

STANISŁAW BURLIGA*, FRANCISZEK CZECHOWSKI**, MAREK HOJNIAK***

Zjawiska gazodynamiczne w wysadzie solnym Kłodawy jako narzędzie stratygraficzne cechsztynu

Wprowadzenie

Znajomość wewnętrznej budowy wysadów solnych jest podstawą zarówno efektywnej eksploatacji złóż soli jak i bezpiecznego posadowienia w wysadach magazynów paliw i składowisk odpadów. Warunkiem prawidłowego rozpoznania struktury wewnętrznej wysadów jest identyfikacja litostratygraficznych członów serii solnej i określenie ich przestrzennego rozmieszczenia. W przypadku struktur solnych na Nizinie Polskiej, zbudowanych ze skał cechsztyńskich, określenie przynależności stratygraficznej poszczególnych członów litologicznych występujących w wysadach nie przedstawia trudności, gdy badany profil obejmuje kilka poziomów litostratygraficznych zachowujących pierwotne następstwo. Największe znaczenie ma przy tym obecność w sekwencji skał przelawicających sole kamienne, jak anhydryty, iłołupki, zubry czy sole potasowe. Sole kamienne cyklotemów 1–3 są bowiem w dominującej części bezbarwne i wykazują podobną wewnętrzną stratyfikację. Podczas tektonicznego płynięcia mas solnych warstwy ulegały jednakże intensywnemu fałdowaniu i ścinaniu, co doprowadziło do częściowej, a lokalnie całkowitej redukcji niektórych poziomów litostratygraficznych. W efekcie powszechne jest występowanie w wysadach niekompletnych sekwencji stratygraficznych i obocznych kontaktów utworów pierwotnie nie sąsiadujących ze sobą. Z tego względu w obszarach najsilniej zaburzonych tektonicznie rozpoziomowanie stratygraficzne utworów jest bardzo trudne, co w praktyce wymusiło

* Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, Wrocław;
e-mail: stanislaw.burliga@ing.uni.wroc.pl

** Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, Wrocław;
e-mail: franciszek.czechowski@ing.uni.wroc.pl

*** Uniwersytet Wrocławski, Wydział Chemii, Wrocław; e-mail: mh@wchuw.r.pl

przyjęcie w kopalnianych dokumentacjach złóż zgeneralizowanych wydzieleń litostratygraficznych. Przykładem generalizacji budowy geologicznej jest południowo-zachodnia część kopalni soli w Kłodawie, w której punktowo stwierdzono obecność wszystkich poziomów cechsztynu (Kucia 1970; Chandij 1976; Misiek 1997; Czapowski 2003), lecz ze względu na wątpliwości w lokalizacji granic między poziomami stratygraficznymi i przynależność wiekową różnych partii soli kamiennych przyjęto nie rozdzielać utworów na odrębne ogniwa litostratygraficzne niemal na całym obszarze pola eksploatacyjnego nr 4. Konsekwencją takiego stanu był brak postępu w rozpoznawaniu tektoniki tej części złoża i wielokrotne nacięcie wyrobiskami górniczymi stref gazonośnych oraz zawodnionych. Doprowadziło to ostatecznie do wyłączenia południowo-zachodniej części kopalni z eksploatacji.

Przeprowadzone dotychczas badania (Burliga i in. 2007; Burliga, Misiek 2007) wskazują, iż lokalizacja zjawisk gazowych i wodnych w wysadzie porządkowana jest przez czynniki litostratygraficzno-tektoniczne. Rozpoziomowanie utworów cechsztynu pozwala zatem nie tylko odtworzyć wewnętrzną strukturę wysadu, ale stwarza również możliwość prognozowania przebiegu stref gazonośnych i zawodnionych w złożu. Niniejsza praca przedstawia możliwość odwrotną – wykorzystania stref gazonośnych do rozdziału cechsztyńskiej serii solnej w obszarach silnie zaburzonych tektonicznie, w których sekwencja skalna jest niekompletna.

1. Stan rozpoznania stref gazonośnych w wysadzie solnym Kłodawy

Kopalnia Soli Kłodawa S.A. zaliczona została do III stopnia zagrożenia wyrzutami gazów oraz II stopnia zagrożenia metanowego. Ze względu na powierzchniowe odstrzelanie ładunków wybuchowych odnotowane wyrzuty nie stanowiły bezpośredniego zagrożenia dla ruchu górniczego, jednakże uwalniane z górotworu toksyczne gazy znacząco utrudniały eksploatację. Najliczniejsze wyrzuty i emanacje gazów udokumentowane zostały w południowej części obszaru górniczego, w rejonie pól eksploatacyjnych 1 i 4 oraz w wyrobiskach międzypolowych. W strefach wyrzutów stwierdzano przede wszystkim obecność wybuchowych mieszanin CH_4 , C_xH_y , H_2S i N_2 oraz nieznaczny udział CO , CO_2 i H_2 .

Badania nad gazonośnością skał solnych w wysadzie Kłodawy koncentrowały się dotychczas nad analizą składu gazów (np. Biały 1962), lokalizacją indywidualnych zjawisk gazowych w wysadzie (Poborski C., Poborski J. 1965; Poborski, Marek 1970), zasięgiem stref zgazowanych w solach (Cybulski 1983) oraz statystycznym ujęciem cech fizykochemicznych i geologicznych zjawisk gazodynamicznych (Krause, Kobiela 2004). W starszych pracach wystąpienia zjawisk gazowych nieprecyzyjnie korelowano z obszarami antyklin solnych oraz ich skłonów (Poborski 1971; Bąkowski i in. 1977; Cybulski 1983). Stwierdzenie powyższe okazało się z czasem niepoprawne, gdyż wiele zjawisk gazowych odnotowano w zubrach (Krause, Kobiela 2004) zajmujących na ogół pozycje synklinalne (Burliga i in. 2005).

Dostrzeżony został również związek między typem skał a rodzajem występujących w nich zjawisk gazowych. Emisja azotu wiązała się przede wszystkim z wystąpieniami zubrów, natomiast węglowodorów i siarkowodoru z solami kamiennymi i przeławicającymi je anhydrytami i łożkami (Krause, Kobiela 2004). Już C. i J. Poborscy (1965) oraz Poborski i Marek (1970) zauważyli, iż w niektórych stanowiskach wyrzutowych blokom łożek i anhydrytu można przypisać przynależność do poziomów łupku cuchnącego i anhydrytu podstawowego oraz że zjawiska gazowe wydają się być ułożone linijnie. Obserwacja ta przyczyniła się do powiązania źródła siarkowodoru z poziomem łupku cuchnącego. Towarzyszące siarkowodorowi węglowodory uznano jednakże za substancje egzotyczne, pochodzące spoza wysadu – prawdopodobnie z jego podłoża (Poborski, Werner 1956; Bąkowski, Tokarski 1966). Tym samym dopuszczona została możliwość wtargnięcia węglowodorów w złożę soli i ich migracji w jego obrębie. Niestety, akceptacja takiej genezy węglowodorów otwiera również możliwość migracji siarkowodoru w obręb złoża analogicznymi drogami, zatem źródła siarkowodoru i węglowodorów pozostają wciąż niejednoznacznie określone.

2. Pozycja geologiczna zjawisk gazowych w wysadzie

We wcześniejszych badaniach nie przykładano dostatecznej uwagi do analizy soli kamiennych, w których zarejestrowano wyrzuty gazów. Dokumentacja zjawisk wyrzutowych w solach zawiera jedynie informacje o zabarwieniu i stratyfikacji soli, bez precyzyjnego wskazania ich wieku. Ponieważ sole kamienne trzech najstarszych cyklotemów zbudowane są z bezbarwnego halitu, a ich wewnętrzna struktura i tekstura uległa znacznej przebudowie podczas fałdowania i ścinania, nieliczne różnicujące je cechy pierwotne okazywały się słabo czytelne, a lokalnie zatarte. Ze względu na dość pospolite zachowanie reliktyw soli potasowo-magnezowych i anhydrytu głównego na granicy cyklotemu PZ2 i PZ3, mniej problematyczne było rozdzielenie soli starszych i młodszych. Zdecydowaną trudność stanowiło natomiast rozróżnienie starszych poziomów solnych. Obecność najstarszych soli kamiennych w złożu stwierdzono dopiero w 1970 i fakt ten miał rangę odkrycia (Poborski, Marek 1970). Do dziś jednakże poziom soli najstarszych pozostał enigmatyczny i zidentyfikowany jest jedynie lokalnie. W dokumentacji zjawisk gazonośnych występujących w solach kamiennych stosowano zatem zgeneralizowane określenie wieku soli, opisując je jako tektonicznie przeobrażone sole cyklotemów starszych.

Badania prowadzone w ostatnich latach w polu nr 4 (Burliga i in. 2007; Burliga, Misiek 2007) wykazały bardzo ścisły związek między litostratygrafią, tektoniką a występowaniem stref gazonośnych. W większości odnotowanych miejsc wypływu siarkowodoru i wyrzutu gazów stwierdzona została obecność bloków anhydrytów zidentyfikowanych jako anhydryt podstawowy oraz towarzyszących im reliktyw łożka korelowanego z łupkiem cuchnącym. Potwierdzone zostały zatem spostrzeżenia C. i J. Poborskich (1965), a jednocześnie – przy lepszym obecnie rozpoznaniu cech litologicznych anhydrytu podstawowego – możliwe

było powiązanie z tym poziomem litostratygraficznym wielu wcześniej wiekowo nieoznaczonych bloków anhydrytów. Obserwacje te upoważniają do stwierdzenia, iż właśnie poziomy łupku cuchnącego i anhydrytu podstawowego są stratygraficznymi wyznacznikami lokalizacji stref gazonośnych w wysadzie i mają pierwszorzędne znaczenie dla ich występowania.

Zjawiska gazowe niepowiązane z powyższą granicą cyklotemów na ogół korelują z granicami wielkoskalowych fałdów o geometrii futerałowej. Kontakty przylegających fałdów posiadają charakterystykę właściwą dla stref ścinania – cechuje je obecność luk stratygraficznych w profilu złoża, przejawiająca się obocznym sąsiedztwem utworów różnowiekowych (np. soli starszych i najmłodszych) oraz redukcją miąższości warstw. Fałdy występujące w wysadzie solnym Kłodawy mają strome skrzydła i osie, w efekcie czego w poziomym rozcięciu przez wysad ich zarys jest eliptyczny do kolistego. Podobny rozkład w wysadzie wykazują również zjawiska gazowe zlokalizowane w strefach kontaktowych skrzydeł fałdów.

3. Uwagi o ciągłości przestrzennej stref gazonośnych

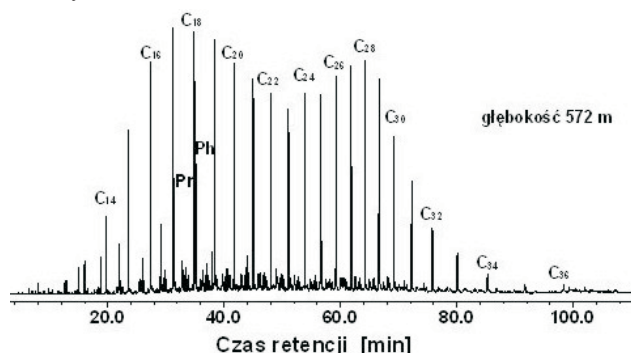
Badania Cybulskiego (1983) wykazały, iż szerokość stref gazonośnych jest stosunkowo niewielka – zawartość niebezpiecznych gazów w skałach ograniczona jest do kilku metrów i może zanikać w odległości zaledwie 1 m od strefy wyrzutu. Intensywne sfałdowanie oraz powszechna redukcja miąższości starszych członów profilu cechsztyńskiego w jądrowej części wysadu utrudnia oboczną i międzypoziomową korelację ogniwi stratygraficznych. Tym samym trudno jest jednoznacznie wykazać ciągłość stref gazonośnych między poziomami eksploatacyjnymi, a lokalnie nawet między sąsiadującymi wyrobiskami górniczymi. W poszukiwaniu narzędzia potwierdzającego przestrzenną kontynuację stref zgazowanych testowo przeprowadzono analizę składu bituminów w dwóch stanowiskach wyrzutowych, które według obrazu kartograficznego zlokalizowane były w jednej strefie gazonośnej na poziomach 600 i 572. Porównane zostały biomarkery zawarte w substancji bitumicznej, czyli skamieniałości organicznych związków biosyntezy przez organizmy żywe, które po przekształceniach w procesach geochemicznych zachowują szkielet biogennej struktury źródłowej. Są one użyteczne w rekonstrukcji paleośrodowiska, pozwalają na odróżnienie środowiska lądowego, morskiego czy jeziornego, określenie potencjału redoks w środowisku sedymentacyjnym, stopnia zasolenia i kwasowości oraz paleotemperatury kolumny wodnej (Fu i in. 1992; ten Haven i in. 1988; Volkman 1988). Służą one także do określania natury kerogenu oraz stopnia jego dojrzałości. Materiał do badań składu biomarkerów z wysadu Kłodawy stanowiły ekstrakty dichlorometanowe z próbek soli, iłołupków oraz materiał z wsięków bituminów występujących w rejonach wyrzutów. Węglowodory analizowano za pomocą chromatografu gazowego wyposażonego w spektrometr masowy (GC-MS), a wyniki opracowywano z wykorzystaniem programu Chem Station.

Analiza GC-MS wykazała, że w składzie ekstraktów jak i węglowodorów pochodzących z wysięków dominowały n-alkany oraz acykliczne izoprenoidy. W mniejszej koncentracji stwierdzono obecność alkilocykloheksanów, alkilobenzenów, kwasów tłuszczowych i ich estrów metylowych i etylowych oraz naftalenu, fenantrenu, dibenzotiofenu i ich metylowych pochodnych. Koncentracja klasycznych biomarkerów – takich jak sterany i terpeny – była poniżej poziomu detekcji.

Przeprowadzone badania wykazały odmienną dystrybucję n-alkanów w solach kamiennych, w łupku i wysiękach węglowodorowych. Porównując skład węglowodorów zawartych w solach kamiennych stwierdzono w stanowisku na poziomie 572 m znaczną koncentrację acyklicznych izoprenoidów, m.in. fitanu (Ph), pristanu (Pr) i farnezanu (Fa), pochodzenia chlorofilowego i bakteriochlorowego, których prekursorami są algi. Jednocześnie nie stwierdzono powyższych składników w solach na poziomie 600. Wskazuje to na przecięcie przez badaną strefę gazonośną różnych warstw soli kamiennych, wytrącanych w różnych warunkach sedymentacyjnych.

Charakterystyka węglowodorów w łożyskach z obu stanowisk jest podobna. Występują w nich także acykliczne izoprenoidy pochodzenia chlorofilowego (fitan Ph i pristan Pr) i bakteriochlorofilowego (farnezan Fa i norfarnezan NFa), jak również ich odpowiedniki bardziej zdegradowane geotermalnie. Brak istotnych różnic między stanowiskami implikuje, iż badane łożyska należą do tego samego poziomu stratygraficznego.

Istotną przesłankę na temat przepuszczalności stref gazonośnych i ich ciągłości dostarczyła analiza węglowodorów z wysięków występujących w badanych stanowiskach. Prostołańcuchowe węglowodory alifatyczne (n-alkany) charakteryzują się bimodalnym rozkładem homologów (rys. 1) o zróżnicowanej relatywnej koncentracji homologów średnio- i wyżejcząsteczkowych. Zawierają one podobny skład acyklicznych izoprenów do odnotowanych w solach kamiennych i łożyskach. Wnioskować można, że stanowią one mieszaninę węglowodorów, które uległy ekspulsji zarówno z łożyska jak i halitu i migrują wzdłuż stref gazonośnych przez wysad.



Rys. 1. Skład homologiczny n-alkanów i acyklicznych izoprenów w wysiękach węglowodorów z soli kamiennych starszych w kopalni soli Kłodawa

Fig. 1. Homological distribution of n-alkanes and acyclic isoprenoids in hydrocarbon leaks from rock salt in Kłodawa salt mine

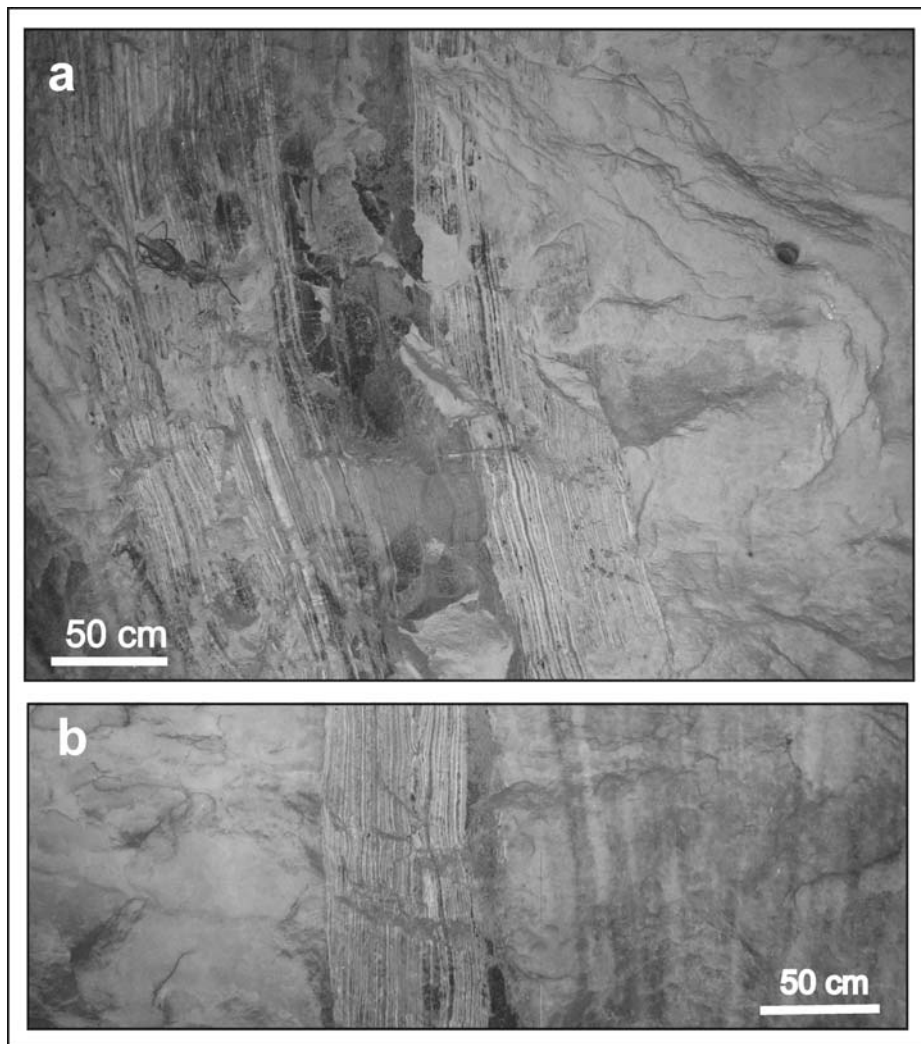
4. Wykształcenie skał w strefie kontaktu cyklotemów PZ1 i PZ2 w wysadzie solnym Kłodawy

Korelacja zjawisk gazowych z poziomami łupku cuchnącego i anhydrytu podstawowego oraz implikowana przez skład węglowodorów ciągłość i przepuszczalność stref gazonównych na długich odcinkach w wysadzie wskazują na istotę identyfikacji powyższych poziomów dla bezpieczeństwa podziemnych wyrobisk górniczych. Intensywna deformacja fałdowo-ścięciowa serii solnej spowodowała, iż bardzo rzadko łożypki i anhydryty zachowują ciągłość ławic w wysadzie. Najczęściej występują one w postaci różnej wielkości bloków (rys. 2) lub uległy tak silnemu rozczłonkowaniu, iż dochodzi do bezpośredniego kontaktu najstarszej i starszej soli kamiennej (rys. 3). Swoiste cechy petrograficzne zarówno anhydrytu podstawowego i łupku cuchnącego, jak i najstarszej i starszej soli kamiennej pozwalają jednakże dość pewnie i precyzyjnie lokować granicę między cyklotemami PZ1 i PZ2, bez względu na ciągłość granicznej sekwencji skalnej.

Najstarsze sole kamienne przy kontakcie z anhydrytem górnym i łupkiem cuchnącym są wyraźnie warstwowane i zbudowane z naprzemiennie występujących warstw ciemno- i jasnoszarych (rys. 2). Nielicznie występują wśród nich warstwy soli bezbarwnych. Miąższość warstw jest zmienna, waha się w przedziale od około 2 cm do 30 cm. Zmienność ta odzwierciedla stopień tektonicznej redukcji miąższości zestawu warstw halitytów, a nie ich cechy sedimentacyjne. Za pierwotną miąższość indywidualnych warstw halitytów przy kontakcie z łupkiem cuchnącym należy przyjąć górne wartości odnotowanego przedziału. Odnotować należy również, że w halitytach ciemnoszarych bywa wyczuwalny siarkowódór.

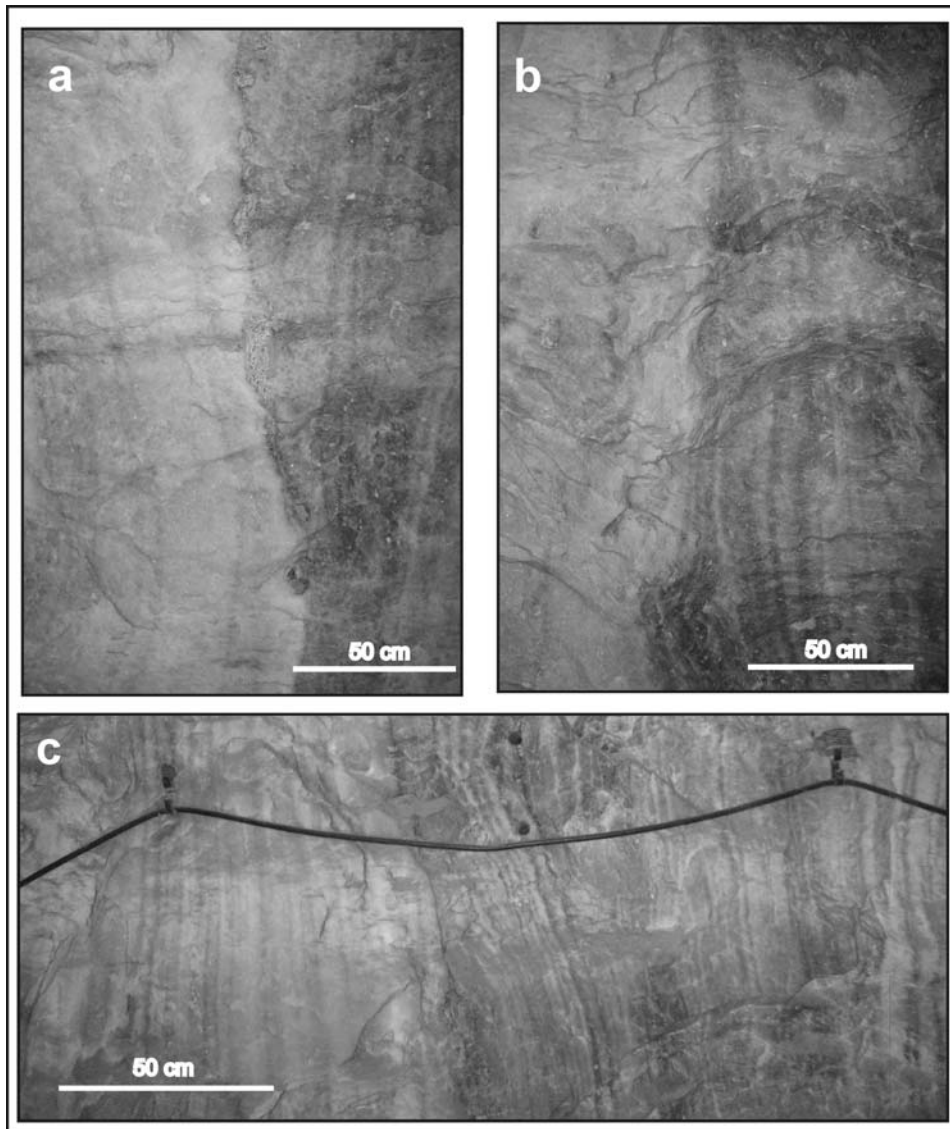
Spśród czterech ogniw oddzielających najstarsze sole kamienne od starszych soli kamiennych – anhydrytu górnego, łupku cuchnącego, dolomitu głównego i anhydrytu podstawowego – najczęściej zachowane są bloki anhydrytu podstawowego z relikami łupku cuchnącego. Szczątki anhydrytu górnego i dolomitu głównego identyfikowane są w nielicznych stanowiskach, stan ich rozpoznania jest bardzo słaby i z tego względu nie mają praktycznego zastosowania dla stratygraficznego rozdziału utworów pierwszego i drugiego cyklotemu solnego. Cechy petrograficzne łupku cuchnącego oraz anhydrytu podstawowego są natomiast na tyle charakterystyczne, iż można zidentyfikować je nawet w niewielkich blokach.

Łupek cuchnący w udokumentowanych stanowiskach osiąga maksymalnie kilka metrów miąższości i zbudowany jest z zestawu warstw czarnych i ciemnoszarych łożwców, łożwców marglistych i łożmargli. Ich diagnostycznymi cechami są: zawartość siarkowodoru oraz sporadycznie występujące kryształy piryty (uważa się, iż piryt może występować również w łupku miedzionośnym, jednakże łupek miedzionośny nie wykazuje zawartości siarkowodoru). Nie odnotowano samodzielnych wystąpień bloków łuku cuchnącego – zazwyczaj przylegają one do wielokrotnie większych bloków anhydrytu podstawowego w postaci wąskich płatów lub smug ciemnego łożu. Anhydryt cechuje się makroskopowo dwudzielną budową. Złożony jest z dwóch odmian litofacjalnych: anhydrytu ciemnoszarego ze słabo zaznaczającą się laminacją oraz anhydrytu wyraźnie laminowanego, z naprzemiennymi



Rys. 2. Relikty ławicy anhydrytu podstawowego na kontakcie najstarszej i starszej soli kamiennej w wysadzie solnym Kłodawy. Widoczna charakterystyczna dwudzielność wykształcenia anhydrytu – anhydryt ciemnoszary sąsiaduje z anhydrytem z wyraźną naprzemienną czarno-białą laminacją. Dostrzegalne są również nodule anhydrytowo-kwarcowe: a – Tektoniczny kontakt anhydrytu podstawowego z solami kamiennymi w ociosie chodnika. Najstarsza sól kamienna widoczna w lewym rogu; jednorodna, biała starsza sól kamienna po stronie prawej; b – Bloki anhydrytu podstawowego na kontakcie najstarszej soli kamiennej (prawa strona) i starszej soli kamiennej (strona lewa). Ciemnoszary anhydryt zachowany szczątkowo; ocios chodnika

Fig. 2. Remnants of Basal Anhydrite beds at the contact of the Oldest and Older Halite rock salt. Two varieties of anhydrite are visible: dark grey anhydrite with subtle lamination bordering with distinctly laminated one with alternating dark grey and white laminae. Anhydrite-quartz nodules are also remarkable: a – Tectonic contact of Basal Anhydrite with rock salt in a gallery wall. The Oldest Halite rock salt visible in left lower corner, the Older Halite white salt occurs on right; b – Basal Anhydrite blocks at the boundary of the Oldest Halite (right) and the Older Halite (left); gallery wall. Dark grey anhydrite preserved as relics



Rys. 3. Tektonicznie przebudowana granica najstarszego i starszego cyklotemu ewaporatowego cechsztynu – bezpośredni kontakt najstarszej i starszej soli kamiennej w wysadzie solnym Kłodawy.

Seria łałupkowo-anhydrytowa uległa tektonicznemu rozwarciu, a jej jedyą pozostałością są drobne bloczki laminowanego anhydrytu z nodułami anhydrytowo-kwarcowymi (a) lub ciemniejsza smuga na kontakcie najstarszej i starszej soli kamiennej (nieciągła, słabo widoczna na rys. b., wyraźna na rys. c).

Ciemna najstarsza sól kamienna występuje na rycinach a, b oraz c po prawej stronie

Fig. 3. Tectonically modified boundary of the oldest and older Zechstein evaporite cycles – direct contact of the Oldest and Older Halites. Shale-anhydrite series has become distorted and its original presence is evidenced only by small blocks of laminated anhydrite with nodules (a) or a dark layer at the contact of oldest and older rock salt (discontinuous, poorly visible on Fig. b., and distinct on Fig. c).

Dark Oldest Halite rock salt occurs on right hand side on all three figures

laminami anhydrytu białego i ciemnoszarego (rys. 2 a). W blokach pospolicie zachowują się fragmenty obu litofacji (rys. 2b). Anhydryty te wykazują kierunkowe ułożenie ziaren mineralnych i są względnie słabo scementowane, co dodatkowo odróżnia je od innych anhydrytów cechsztyńskich. Charakterystyczną cechą anhydrytu podstawowego jest ponadto występowanie nodularnych konkrecji anhydrytowych spojonych krzemionką, które zaburzają laminację. Przy kontakcie z łupkiem cuchnącym i w strefach spękań w anhydrylicie bywa wyczuwalny siarkowodór.

Starsze sole kamienne przy kontakcie z anhydrytem podstawowym są bezbarwne, białe i wykazują subtelne warstwowanie podkreślone laminami szarego anhydrytu rozproszonego w soli. Miąższość warstw halitytowych jest zmienna i podobnie jak w przypadku najstarszej soli kamiennej odzwierciedla stopień ich tektonicznego odkształcenia, a nie pierwotne cechy sedimentacyjne. W odróżnieniu od najstarszej soli kamiennej, nie stwierdzono w niej przejawów obecności siarkowodoru.

Z powyższego opisu wykształcenia najstarszych i starszych soli kamiennych przy kontakcie z członami iłołupkowo-anhydrytowymi wynika, iż nawet przy braku skał rozdzielających sole, możliwe jest wskazanie przypuszczalnej granicy między solami dwóch cyklotemów. Dochodzi bowiem do ostrego, wyraźnego kontaktu szarych soli kamiennych, właściwych dla ogniwa najstarszej soli kamiennej, z czystymi halitytami ogniwa starszej soli kamiennej (rys. 3a, b). Granicę tę jednoznacznie uwiarygodniają zachowujące się na kontakcie relikty anhydrytu podstawowego i łupku cuchnącego. Miąższość bloków anhydrytu podstawowego może przekraczać 10 m, jednak na ogół w wyrobiskach górniczych odsłaniają się bloki wielkości 0,5–3 m. W skrajnym przypadku roztarcia ławic anhydrytu podstawowego i łupku cuchnącego ich jedyną pozostałością jest cienka, nieciągła smuga anhydrytowo-ilasta (rys. 3c). Smuga taka odróżnia się od regularnej laminacji ciemniejszą barwą i sporadyczną obecnością drobnych (rzędu 1–2 mm średnicy i większych), linijnie ułożonych bloczków anhydrytowych. Najbardziej znamienne dla niej jest jednakże zapach siarkowodoru, stanowiący jedyną rozpoznawalną, fizykochemiczną pozostałość po poziomie łupku cuchnącego. Niektórym smugom towarzyszą również wysięki węglowodorów oraz silne zgasowanie przyległych skał. Szerokość samych smug może nie przekraczać 1 cm, jednak na ogół są kilkucentymetrowej miąższości. Natomiast strefy zgasowania skał sięgają do kilku metrów szerokości, szczególnie w przypadku obecności dużych bloków anhydrytowo-iłołupkowych. Strefy wyrzutów i emanacji gazów stają się tym samym kolejnym wskaźnikiem kontaktu utworów cyklotemów PZ1 i PZ2.

Wnioski

Udokumentowana korelacja stref gazonośnych z poziomami łupku cuchnącego i anhydrytu podstawowego czyni z powyższych zjawisk pomocnicze narzędzie w określaniu granicy między dwoma najstarszymi cyklotemami solnymi cechsztynu. Pierwszorzędne znaczenie ma przy tym stwierdzenie obecności siarkowodoru, który zachowuje się w strefie

kontaktowej najstarszej i starszej soli kamiennej nawet w przypadku całkowitego roztrucia skał ogniwi łupku cuchnącego i anhydrytu podstawowego. Ponieważ – jak wskazują analizy bituminów – gazy i ciecze mogą migrować wzdłuż kontaktów wielkoskalowych struktur fałdowych łączących różnowiekowe utwory, sama obecność siarkowodoru nie rozstrzyga jednakże o wieku utworów. Potwierdzona powinna być ona dodatkowymi obserwacjami – obecnością fragmentów laminowanego, na przemian białego i ciemnoszarego, rozsypliwego anhydrytu z nodułami siarczanowo-krzemionkowymi, występowaniem czarnego ilitu oraz kontrastowego, ostrego kontaktu szarych i białych soli kamiennych. Ostatnia cecha jest łatwo dostrzegalna nawet przy niewielkim polu obserwacji, dlatego umożliwi wskazanie granicy cyklotemów już podczas otworowego rozpoznawania złoża. Opróbowanie strefy kontaktowej pod kątem zawartości gazów i śladów skał płonnych powinno stanowić w tym przypadku standardową czynność weryfikacyjną. Szczegółowe wyznaczenie przebiegu poziomów łupku cuchnącego i anhydrytu podstawowego w wysadzie solnym umożliwi prognozowanie przebiegu stref zagrożenia wyrzutowego oraz emanacji gazów, a tym samym stwarza możliwość zaprojektowania optymalnej pod względem bezpieczeństwa metody eksploatacji złoża solnego. Przewodność hydrauliczna strefy kontaktowej między kompleksami najstarszej i starszej soli kamiennej cechsztynu uwidacznia, iż identyfikacja tej granicy ma również istotne znaczenie dla bezpiecznej lokalizacji szczelnych kawern magazynowych i składowisk odpadów w wysadowych złożach soli cechsztyńskich na obszarze Polski.

Autorzy składają serdeczne podziękowania pracownikom Kopalni Soli „Kłodawa” S.A., w szczególności Grzegorzowi Miśkowi, Sylwestrowi Janiów oraz Romanowi Chęcińskiemu, za pomoc w pozyskaniu materiałów badawczych do niniejszej pracy. Badania zrealizowane zostały częściowo ze środków na naukę w latach 2006–2007.

LITERATURA

- Biały U., 1962 – Przebadanie skał solonośnych oraz soli na zawartość gazów w poziomie 600 m Kopalni Soli „Kłodawa”. Archiwum Kopalni Soli „Kłodawa” S.A., Kłodawa, 8.
- Bąkowski J., Brańka S., Cybulski C., 1977 – Zagrożenie wyrzutowe z uwzględnieniem wystąpienia siarkowodoru (H₂S) w górnictwie solnym PRL. Materiały z 9 Międzynarodowego Kolokwium. Mikołów.
- Bąkowski J., Tokarski A., 1966 – Wschodnia ściana Kłodawy jako element naftowo-poszukiwawczy. Zeszyty Naukowe AGH, 139, s. 176–186.
- Burliga S., Janiów S., Sadowski A., 2005 – Perspektywy eksploatacji soli w Kopalni Soli „Kłodawa” w aspekcie aktualnego stanu wiedzy o budowie tektonicznej wysadu Kłodawy. Technika Poszukiwań Geologicznych Geosynoptyka i Geotermia, 4–5, s. 17–25.
- Burliga S., Misiek G., 2007 – O możliwości prognozowania przebiegu stref zagrożeń gazowych i wodnych w złożach soli na przykładzie wysadu solnego Kłodawy. XII Międzynarodowe Sympozjum Solne Quo Vadis Sal, Kłodawa, s. 51–52.
- Burliga S., Misiek G., Janiów S., Dumicz E., 2007 – Tektoniczne uporządkowanie zjawisk gazodynamicznych w wysadzie solnym Kłodawy. W: Warsztaty Górnicze „Zagrożenia naturalne w górnictwie”, Wyd. ISMiE PAN/Wyższy Urząd Górniczy – Katowice, dysk optyczny.

- Chandij M., 1976 – Geochemiczna regionalizacja jakościowa złóż soli w kopalniach kujawskich. *Prace Geologiczne PAN Oddz. w Krakowie*, 91, s. 80.
- Cybulski C., 1983 – Nowsze poglądy na migrację bituminów wraz z próbą prognozowania zagrożenia wyrzutowego poprzez określenie „aureoli kontaktowej” na przykładzie pola 4 Kopalni Soli „Kłodawa” S.A. *Materiały z Prac Komisji*, z. 7. Wałbrzych.
- Czapowski G., 2003 – Stratygrafia i charakterystyka litologiczna złoża kłodawskiego. W: Burliga S., Czapowski G., Poborska-Młynarska K.: Aktualizacja obrazu budowy geologicznej wysadu solnego w granicach obszaru górniczego Kopalni Soli „Kłodawa” z wnioskami dla dalszego jej funkcjonowania. *Archiwum Kopalni Soli „Kłodawa” S.A.* s. 21–59.
- Fu J.M., Sheng G.Y., Xy J.Y., Jia R.F., Fan S.F., Peng P.G., Eglinton G. and Gouar A.P., 1992 – Biomarker compounds as indicators of paleoenvironments. *Chin. J. Geochem.* 11, s. 1–12.
- Krause E., Kobiela Z., 2004 – Ocena stanu zagrożenia gazowego oraz zagrożenia wyrzutami gazów i skał w Kopalni Soli „Kłodawa” z uwzględnieniem przestrzennego rozwoju eksploatacji. *Kraków. Archiwum Kopalni Soli „Kłodawa” S.A.*, ss. 59.
- Kucia Z., 1970 – Nowe człony stratygraficzne cechsztynu w kopalni Kłodawa. *Przegląd Geologiczny*, 18/7, s. 345–346.
- Misiek G., 1997 – Stratygrafia i wykształcenie utworów cechsztynu w wysadzie solnym Kłodawy. W: red. Burliga S.: *Tektonika solna regionu kujawskiego*. 20–23, Wyd. Wind, Wrocław.
- Poborski C., Poborski J., 1965 – Z badań nad gazonośnością skał w kopalniach soli regionu kujawskiego. *Przegląd Górniczy* 2, s. 62–64.
- Poborski J., Werner Z., 1956 – O wyciekach ropy naftowej w kopalniach soli na Kujawach. *Przegląd Geologiczny* 12, s. 574.
- Poborski J., Marek S., 1970 – Renesans poszukiwań naftowych na strukturach solnych regionu kujawskiego. *Przegląd Geologiczny* 7, 315–319.
- ten Haven H. L., de Leeuw J.W., Sinninghe Damste J.S., Schenk P.A., Palmer S.E. and Zumberge J.E., 1988 – Application of biological markers in the recognition of paleohypersaline environments. W: A.J. Fleet, K. Kelets and M.R. Talbot (Eds), *Lacustrine Petroleum Source Rocks*. Geological Society Special Publication 40. Blackwell, Oxford, s. 123–130.
- Volkman J.K., 1988 – Biological marker compounds as indicators of the depositional environments of petroleum source rocks. W: A.J. Fleet, K. Kelets and M.R. Talbot (Eds), *Lacustrine Petroleum Source Rocks*. Geological Society Special Publication 40. Blackwell, Oxford s. 103–122.

**ZJAWISKA GAZODYNAMICZNE W WYSADZIE SOLNYM KŁODAWY
JAKO NARZĘDZIE STRATYGRAFICZNE CECHSZTYNU**

Słowa kluczowe

Zjawiska gazodynamiczne, litostratygrafia cechsztynu, najstarsza sól kamienna, łupek cuchnący, anhydryt podstawowy, biomarkery, n-alkany, izoprenoidy acykliczne

Streszczenie

Znajomość budowy wewnętrznej wysadów solnych jest kluczowa dla bezpiecznej eksploatacji złóż soli i bezpiecznego posadowienia w nich magazynów paliw oraz składowisk odpadów. Podstawą rozpoznania geologicznej struktury wysadów jest określenie litostratygrafii budujących je skał serii solnej. Niniejsza praca przedstawia możliwość wykorzystania zjawisk gazowych do rozpoziomowania utworów najstarszego cyklotemu solnego (PZ1) od cyklotemu starszego (PZ2) na przykładzie wysadu solnego Kłodawy.

Zjawiska gazowe zostały licznie udokumentowane w południowej części obszaru eksploatacyjnego Kopalni Soli „Kłodawa” S.A. W strefach wyrzutu gazów stwierdzono obecność wybuchowych mieszanin CH₄, C_xH_y, H₂S i N₂ oraz nieznaczny udział CO, CO₂ i H₂. Na podstawie geochemicznej charakterystyki węglowodorów z wy-

sieków i skał występujących w strefach wyrzutów gazów wykazano, iż strefy gazonośne są ciągłe i przepuszczalne na długich odcinkach w wysadzie, a ich przebieg kontrolowany jest przez wielkoskalowe fałdy. Stwierdzono ponadto korelację stref gazonośnych z poziomem łupku cuchnącego i szeroko pojmowaną granicą między najstarszą oraz starszą solą kamienną. Stwarza to możliwość ich wykorzystania do wyznaczenia granicy między powyższymi solami.

Prześciowa sekwencja skalna między najstarszą a starszą solą kamienną najczęściej zachowana jest w wysadzie relikto-wo, w postaci bloków anhydrytu podstawowego, a rzadziej łupku cuchnącego. Charakterystyczne cechy petrograficzne tych skał – naprzemienna biało-szara laminacja i obecność nodul siarczanowo-krzemionkowych w części anhydrytu podstawowego oraz wyczuwalna obecność siarkowodoru w łupku cuchnącym – pozwalają zidentyfikować te poziomy nawet przy znacznej redukcji ich miąższości. Dodatkowo granicę cyklotemów podkreśla kontrast barwny stropowej części najstarszej soli kamiennej (szarej) i spągowej części starszej soli kamiennej (białej). W przypadku silnego tektonicznego roztarcia sekwencji iłolupkowo-anhydrytowej sole kamienne rozdzielone są ciemną smugą wykazującą zawartość siarkowodoru. Wzdłuż takiego kontaktu notowane są również wyrzuty gazów. Strefy gazonośne stanowią zatem dodatkowe narzędzie umożliwiające wyznaczenie granicy między dwoma najstarszymi cyklotemami solnymi, nawet przy niekompletnym profilu litostratigraficznym. Przedstawione w pracy obserwacje umożliwiają wyznaczanie pozycji łupku cuchnącego i stref gazonośnych w wysadzie już na etapie otworowego rozpoznawania złoża.

GAS HAZARDS IN KŁODAWA SALT STRUCTURE AS A ZECHSTEIN STRATIGRAPHIC INDICATOR

Key words

Gas hazards, litostratigraphy of Zechstein, Oldest Halite, Stinking Shale, Basal Anhydrite, biomarkers, n-alkanes, acyclic isoprenoids

Abstract

Recognition of internal structure of salt diapirs has a key significance for safe and efficient excavation of rock salt as well as for safe location of caverns for hydrocarbon storage and waste disposal in salt bodies. Interpretation of salt structure architecture is primarily based on identification and mapping of lithostratigraphic horizons. In case of salt domes located in Polish Lowlands, built of Zechstein formations, the internal stratigraphy of beds is easy to establish when a complete sequence of lithological units is observable. However, due to folding and shearing of the salt sequence, more competent beds have become boudinaged and distorted. Thus, direct contacts of rock salt of different Zechstein cyclothems are common in the salt domes, complicating restoration of their internal structure. This paper presents the ability of using gas hazard zones as indicators of the boundary between the oldest (PZ1) and older (PZ2) Zechstein evaporite cycles and between the Oldest Halite and Older Halite rock salt.

Gas hazards have been widely documented in the southern part of the excavation area in the Kłodawa Salt Structure, that is build of intensely folded salt rocks of 4 Zechstein evaporite cycles. These were dominantly outbursts of CH_4 , C_xH_y , H_2S and N_2 mixture, with minor content of CO , CO_2 and H_2 . Hydrocarbon leaks were also observed locally in the zones. Emission of toxic hydrogen sulphide was of particular significance, as its occurrence lead to temporal abandonment of salt excavation in some galleries. Superposed sheath folding resulted in discontinuity of rock beds, therefore for long it had not been possible to establish the controls on the gas hazard distribution. Although Poborski C. & Poborski J. (1965) noted that the Stinking Shale and Basal Anhydrite occur in some gas hazards zones, little was done on systematic analysis of this observation. Recent works (Burliga et al. 2007; Burliga & Misiek 2007) showed that there is strict relationship between litostratigraphy, tectonics and gas hazard location. Gas bearing zones proved to correlate with Stinking Shale/Basal Anhydrite horizons and with contacts of large scale sheath folds, and they seem to be continuous over large distances in the salt dome.

In order to assess the continuity of gas hazard zones, geochemical analyses of hydrocarbons occurring in the zones were carried. The samples were taken from sites located at two mine levels (572 and 600), being at about 30 m vertical distance. Extracts from host rocks (shale and rock salt) as well as hydrocarbons from leaks were

analysed with GC-MS. The n-alkanes from rock salt at 572 level are characterized by high concentration of acyclic isoprenes – phitane, pristane, farnesene among others – whereas they are missing in salt at 600 level. The extracts from shale depict similar composition on both levels and contain acyclic isoprenes of chlorophyll and bacteriochlorophyll origin (phitane, pristane and farnesene, narofarnesen, respectively). Hydrocarbons from the leaks are characterized by bimodal distributions of the n-alkanes with odd-to-even (C11–C17) and even-to-odd (C20–C28) predominance (Fig 1). They contain acyclic isoprenes alike as those detected both in shale and rock salt, indicating, thus, that the hydrocarbons could mix and migrate throughout the gas bearing zone.

The correlation of gas bearing zones with the Stinking Shale horizon and their continuity in the salt dome indicate that identification of this lithostratigraphic unit is crucial for safety of salt excavation. However, because of its rheological properties, this shale is rarely preserved as a bed – most commonly it is completely missing in rock profiles. Therefore, the boundary between the oldest and older Zechstein evaporite cycles generally coincides with a lithologically variable horizon that hosts gas hazards. There are several physical rock features enabling to position that boundary, even if the rock profile is incomplete. Contrasting colour of rock salt at the boundary with shale-anhydrite sequence separating salts of the Oldest Halite and the Older Halite units is the most remarkable feature. The uppermost part of the Oldest Halite is built of greyish to dark grey layered rocks salt, whereas the bottom section of the Older Halite profile constitutes of white (transparent), subtly layered rock salt (Fig. 2 and 3). If the Basal Anhydrite is present, it is distinguishable by two contrasting lithofacies: dark grey anhydrite with barely visible lamination and laminated anhydrite with distinct white and dark grey alternating laminae, containing anhydrite-silica nodules (Fig. 2). Stinking shale is dark grey-to-black in colour and it commonly occurs only as a thin layer attached to the Basal Anhydrite block. The Upper Anhydrite and Main Dolomite units are rarely preserved and they are poorly documented, thus they do not have significance in practical positioning of the boundary between the first two evaporite Zechstein cycles in the Kłodawa Salt Structure.

In case of intense tectonic distortion of shale-anhydrite sequence, a remarkably dark layer typically separates rock salts of the Oldest Halite and the Older Halite (Fig. 3). Detailed investigations of such layers showed that apart from very fine remnants of the Basal Anhydrite beds and dark clay smears, hydrogen sulphide can be smelled in it. This gas is also detectable in rock salt at the cycle boundary zone, even if the primary host rock is completely missing. Combining all observation together it can be stated that gas bearing zones provide an alternative tool for positioning the stratigraphic boundary between Zechstein 1 and Zechstein 2 evaporite cycles. These gas phenomena can not be used, however, separately, without a lithological control, as they also occur along the tectonic contacts of large scale sheath folds.