

Kraków, 27 listopada 2017

**Tomasz Topór**

Instytut Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk

Tytuł rozprawy doktorskiej:

**Lower Silurian shales of the Baltic Basin (Poland): reservoir parameters and methane storage potential as a function of thermal maturity**

Polski tytuł:

**Dolnosylurskie łupki basenu bałtyckiego: parametry zbiornikowe i potencjał retencji metanu w funkcji dojrzałości termicznej**

Promotor: dr hab. Arkadiusz Derkowski, prof. ING PAN

#### ABSTRACT

The study evaluates and integrates the most important reservoir parameters for Lower Silurian shales from the Polish part of the Baltic Basin, which represent a wide spectrum of thermal maturity with  $R_o$  (vitrinite reflectance) from ~0.5% to ~3.5%. The study determines porosity, its evolution with thermal maturity, and reveals factors controlling methane ( $CH_4$ ) sorption in studied shales. In addition, the study tries to identify potential sweet spots and estimates shale-gas reserves with distinction between free and adsorbed gas fractions in the Baltic Basin.

The to-date techniques of porosity determination in shales – the most important reservoir parameter in evaluation of any oil and gas reservoirs – presented intrinsic flaws. Therefore, a new porosity measurement technique called dual liquid porosimetry (DLP) was developed as the first step of the study. DLP allows to determine total porosity, maximum porosity accessible for liquid hydrocarbons and a range of ineffective porosity, which in shales is mainly associated with clay-bound water (CBW). Detailed examination of porosity (including breaking them down into micro-, meso- and macroporosity) as a function of thermal maturity, combined with organic matter (OM), clay mineral investigation, and high-pressure  $CH_4$  sorption measurements, revealed that OM maturation exerts a dominant control on porosity evolution in micro- and mesoscale in

the Baltic Basin shales. OM also controls the micropore volume and CH<sub>4</sub> sorption potential in the studied shales, masking the role of clay minerals in a sorption processes. The results showed that the CH<sub>4</sub> loading potential – defined as maximum absolute CH<sub>4</sub> adsorption divided by micropore volume – decreases in micropores with increasing maturity.

The integration of a wide spectrum of rock properties related to reservoir and completion quality (porosity, OM content and thermal maturity, mineral composition, fractions of adsorbed and free gas, mineral-based brittleness index) allowed to determine potential sweet spots in the Baltic Basin shale-gas prospects area (constrained by R<sub>o</sub> isolines 1.0% and 3.5%). A combination of DLP and high pressure CH<sub>4</sub> adsorption measurements were used to determine the total gas capacity and to estimate the fractions of adsorbed and free gas, under assumed formation conditions. Finally, shale-gas reserves in the Baltic Basin shale-gas prospects area were estimated for 213 bln m<sup>3</sup> and 534 bln m<sup>3</sup>, assuming a recovery factor of 10% and 25%, respectively.

**Key words:** Baltic Basin, porosity, clay-bound water, thermal maturity, methane adsorption, sweet spots

## STRESZCZENIE

W pracy zostały wyznaczone i zintegrowane kluczowe parametry zbiornikowe dla dolnosylurskich łupków z polskiej części basenu bałtyckiego, które reprezentują szerokie spektrum dojrzałości termicznej z  $R_o$  (refleksyjność wityryny) od ~0.5% do ~3.5%. Praca dostarcza informacji na temat porowatości i jej ewolucji wraz z termicznym dojrzewaniem oraz ujawnia główne czynniki kontrolujące adsorpcję metanu ( $CH_4$ ) w badanych łupkach. Dodatkowo w pracy podjęta została próba identyfikacji stref o podwyższonym potencjale występowania węglowodorów (tzw. *sweet spots*) oraz oszacowania zasobów gazu ziemnego z rozgraniczeniem na gaz wolny i zaadsorbowany w basenie bałtyckim.

Aktualne metody pomiaru porowatości w łupkach – najważniejszego parametru przy ocenie potencjału eksploatacyjnego złóż ropy naftowej i gazu ziemnego – posiadają liczne wady. Jednym z pierwszych zadań w prezentowanej pracy było opracowanie nowej metody pomiaru porowatości nazwanej *dual liquid porosimetry* (DLP). Metoda DLP łączy techniki nasycenia wodą i naftą z pomiarami adsorpcji wody, w celu wyznaczenia porowatości całkowitej, maksymalnej porowatości dostępnej dla ciekłych węglowodorów oraz zakresu porowatości nieefektywnej, która w skałach łupkowych związana jest głównie z obecnością silnie zaadsorbowanej wody na powierzchniach minerałów ilastych (*clay-bound water* – CBW). Szczegółowa analiza porowatości (w mikro-, mezo- i makroskali) w łupkach basenu bałtyckiego, w połączeniu z charakterystyką materii organicznej, minerałów ilastych i wysokociśnieniowej adsorpcji  $CH_4$  wykazała, że ewolucja mikro- i mezoporowatości z głębokością jest podyktowana zmianami zachodzącymi w trakcie dojrzewania materii organicznej. Ponadto, materia organiczna jest głównym czynnikiem kontrolującym objętość mikroporów i potencjał sorpcyjny  $CH_4$ . Ten ostatni – definiowany jako stosunek maksymalnej absolutnej adsorpcji  $CH_4$  do objętości mikroporów – maleje wraz z postępującą dojrzałością termiczną. Rola minerałów ilastych w procesie sorpcyjnym jest maskowana przez udział materii organicznej.

Połączenie szeregu kluczowych parametrów zbiornikowych, opisujących własności zbiornikowe i udostępnienie złoża (porowatość, zawartość materii organicznej, stopień dojrzałości termicznej, skład mineralogiczny, proporcje między gazem wolnym i zaadsorbowanym, indeks kruchości) posłużyło do wyznaczenia tzw. *sweet spotów* w basenie bałtyckim w strefie o najwyższym potencjale występowania gazu ograniczonej izoliniami  $R_o$  1.0% i 3.5%. Połączenie metody DLP z wysokociśnieniową adsorpcją  $CH_4$  pozwoliło wyznaczyć

całkowitą ilość CH<sub>4</sub> w zadanych warunkach złożowych, wraz z rozgraniczeniem na gaz wolny i zaadsorbowany. Potencjalne zasoby gazu ziemnego, w strefie R<sub>o</sub> 1.0% i 3.5%, zostały oszacowane na 213 mld m<sup>3</sup> i 534 mld m<sup>3</sup> przy współczynnikach wydobywania ze złoża 10% i 25%.

**Słowa kluczowe:** basen bałtycki, porowatość, *clay-bound water*, dojrzałość termiczna, adsorpcja metanu, *sweet spots*