ludlowe, a ponadto lokalnie górnokambryjskie lub i tremadokie łupki ałunowe oraz łupki dictyonemowe wyższego tremadoku — ryc. 3 (Modliński & Szymański, 1997, 2008; Modliński i in., 2006; Szymański, 2008). Rozwój sedymentacji tego typu osadów był wynikiem wpływu licznych czynników, z których najistotniejszymi były: subsydenca basenu, względne zmiany poziomu morza, batymetria zbiornika, jego produktywność organiczna, tempo dostawy materiału detrytycznego, warunki geochemiczne w strefie przydennej, głównie natlenienie, i związana z nimi aktywność organizmów mułożernych, obecność barier w topografii dna zbiornika, które sprzyjały powstawaniu izolowanych stref o warunkach anoksycznych, a także konfiguracja prądów morskich czy warunki klimatyczne.

Ałunowe łupki górnego kambriu oraz dolnego tremadoku i niższej części górnego tremadoku występują jedynie w obszarze morskiego sektora basenu bałtyckiego oraz w północnej części sektora lądowego, gdzie są wydzielane jako formacja z Piaśnicy (ryc. 3), reprezentująca system depozycyjny wysokiego poziomu morza (Szymański, 2008). Osady te są zwykle skrzemionkowane, spityzowane oraz impregnowane fosforanami, niekiedy skalcytyzowane (*op. cit.*). Charakteryzują się one bardzo dużą zawartością substancji organicznej (w poszczególnych otworach wynosi ona średnio od 3 do 12% wag. TOC), a także II typem kerogenu (Więclaw i in., 2010). Miąższość iłowców formacji z Piaśnicy jest jednak stosunkowo niewielka. W sektorze lądowym wynosi ona maksymalnie kilka do kilkunastu metrów, a w polskim sektorze morskim basenu bałtyckiego maksymalnie sięga 34 m (Szymański, 2008; Więclaw i in., 2010). Tak mała miąższość wyklucza tę formację jako cel poszukiwań złóż gazu ziemnego w łupkach, aczkolwiek z uwagi na bliskie położenie w profilu do

łupków górnego ordowiku i dolnego syluru w niektórych strefach może ona być brana pod uwagę jako podrzędny cel poszukiwawczy.

W skali regionalnej łupki alunowe i pokrewne im odmiany facjalne wykazują diachroniczność i oboczną zmienność miąższości. W południowej Skanii (w Szwecji) ekwiwalenty iłowców formacji z Piaśnicy są obecnie obiektem poszukiwań złóż gazu ziemnego w łupkach, które prowadzi firma *Shell*. W obszarze tym zawartość substancji organicznej w łupkach sięga 20% wag. TOC (Lewan & Burchardt, 1989; Bharati i in., 1992). Zasoby wydobywalne gazu ziemnego w łupkach alunowych w Skanii są oceniane przez firmę *Advanced Resources International* na około 300 mld m³. Ku wschodowi łupki alunowe obejmują coraz młodsze interwały stratygraficzne i mają coraz niższy stopień dojrzałości termicznej (Kanev i in., 1994). W Estonii są one obiektem eksploatacji ropy naftowej z łupków metodami odkrywkwowymi.

Kolejną formacją czarnych łupków bitumicznych są występujące w wyższej części profilu stratygraficznego wschodniej części obniżenia podlaskiego utwory formacji z Białowieży — ryc. 3 (Modliński & Szymański, 2008). Cechuje je duża zawartość uranu, pod kątem którego prowadzono większość prac rozpoznawczych w obrębie tej formacji, jak również duża zawartość substancji organicznej (Modliński & Szymański, 2008). Jednak mała miąższość (maksymalnie 4 m), jak również niski stopień dojrzałości termicznej wykluczają możliwość zaszeregowania tej formacji jako celu poszukiwań złóż gazu ziemnego w łupkach.

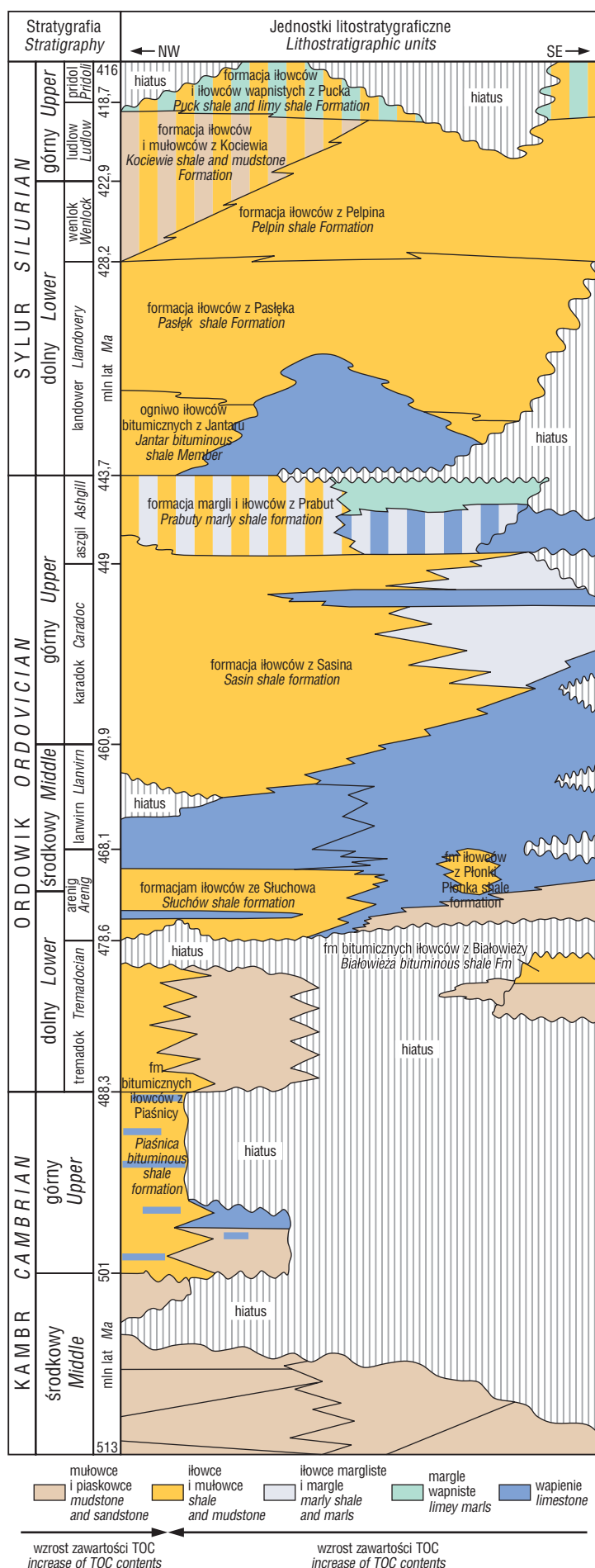
Po okresie depozycji osadów węglanowych, a w mniejszym stopniu klastycznych, reprezentujących głównie interwał stratygraficzny arenigu i środkowego ordowiku, a we wschodnich i południowo-wschodnich strefach basenów sedymentacyjnych na zachodnim skłonie EEC również karadoku i aszgiłu, nastąpił diachroniczny nawrót sedymentacji osadów ilasto-mułowcowych, stanowiących główny obiekt poszukiwań złóż gazu ziemnego w łupkach na kratonie wschodnioeuropejskim.

W północno-zachodniej części systemu omawianych basenów, tj. na wyniesieniu Łeby, sedimentacja ciemnych, bogatych w substancję organiczną łupków rozpoczęła się już w późnym lanwirnie. Zachodziła wówczas depozycja iłowców formacji z Sasina, której zasięg rozszerzał się diachronicznie ku wschodowi i południowemu wschodowi, stopniowo zastępując obocznie wapienne i margliste ekwiwalenty stratygraficzne formacji z



Ryc. 3. Pozycja głównych formacji iłowcowych w profilu stratygraficznym dolnego paleozoiku na zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego (kompilacja na podstawie Modlińskiego i in., 2006; Modlińskiego & Szymańskiego, 1997, 2008; Szymańskiego, 2008, zmieniona)

Fig. 3. Position of the major shale formations in stratigraphic section of the Lower Paleozoic at the western slope of the East European Craton (compilation based on: Modliński et al., 2006; Modliński & Szymański, 1997, 2008; Szymański, 2008, modified)



Sasina — ryc. 3 (Modliński & Szymański, 1997). Wraz z eustatycznym obniżaniem się poziomu morza w aszylu zasięg sedimentacji węglanowej rozszerzył się ku zachodowi i północnemu zachodowi, obejmując niemal cały obszar omawianych basenów, za wyjątkiem obniżenia Łeby, gdzie nadal kontynuowała się sedimentacja iłowców wzbogaconych w substancję organiczną. Miąższość iłowców formacji z Sasina wzrasta ze wschodu na zachód i północny zachód — w basenie bałtyckim od 3,5 m do 37 m w sektorze lądowym oraz od 26,5 m do 70 m na szelfie bałtyckim (Modliński & Szymański, 1997), a w rejonie obniżenia podlaskiego i niecki płocko-warszawskiej od 1,5 m do 52 m (Modliński & Szymański, 2008).

W rejonie wyniesienia Łeby średnia zawartość substancji organicznej w utworach karadoku w poszczególnych otworach wynosi zazwyczaj od 1,5% do 2,5% wag. TOC. Szerszy zakres średniej zawartości substancji organicznej w utworach w tej strefie, tj. od około 1% do 3,3% TOC, podają Więclaw i in. (2010). Dużą zawartość substancji organicznej w tych utworach, sięgającą maksymalnie 6,73% TOC w profilu otworu Gdańsk IG-1, potwierdzają także dane Skręt i Fabiańskiej (2009). Natomiast we wschodniej i zachodniej części basenu bałtyckiego średnia zawartość substancji organicznej w utworach karadoku nie przekracza zazwyczaj 1%. W zachodniej i środkowej części obniżenia podlaskiego średnia zawartość substancji organicznej w utworach karadoku w profilach poszczególnych otworów wynosi od około 1% do 1,25% TOC, a w podłożu niecki płocko-warszawskiej od 2,1% do 3,76% TOC. W regionie lubelskim zawartość TOC wynosi mniej niż 1%. Średnia zawartość substancji organicznej w utworach aszylu jest zazwyczaj mniejsza od 0,5%, za wyjątkiem wyniesienia Łeby, gdzie maksymalnie sięga do około 4,5%. Substancja organiczna łupków górnego ordowiku charakteryzuje się kerogenem II typu.

Dużą zawartość substancji organicznej w iłowcach górnego ordowiku została stwierdzona we wschodniej, litewskiej i łotewskiej, części basenu bałtyckiego (Kanev i in., 1994; Zdanavičiūtė i in., 1998). Największa zawartość TOC pomierzona w utworach tej strefy sięga 16%, a średnia zawartość, określona na podstawie 213 pomiarów, wynosi 3,47% TOC (wg Kadūnienė, 2001).

Wraz z eustatycznym podnoszeniem się poziomu morza w landowerze zasięg sedimentacji ilastej rozszerzył się na wschód. Jedynie we wschodniej części obniżenia podlaskiego i w regionie lubelskim utrzymywała się depozycja utworów ilasto-marglistych. Najbardziej wschodnia strefa regionu lubelskiego, położona wzdłuż granicy z Ukrainą, pozostawała wyniesiona, toteż na tym obszarze landower jest reprezentowany przez hiatus.

W basenie bałtyckim i obniżeniu podlaskim profil landoweru rozpoczynają utwory ogniwa iłowców bitumicznych z Jantaru (ryc. 3) i jego ekwiwalentów o charakterystycznej, dużej zawartości substancji organicznej, aczkolwiek małej miąższości, maksymalnie sięgającej 12 m (Modliński i in., 2006). We wschodniej części basenu bałtyckiego są one lokalnie zastępowane przez formację wapieni z Barcian (Jaworowski & Modliński, 1968), cechującą się małą zawartością substancji organicznej. Wyższą część profilu landoweru stanowią iłowce formacji z Pasłęka (ryc. 3). Łączna miąższość utworów landoweru wzrasta ze wschodu na zachód i maksymalnie wynosi około 70 m (Modliński i in., 2006), aczkolwiek na przeważającej części obszaru zawiera się w zakresie 20–40 m.

Na znacznych obszarach zachodniego skłonu EEC utwory landoweru, zwłaszcza jego niższej części, cechują się dużą zawartością substancji organicznej (Klimusko, 2002). Największą zawartość TOC, do 20%, pomierzono w utworach landoweru w obniżeniu podlaskim, natomiast średnia zawartość TOC w tych utworach wynosi od 1,5% do 6%. W środkowej części basenu bałtyckiego średnia zawartość substancji organicznej w utworach landoweru w profilach poszczególnych otworów wynosi zazwyczaj od 1% do 2,5%, natomiast w jego częściach wschodniej i zachodniej zwykle mniej niż 1%. Zbliżone wartości podają Więclaw i in. (2010), aczkolwiek największa średnia zawartość substancji organicznej w utworach landoweru, notowana przez tych autorów w profilu otworu Kościerzyna IG-1, wynosi 3,9%. W północno-zachodniej części regionu lubelskiego średnia zawartość substancji organicznej sięga 3%, natomiast ku południu i południowemu wschodowi spada ona poniżej 1% TOC. Substancja organiczna utworów landoweru charakteryzuje się kerogenem II typu.

Wyższą część profilu dolnego syluru w basenie bałtyckim stanowią iłowce wenloku i ludlowu, zaliczane do formacji z Pelpina, częściowo charakteryzujące się podwyższoną zawartością substancji organicznej, które od zachodu są stopniowo, diachronicznie zastępowane przez mułowce i iłowce, lokalnie z piaskowcami, formacji z Kociewia (ryc. 3), o mniejszej zawartości substancji organicznej (Klimusko, 2002; Modliński i in., 2006). Grubsza frakcja osadów klastycznych formacji z Kociewia wiąże się z dostawą materiału detrytycznego z kaledońskiej strefy kolizji, położonej na północnym zachodzie. Miąższość utworów wenloku jest obocznie silnie zmienna — od poniżej 100 m we wschodniej części obniżenia podlaskiego i regionu lubelskiego do ponad 1000 m w zachodniej części basenu bałtyckiego.

W rejonie środkowej i zachodniej części basenu bałtyckiego średnia zawartość substancji organicznej w profilu utworów wenloku mieści się zazwyczaj w zakresie od 0,5% do 1% TOC, we wschodniej części basenu wzrasta zaś do 1,3–1,4% TOC. Średnia zawartość substancji organicznej wzrasta również na południe i południowy wschód od basenu bałtyckiego. W obniżeniu podlaskim wynosi ona od 0,6% do 1,3%, w regionie lubelskim zaś od 1% do ~1,7% TOC. Jako że są to wartości średnie pomierzone w profilach o stosunkowo dużej miąższości, należy wziąć pod uwagę, że w obrębie profilu występują pakiety o większej średniej zawartości substancji organicznej. Substancję organiczną utworów wenloku również cechuje II typ kerogenu.

Dużą zawartość substancji organicznej w utworach dolnego syluru, sięgającą maksymalnie 17% TOC, została stwierdzona we wschodniej, litewskiej i łotewskiej, części basenu bałtyckiego (Zdanavičiūtė & Bojesen-Koefoed, 1997; Kadūnienė, 2001; Zdanavičiūtė & Lazauskienė, 2007). Zależnie od lokalizacji opróbowanych otworów oraz położenia próbek w profilu jej średnia zawartość w tym rejonie jest oceniana na od powyżej 1% TOC (Kadūnienė, 2001) do 6,57% TOC (Zdanavičiūtė i in., 1998). Na dużą zawartość TOC w utworach landoweru we wschodniej części basenu bałtyckiego w granicach Polski, rzędu 9–11% w pojedynczych próbkach, wskazują również Skręt i Fabiańska (2009). Z uwagi na niski stopień dojrzałości termicznej, zazwyczaj w zakresie 0,7–1,1% Ro (Zdanavičiūtė & Swadowska, 2002; Molenaar i in., 2007), utwory te nie są uznawane za potencjalnie zawierające gaz ziemny w łupkach.

Mięszość utworów ludlowu silnie wzrasta z południowego wschodu i wschodu ku północnemu zachodowi — w krawędziowej części kratonu wschodnioeuropejskiego wynosi maksymalnie ponad 2000 m, a we wschodniej części basenu bałtyckiego spada do 150–300 m. We wschodniej części obniżenia podlaskiego wynosi ona około 300–400 m, w jego części zachodniej zaś przekracza 1100 m. W regionie lubelskim mięszość utworów ludlowu wzrasta od około 250 m w części wschodniej do ponad 600 m w części północno-zachodniej.

Średnia zawartość substancji organicznej w utworach ludlowu jest stosunkowo mała (Klimuszek, 2002). W basenie bałtyckim wzrasta ona z zachodu ku wschodowi od poniżej 0,3% TOC do ponad 0,8% TOC. Zbliżone wartości obserwuje się również w obniżeniu podlaskim i regionie lubelskim. Ogólny wzrost zawartości substancji organicznej ku wschodowi jest związany głównie z obocznymi zmianami facjalnymi, przede wszystkim rozcieńczeniem substancji organicznej w osadzie w wyniku intensywnej dostawy materiału detrytycznego z zachodu, a w mniejszym stopniu ze wzrostem dojrzałości termicznej ku zachodowi.

W wyniku erozji we wczesnym dewonie oraz późnym karbonie i wczesnym permie utwory prydolu są zachowane tylko w środkowej części basenu bałtyckiego, południowej części obniżenia podlaskiego oraz w przeważającej części regionu lubelskiego. Są one reprezentowane głównie przez mułowce i iłowce margliste (Modliński i in., 2006), o stosunkowo małej zawartości substancji organicznej. W polskiej części basenu bałtyckiego maksymalnie osiągają mięszość 500–600 m, a w obniżeniu podlaskim i regionie lubelskim nieomal 1000 m. Średnia zawartość substancji organicznej w utworach prydolu nie przekracza 0,5% TOC.

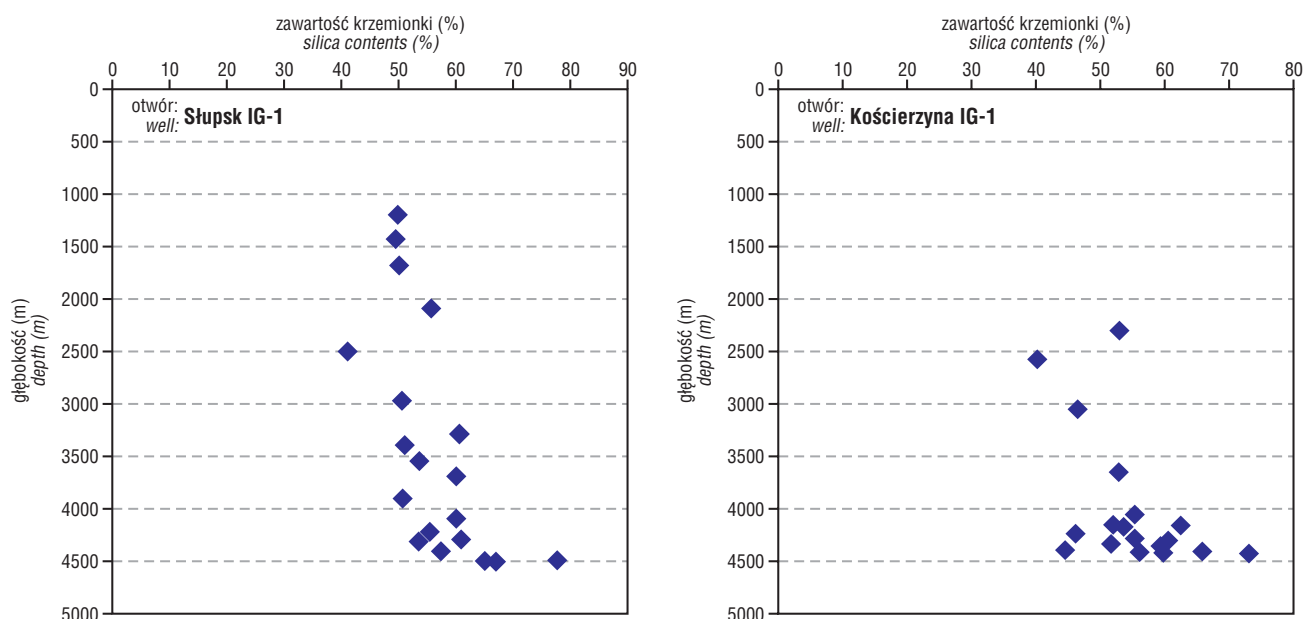
Współcześnie mierzona zawartość substancji organicznej jest mniejsza od pierwotnej jej zawartości. Wiąże się to z częściową transformacją substancji organicznej i powstawaniem węglowodorów. Różnica między współczesną i

pierwotną zawartością TOC wzrasta wraz z dojrzałością termiczną utworów. Jest ona również silnie zależna od genetycznego typu kerogenu. Największa redukcja zawartości TOC wraz ze wzrastającą dojrzałością zachodzi w skale zawierającej I typ kerogenu, a coraz mniejsza charakteryzuje utwory zawierające II oraz III typ kerogenu. Biorąc pod uwagę II typ kerogenu, można przyjmować, że w strefach o dojrzałości odpowiadającej oknu generowania gazu pierwotna zawartość TOC była co najmniej o połowę większa od wartości mierzonej laboratoryjnie.

Z punktu widzenia poszukiwań i eksploatacji korzystne jest, aby łupki gazonośne miały dużą zawartość krzemionki. Warunkuje to podatność skały na szczelinowanie, co w efekcie decyduje o możliwości dopływu gazu do otworu wiertniczego. Łupki dolnego paleozoiku są pod tym kątem stosunkowo słabo zbadane, aczkolwiek nieliczne dostępne dane wskazują, że zawartość krzemionki w tych osadach jest duża. W profilu otworu Słupsk IG-1 zawartość krzemionki w osadach wynosi około 50–70%, a w profilu otworu Kościerzyna IG-1 — około 45–65% (ryc. 4) (Krzemiński & Poprawa, 2006). W obu profilach obserwuje się tendencję do wzrostu zawartości krzemionki z głębokością. Dla interwałów o wysokiej zawartości substancji organicznej charakterystyczna jest ponadto obecność koncentracji pirytowych, jak również obniżona intensywność bioturbacji (Lis, 2010).

Pionowa i oboczna zmienność zawartości TOC w utworach dolnego paleozoiku EEC

Zmiany zawartości substancji organicznej w poszczególnych profilach mają istotny związek z tempem depozycji materiału detrytycznego. Jego intensywna dostawa, mimo obfitej produkcji szczątków organicznych w basenie, powodowała zmniejszenie zawartości substancji organicznej w osadzie. W późnym ordowiku i sylurze wyraźne narastanie tempa depozycji nieorganicznego detrytus (Poprawa, 2006b) spowodowało ogólną tendencję do

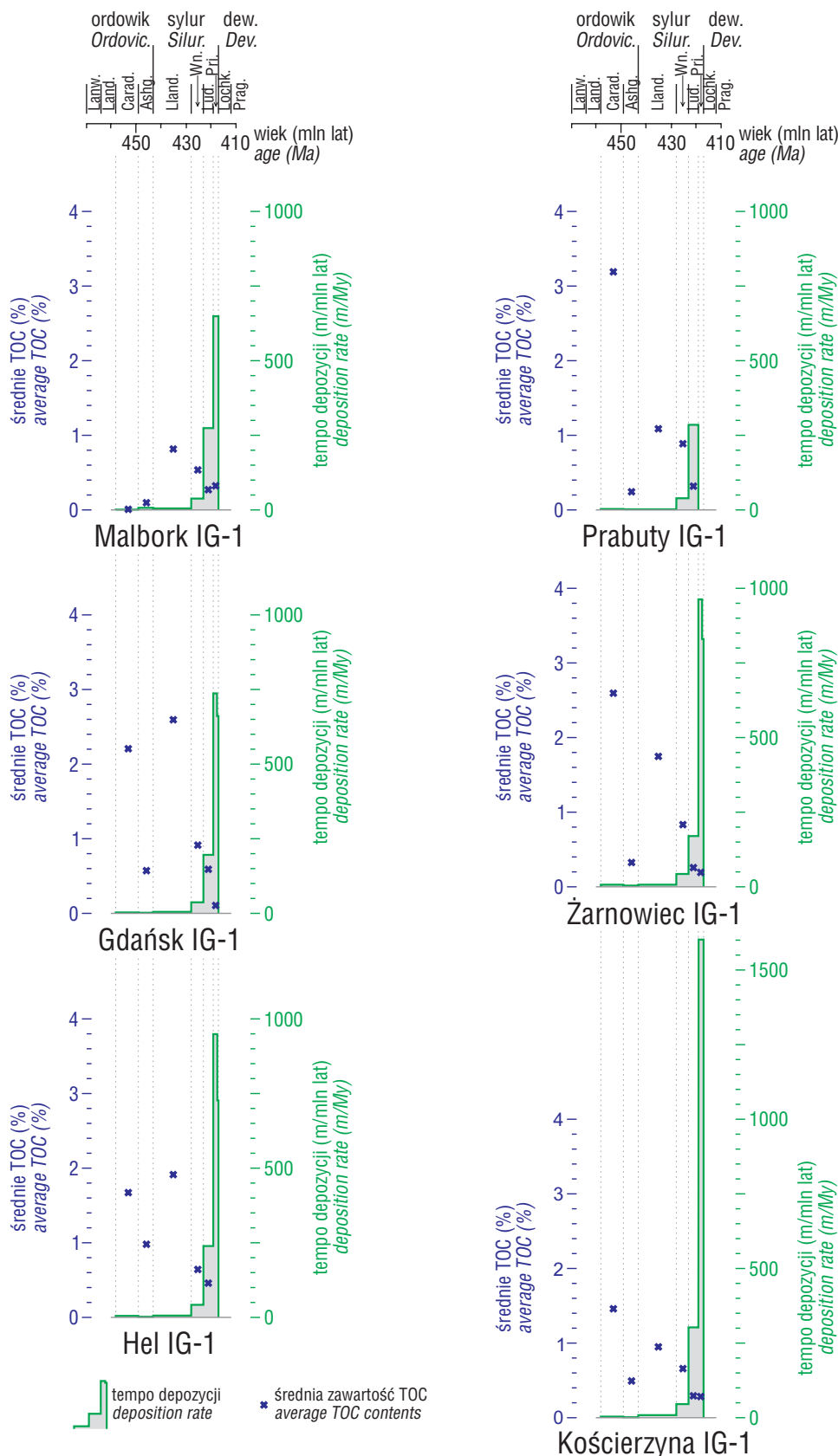


Ryc. 4. Zawartość krzemionki w łupkach dolnego paleozoiku w dwóch przykładowych profilach w zachodniej części basenu bałtyckiego (wg Krzemińskiego & Poprawy, 2006)

Fig. 4. Silica contents in the Lower Palaeozoic shale in two exemplary wells from the western part of the Baltic basin (after Krzemiński & Poprawa, 2006)

spadku zawartości substancji organicznej w górę profilu (ryc. 5). Trend ten jest dobrze widoczny zwłaszcza w utworach sylurskich, które wykazują mniejsze zróżnicowanie

facjalne niż utwory górnego ordowiku. Średnia zawartość substancji organicznej w utworach aszgilu, a niekiedy również karadoku, jest mniejsza na skutek innych czynników



Ryc. 5. Relacje między tempem depozycji materiału detrytycznego utworów górnego ordowiku i syluru w basenie bałtyckim (wg Poprawy, 2006b) a średnią zawartością substancji organicznej

Fig. 5. Relation between sediment deposition rate for the Upper Ordovician and Silurian (after Poprawa, 2006b) and average contents of organic matter

niż tempo depozycji — wpłynęło na nią węglanowe wykształcenie facjalne. W strefach, gdzie karadok jest wykształcony w facjach ilastych, zawartość TOC jest zgodna z ogólnym trendem (ryc. 5).

Charakterystyczną cechą utworów dolnopaleozoicznych w basenach sedymentacyjnych na zachodnim skłonie EEC jest wyraźny diachronizm w pojawianiu się w nich pakietów ilasto-mułowcowych o dużej zawartości substancji organicznej. Z północnego zachodu ku południowemu wschodowi w poszczególnych profilach interwały najbogatsze w substancję organiczną występują w coraz młodszych osadach (ryc. 6).

W północnej części basenu bałtyckiego (strefa szelfu bałtyckiego oraz wyniesienie Łeby) sedymentacja czarnych łupków bitumicznych pojawia się po raz pierwszy już w późnym kambrze i tremadoku (ryc. 3, 6). Sedymentacja ta nie znajduje odpowiedników w strefach basenu bałtyckiego położonych dalej na południe i wschód oraz w basenie lubelsko-podlaskim, za wyjątkiem lokalnego występowania łupków dictyonemowych wyższego tremadoku we wschodniej części obniżenia podlaskiego — ryc. 3 (Modliński & Szymański, 2008).

Po przerwie związanej z depozycją utworów w przewadze węglanowych, począwszy od późnego lanwiru na wyniesieniu Łeby były deponowane czarne łupki o dużej zawartości TOC (ryc. 6). Ku południowemu wschodowi osad ten był zastępowany przez utwory węglanowe (ryc. 3). Duża zawartość TOC jest charakterystyczna również dla utworów karadoku na wyniesieniu Łeby, a także w podłożu niecki płocko-warszawskiej i zachodniej części obniżenia podlaskiego.

Utwory landoweru stanowią najbogatszy w substancję organiczną interwał profilu w obszarze środkowej części basenu bałtyckiego (ryc. 6), środkowej części obniżenia podlaskiego oraz północno-zachodniej części regionu lubelskiego. Na wyniesieniu Łeby zawartość TOC w utworach landoweru jest mniejsza niż w utworach górnego ordowiku, a w południowo-wschodniej części regionu lubelskiego landower jest reprezentowany przez hiatus.

W środkowej i zachodniej części basenu bałtyckiego oraz obniżenia podlaskiego w utworach wenloku obserwuje się mniejszą zawartość substancji organicznej niż w utworach landoweru. Nie dotyczy to jednak wschodniej części basenu bałtyckiego i południowo-wschodniej części

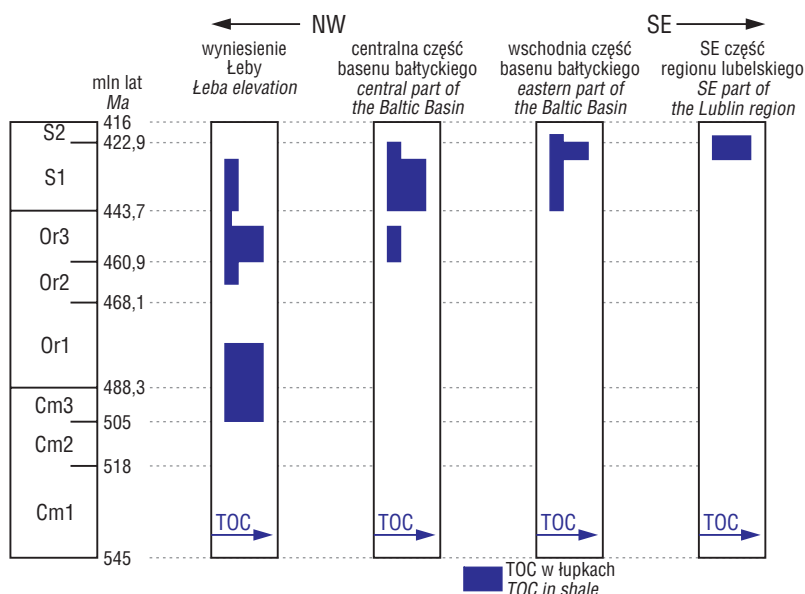
regionu lubelskiego, gdzie największą zawartość TOC w profilu obserwuje się w utworach wenloku (ryc. 6).

Do oceny możliwości występowania akumulacji gazu ziemnego w łupkach potrzebna jest nie tyle informacja o średniej zawartości substancji organicznej w poszczególnych interwałach stratygraficznych w profilu (jest to miąższość skał macierzystych brutto), co raczej dane o miąższości kompleksów spełniających określone kryterium, którym zazwyczaj jest zawartość minimum 1%; 1,5% bądź 2% TOC (jest to miąższość skał macierzystych netto). Ograniczona długość interwałów rdzeniowych w profilu, a także ograniczona liczbowo możliwość poboru z miąższych kompleksów ilasto-mułowcowych próbek do analiz zawartości TOC powodują, że na podstawie pomiarów laboratoryjnych nie można określić, czy jest spełniony warunek minimalnej zawartości TOC. Dlatego stosuje się pośrednie metody określania zawartości substancji organicznej na podstawie otworowych krzywych geofizycznych, które przy odpowiedniej kalibracji laboratoryjnymi pomiarami umożliwiają odtworzenie ciągłego profilu zawartości TOC (np. Drop & Kozłowski, 2010). Do tych celów wykorzystuje się głównie krzywe: gamma, neutron-gamma, gęstościową, opornościową i akustyczną.

W basenie dolnopaleozoicznym na zachodnim skłonie EEC większość otworów została odwiercona w latach 60. i 70. ubiegłego stulecia. Zapis krzywych otworowych uzyskanych za pomocą ówczesnych technik sondowań otworowych nie jest w pełni użyteczny do odtwarzania ciągłego profilu zawartości TOC. Niemniej jednak są obserwowane zależności pomiędzy zapisem krzywych otworowych a laboratoryjnymi pomiarami TOC (ryc. 7). Relacje między zawartością TOC brutto w danym interwale stratygraficznym a jego zawartością netto ilustruje ryc. 7. Średnia zawartość TOC brutto w utworach landoweru o miąższości 63 m wynosi 1,76%, przy czym utwory w wyższej części profilu landoweru średnio zawierają zaledwie 0,45% TOC, natomiast w niższej części profilu występuje interwał o miąższości około 11 m o średniej zawartości TOC netto 4,36%.

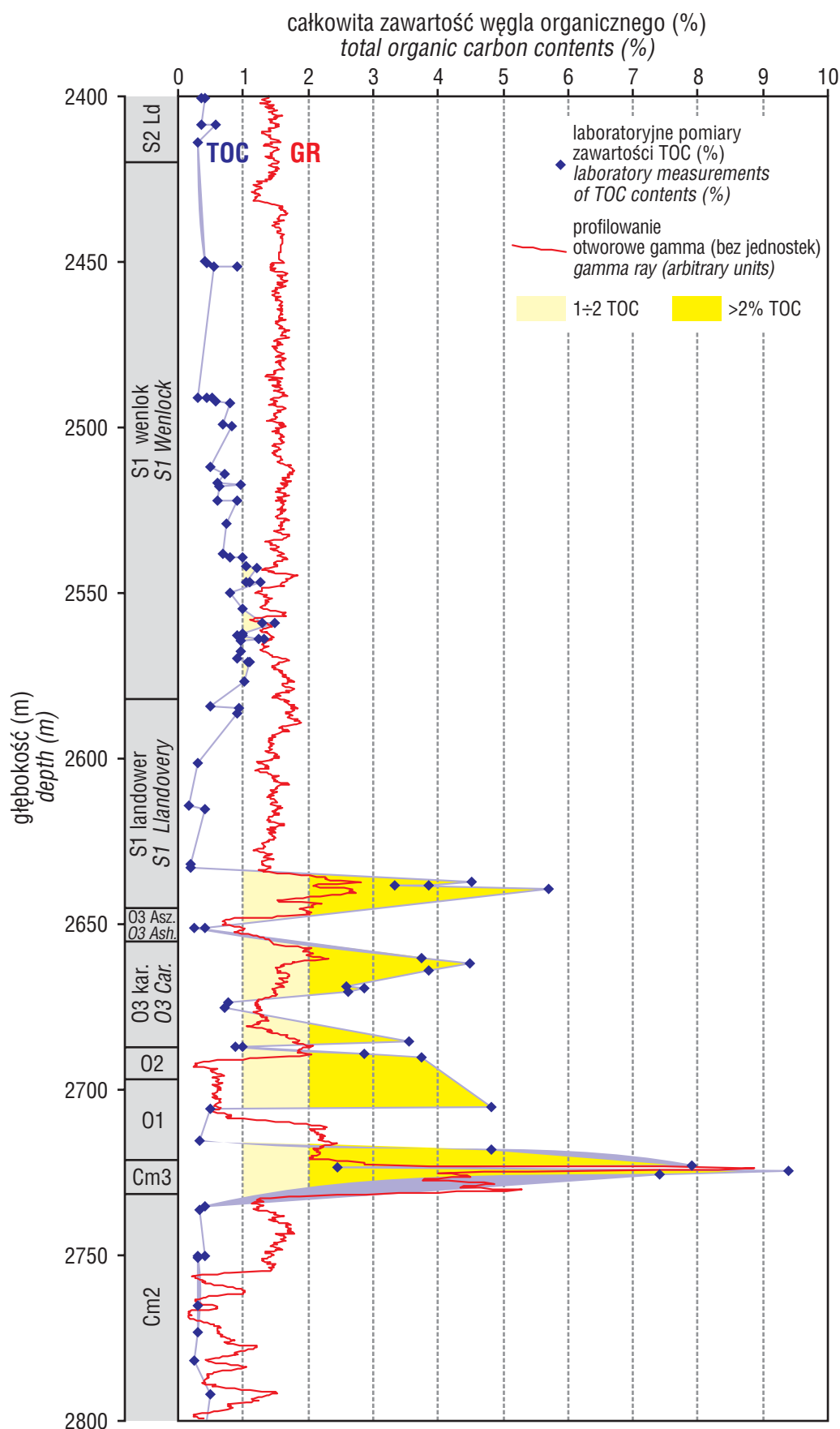
Głębokość zalegania oraz dojrzałość termiczna łupków dolnego paleozoiku

Głębokość zalegania kompleksów łupków górnego ordowiku i dolnego syluru, a także łupków górnego kam-



Ryc. 6. Uproszczony schemat ilustrujący diachronizm pojawiania się osadów ilasto-mułowcowych bogatych w substancję organiczną we wczesnym paleozoiku w basenach sedymentacyjnych na zachodnim skłonie EEC

Fig. 6. Simplified scheme illustrating diachronism of the first appearance of organic rich shale in sedimentary basins from the western slope of the EEC in the Early Palaeozoic times



Ryc. 7. Korelacja laboratoryjnych pomiarów zawartości węgla organicznego z zapisem otworowego profilowania gamma oraz wyznaczenie interwałów netto skał macierzystych w przykładowym profilu otworu wiertniczego Żarnowiec IG-1 (północna część basenu bałtyckiego)

Fig. 7. Correlation between laboratory measurements of TOC contents and gamma ray log, as well as determination of net intervals of source rock at the example of the Żarnowiec IG-1 well (northern Baltic Basin)

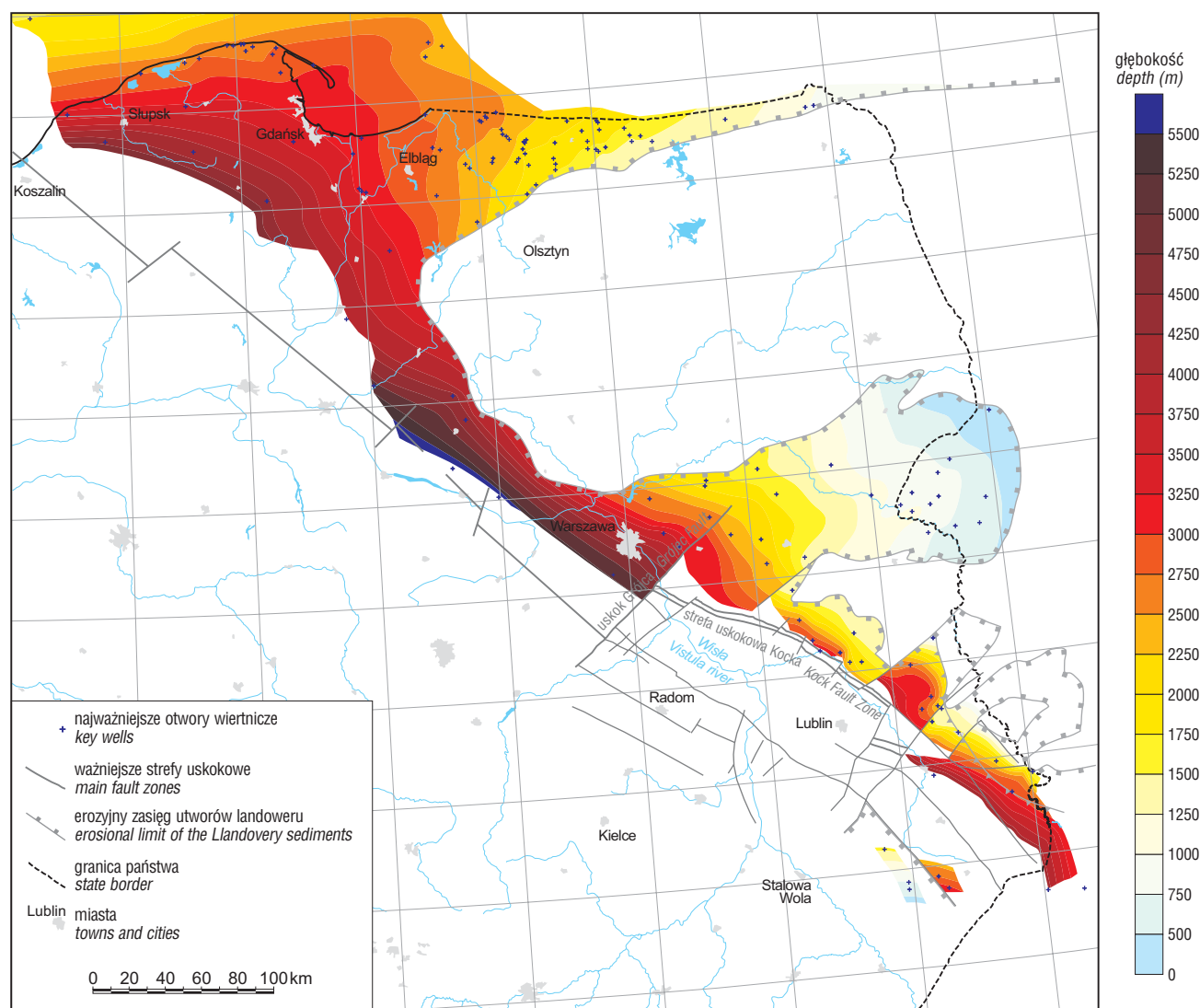
bru i tremadoku na zachodnim skłonie EEC jest zależna przede wszystkim od miąższości utworów górnego syluru oraz permo-mezozoiku. Miąższość obu tych kompleksów znacząco wzrasta ku zachodowi, powodując wzrost głębokości zalegania w tym kierunku kompleksu potencjalnie zawierającego gaz ziemny w łupkach (ryc. 8). W regionie lubelskim na głębokość zalegania łupków dolnego paleozoiku dodatkowo wpływa miąższość kompleksu utworów dewońsko-karbońskich, największa w obrębie rowu lubelskiego (Żelichowski & Kozłowski, 1983).

W basenie bałtyckim współczesna głębokość zalegania łupków górnego ordowiku i dolnego syluru zmienia się na terytorium Polski od około 1000 m w jego wschodniej części do ponad 4500 m w części zachodniej (ryc. 8). W obniżeniu podlaskim głębokość ta zmienia się od około 500 m na wschodzie do około 4000 m w rejonie Warszawy. W regionie lubelskim głębokość zalegania łupków dolnego paleozoiku dodatkowo komplikują uskoki powstałe w bretońskiej fazie deformacji, niekiedy o dużych zrzutach, ograniczające poszczególne bloki, a także duża miąższość utworów dewonu i karbonu w rowie lubelskim. W strefach, gdzie utwory dolnego paleozoiku są udokumentowane wiertniczo, głębokość zalegania łupków zmienia się zazwyczaj od około 1000 m we wschodniej części obszaru

do około 3000–3500 m w pobliżu strefy Kocka (ryc. 8). Najgłębsze zaleganie spągu landoweru (ok. 4330 m) zostało udokumentowane w otworze wiertniczym Łopiennik IG-1.

W strefie rowu lubelskiego i jego południowo-wschodniego przedłużenia utwory górnego ordowiku i dolnego syluru znajdują się na zbyt dużej głębokości, by można było prowadzić ekonomicznie uzasadnione poszukiwania akumulacji gazu ziemnego w łupkach. Jednak dalej na zachód, w strefie Biłgoraj–Narol, głębokość zalegania kompleksów dolnopaleozoicznych zmniejsza się nawet do 500–1000 m (ryc. 8).

Określenie stopnia dojrzałości termicznej łupków górnego ordowiku i dolnego syluru jest stosunkowo trudne z powodu ograniczeń w stosowaniu podstawowej metody badania dojrzałości termicznej skał osadowych, jaką jest pomiar refleksyjności wityrytu. Ograniczenia te są spowodowane tym, że w dolnym paleozoiku rośliny nie występowały jeszcze na lądach i dlatego utwory z tego okresu nie zawierają wityrytu. Zastępczo są wykonywane pomiary refleksyjności zooklastów, alginatów czy bituminów, które umożliwiają prawidłowe określenie dojrzałości termicznej, choć z nieco większym zakresem błędów pomiaru (Grotek, 2006).



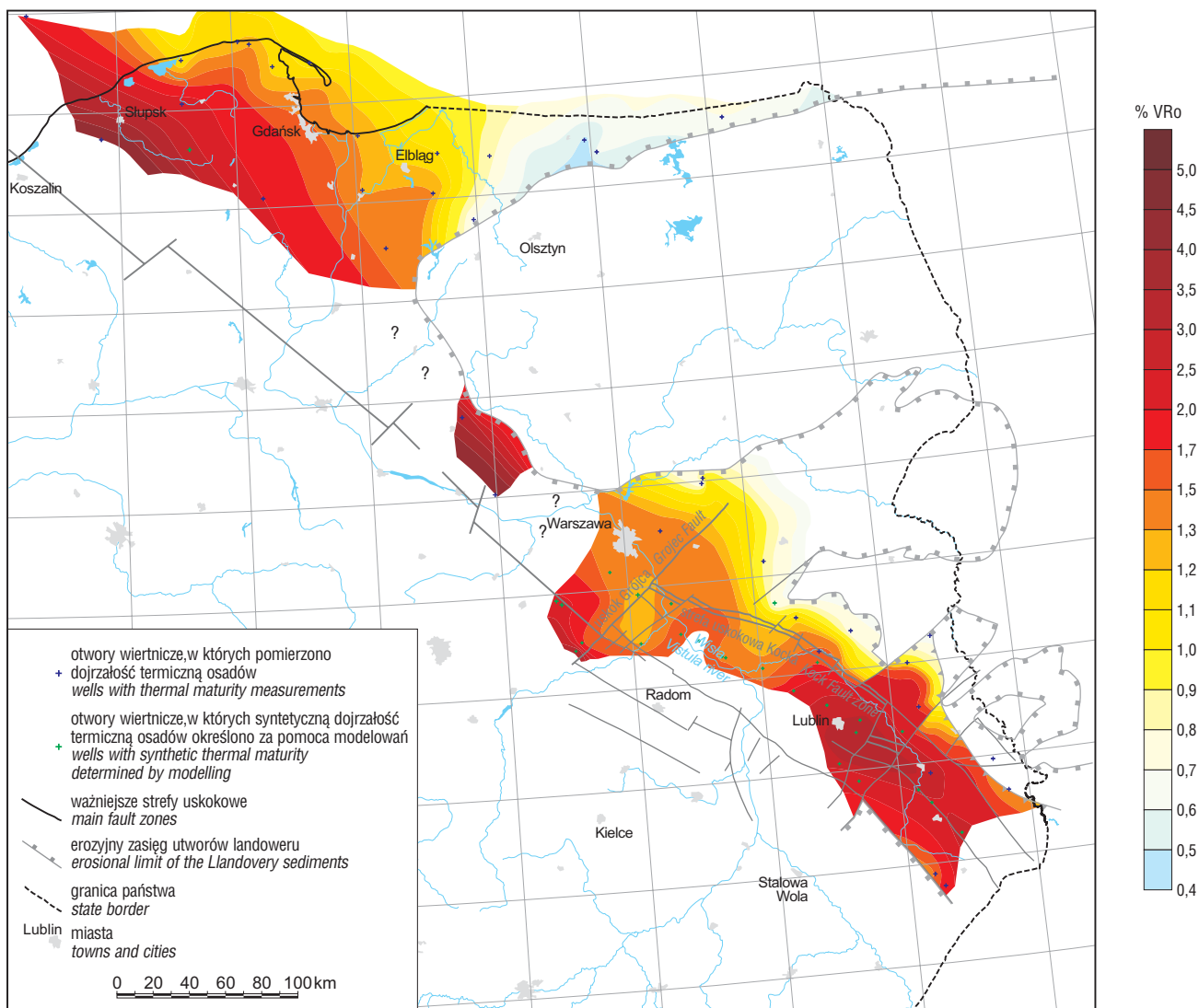
Ryc. 8. Mapa głębokości do spągu landoweru (spąg syluru) na zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego
Fig. 8. Map of the depth to the base of the Llandovery (base of the Silurian) at western slope of the East European Craton

Odtworzona dojrzałość termiczna łupków dolnego paleozoiku na zachodnim skłonie EEC, podobnie jak głębokość ich zalegania, ogólnie wrasta ze wschodu i północnego wschodu ku zachodowi i południowemu zachodowi — ryc. 9 (Nehring-Lefeld i in., 1997; Swadowska & Sikorska, 1998; Grotek, 2006). W kierunku tym następuje zmiana właściwości górnordowych i dolnosylurskich skał macierzystych, które zmieniają swoją dojrzałość od zakresu skał niedojrzałych lub słabo dojrzałych do generowania węglowodorów do zakresu okna gazu suchego bądź zakresu utworów przejrzalnych w pobliżu krawędzi kratonu wschodnioeuropejskiego.

W polskiej części basenu bałtyckiego pomierzone wartości dojrzałości termicznej utworów dolnego paleozoiku zmieniają się od ok. 0,5–0,6% Ro po stronie wschodniej do około 3–4% Ro po stronie zachodniej (ryc. 9). Brak danych odnośnie dojrzałości termicznej utworów we wschodniej części obniżenia podlaskiego, natomiast w jego części środkowej dojrzałość termiczna wynosi ok. 0,9–1,1% Ro, a w części zachodniej przekracza 1,3% Ro. We wschodniej części regionu lubelskiego (lubelski skłon kratonu wschodnioeuropejskiego) dojrzałość termiczna osadów zmienia się ze

wschodu na zachód od 0,6–0,7% Ro do około 1,5–2,0% Ro (ryc. 9). Najwyższy stopień dojrzałości termicznej został udokumentowany w profilu otworu Łopiennik IG-1 (2,7–3,4% Ro). W obszarze rowu lubelskiego, gdzie utworów dolnego paleozoiku nie zostały nawiercone, zastosowano modelowanie dojrzałości termicznej syntetycznych profili i na jego podstawie oceniono, że dojrzałość termiczna łupków w środkowej części rowu maksymalnie osiąga około 4% Ro. W strefie Biłgoraj–Narol, pomimo małej głębokości zalegania utworów dolnego paleozoiku, ich dojrzałość termiczna jest stosunkowo wysoka (ryc. 9).

Należy zwrócić uwagę na negatywną z punktu widzenia poszukiwań złóż gazu ziemnego w łupkach zależność między głębokością zalegania i dojrzałością termiczną (Poprawa & Kiersnowski, 2008). W strefach, gdzie mała głębokość zalegania łupków pozwala utrzymać koszty prac poszukiwawczych na stosunkowo niskim poziomie, dojrzałość termiczna jest często niewystarczająca do występowania w nich gazu ziemnego. Dojrzałość termiczna łupków wzrasta w kierunku zachodnim, podobnie jak ich pogrzebanie, co sprawia, że w zachodniej części omawianego obszaru potencjalne akumulacje mogą się znajdować



Ryc. 9. Mapa dojrzałości termicznej (w skali refleksyjności wityritu % VRo) utworów landoweru (dolny sylur) na zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego

Fig. 9. Map of thermal maturity (vitrinite reflectance scale % VRo) for Llandovery (Lower Silurian) sediments at the western slope of the East European Craton

na głębokościach zbyt dużych, by można było prowadzić ekonomicznie opłacalną eksploatację gazu. Niemniej jednak w strefie pośredniej występują obszary, na których głębokość zalegania bogatych w substancję organiczną utworów górnego ordowiku i dolnego syluru jest jeszcze stosunkowo mała, a stopień dojrzałości termicznej jest już wystarczająco wysoki do powstania gazu ziemnego w łupkach (ryc. 10).

Czas kształtowania się dojrzałości termicznej łupków dolnego paleozoiku, a w konsekwencji czas generowania węglowodorów, można określić na podstawie dojrzałości termicznej osadów w profilach poszczególnych otworów wiertniczych. Na kratonie wschodnioeuropejskim stwierdzono występowanie dwóch odmiennych scenariuszy historii termicznej. Część osadów na kratonie charakteryzuje się spójnym profilem dojrzałości termicznej, obejmującym zarówno utwory permo-mezozoiku, jak i dolnego paleozoiku (ryc. 11A). Można uznać, że obserwowana dojrzałość termiczna ukształtowała się w nich w późnym mezozoiku bądź nawet w kenozoiku, co można wiązać z mezozoicznym zdarzeniem termicznym opisywanym przez Poprawę i Grotek (2005). Takie profile dowodzą ponadto, że faza generowania węglowodorów w potencjalnie macierzystych łupkach dolnego paleozoiku zachodziła również w późnym mezozoiku (-kenozoiku?).

Drugi scenariusz historii termicznej odzwierciedla się poprzez wyraźne niezgodności w profilu dojrzałości termicznej (ryc. 11B), wskazujące, że dojrzałość termiczna ukształtowała się przed depozycją utworów permsko-mezozoicznych. W regionie lubelskim nastąpiło to przypuszczalnie w późnym karbonie (Majorowicz i in., 1984; Botor i in., 2002; Karnkowski, 2003a; Poprawa & Żywiecki, 2005), a w basenie bałtyckim w dewonie lub też wczesnym karbonie (Karnkowski, 2003b; Poprawa & Grotek, 2005).

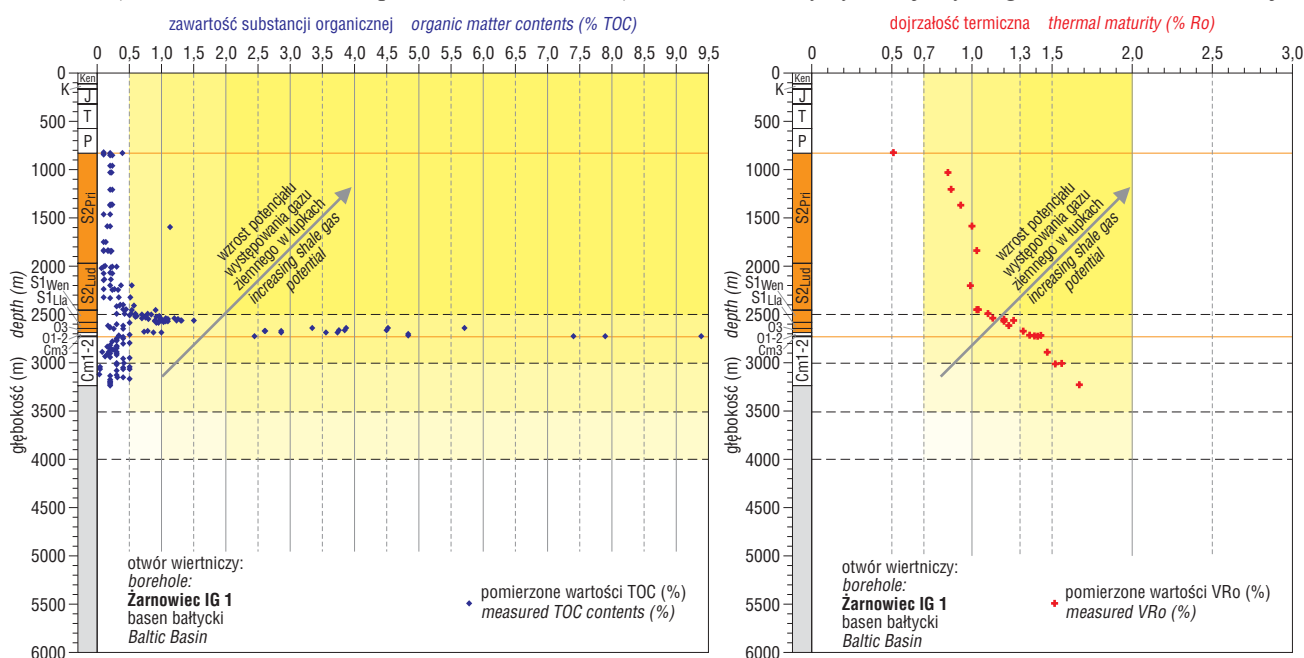
Wówczas też w potencjalnie macierzystych łupkach dolnego paleozoiku były generowane węglowodory.

W potencjalnie macierzystych utworach dolnego paleozoiku na kratonie wschodnioeuropejskim gaz ziemny mógł być generowany w przybliżeniu równocześnie w kolumnie osadów o dużej miąższości, niekiedy przekraczającej 100–200 metrów. Przeciwdziałało to ekspulsji gazu ziemnego i mogło sprzyjać jego zachowaniu w skale macierzystej.

Objawy i skład węglowodorów w utworach dolnego paleozoiku

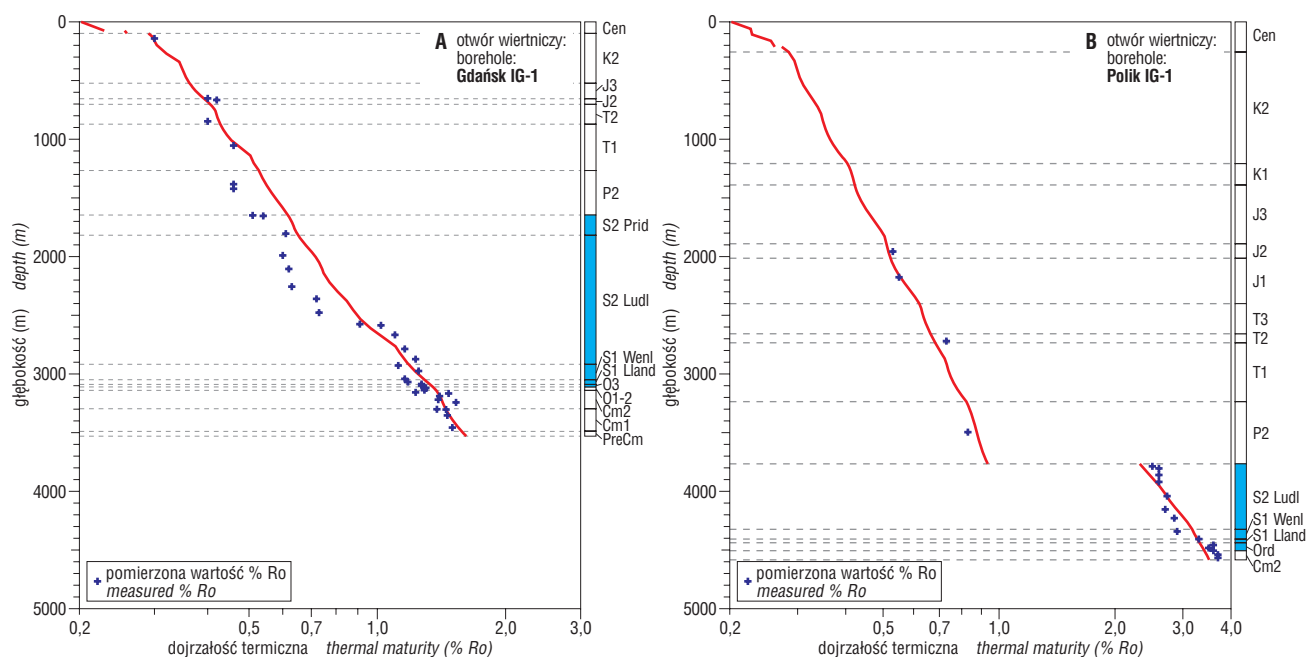
W utworach dolnego paleozoiku na kratonie wschodnioeuropejskim są notowane liczne objawy węglowodorów (Depowski, 1962; Areń & Depowski, 1965; Depowski & Królicka, 1964; Karnkowski, 1993; Stolarczyk i in., 1997; Poprawa, 2009). Są to zarówno objawy węglowodorów w utworach sylurskich (najczęściej stwierdzane na krzywej gazowej bądź jako bąble metanu na świeżo wyjętych rdzeniach wiertniczych), jak również objawy w potencjalnie zbiornikowych utworach kambru oraz dolnego i środkowego ordowiku (Poprawa, 2010b). Objawy gazu ziemnego w utworach górnego ordowiku lub też dolnego syluru stwierdzano m.in. w otworach Kościerzyna IG-1 i Pasłek IG-1 w basenie bałtyckim, Kałuszyn 1 w obniżeniu podlaskim, czy Łopiennik IG-1 w regionie lubelskim.

Lokalnie też, w północnej części lądowego sektora basenu bałtyckiego, a także w strefie szelfu bałtyckiego, występują złoża węglowodorów generowanych najprawdopodobniej z górnokambryjskich i tremadockich skał macierzystych (Górecki i in., 1992; Karnkowski, 1993; Schleicher i in., 1998; Więclaw i in., 2010). Jednakże poza tą strefą oraz obszarem zasięgu migracji z wymienionych skał macierzystych objawy węglowodorów w konwencjo-



Ryc. 10. Relacje między głębokością zalegania, rozkładem zawartości substancji organicznej oraz dojrzałością termiczną skał w przykładowym profilu otworu w centralnej części basenu bałtyckiego (Żarnowiec IG-1). W profilu tym dojrzałość termiczna wzbogaczonego w substancję organiczną interwału utworów górnego ordowiku i dolnego syluru jest wystarczająca do generowania gazu ziemnego, a głębokość zalegania tych utworów umożliwia prowadzenie ekonomicznie uzasadnionej eksploatacji gazu ziemnego z łupków

Fig. 10. Relation between burial depth, distribution of organic matter in a section, as well as thermal maturity profile for the exemplary well from the central part of the Baltic Basin (Żarnowiec IG-1). In this case, thermal maturity of the Upper Ordovician to Lower Silurian interval rich in organic matter is sufficient for gas generation and the depth of burial is low enough for economic shale gas production



Ryc. 11. Przykłady profili dojrzałości termicznej w basenach sedymentacyjnych na zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego: **A** — otwór Gdańsk IG-1 (centralny basen bałtycki) z profilem dojrzałości termicznej wskazującym na mezozoiczny (-kenozoiczny?) wiek jej kształtowania się, a w efekcie również na generowanie węglowodorów z dolnopaleozoicznych skał macierzystych w mezozoiku (-kenozoiku?); **B** — otwór Polik IG-1 (niecka płocko-warszawska) z profilem dojrzałości termicznej wskazującym na waryscyjski wiek jej kształtowania się oraz generowania węglowodorów z dolnopaleozoicznych skał macierzystych

Fig. 11. Examples of thermal maturity profiles for the sedimentary basins from the western slope of the East European Craton: **A** — borehole Gdańsk IG-1 (central Baltic Basin) with thermal maturity profile indicative for its development during Mesozoic (-Cenozoic?) time, as well as for Mesozoic (-Cenozoic?) hydrocarbon generation from the Lower Palaeozoic source rocks; **B** — borehole Polik IG-1 (Płock-Warszawa trough) with thermal maturity profile indicative for its development during Variscan time, as well as for Variscan hydrocarbon generation from the Lower Palaeozoic source rocks

nalnych zbiornikowych utworach kambru oraz dolnego i środkowego ordowiku wiążą się z omawianymi tu łupkami dolnego paleozoiku. Wynika to z braku innych formacji macierzystych w obrębie kompleksu dolnopaleozoicznego. Wykazano także, że ropa naftowa akumulowana w utworach zbiornikowych dewonu w regionie lubelskim była generowana z dolnosylurskich skał macierzystych (Klimuszko, 2002).

Objawy węglowodorów w utworach dolnego paleozoiku na kratonie wschodnioeuropejskim wykazują charakterystyczną strefowość. We wschodniej części basenu bałtyckiego, obniżenia podlaskiego oraz regionu lubelskiego występują niemal wyłącznie objawy ropy naftowej. Dalej ku zachodowi znajdują się strefy występowania zarówno objawów ropy naftowej, jak i gazu ziemnego, a następnie strefy występowania wyłącznie objawów gazu ziemnego. Strefowość ta ma ścisły związek z dojrzałością termiczną.

Podobna strefowość jest obserwowana w składzie gazów węglowodorowych. Zawartość gazów wyższych niż metan (etan, propan, butan etc.) wzrasta z zachodu, gdzie stanowią one zaniedbywaną domieszkę (< 5%), ku wschodowi, gdzie w basenie bałtyckim stanowią one 30–40% składu gazu.

We wschodniej części basenu bałtyckiego, obniżenia podlaskiego oraz regionu lubelskiego stwierdzono ponadto dużą zawartość azotu w gazie, sięgającą 60–80% (Poprawa, 2009). Ku zachodowi jego zawartość maleje do poniżej 10–20%. Obserwuje się zatem spadek zawartości azotu wraz ze zwiększaniem się stopnia dojrzałości termicznej, co wyklucza pochodzenie azotu z przegrzanych skał macierzystych. W basenie bałtyckim, a po części również w obniżeniu podlaskim obserwuje się bliską korelację stref

występowania dużej zawartości azotu w gazie ze strefami występowania karbońskich intruzji magmowych. Karbońskie intruzje magmowe i skały wylewne znane są również z obszaru lubelskiego. Stanowi to podstawę do sugestii, że azot w utworach dolnego paleozoiku na kratonie wschodnioeuropejskim może być genetycznie powiązany z aktywnością magmową.

Ciśnienie w obrębie kompleksów łupków dolnopaleozoicznych jest słabo poznane, gdyż w utworach tych nie wykonywano dotąd testów złożowych. Sądząc jednak z wyników testów złożowych potencjalnie zbiornikowych utworów kambru oraz dolnego i środkowego ordowiku, w obrębie kompleksu utworów dolnopaleozoicznych nie należy oczekiwać obecności znaczących nadciśnień (Bojarski, 1996).

Potencjał występowania gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku

Zasadniczymi, geologicznymi i geochemicznymi parametrami łupków dolnego paleozoiku, charakteryzującymi potencjał występowania w tych utworach akumulacji gazu ziemnego, są: miąższość interwałów bogatych w substancję organiczną, zawartość substancji organicznej, dojrzałość termiczna łupków oraz głębokość ich zalegania. Znacząca oboczna zmienność wartości każdego z tych parametrów w pokrywie zachodniego skłonu EEC w granicach Polski (ryc. 6, 8, 9), jak również ich złożone wzajemne relacje powodują, że potencjał występowania akumulacji gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku jest obocznie zmienny i trudy do określenia.

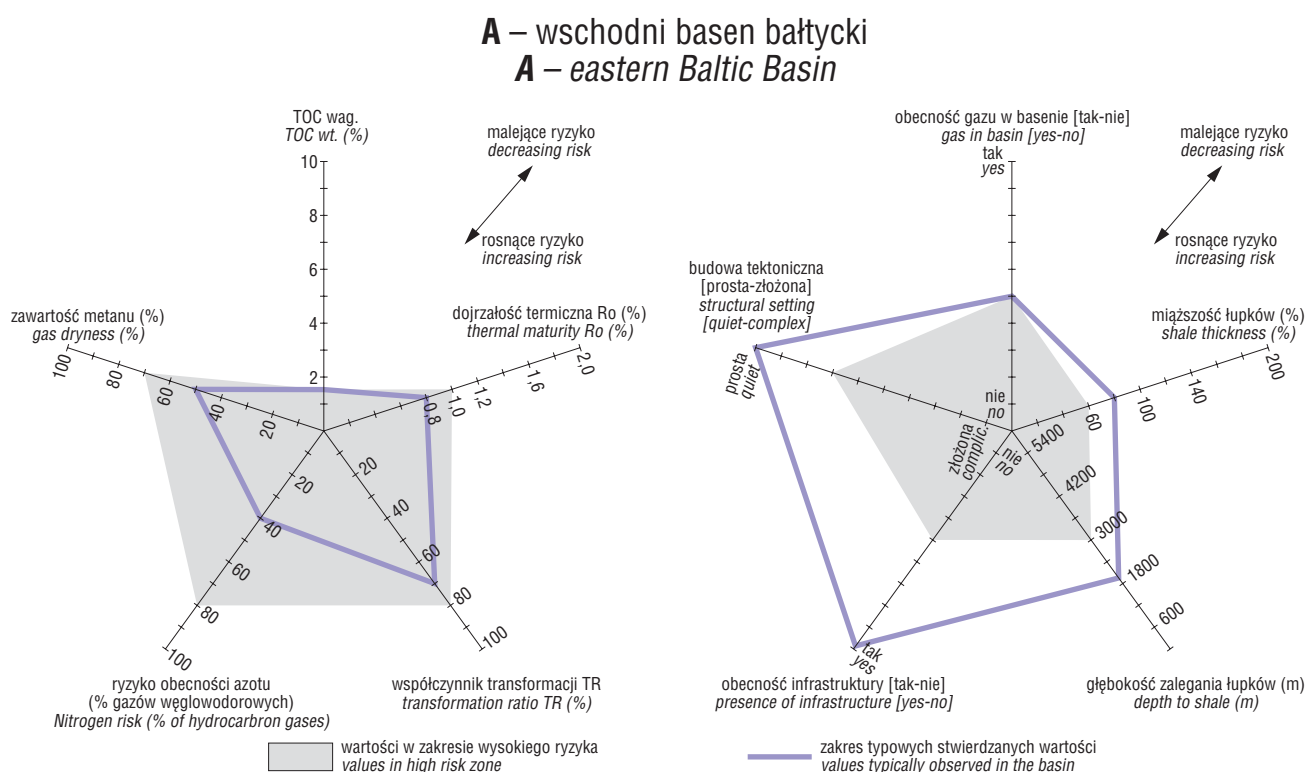
Wschodnie ograniczenie strefy o podwyższonym potencjale występowania akumulacji gazu ziemnego w łupkach stanowi obniżający się w tym kierunku stopień dojrzałości termicznej — ryc. 9 (Poprawa & Kiersnowski, 2008; Poprawa, 2009). We wschodniej części basenu bałtyckiego, obniżenia podlaskiego i regionu lubelskiego łupki dolnego paleozoiku znajdują się w zakresie okna generowania ropy, co oprócz pomiarów dojrzałości termicznej potwierdza dominacja objawów ropy naftowej (ryc. 12A). Ponadto w strefach tych może występować duża zawartość azotu w gazie, co zwiększa ryzyko ekonomiczne poszukiwań.

We wschodniej części obniżenia podlaskiego, jak również we wschodniej części basenu bałtyckiego w utworach zalegających na stosunkowo niedużych głębokościach, rzędu 1000–2000 m, stwierdzono dużą zawartość substancji organicznej, lokalnie sięgającą 15–20% (ryc. 12A). Mając na względzie to, że dojrzałość termiczna tych utworów sięga 0,8–1,1% Ro, można w oczekiwać występowania w nich nagromadzeń ropy naftowej w łupkach (*oil shale*). Dotyczy to zwłaszcza południowo-zachodniej części Litwy oraz północno-wschodniej części obniżenia podlaskiego. Obecność tego typu złóż stwierdzono w USA, np. w paleogeńskich łupkach Green River w basenie Great Green River, w dewońskich łupkach Bakken w basenie Williston oraz w paleoceńskich łupkach Waltman w basenie Wind River. Bardzo duże zasoby ropy naftowej w łupkach występują również w basenach sedimentacyjnych zachodniej Kanady. W Europie ropa naftowa występuje w łupkach kimerydu w Anglii (Devonshire), jak również w dolnojurajskich łupkach w basenie paryskim i ordowickich łupkach w Estonii. Jednak biorąc pod uwagę obecny poziom technologii wydobywczych oraz ceny ropy naftowej, eksploatacja tych złóż nie jest ekonomicznie uzasadniona.

Ku zachodowi dojrzałość termiczna łupków dolnego paleozoiku wzrasta, aczkolwiek w strefach, gdzie zawiera się ona w zakresie 1,1–1,3% Ro, należy oczekiwać trudności w ewentualnej produkcji gazu z łupków z uwagi na stosunkowo dużą zawartość gazów węglowodorowych wyższych niż metan, a także z uwagi na możliwość współwystępowania ropy naftowej z gazem ziemnym w łupkach.

W zachodnich częściach basenów na skłonie EEC, gdzie łupki dolnego paleozoiku osiągają bardzo wysoki stopień dojrzałości termicznej, próbki uzyskane z testów złożowych wykonywanych w konwencjonalnych utworach zbiornikowych kambru i niższego ordowiku wskazują na obecność suchego gazu (ryc. 12B). Strefę ekonomicznie uzasadnionej eksploatacji gazu limituje od zachodu zbyt duża głębokość zalegania łupków dolnego paleozoiku — ryc. 12B (Poprawa & Kiersnowski, 2008; Poprawa, 2009). Ponadto w utworach zachodniej części basenu bałtyckiego nie stwierdzono tak dużej zawartości TOC, jak w części wschodniej.

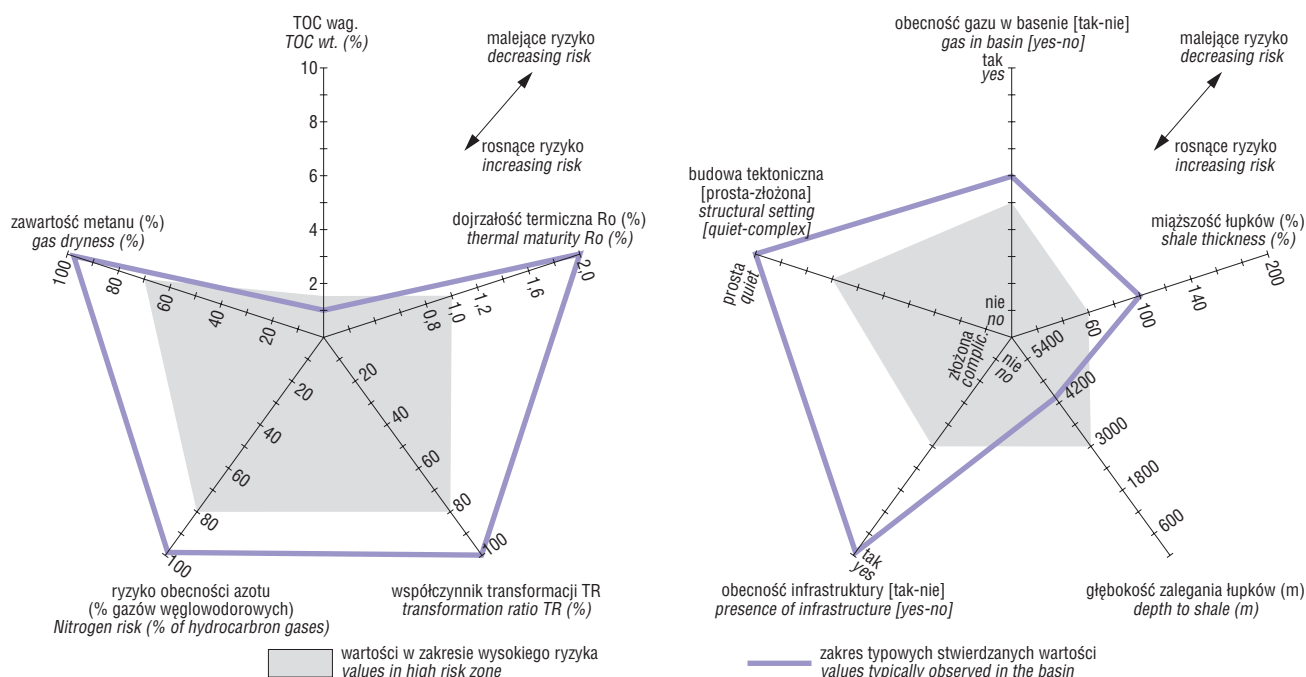
Pomiędzy strefami o zbyt niskim stopniu dojrzałości termicznej oraz zbyt dużej głębokości zalegania łupków dolnego paleozoiku znajduje się szeroki pas o podwyższonym potencjale poszukiwawczym — ryc. 13 (Poprawa & Kiersnowski, 2008; Poprawa, 2009). W strefie tej występują stosunkowo dużej miąższości interwały łupków o średniej zawartości substancji organicznej przekraczającej 1–2% TOC (ryc. 7, 10, 12C) i o dojrzałości termicznej odpowiedniej do generowania gazu (ryc. 9, 10), a analizy wyników testów złożowych wskazują, że w łupkach tych można ewentualnie oczekiwać występowania dobrej jakości suchego gazu o niewielkiej zawartości azotu (ryc. 12C). Głębokość zalegania tych łupków umożliwia prowadzenie



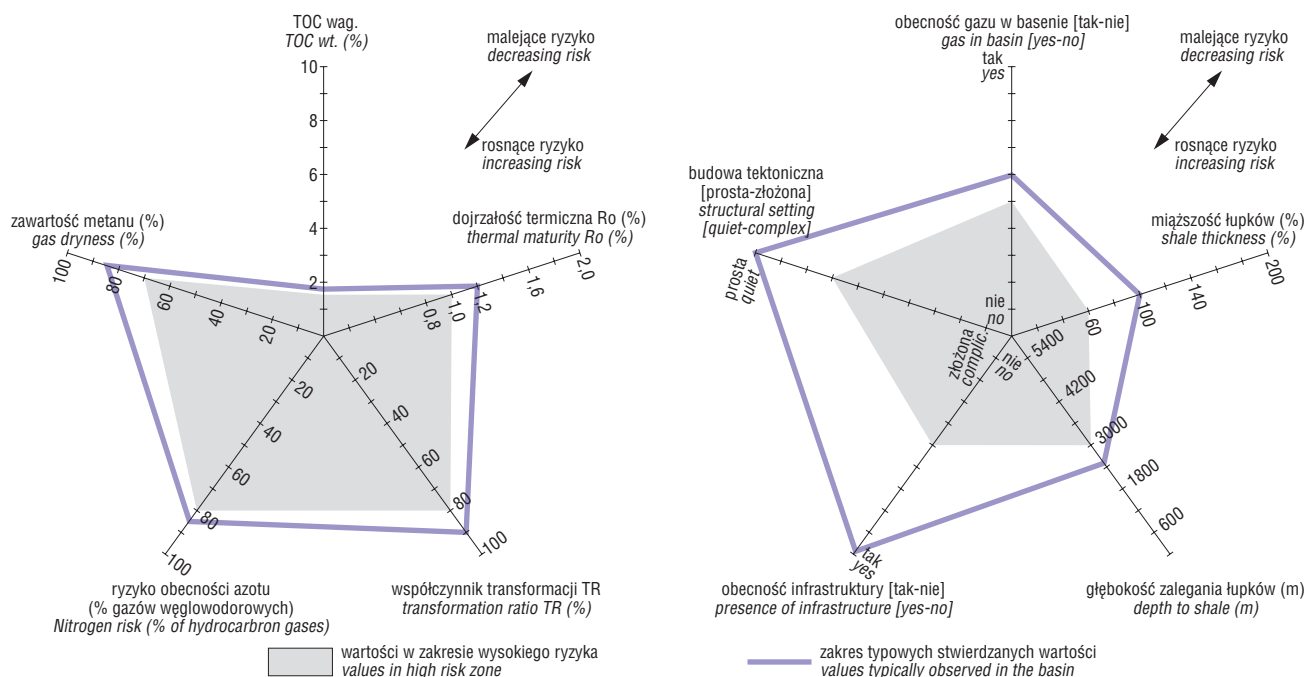
Ryc. 12. Określanie geologicznych i geochemicznych parametrów ryzyka poszukiwań złóż gazu ziemnego w łupkach. Przykłady z basenu bałtyckiego: **A** — z części wschodniej, **B** — z części zachodniej oraz **C** — z części środkowej

Fig. 12. Geological and geochemical shale gas exploration risk assessment. Examples for the Baltic Basin: **A** — eastern part, **B** — western part, and **C** — central part

B – zachodni basen bałtycki B – western Baltic Basin



C – centralny basen bałtycki C – central Baltic Basin



ekonomicznie uzasadnionej eksploatacji gazu ziemnego (ryc. 8, 10).

Na podstawie analizy obocznej zmienności głównych parametrów decydujących o możliwości występowania gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku można stwierdzić, że strefa o podwyższonym potencjale poszukiwawczym (ryc. 13) kontynuuje się na południową część szelfu bałtyckiego. Niemniej jednak, na obecnym poziomie technologii wydobywczych eksploatacja gazu ziemnego z łupków w obszarach szelfowych jest nieopłacalna,

ponieważ ceny wierceń w obszarach morskich są kilkakrotnie wyższe niż w obszarach lądowych. Dalej ku północy, na terytorium Szwecji utwory górnego ordowiku i syluru w wielu miejscach zostały zerodowane, a tam, gdzie się zachowały, występują w fałdach płytszego morza, niekiedy węglanowych, charakteryzujących się mniejszą zawartością substancji organicznej oraz niższym stopniem dojrzałości termicznej. Z powodu zmian facyjnych niekorzystnych z punktu widzenia zawartości substancji organicznej oraz zmniejszającej się dojrzałości termicznej omawiany sys-

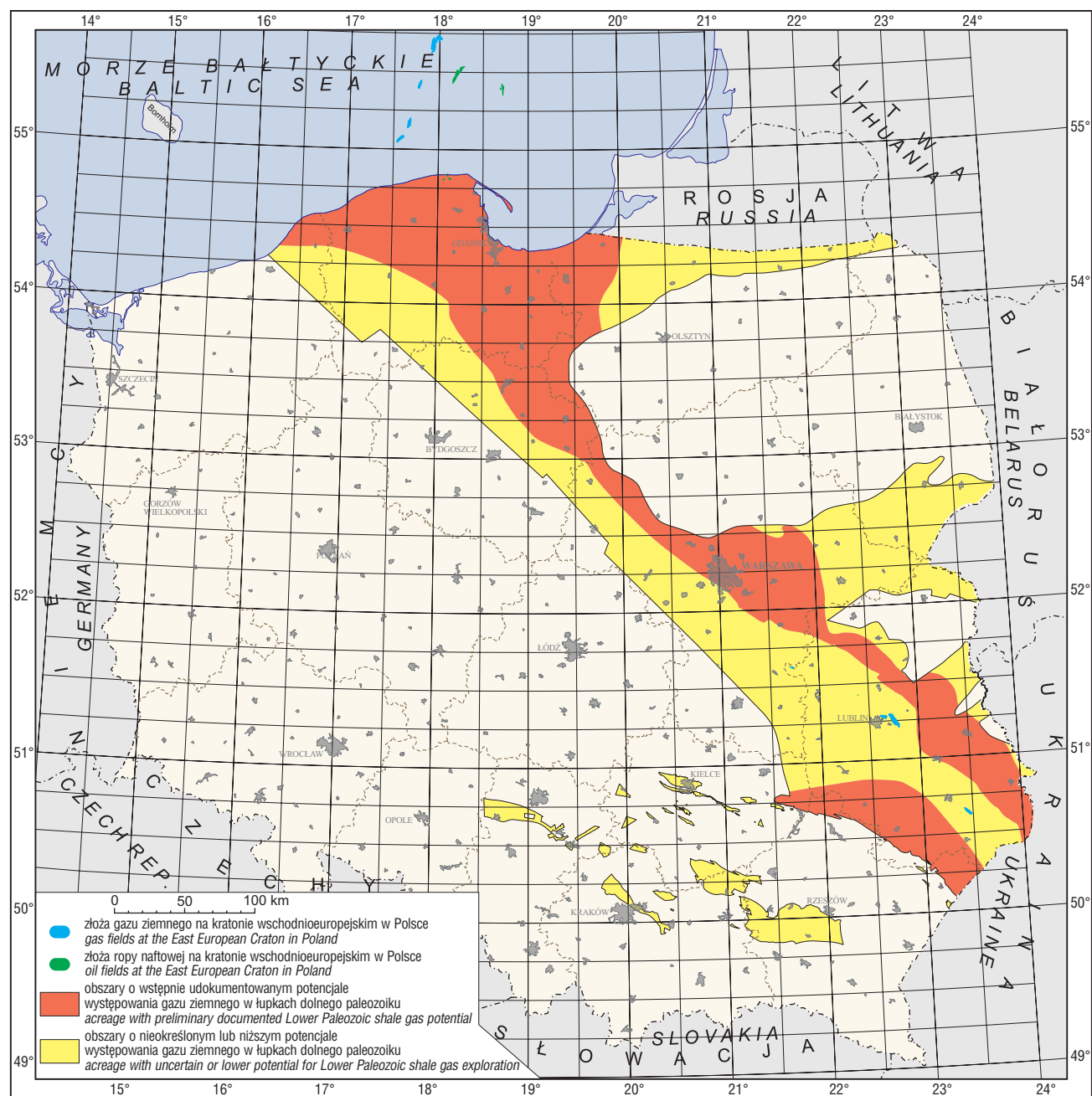
tem naftowy przypuszczalnie nie kontynuuje się we wschodniej części basenu bałtyckiego oraz na wschód od basenu lubelsko-podlaskiego.

Można zatem przyjąć, że postulowany system węglowodorowy z gazem ziemnym w łupkach dolnego paleozoiku nie kontynuuje się poza terytorium Polski. Wyjątkiem może być przygraniczna część Ukrainy na północny zachód od Lwowa (ryc. 1). Także na niewielkich obszarach w południowo-zachodniej Litwie dojrzałość łupków dolnego paleozoiku może zbliżać się do początkowego zakresu okna generowania gazu ziemnego.

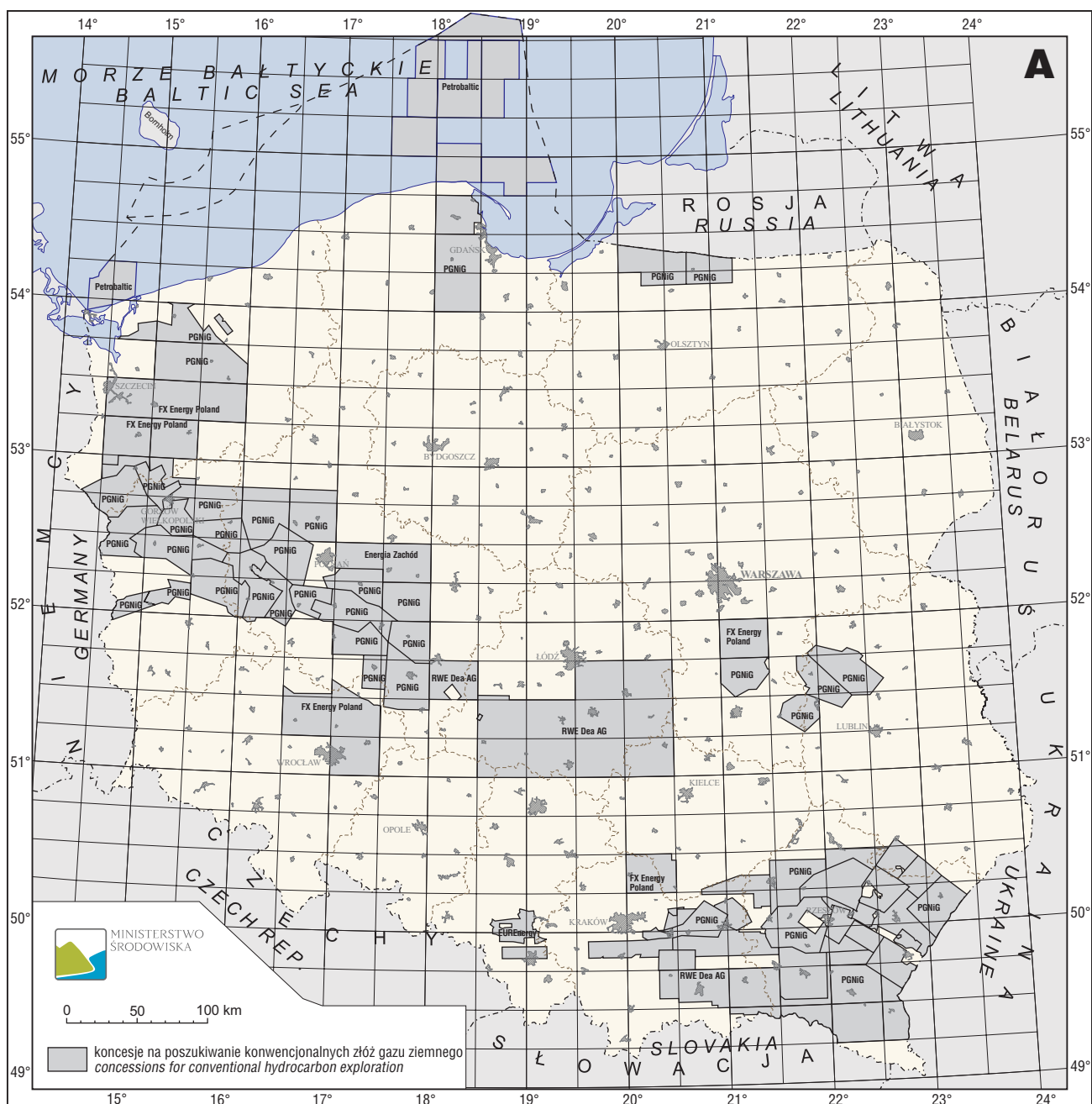
Zbliżone facjalnie łupki górnego ordowiku i dolnego syluru występują również w bloku małopolskim (ryc. 1). Potencjał występowania w nich akumulacji gazu ziemnego jest jednak mniejszy niż na kratonie wschodnioeuropejskim, gdyż na skutek intensywnej erozji zachowały się one

jedynie w formie izolowanych płatów (ryc. 1, 13). Ponadto w poszczególnych profilach górnego ordowiku i dolnego syluru bloku małopolskiego stwierdzono liczniejsze hiatusy niż na kratonie wschodnioeuropejskim, a także mniejszą zawartość substancji organicznej. Ponadto na znacznych obszarach bloku małopolskiego łupki dolnego paleozoiku nie są wystarczająco dojrzałe termicznie do generowania gazu ziemnego.

Największy płat utworów dolnego paleozoiku zachował się w rejonie Pilzno–Zagorzyce–Nawsie–Hermanowa (na południe od linii Rzeszów–Tarnów; ryc. 13). W płacie tym łupki są pogrzebane na głębokości 3000–6000 m p.p.t., mają podwyższoną zawartość substancji organicznej i dojrzałość termiczną w zakresie 0,9–1,3% Ro. Przypuszczalnie stanowią one skałę macierzystą złoża Nosówka, zawierającego ropę naftową w węglanach dolnego karbonu. Rów-



Ryc. 13. Obszar występowania łupków dolnego paleozoiku potencjalnie zawierających niekonwencjonalny gaz ziemny
Fig. 13. Lateral extent of the Lower Palaeozoic shale, potentially accumulating shale gas



Ryc. 14. Mapa koncesji na poszukiwanie węglowodorów w Polsce (opracowanie: R. Bońda & D. Siekiera; źródło: Ministerstwo Środowiska, Departament Geologii i Koncesji Geologicznych): **A** — stan w pierwszej połowie 2007 r.; **B** — stan w grudniu 2009 r.

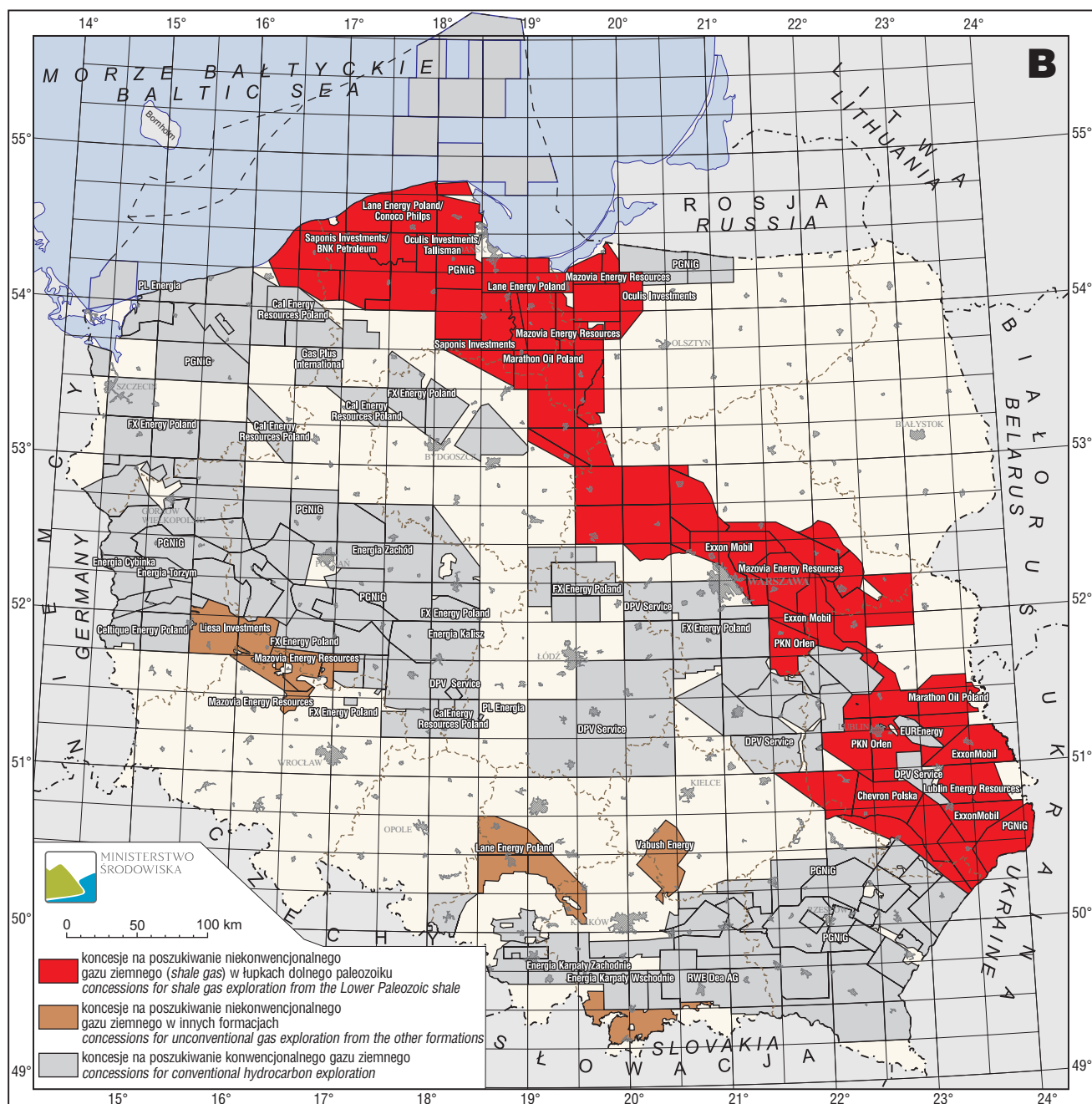
Fig. 14. Map of concessions for hydrocarbon exploration in Poland (prepared by: R. Bońda & D. Siekiera; source: Polish Ministry of Environment, Department of Geology and Geological Concessions): **A** — status for early 2007; **B** — status for December 2009

niez w rejonie Woli Obszańskiej–Uszkowiec (wschodnia część bloku małopolskiego) wzbogacone w substancję organiczną łupki syluru mogą stanowić konwencjonalną skałę macierzystą.

Zaletą utworów dolnopaleozoicznych zachodniej części kratonu wschodnioeuropejskiego jest ich duże oboczne rozprzestrzenienie (ryc. 13). Eksploatacji gazu ziemnego z łupków sprzyja również stosunkowo prosta budowa tektoniczna tego obszaru, zwłaszcza basenu bałtyckiego i obniżenia podlaskiego (ryc. 12C). Istotne znaczenie dla ewentualnej eksploatacji gazu z sylurskich łupków będzie mieć rozpoznanie systemu naturalnych spękań tektonicznych tych skał, który może zwiększyć strefę drenażu gazu

(por. Gale i in., 2007). Stosunkowo małe zagęszczenie uskoków (np. Domżański i in., 2004; Poprawa i in., 2006) ułatwia szczelinowanie i sprawia, że nie występuje ryzyko przejmowania przez uskoki energii szczelinowania. Nieliczne obecnie dane wskazują również na dużą zawartość krzemionki w tych utworach (Krzemiński & Poprawa, 2006), która ułatwia penetracyjne szczelinowanie górotworu.

Możliwość występowania gazu ziemnego w łupkach dolnopaleozoicznego basenu sedymentacyjnego na zachodnim skłonie EEC w Polsce została w pełni dostrzeżona przez liczne zachodnie firmy specjalizujące się w tym sektorze przemysłu naftowego. Ich zainteresowanie uczyniło



obecnie z Polski najaktywniejszy i najbardziej konkurencyjny rynek poszukiwań złóż gazu ziemnego w łupkach w Europie. Intensywność początkowych prac rozpoznawczych prowadzonych w Polsce ilustruje postęp w przyznawaniu koncesji na poszukiwania gazu ziemnego w łupkach. Do pierwszej połowy 2007 roku obszar o podwyższonym potencjale występowania gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku (ryc. 13) pozostawał niemal w całości poza zainteresowaniem przemysłu naftowego i nie udzielono w Polsce żadnych koncesji na poszukiwanie i rozpoznawanie niekonwencjonalnych złóż węglowodorów (ryc. 14A). Natomiast już pod koniec 2009 roku możliwości pozyskania koncesji poszukiwawczych w tym obszarze zostały niemal w pełni wyczerpane (ryc. 14B). Należy podkreślić, że na podstawie obecnej, ograniczonej liczby danych potencjał występowania gazu w łupkach nie może być w pełni wiarygodnie określony. Jednak tak duże zainteresowanie łupkami dolnego paleozoiku w Polsce, m.in. gigantów

przemysłu naftowego, stwarza gwarancję, że wkrótce możliwości występowania złóż gazu ziemnego zostaną dobrze rozpoznane.

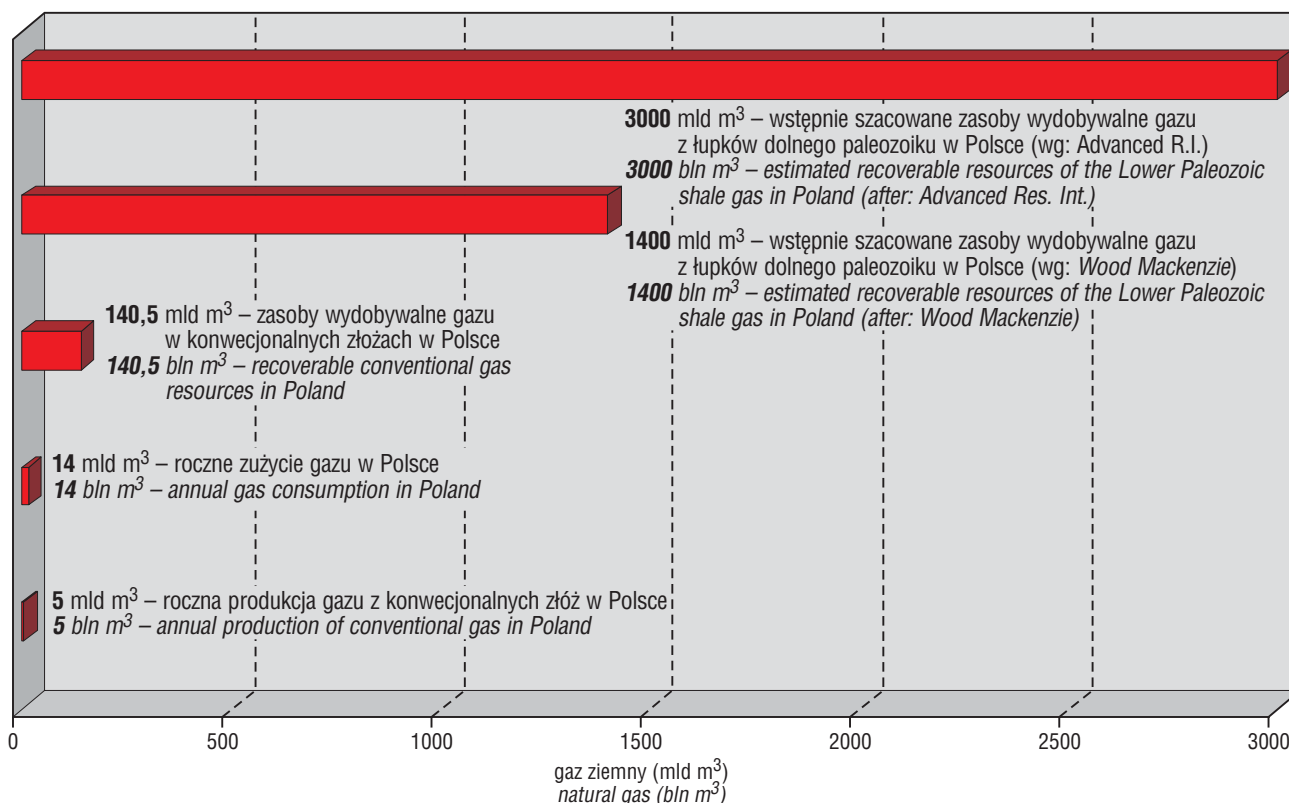
Potencjalne zasoby gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku

To, czy w Polsce występują akumulacje gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku, zostanie stwierdzone w ciągu najbliższych 2–3 lat, po uzyskaniu wyników z co najmniej kilku wierceń poszukiwawczych w różnych częściach basenu i wykonaniu odpowiednich zabiegów technicznych. Pierwszy otwór poszukiwawczy, wiercony przez Lane/ConocoPhillips na wyniesieniu Łeby, zostanie ukończony ok. połowy 2010 r.

W przypadku pozytywnych rezultatów pierwszych wierceń poszukiwawczych, w celu wiarygodnego określenia zasobów gazu ziemnego w łupkach kratonu wschod-

nioeuropejskiego konieczne będzie odwiercenie kolejnych kilkunastu bądź kilkudziesięciu otworów, co potrwa następnych kilka lat. Natomiast zbudowanie w pełni rozwiniętego systemu produkcji gazu z takich złóż zajmie zapewne kilkanaście lat i będzie wymagać odwiercenia otworów eksploatacyjnych liczonych w tysiącach. Niemniej jednak są podejmowane próby wstępnego określenia zasobów gazu, choć z powodu braku wszystkich koniecz-

nego w łupkach. Wyniki tych szacunków dają wyobrażenie o znaczeniu ewentualnych złóż gazu ziemnego w łupkach dla rynku gazowego w Polsce i dla ekonomii kraju. Dla porównania zasoby konwencjonalnych złóż gazu ziemnego w Polsce wynoszą około 140,5 mld m³, roczne krajowe zużycie gazu ziemnego sięga obecnie około 14 mld m³, natomiast roczna produkcja z konwencjonalnych złóż w Polsce wynosi około 5 mld m³ (ryc. 15).



Ryc. 15. Zestawienie potencjalnych zasobów wydobywalnych gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku na kratonie wschodnioeuropejskim, wstępnie oszacowanych przez *Wood Mackenzie* oraz *Advanced Resources International*, z zasobami wydobywalnymi gazu w konwencjonalnych złożach w Polsce, rocznym zużyciem gazu w Polsce oraz roczną produkcją gazu z konwencjonalnych złóż w Polsce. Należy podkreślić, że zasoby gazu ziemnego w łupkach są obecnie określane na podstawie niewystarczającej ilości dostępnych danych i mogą znacząco odbiegać od rzeczywistych

Fig. 15. Compilation of potentially recoverable resources of Lower Paleozoic shale gas in Poland, according to preliminary estimations by *Wood Mackenzie* and *Advanced Resources International*, and recoverable conventional gas resources, annual production of conventional gas and annual gas consumption in Poland. It should be noted that these shale gas resources are estimated on the basis of still insufficient amount of data and thus they may differ substantially for true ones

nych danych wyniki tych oszacowań mogą znacząco odbiegać od rzeczywistych i należy je traktować raczej jako określenie zakresu możliwych wielkości zasobów.

Według danych zamieszczonych w raporcie firmy konsultingowej *Advanced Resources International*, w łupkach dolnego paleozoiku polskiej części kratonu wschodnioeuropejskiego zasoby wydobywalne gazu ziemnego sięgają do 3000 mld m³ (ryc. 15). Z kolei eksperci firmy *Wood Mackenzie* zasoby wydobywalne tej formacji ocenili na 1400 mld m³. Według obu tych prognoz nie jest wykluczone, że łupki dolnego paleozoiku w Polsce zawierają złoża gazu klasyfikowane jako gigantyczne i choć wiarygodność tych obliczeń jest ograniczona, to jednak prognozy te przyczyniły się do tego, że dolnopaleozoiczny basen na kratonie wschodnioeuropejskim stał się jednym z najbardziej atrakcyjnych w Europie obszarów poszukiwań gazu ziem-

Elementy ryzyka poszukiwań gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku

Chociaż występujące w polskiej części kratonu wschodnioeuropejskiego łupki dolnego paleozoiku są przedmiotem dużego zainteresowania przemysłu naftowego i w najbliższych latach w poszukiwaniu w nich złóż gazu ziemnego zostaną zainwestowane ogromne środki finansowe, to jednak należy podkreślić, że niektóre elementy geologiczno-złożowej charakterystyki tej formacji świadczą na rzecz podwyższonego ryzyka poszukiwawczego.

W porównaniu z klasycznymi formacjami łupków gazonośnych na świecie, np. Barnett Shale w Stanach Zjednoczonych (m.in. Jarvie i in., 2007; Pollastro, 2007), łupki dolnego paleozoiku w Polsce charakteryzują się nieco

mniejszą średnią zawartością substancji organicznej. Z punktu widzenia geochemii organicznej nie bez znaczenia jest również to, że są one starsze od łupków gazonośnych w najlepiej rozpoznanych basenach, które w większości są wieku dewońskiego lub karbońskiego, a niekiedy młodsze. Ponadto w tych strefach EEC, w których łupki dolnopaleozoiczne są współcześnie pogrążone do głębokości 3000–3500 m, stopień ich dojrzałości termicznej jest niższy od stopnia dojrzałości termicznej łupków Barnett.

Typową cechą basenów zawierających złoża gazu ziemnego w łupkach jest obecność w nich również konwencjonalnych złóż gazu ziemnego lub ropy naftowej, gdyż formacje łupków gazonośnych są jednocześnie wysokiej jakości konwencjonalnymi skałami macierzystymi.

W polskiej części zachodniego skłonu EEC uwagę zwraca to, że konwencjonalne złoża węglowodorów są niewielkie i nieliczne (ryc. 13). W basenie bałtyckim złoża te występują w obrębie kompleksu dolnopaleozoicznego, tj. w piaskowcach środkowego kambru (Strzetelski, 1979; Górecki i in., 1992; Stolarczyk i in., 1997, 2004), a w regionie lubelskim w utworach dewonu i karbonu (Karnowski, 1993). Niemniej jednak również złoża ropy naftowej w regionie lubelskim były zasilane przez węglowodory pochodzące z sylurskich skał macierzystych (Klimuszek, 2002).

Brak konwencjonalnych złóż węglowodorów w obrębie kompleksu dolnopaleozoicznego można w pewnym stopniu wytłumaczyć brakiem formacji zbiornikowych w nadkładzie macierzystych łupków górnego ordowiku i dolnego syluru (ryc. 2). Natomiast na Litwie, a także w Gotlandii i na Łotwie oboczne zmiany facjalne w brzeżnej części basenu wyrażają się między innymi pojawianiem się w profilu utworów górnego ordowiku i syluru budowli węglanowych, które stanowią formacje zbiornikowe i zawierają niewielkie złoża ropy naftowej (Kanev i in., 1994). Drugim powodem braku konwencjonalnych złóż węglowodorów w tym obszarze mogą być bardzo słabe właściwości zbiornikowe utworów kambryjskich, związane przede wszystkim z ich cementacją kwarcową (Sikorska, 1998; Stolarczyk i in., 2004; Molenaar i in., 2007).

W wielu otworach na kratonie wschodnioeuropejskim stwierdzano objawy gazu ziemnego w utworach sylurskich. Jednak ilość i intensywność objawów jest stosunkowo mała w porównaniu do objawów opisywanych z klasycznych basenów z gazem w łupkach.

Efektywnej produkcji gazu ziemnego z łupków sprzyja występowanie w obrębie takiego kompleksu nadcisnień. Do tej pory w obrębie łupków dolnopaleozoicznych kratonu wschodnioeuropejskiego nie zostały wykonane testy złożowe, toteż ciśnienia w tym kompleksie są słabo poznane. Niemniej w trakcie wierceń nie rejestrowano w utworach ordowiku i syluru oddziaływania nadcisnień na płuczkę wiertniczą. Także w lepiej rozpoznanych utworach kambru poniżej profilu łupków nie stwierdzono znaczących nadcisnień. Elementem ekonomicznego ryzyka związanego z poszukiwaniami są też przesłanki na rzecz występowania, zwłaszcza we wschodniej części basenu, podwyższonej zawartości azotu w konwencjonalnych skałach zbiornikowych. Geneza azotu, jak również jego relacje do łupków dolnopaleozoicznych, pozostają jednak na tym etapie rozpoznania niejasne.

Wnioski

Dolnopaleozoiczny basen sedymentacyjny na zachodnim skłonie EEC (ryc. 1) jest obecnie jednym z najbardziej atrakcyjnych obszarów poszukiwań złóż gazu ziemnego w łupkach w Europie. Główną formację potencjalnie zbiornikową stanowią w nim przede wszystkim łupki górnego ordowiku lub też dolnego syluru, a lokalnie, w północnej części basenu bałtyckiego, również łupki górnego ordowiku i tremadoku (ryc. 2, 3). Pod względem eksploatacji gazu ziemnego z łupków zaletą tego basenu jest duże oboczne rozprzestrzenienie łupków (ryc. 1, 13) oraz stosunkowo prosta tektonika, zwłaszcza basenu bałtyckiego i obniżenia podlaskiego. Nieco bardziej skomplikowana jest budowa geologiczna regionu lubelskiego, gdzie kompleks utworów dolnopaleozoicznych jest zaangażowany przez późnofamerską do wczesnowizeńskiej tektonikę blokową.

Charakterystyczną cechą utworów dolnopaleozoicznych w basenach sedymentacyjnych na zachodnim skłonie EEC jest wyraźny diachronizm w pojawianiu się w nich pakietów ilasto-mułowcowych o dużej zawartości substancji organicznej. Z północnego zachodu ku południowemu wschodowi interwały najbogatsze w substancję organiczną występują w poszczególnych profilach w coraz młodszych osadach, począwszy od górnego kambru i tremadoku oraz górnego lanwiru i karadoku na wyniesieniu Łeby, poprzez landower w środkowej części basenu bałtyckiego, środkowej części obniżenia podlaskiego oraz północno-zachodniej części regionu lubelskiego, aż po wenlok we wschodniej części basenu bałtyckiego i południowo-wschodniej części regionu lubelskiego (ryc. 6). Toteż w różnych częściach zachodniego skłonu EEC poszukiwania gazu ziemnego w łupkach są prowadzone w różnych formacjach. Substancja organiczna łupków dolnego paleozoiku cechuje się kerogelem II typu.

Łupki górnego kambru i tremadoku, występujące jedynie w obszarze morskiego sektora basenu bałtyckiego oraz w północnej części jego lądowego sektora, charakteryzują się bardzo dużą zawartością substancji organicznej, aczkolwiek małą miąższością i stanowią jedynie podrzędny komponent kompleksu łupków potencjalnie gazonośnych. Łupki karadoku spełniają kryteria występowania w nich gazu ziemnego głównie w rejonie wyniesienia Łeby oraz w podłożu niecki płocko-warszawskiej i w zachodniej części obniżenia podlaskiego. Utwory aszgilu kryteria takie spełniają jedynie w rejonie wyniesienia Łeby. Osady landoweru stanowią podstawową formację potencjalnie zawierającą gaz w łupkach na całym obszarze basenów sedymentacyjnych na zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego, za wyjątkiem środkowej i południowej części regionu lubelskiego. Wynika to z tego, że utwory landoweru cechuje duża zawartość substancji organicznej, zwłaszcza w niższej części piętra, jak również stosunkowo duża miąższość. Duża miąższość łupków wenloku, pomimo ogólnie mniejszej zawartości TOC niż w utworach landoweru, decyduje o istotnym znaczeniu utworów tego piętra dla poszukiwań gazu w łupkach. W środkowej i południowej części regionu lubelskiego jest to główna formacja potencjalnie zawierająca gaz ziemny w łupkach.

Współczesna, laboratoryjnie mierzona zawartość substancji organicznej w skale jest mniejsza od zawartości pierwotnej. Różnica między współczesną a pierwotną

zawartością TOC wzrasta wraz z dojrzałością termiczną utworów. Biorąc pod uwagę II typ kerogenu, można przyjąć, że w strefach o dojrzałości odpowiadającej oknu generowania gazu pierwotna zawartość TOC była co najmniej o połowę większa od współczesnej.

W obszarze kratonu wschodnioeuropejskiego stwierdzono obecność strefy o przebiegu NW-SE o podwyższonym potencjale poszukiwawczym (ryc. 13). Jest to strefa, w której utwory o dojrzałości termicznej odpowiednio dużej do generowania gazu ziemnego w łupkach występują na głębokości wystarczająco małej do prowadzenia ekonomicznie uzasadnionej eksploatacji gazu (Poprawa & Kiersnowski, 2008; Poprawa, 2009). W strefie tej występują stosunkowo miększe pakiety łupków o dużej zawartości substancji organicznej (ryc. 7, 10, 12c), a wyniki testów złożowych wskazują, że w osadach tych można ewentualnie oczekiwać występowania dobrej jakości suchego gazu o niewielkiej zawartości azotu (ryc. 12c). O możliwej obecności gazu ziemnego w tych osadach pośrednio świadczą również jego objawy. Wstępne przesłanki wskazują także, że zawartość krzemionki w tych łupkach jest stosunkowo duża — ryc. 4 (Krzeniński & Poprawa, 2006).

W strefach o dojrzałości termicznej w zakresie 0,8–1,1% Ro i dużej zawartości substancji organicznej istnieją perspektywy występowania złóż ropy naftowej w łupkach (*oil shale*). Dotyczy to głównie basenu bałtyckiego w południowo-zachodniej części Litwy oraz północno-wschodniej części obniżenia podlaskiego.

Na podstawie obecnie dostępnych danych nie jest możliwe wiarygodne oszacowanie potencjalnych zasobów gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku na kratonie wschodnioeuropejskim. Wstępnie wykonywane szacunkowe obliczenia wskazują jednak na możliwość występowania złóż o zasobach klasyfikowanych jako gigantyczne (1400–3000 mld m³ zasobów wydobywalnych; ryc. 15). Dla porównania zasoby konwencjonalnych złóż gazu ziemnego w Polsce wynoszą około 140,5 mld m³, a roczne krajowe zużycie gazu ziemnego — około 14 mld m³.

Warto jednak zwrócić uwagę na to, że na obecnym poziomie rozpoznania łupków dolnego paleozoiku na kratonie wschodnioeuropejskim w Polsce stwierdzono kilka cech tego kompleksu, które podwyższają ryzyko poszukiwań złóż gazu ziemnego. Najważniejszą z nich jest niewielka liczba konwencjonalnych złóż węglowodorów w kompleksie dolnopaleozoicznym (ryc. 13) oraz ich niewielkie zasoby. Ilość i intensywność objawów gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku jest stosunkowo mała. Nie obserwuje się również przesłanek na rzecz występowania w łupkach dolnego paleozoiku nadciśnień. W porównaniu do klasycznych formacji łupków gazonośnych na świecie, jak np. Barnett Shale, charakteryzują się one mniejszą średnią zawartością substancji organicznej. W strefach o optymalnej głębokości pograżenia stopień dojrzałości termicznej jest niższy od stopnia dojrzałości łupków Barnett. We wschodniej części dolnopaleozoicznego basenu na zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego, w której występują łupki o niskim stopniu dojrzałości termicznej, stwierdzono ponadto ryzyko występowania dużej zawartości azotu w gazie.

Literatura

- AREŃ B., JAWOROWSKI K., JUSKOWIAKOWA M., LENDZION K. & WICHROWSKA M. 1979 — The Vendian and Lower Cambrian in the Polish part of the East European platform. *Biul. Inst. Geol.*, 318: 43–57.
- AREŃ B. & DEPOWSKI S. 1965 — Przejawy gazu w eokambrze obniżenia podlaskiego. *Kwart. Geol.*, 9: 17–25.
- BHARATI S., LARTER S. & HORSFIELD B. 1992 — The unusual source potential of the Cambrian Alum Shale in Scandinavia as determined by quantitative pyrolysis methods. [W:] Spencer A.M. (red.), *Generation, Accumulation and Production of Europe's hydrocarbon II*. Spec. Publ. EAPG, Springer: 103–110.
- BOJARSKI L. 1996 — Atlas hydrochemiczny i hydrodynamiczny paleozoiku i mezozoiku oraz ascenzyjnego zasolenia wód podziemnych na Niżu Polskim. Państw. Inst. Geol.
- BOTOR D., KOTARBA M. & KOSAKOWSKI P. 2002 — Petroleum generation in the Carboniferous strata of the Lublin Trough (Poland): an integrated geochemical and numerical modelling approach. *Org. Geochem.*, 33: 461–476.
- BUNIAK A., KWOLEK K., KIERSNOWSKI H. & KUBERSKA M. 2008 — Perspektywy odkrycia złóż gazu ziemnego (typu *tight gas*) w piaskowcach eolicznych w basenie górnego czerwonego spagowca. *Pr. Inst. Gór. Naft. i Gaz.*, 150: 61–66.
- BUNIAK A., KUBERSKA M. & KIERSNOWSKI H. 2009 — Petrograficzno-petrofizyczna charakterystyka piaskowców eolicznych strefy Siekierki–Winna Góra (koło Poznania) w aspekcie poszukiwań złóż gazu zamkniętego w osadach czerwonego spagowca. *Prz. Geol.*, 57: 328–334.
- DEPOWSKI S. 1962 — Znaczenie bezpośrednich śladów ropy naftowej i gazu ziemnego dla oceny perspektyw ropo- i gazonośności obszarów poszukiwawczych. *Wiad. Naftowe*, 8(10): 217–219.
- DEPOWSKI S. & KRÓLICKA J. 1964 — Ślady ropy naftowej i gazu ziemnego na Niżu Polskim oraz ich znaczenie dla poszukiwań naftowych. *Kwart. Geol.*, 8: 171–188.
- DOMŻALSKI J., GÓRECKI W., MAZUREK A., MYŚKO A., STRZETELSKI W. & SZAMAŁEK K. 2004 — The prospects for petroleum exploration in the eastern sector of Southern Baltic as revealed by sea bottom geochemical survey correlated with seismic data. *Prz. Geol.*, 52(8/2): 792–799.
- DROP K. & KOZŁOWSKI M. 2010 — Rola geofizyki wiertniczej w określeniu zasobów gazu ziemnego w łupkach. *Prz. Geol.*, 58: 263–265.
- GALE J.F.W., REED R.M. & HOLDER J. 2007 — Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments. *AAPG Bull.*, 91(4): 603–622.
- GÓRECKI W., LAPINSKAS P., LASHKOV E., LASHKOVA L., REICHER B., SAKALAUSKAS K. & STRZETELSKI W. 1992 — Petroleum perspectives of the Baltic Syncline. *Polish J. Min. Res.*, 1: 65–88.
- GROTEK I. 2006 — Dojrzałość termiczna materii organicznej z utworów pokrywy osadowej pomorskiego odcinka TESZ, basenu bałtyckiego oraz obszarów przyległych. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 186: 253–270.
- HADRO J. 2010 — Strategia poszukiwań złóż gazu ziemnego w łupkach. *Prz. Geol.*, 58: 250–258.
- JARVIE D. 2009 — Using geochemistry to assess unconventional shale resources plays. Materiały: AAPG Winter Education Program, 12–13.02.2009, Houston, USA.
- JARVIE D.M., HILL R.J., RUBLE T.E. & POLLASTRO R.M. 2007 — Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG Bull.*, 91(4): 475–499.
- JAWOROWSKI K. 1971 — Sedimentary structures of the Upper Silurian siltstones in the Polish Lowlands. *Acta Geol. Pol.*, 21(4): 519–571.
- JAWOROWSKI K. 1997 — Warunki depozycji ciał piaszczystych kambriu dolnego i środkowego w polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 377: 1–118.
- JAWOROWSKI K. 2000 — Facies analysis of the Silurian shale-siltstone succession in Pomerania (northern Poland). *Geol. Quart.*, 44(3): 297–316.
- JAWOROWSKI K. & MODLIŃSKI Z. 1968 — Dolnosylurskie wapienie gruzłowe w północno-wschodniej Polsce. *Geol. Quart.*, 12(3): 493–506.
- JUSKOWIAKOWA M. 1971 — Bazalty wschodniej Polski. *Biul. Inst. Geol.*, 245: 173–252.
- KADŪNIENĖ E. 2001 — Organic matter in the oil source rocks. [W:] Zdanavičiūtė O. & Sakalauskas K. (red.), *Petroleum Geology of Lithuania and Southeastern Baltic*. Institute of Geology, Vilnius: 96–118.

- KANEV S., MARGULIS L., BOJESSEN-KOEFOED J.A., WEIL W.A., MERTA H. & ZDANAVIČIŪTĖ O. 1994 — Oils and hydrocarbon source rocks of the Baltic syncline. *Oil and Gas J.*, 92: 69–73.
- KARNKOWSKI P. 1993 — Złoża gazu ziemnego i ropy naftowej w Polsce. Tom 1 — Niż Polski. Tow. Geosynopt. GEOS AGH, Kraków.
- KARNKOWSKI P.H. 2003a — Karboński etap rozwoju basenu lubelskiego jako główne stadium generacji węglowodorów w utworach młodszego paleozoiku Lubelszczyzny — wyniki modelowań geologicznych (PetroMod). *Prz. Geol.*, 51(9), 783–790.
- KARNKOWSKI P.H. 2003b — Modelowanie warunków generacji węglowodorów w utworach starszego paleozoiku na obszarze zachodniej części basenu bałtyckiego. *Prz. Geol.*, 51: 756–763.
- KLIMUSZKO E. 2002 — Utwory syluru południowo-wschodniej Polski jako skały potencjalnie macierzyste dla dewońskich rop naftowych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 402: 75–100.
- KOTAS A. (ed.) 1994 — Coal-bed Methane Potential of the Upper Silesian Coal Basin, Poland. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 142.
- KRZEMIŃSKI L. & POPRAWA P. 2006 — Geochemia klastycznych osadów ordowiku i syluru ze strefy Koszalin–Chojnice i zachodniej części basenu bałtyckiego. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 186: 123–147.
- LENDZION K. 1983 — Rozwój kambryjskich osadów platformowych Polski. *Pr. Inst. Geol.*, 105: 1–55.
- LEWAN M.D. & BUCHARDT B. 1989 — Irradiation of organic matter by uranium decay in the Alum Shale, Sweden. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 1307–1322.
- LIS P. 2010 — Drobnopiezistyczne osady górnoordowicko-dolnosylurskie basenu podlasko-lubelskiego. *Prz. Geol.*, 58: 259–262.
- MAJOROWICZ J.A., MAREK S. & ZNOSKO J. 1984 — Paleogeothermal gradients by vitrinite reflectance data and their relation to the present geothermal gradient patterns of the Polish Lowland. *Tectonophysics*, 103: 141–156.
- MODLIŃSKI Z. 1982 — Rozwój litofacyjny i paleotektoniczny ordowiku na obszarze platformy prekambryjskiej w Polsce. *Pr. Inst. Geol.*, 52: 1–65.
- MODLIŃSKI Z. & SZYMAŃSKI B. 1997 — The Ordovician lithostratigraphy of the Peribaltic Depression (NE Poland). *Geol. Quart.*, 41(3): 273–288.
- 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., NEHRING-LEFELD M. & RYBA J. 1994 — The Early Palaeozoic Complex in the Polish Part of the Baltic Sea. *Z. Geol. Wiss.*, 22(1/2): 227–234.
- MODLIŃSKI Z., SZYMAŃSKI B. & TELLER L. 2006 — Litostratygrafia syluru polskiej części obniżenia perybałtyckiego — część lądowa i morska (N Polska). *Prz. Geol.*, 54: 787–796.
- MOLENAAR N., ČYTĖNĖ J. & ŠLIAUPA S. 2007 — Quartz cementation mechanisms and porosity variation in Baltic Cambrian sandstones. *Sediment. Geol.*, 195: 135–159.
- NEHRING-LEFELD M., MODLIŃSKI Z. & SWADOWSKA E. 1997 — Thermal evolution of the Ordovician in the western margin of the East-European Platform: CAI and Ro data. *Geol. Quart.*, 41(2): 129–138.
- PODHALAŃSKA T. & MODLIŃSKI Z. 2006 — Stratygrafia i wykształcenie facjalne osadów ordowiku i syluru strefy Koszalin–Chojnice; podobieństwa i różnice z obszarami zachodniej krawędzi kratonu wschodnioeuropejskiego i Rugii. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 186: 39–78.
- POLLASTRO R.M. 2007 — Total petroleum system assessment of undiscovered resources in the giant Barnett Shale continuous (unconventional) gas accumulation, Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bull.*, 91(4): 551–578.
- POPRAWA P. 2006a — Neoproterozoiczny rozpad superkontynentu Rodinii/Pannotii — zapis w rozwoju basenów osadowych na zachodnim skłonie Bałtyki. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 186: 165–188.
- POPRAWA P. 2006b — Rozwój kaledońskiej strefy kolizji wzdłuż zachodniej krawędzi Bałtyki oraz jej relacje do basenu przedpola. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 186: 189–214.
- POPRAWA P. 2009 — Potential for Gas Shale Exploration in the Upper Ordovician-Silurian and Lower Carboniferous Source Rocks in Poland. *AAPG Ann. Convent. & Exhibit.*, 7–10.06.2009, Denver, Colorado, USA, Abstrakt Volume.
- POPRAWA P. 2010a — System węglowodorowy z gazem ziemnym w łupkach — północnoamerykańskie doświadczenia oraz europejskie perspektywy. *Prz. Geol.*, 58: 216–225.
- POPRAWA P. 2010b — Poszukiwania złóż gazu ziemnego w łupkach (*shale gas*) w Polsce. *Wiad. Naft. Gazow.*, 2(142): 11–15.
- POPRAWA P. & GROTEK I. 2005 — Revealing palaeo-heat flow and paleooverpressures in the Baltic Basin from thermal maturity modelling. *Miner. Soc. Poland, Sp. Papers*, 26: 235–238.
- POPRAWA P. & KIERSNOWSKI H. 2008 — Perspektywy poszukiwań złóż gazu ziemnego w skałach ilastych (*shale gas*) oraz gazu ziemnego zamkniętego (*tight gas*) w Polsce. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 429: 145–152.
- POPRAWA P. & PACZEŚNA J. 2002 — Rozwój ryftu w późnym neoproterozoiku-wczesnym paleozoiku na lubelsko-podlaskim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego — analiza subsydencji i zapisu facjalnego. *Prz. Geol.*, 50(1): 49–63.
- POPRAWA P. & ŻYWIECKI M.M. 2005 — Heat transfer during development of the Lublin Basin (SE Poland): maturity modelling and fluid inclusion analysis. *Miner. Soc. Poland, Sp. Papers*, 26: 239–248.
- POPRAWA P., ŠLIAUPA S., STEPHENSON R.A. & LAZAUSKIENĖ J. 1999 — Late Vendian-Early Palaeozoic tectonic evolution of the Baltic Basin: regional implications from subsidence analysis. *Tectonophysics*, 314: 219–239.
- POPRAWA P., ŠLIAUPA S. & SIDOROV V. 2006 — Późnosylursko-wczesnodewońska śródpłytkowa kompresja na przedpola kaledońskiej orogenu (centralna część basenu bałtyckiego) — analiza danych sejsmicznych. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 186: 215–224.
- SCHLEICHER M., KÖSTER J., KULKE H. & WEIL W. 1998 — Reservoir and source rock characterization of the Early Palaeozoic interval in the Peribaltic Syncline, northern Poland. *J. Petrol. Geol.*, 21: 33–56.
- SIKORSKA M. 1998 — Rola diagenety w kształtowaniu przestrzeni porowej piaskowców kambru z polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 164: 1–66.
- SKRĘT U. & FABIAŃSKA M.J. 2009 — Geochemical characteristics of organic matter in the Lower Palaeozoic rocks of the Peribaltic Syncline (Poland). *Geochem. J.*, 43(5): 343–369.
- STOLARCZYK F., STOLARCZYK J., WYSOCKA H. & BUCHELT M. 1997 — Strefy perspektywiczne dla występowania węglowodorów w kambrze lubelsko-podlaskiej części starej platformy. *Prz. Geol.*, 45: 171–175.
- STOLARCZYK F., STOLARCZYK J. & WYSOCKA H. 2004 — Perspektywiczne obszary poszukiwań węglowodorów w kambrze polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej. *Prz. Geol.*, 52: 403–412.
- STRZETELSKI W. 1979 — Litofacja i szczelinowatość roponośnych utworów kambru w syneklizie perybałtyckiej. *Pr. Geol. Komis. Nauk. Geol. PAN Krak.*, 116: 93.
- SWADOWSKA E. & SIKORSKA M. 1998 — Historia pogrzebania skał kambru na podstawie refleksyjności macerałów wityrinitopodobnych w polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej. *Prz. Geol.*, 46(8): 699–706.
- SZYMAŃSKI B. 2008 — Zapis litologiczny i mikrofacjalny osadów euksynicznych kambru górnego i tremadoku obniżenia bałtyckiego (północna Polska). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 430: 113–154.
- TOMCZYK H. 1976 — Rozwój litofacyjny syluru w zachodniej części syneklizy perybałtyckiej. *Biul. Inst. Geol.*, 270: 109–130.
- TOMCZYKOWA E. 1988 — Silurian and Lower Devonian Biostratigraphy and Palaeoecology in Poland. *Biul. Inst. Geol.*, 359: 21–41.
- WIĘCŁAW D., KOTARBA M., KOSAKOWSKI P. & KOWALSKI A. 2010 — Habitat and hydrocarbon potential of the Lower Palaeozoic source rocks of the Polish sector of the Baltic Sea. *Geol. Quart.* (w druku).
- ZDANAVIČIŪTĖ O. & BOJESSEN-KOEFOED J.A. 1997 — Geochemistry of Lithuanian oils and source rocks: a preliminary assessment. *J. Petrol. Geol.*, 20: 381–402.
- ZDANAVIČIŪTĖ O. & LAZAUSKIENE J. 2007 — The petroleum potential of the Silurian succession in Lithuania. *J. Petroleum Geology*, 30(4): 325–337.
- ZDANAVIČIŪTĖ O. & SWADOWSKA E. 2002 — Petrographic and pyrolysis-gas chromatography investigations of the Lower Palaeozoic organic matter of Lithuania. *Geologija*, 40: 15–22.
- ZDANAVIČIŪTĖ O., KHUBLDIKOV A.I. & BOJESSEN-KOEFOED J.A. 1998 — Geology and Oil Geochemistry of the Eastern Part of the Baltic Syncline. [W:] Suveizdis P. & Zdanavičiūtė O. (red.), *Perspective of Petroleum Exploration in the Baltic Region. Proceedings of the International Conference, Institute of Geology, Vilnius*: 58–65.
- ŻELICHOWSKI A.M. & KOZŁOWSKI S. (red.) 1983 — Atlas geologiczno-surowcowy obszaru lubelskiego. Wydaw. Geol.

Praca wpłynęła do redakcji 08.02.2010 r.

Po recenzji akceptowano do druku 22.02.2010 r.