

Summary

The main goal of this doctoral dissertation is a complex recognition of magnetic properties of lower Paleozoic gas-bearing shales from the Pomerania region, northern Poland. The properties were further applied to investigate sedimentological and diagenetic processes during rock formation. The studies encompass three main topics. The first one concerns magnetic anisotropy, which reflects the arrangement of magnetic minerals, and is conditioned mainly by tectonic or sedimentary processes. Another two concentrate on magnetic properties differentiation of studied rocks, and their relationship with variable conditions during sedimentation and diagenesis. The first of them was dedicated to defining the relationship between magnetic mineral assemblage in studied rock and oxygenation conditions during material deposition associated with preserved organic matter (OM) content and their further modifications. The latter was, in turn, focused on magnetic susceptibility (MS) studies. The idea was to monitor MS differentiation throughout the studied lithology profile and define factors influencing this parameter. Here, the relationship between MS values and changeable OM content, lithology (overall and magnetic mineral assemblage), and parameters describing oxygenation of the environment during rock formation has been considered.

Within the dissertation, interdisciplinary studies were performed, combining magnetic, sedimentological, mineralogical, and geochemical methods. The whole studied material constitutes of six exploration drill cores performed to recognize unconventional resources of shale gas by the Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo (PGNiG) company, while rock samples for laboratory measurements were collected from two oriented drill cores. The analyzed interval encompasses a continuous lithostratigraphic profile from the late Ordovician to early Silurian and includes five rock formations. Part of the presented research was conducted within the ShaleMech project (BlueGas grant), whose purpose was to maximize the effectiveness of hydraulic fracturing and thus gas exploitation by extensive geomechanical studies.

Comprehensive rock magnetic research, such as hysteresis loop, MS versus temperature, or isothermal remnant demagnetization (IRM), allowed to recognize and define magnetic minerals assemblage in studied rock. This stage was necessary for proper magnetic anisotropy results interpretation obtained from AMS and AARM methods (anisotropy of magnetic susceptibility, anhysteretic anisotropy of magnetic remanence). The outcome provides information about the texture of the analyzed rocks specifically about the arrangement of magnetic grains. The rock magnetic results were combined with geochemical and mineralogical data for their proper interpretation.

The next stage of the research was the recognition of rock magnetic properties, especially composition and grains size, which was further collated with OM content. The studies were

focused on recognizing and defining factors influencing the formation and preservation of magnetic minerals in shales. For that purpose, detailed rock magnetic studies were performed at the Institute for Rock Magnetism, University of Minnesota, the USA. These studies allowed the recognition of nano-size magnetic grains properties in selected material. The measurements of remnant magnetization in low temperatures (300 - 10 K range) were conducted on powder rock samples. The results allow deducing that magnetic mineral composition is related to preserved OM amount, which corresponds with the oxygenation of the sedimentary environment. In addition to detailed studies in microscale (sample size is limited to several millimeters), the studies concerning the whole Pomerania area were also performed (dozens of meters of the lithological profile). This part of the research was dedicated to finding out more about the paleoenvironment during Ordovician and Silurian times. The analyses based on combined datasets including RockEval analysis (organic matter content), geochemical logging (overall mineral content and oxygenation indices), and MS variations were investigated on six approximately 200-meter-long intervals of exploration drill cores from the Pomerania region. Obtained results allowed me to define the relationship between considered parameters, magnetic minerals assemblage, OM content, and oxygen amount during rock formation, which in further interpretation allowed defining the paleoenvironment.

The outcome of this doctoral dissertation is a better understanding of factors influencing variations in magnetic minerals composition in studied gas-bearing shales, which allows to better interpret environmental conditions in which analyzed rocks were formed. The obtained results confirm the great importance of the early stage of rock formation, deposition, and early diagenesis, in process of magnetic minerals formation and preservation. It was demonstrated that mineral composition, which is defined at this stage, controls magnetic susceptibility values, and remains in a relationship with organic matter content. Thus, observed dependence may be applied in the context of unconventional gas exploration. Here, magnetic mineral composition and MS value can provide valuable information about potentially preserved OM content, which can be useful when defining the layers with the highest potential for hydrocarbons.

Also, as a part of this dissertation, the original scientific phenomenon of magnetic anisotropy is described. The results exhibit strong, bedding parallel foliation that resulted from sediment compaction. Moreover, slight magnetic lineation was observed, whose origin was defined as sedimentary. Magnetic minerals alignment, indicating bottom currents activity during sediment deposition, allowed discussion about the paleoenvironment. The outcome provides valuable data about the source area of detrital material and changes, which occurred in the sedimentary regime influenced by the tectonic evolution of the sedimentary basin.

Streszczenie w języku polskim

Celem badawczym rozprawy doktorskiej było kompleksowe rozpoznanie własności magnetycznych dolnopaleozoicznych łupków gazonośnych z obszaru Pomorza (północna Polska). Własności te wykorzystano następnie jako narzędzie do badania procesów sedymentologicznych i diagenetycznych w czasie formowania się skały. Praca skupiła się na trzech głównych zagadnieniach badawczych. Pierwsze obejmuje zdefiniowanie anizotropii magnetycznej, która odzwierciedla uporządkowanie minerałów magnetycznych, uwarunkowane głównie procesami tektonicznymi lub sedymentacyjnymi. Kolejne dwa podejmują tematykę zróżnicowania własności magnetycznych skały i ich związku ze zmieniającymi się w czasie sedymentacji osadu warunkami środowiskowymi i jego dalszej diagenety. Pierwszy z nich koncentrował się na określeniu zależności pomiędzy składem minerałów magnetycznych w skale osadowej a warunkami natlenienia w czasie depozycji materiału osadowego, powiązanymi z zachowaniem materii organicznej oraz późniejszą diagenetą. W ramach ostatniego obszaru badawczego prześledzono zmienność podatności magnetycznej w profilu litologicznym oraz podjęto próbę określenia czynników kontrolujących wartości podatności. Rozpatrywano tutaj związek pomiędzy podatnością magnetyczną a zróżnicowaną zawartością materii organicznej, litologią (ogólny i magnetyczny skład mineralny) oraz parametrami opisującymi natlenienie środowiska powstawania skały.

W ramach pracy przeprowadzono badania interdyscyplinarne, łączące metody magnetyczne oraz sedymentologiczne, mineralogiczne i geochemiczne. Całość materiału badawczego stanowiło sześć rdzeni wiertniczych wykonanych na potrzeby rozpoznania złóż niekonwencjonalnych przez PGNiG S.A., zaś materiał skalny do pomiarów laboratoryjnych pobrany został z dwóch orientowanych rdzeni. Analizowany interwał obejmował ciągły profil litostratygraficzny w przedziale od późnego ordowiku do wczesnego syluru i obejmował pięć formacji skalnych. Część prac wykonano w ramach projektu ShaleMech (grant w ramach BlueGas), którego celem było zmaksymalizowanie efektywności wydobywania gazu niekonwencjonalnego poprzez szczegółowe badania geomechaniczne.

Kompleksowe badania petromagnetyczne, takie jak pętla histerezy, podatność magnetyczna w funkcji temperatury czy IRM (izotermalna pozostałość magnetyczna) umożliwiły rozpoznanie oraz zdefiniowanie minerałów magnetycznych w analizowanych skałach. Krok ten był niezbędny dla poprawnej interpretacji wyników AMS i AARM (anizotropia podatności magnetycznej i bezhisterezowa anizotropia pozostałości magnetycznej), informujących o anizotropii magnetycznej. Badania te umożliwiły obserwację tekstury skały, a zwłaszcza uporządkowania minerałów magnetycznych. Wyniki badań magnetycznych zestawiono z wynikami analiz geochemicznych i mineralogicznych w celu ich poprawnej interpretacji.

Kolejnym etapem pracy doktorskiej było szczegółowe rozpoznanie własności minerałów magnetycznych, a w szczególności składu i wielkości ich ziaren, co następnie zestawiono z zawartością materii organicznej. Badanie ukierunkowane było na rozpoznanie i zdefiniowanie czynników warunkujących powstawanie i zachowanie minerałów magnetycznych w łupkach. W tym celu wykonano szczegółowe badania petromagnetyczne w laboratorium Institute for Rock Magnetism (University of Minnesota) w Stanach Zjednoczonych, które umożliwiły rozpoznanie własności magnetycznych nano-cząsteczek. Przeprowadzono pomiar zmienności pozostałości magnetycznej w zależności od temperatury w zakresie niskich temperatur (300 do 10 K) na próbkach sproszkowanych skał. Wyniki doprowadziły do wniosku o zależności kompozycji minerałów magnetycznych od ilości zachowanej substancji organicznej, co w dalszej interpretacji zależy m.in. od stopnia natlenienia środowiska sedimentacyjnego. Oprócz badań szczegółowych w mikroskali (skała badanej próbki z rdzenia ograniczona do kilku milimetrów) przeprowadzono również badania obejmujące cały region Pomorza (skała kilkudziesięciu metrów profilów), ukierunkowane na uzyskanie dodatkowych informacji na temat paleośrodowiska w okresie od wczesnego ordowiku do końca syluru. Analizy opierające się na zestawieniu parametrów analiz RockEval (zawartość materii organicznej), profilowań geochemicznych (ogólny skład mineralny i parametry natlenienia) oraz zmienności podatności magnetycznej, przeprowadzono na sześciu ok. dwustumetrowych interwałach rdzeni. Uzyskane wyniki umożliwiły określenie zależności pomiędzy składem mineralnym, zawartością materii organicznej i warunkami natlenienia w czasie formacji skały, co dalej pozwoliło sformułować wnioski dotyczące paleośrodowiska.

Rezultatem pracy doktorskiej jest lepsze zrozumienie czynników warunkujących zmienność składu minerałów magnetycznych w badanych łupkach, co pozwala lepiej interpretować warunki środowiska w jakich powstawała skała. Uzyskane wyniki wskazują na duże znaczenie wczesnego etapu formowania się, depozycji i wczesnej diagenety, w procesie powstawania i zachowania minerałów magnetycznych w analizowanej skale. Wykazano, że skład mineralny, który został zdefiniowany na tym etapie decyduje o wartościach podatności magnetycznej badanej skały i pozostaje w relacji z zawartością materii organicznej. Wyniki te mają znaczenie w kontekście wydobycia gazu niekonwencjonalnego: kompozycja minerałów magnetycznych oraz wartość podatności magnetycznej analizowanej skały pozwala wyciągnąć wnioski o potencjalnym zachowaniu substancji organicznej, co może mieć zastosowanie w kontekście wyodrębnienia warstw o największym potencjale eksploatacyjnym.

Ponadto praca podejmuje ciekawą tematykę anizotropii łupków. Wyniki badań wskazują na silną foliację magnetyczną wynikającą z kompaktacji osadu. Ponadto zaobserwowano słabą lineację, której genezę zinterpretowano jako sedimentacyjną. Ukierunkowanie minerałów magnetycznych świadczy tutaj o działalności prądów przydennych w okresie depozycji osadu. Zdefiniowany kierunek prądów pozwala również podjąć dyskusję o paleośrodowisku w czasie formowania skały, dostarczając dodatkowych informacji o źródle materiału

detrytycznego oraz zmianach jakie nastąpiły w systemie depozycyjnym, spowodowanych ewolucją tektoniczną basenu sedimentacyjnego.

