

INKLUZJE W SOLACH BITUMICZNYCH WYSADU KŁODAWSKIEGO

Inclusions in bituminous salts from Kłodawa Salt Dome

Tomasz TOBOŁA

*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska;
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: tob@geolog.geol.agh.edu.pl*

Treść: Tak zwane sole bitumiczne są rodzajem skał solnych wykazującym znaczną zawartość węglowodorów nadającą im specyficzny kolor i zapach. W wysadzie kłodawskim występują w formie nagromadzeń o różnych wielkościach i kształtach. Najczęściej tworzą one nieregularne smugi, soczewki lub pasma o zróżnicowanych barwach zmieniających się od jasnożółtego po ciemnobrązowy. Badania petrologiczne tych utworów w płytkach grubych wykazały obecność bardzo różnorodnie wykształconych zespołów inkluzji fluidalnych. Zmienność ta dotyczy zarówno rozmiarów i kształtów inkluzji, jak i stosunku fazy gazowej do ciekłej oraz roztworów do zawartości węglowodorów. Pod tym względem wyróżnionych zostało siedem głównych typów zespołów inkluzji, pomiędzy którymi występują typy pośrednie. Występujące w poszczególnych zespołach inkluzji węglowodory także wykazują dużą różnorodność pod względem własności optycznych zarówno w świetle widzialnym, jak i ultrafioletowym.

Słowa kluczowe: wysad Kłodawa, cechsztyń, sole bitumiczne, sole epigenetyczne, inkluzje fluidalne

Abstract: The so-called bituminous salts are a kind of salt rocks, which display considerable amounts of hydrocarbons giving them a specific colour and smell. In Kłodawa Salt Dome they occur as concentrations of various size and shape. Most often they form irregular streaks, lenses or bands of salts with different colours changing from light yellow to dark brown. The petrological investigations of such salts in thick plates showed a presence of very different fluid inclusion assemblages (FIA). They vary in size of inclusions, their shapes, the ratio of the gas to liquid phase and the ratio of solutions to hydrocarbons. In this respect, seven main types of FIA were distinguished including intermediate types, as well. Hydrocarbons occurring in singular FIA also show diversity in terms of optical properties in visible and ultraviolet light.

Key words: Kłodawa Salt Dome, Zechstein, bituminous salts, epigenetic salts, fluid inclusions

WSTĘP

Zagadnienie migracji węglowodorów ciekłych i gazowych w różnych utworach skalnych od wielu lat budzi duże zainteresowanie geologów nie tylko ze względów poznawczych, ale także praktycznych, związanych z poszukiwaniem złóż. Rozwój metod badawczych pozwala na coraz dokładniejsze rozpoznanie problemu. Szczególne znaczenie mają tu badania inkluzji fluidalnych występujących w minerałach diagenetycznych i epigenetycznych, które ze względu na swoją genezę stanowią zapis warunków termicznych i ciśnieniowych panujących w trakcie migracji. Jednocześnie zawierają one pierwotne niezmienione medium (ciecze, gazy) przemieszczające się w środowisku skalnym (m.in. Roedder 1979, Roedder & Belkin 1980, Bodnar 1990, Parnell *et al.* 1996, Aplin *et al.* 1999, 2000, Thiéry *et al.* 2000, Volk *et al.* 2000, Munz 2001, Liu *et al.* 2003, Tseng & Pottorf 2003, Bourdet *et al.* 2008).

Częste współwystępowanie złóż węglowodorów ciekłych i gazowych wraz z ewaporatami było zjawiskiem znanym i od dawna wielokrotnie opisywanym w literaturze geologicznej. Ta współzależność wynika z dobrych własności kolektorskich ewaporatów węglanowych oraz siarczanowych i jednocześnie cech izolacyjnych grubych pokładów soli kamiennej. W obrębie cechsztyńskiej formacji solonośnej obszaru Polski występowanie złóż węglowodorów ciekłych i gazowych zostało stwierdzone w wielu miejscach (Karnkowski 1993, 2000a, b). Szczególne znaczenie mają utwory dolomitu głównego, które stanowią skałę macierzystą i kolektorską dla złóż ropy i gazu (Depowski *et al.* 1978, Kotarba *et al.* 2000a, b). Duże znaczenie surowcowe posiadają także utwory wapienia cechsztyńskiego (Karnkowski 2000a *op. cit.*). Nagromadzenia te występują głównie w peryferycznych częściach basenu cechsztyńskiego, a ich wpływ na wyżej zalegające sole kamienne określony został w pracy Kovalevych *et al.* (2008).

W centralnej części basenu cechsztyńskiego w Polsce, gdzie zlokalizowane są liczne struktury solne (Szybist & Garlicki 2003, Szybist 2003, 2008) objawy występowania bituminów notowane były od końca XIX w. (Poborski & Werner 1956). Były to przede wszystkim drobne ślady ropy na powierzchni, a w paru przypadkach stwierdzone także w próbkach z wierceń. W górnico udoświadczonych wysadach solnych także obserwowano przejawy bitumiczności soli kamiennych. Występowały one w formie wycieków ropy naftowej w wyrobiskach kopalni „Solno” w Inowrocławiu, a następnie w kopalni „Kłodawa”. Analiza geologiczna tych wystąpień w kopalniach skłoniła pierwszych badaczy do stwierdzenia, że są to ropy pochodzenia epigenetycznego (Poborski & Werner 1956, Poborski & Marek 1970). Podobną genezę substancji organicznej na podstawie badań petrologicznych i geochemicznych soli bitumicznych wskazują Natkaniec-Nowak *et al.* (2001a, b).

ZARYS BUDOWY GEOLOGICZNEJ WYSADU KŁODAWSKIEGO

Wysad solny Kłodawa zlokalizowany jest w centralnej Polsce na obszarze Nizy Polskiego (Fig. 1). Stanowi środkową część większej struktury solnej o generalnym przebiegu NW-SE, ciągnącej się od Izbycy Kujawskiej do Solcy Wielkiej k. Łęczycy (Poborski 1957a, b, Burliga 1998). Stwierdzony został badaniami grawimetrycznymi w latach 30. XX w., a następnie rozpoznany po II wojnie światowej otworami wiertniczymi oraz wyrobiskami kopalnianymi (Burliga *et al.* 1995).

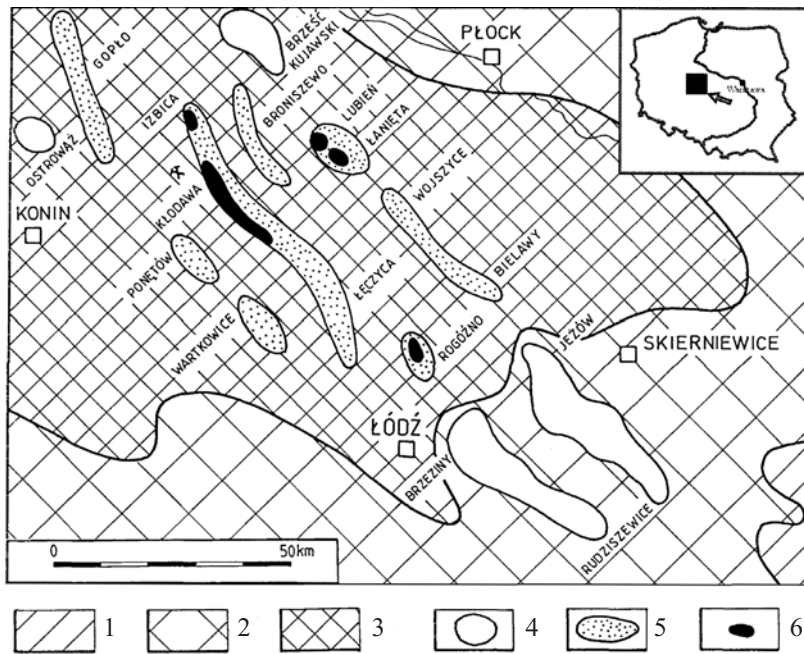


Fig. 1. Wycinek mapy litofacjalnej z lokalizacją struktur solnych w rejonie Łódź – Konin (wg Garlickiego & Szybista 1986): 1 – pole facji siarczanowo-węglanowo-litoralnej, 2 – pole facji chlorkowej, 3 – pole facji chlorkowej z solami K-Mg, 4 – poduszki i wały solne, 5 – struktury solne wydawowe częściowo przebijające się przez mezozoik, 6 – struktury solne wydawowe całkowicie przebijające się przez mezozoik

Fig. 1. Fragment of Zeichstein lithofacies map and location of salt structures in the Łódź – Konin area (after Garlicki & Szybist 1986): 1– sulphate-carbonate-littoral facies range, 2– chloride facies range, 3 – chloride facies range with K-Mg salts, salt pillows and walls, 5 – salt domes partly protruding the Mesozoic strata, 6 – salt domes entirely piercing through the Mesozoic strata

Wysad kłodawski jest największą ze znanych dotychczas w Polsce struktur solnych. W planie poziomym jest wyraźnie wydłużony w kierunku NW-SE. Jego długość wynosi 26 km, a szerokość w rejonie miejscowości Kłodawa dochodzi do 2 km. W przekroju poprzecznym do dłuższej osi przyjmuje formę asymetrycznego pnia, przebijającego się całkowicie przez nakład mezozoiczny. Południowo-zachodnia ściana wysadu jest prawie pionowa lub zapada wstecznie pod kątem około 80° na NE. Ściana północno-wschodnia jest pochylona łagodniej i zapada pod kątem $45\text{--}60^\circ$ na NE.

W profilu litostratygraficznym złoża wydzielone zostały trzy górne, w pełni wykształcone cyklotemy solne, tj. PZ2, PZ3, PZ4 (Charysz 1973, Garlicki & Szybist 1986, 1991, Wagner 1994, Burliga *et al.* 1995, Kiersnowski *et al.* 1995). Reprezentują je zespoły warstw soli kamiennych z przerostami soli potasowo-magnezowych, anhydrytów, zubrów, iłów i iłowców solnych. Utwory najstarszego cyklotemu solnego (PZ1), takie jak: łupek miedzionośny (T1), wapień cechsztyński (Ca1), anhydryt dolny (A1d), znane są tylko jako bloki tektoniczne (Burliga *et al.* 1995). Występowanie soli najstarszych (Na1) jest także problematyczne z uwagi na ich duże podobieństwo petrologiczne do soli starszych (Na2) (Kucia 1970).

Tektonika wewnętrzna złoża jest bardzo skomplikowana, ze względu na silne zaburzenia serii solnych (Tarka 1992, Burliga 1994, 1997, 2006, Burliga & Misiek 1997). Charakterystycznymi zaburzeniami są fałdy wąskopromienne o dużej amplitudzie, wysadowe przebijanie się soli starszych przez kompleksy soli młodszych i najmłodszych, przerwanie ciągłości warstw przez wyprasowanie lub rozerwanie. Generalnie, w przekroju poprzecznym (Fig. 2) zaznaczają się dwie antykliny o jądrach zbudowanych z soli starszych (Na2), rozdzielone głęboką synkliną. W planie poziomym fałdy te są wyraźnie wydłużone zgodnie z dłuższą osią wysadu. Antykлина w północno-wschodniej części wysadu zwana jest antykliną brzezną. Jej skrzydło NE zostało ścięte na etapie formowania wysadu i przebijania się utworów solnych przez mezozoik. Brak jest w nim utworów piętra PZ3 i PZ4. Z kolei południowo-wschodnie skrzydło w górnej części tworzą utwory młodsze występujące w normalnej kolejności stratygraficznej (Fig. 2). Ku dołowi natomiast obserwuje się stopniowe wyklinowanie poszczególnych ogniw.

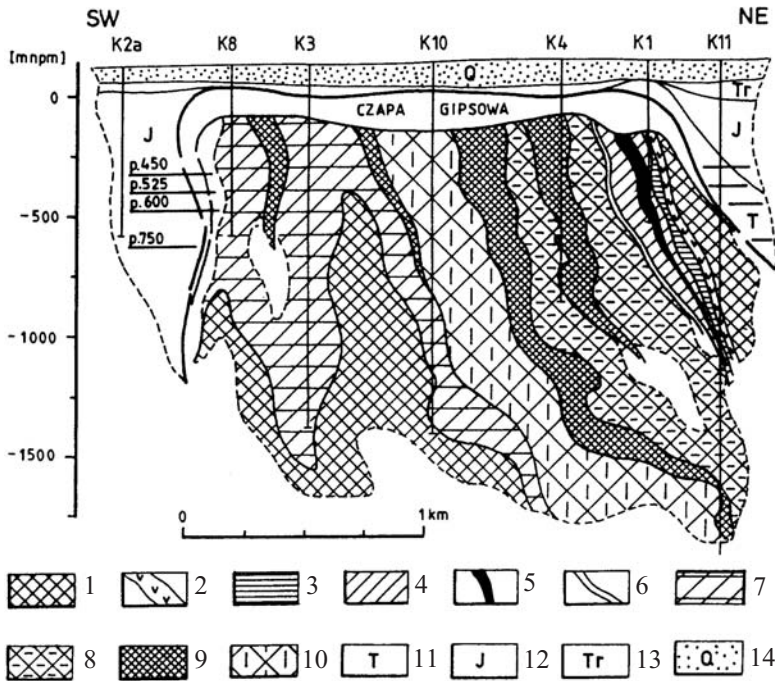


Fig. 2. Przekrój geologiczny przez górną część wysadu kłodawskiego (wg Szybista 1995): 1 – starsza sól kamienna, 2 – starsza sól potasowa, 3 – szary ił solny i anhydryt główny, 4 – młodsza sól kamienna, 5 – młodsza sól potasowa (karnalitowiec kizerytowy), 6 – zespół karnalitonosny, 7 – zespół soli młodszych, 8 – zuber brunatny i sole ilaste, 9 – najmłodsza sól kamienna (różowa), 10 – zuber czerwony z solami ilastymi, 11 – trias, 12 – jura, 13 – trzeciorzęd, 14 – czwartorzęd

Fig. 2. Geological cross-section through the upper part of Kłodawa Salt Dome (after Szybista 1995): 1 – older halite, 2 – older potassium salt, 3 – grey salt clay and main anhydrite, 4 – younger halite, 5 – younger potassium salt (kizeritic carnallite), 6 – carnallite-bearing association, 7 – younger salts association, 8 – brown zuber and clayey salts, 9 – youngest halite (pink), 10 – red zuber with clayey salts, 11 – Triassic, 12 – Jurassic, 13 – Tertiary, 14 – Quaternary

W SW części wysadu występująca forma antyklinalna wykazuje znacznie większą szerokość (Fig. 2). W górnej części rozczłonkuje się na kilka mniejszych antyklin podzielonych młodszymi utworami tworzącymi synkliny. Obie formy antyklinalne rozdzielone są głęboką synkliną, w której występują twory cyklotemu PZ3 oraz PZ4. Są to Zubry i najmłodsza sól kamienna różowa.

MIEJSCA OPRÓBOWANIA I CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH ODSŁONIEĆ

Próbki soli bitumicznych przeznaczone do badań laboratoryjnych pobrane zostały z trzech rejonów:

- 1) skrzyżowania chodnika NEVI z chodnikiem podstawowym 98 na poziomie 600 (próbka C1);
- 2) wejścia do komory KS14 na poziomie 600 (próbki C2 i C3);
- 3) chodnika wentylacyjnego do komory KS14 na poziomie 587, gdzie występują dwa odsłonięcia; pierwsze zlokalizowane jest około 3 m od pochylni na poziomie 600 rejonu (próbka nr C4), drugie stanowi strefa wyrzutowa nr 97 (próbki C5 i C6).

W pierwszym rejonie sole bitumiczne występują w formie kilku nieciągłych pasm przebiegających generalnie równolegle do uławicenia soli starszych (Na2) w tej części złoża. Uławicenie to jednak w najbliższym sąsiedztwie soli bitumicznych zanika (Fig. 5A). Pasma soli bitumicznych posiadają zmienną miąższość od kilku do kilkunastu centymetrów i nieostre granice. Miejscami przechodzą w nieregularne nagromadzenia o stosunkowo intensywnej barwie miodowej.

Istotnym elementem omawianego odsłonięcia jest występowanie także powierzchni nieciągłości o przebiegach zgodnych z ogólnym zapadaniem soli starszych. Są one na ogół bardzo słabo widoczne i dopiero miejscami występujące delikatne podkreślenie ciemniejszą smugą pozwala na ich lokalizację. O znacznym zaangażowaniu tektonicznym tych powierzchni świadczą spotykane niekiedy porwaki anhydrytu silnie pofałdowane i rozarte (Fig. 3B).

Makroskopowo sole bitumiczne w tym odsłonięciu posiadają zabarwienie od jasno do ciemnomiodowego. Są to sole grubokrystaliczne o kryształach sięgających do 15 mm, rzadziej pojawiają się fragmenty średniokrystaliczne (Fig. 3C). Wykształcenie halitu jest głównie ksenomorficzne o kryształach obłych, niekiedy nieco wydłużonych. Skała jest wyraźnie rozsypliwa.

Drugi rejon charakteryzuje się występowaniem pasa soli bitumicznych o miąższości od 20 do 30 cm, stosunkowo ostro oddzielonych od soli starszych (Fig. 3D, E). W jej obrębie sole bitumiczne wykazują duże zróżnicowanie petrologiczne zarówno co do wielkości kryształów halitu, jak i zabarwienia skały. Na jednej z granic z solami starszymi (Na2) występuje nieostra warstewka soli szarej o miąższości kilku centymetrów przechodzącej w ciemnoszarą (Fig. 3D, E). Jest to sól średniokrystaliczna, miejscami grubokrystaliczna. W jej obrębie pojawiają się stosunkowo często większe kryształy halitu o rozmiarach sięgających do 30 mm. Obserwacje pod lupą binokularną wykazały, że większe kryształy halitu są bardzo czyste, przezroczyste.

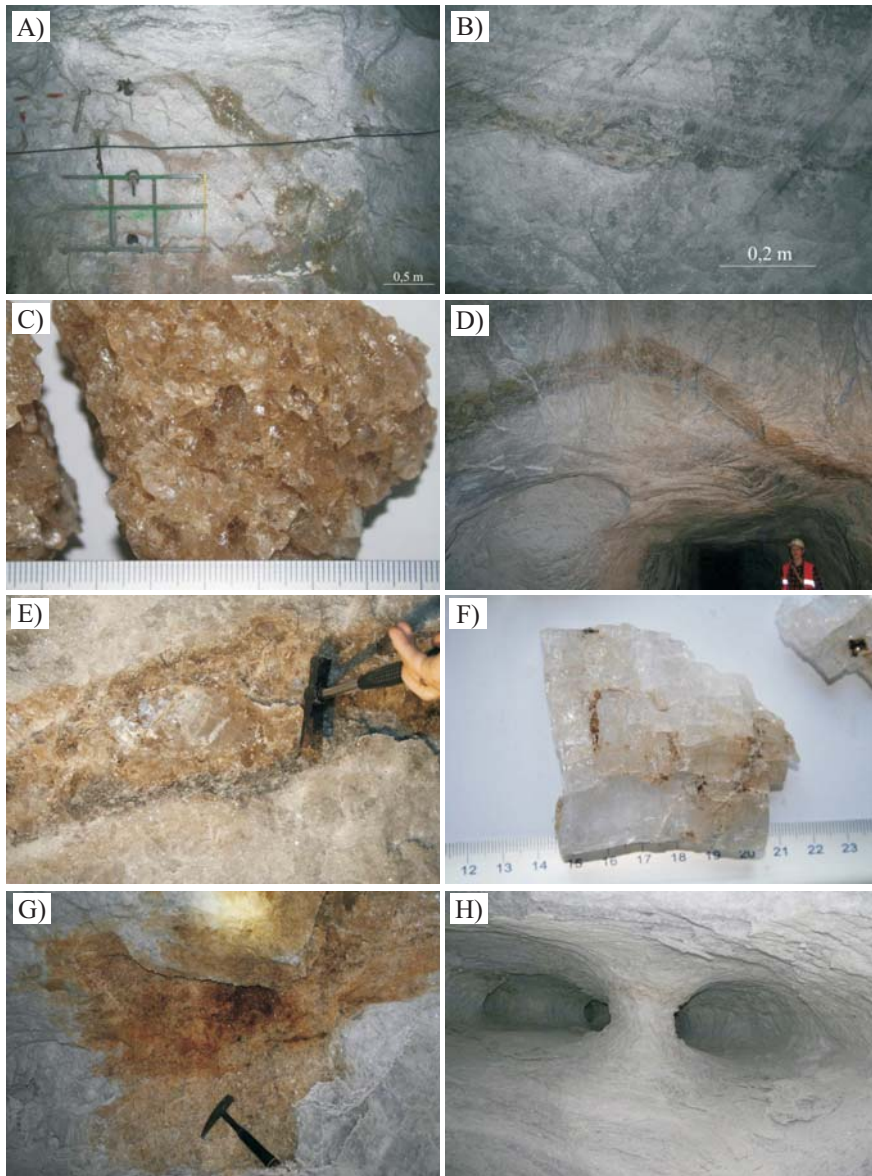


Fig. 3. A) skupienia i smugi soli bitumicznych w rejonie skrzyżowania chodnika NE VI z chodnikiem podstawowym na poziomie 600; B) porozrywane, sfałdowane i wytarte fragmenty anhydrytu na powierzchni nieciągłości w rejonie skrzyżowania chodnika NE VI z chodnikiem podstawowym na poziomie 600; C) sole bitumiczne ze skupień zlokalizowanych jak na figurze A; D) rozmieszczenie pasma soli bitumicznych przy wejściu do komory KS14 na poziomie 600; E) zmienność zabarwienia w paśmie soli bitumicznych przy wejściu do komory KS14 na poziomie 600; F) duże kryształy halitu z widocznymi międzyziarnowymi brunatnymi skupieniami substancji bitumicznej; G) nagromadzenie soli bitumicznych w chodniku wentylacyjnym do komory KS14 na poziomie 587; H) komory powyrzutowe w chodniku wentylacyjnym do komory KS14 na poziomie 587

W bardziej drobnokrystalicznych fragmentach opisywanego pasa można napotkać pojedyncze, drobne (rzędu dziesiątej części milimetra) owalne skupienia szarej lub brunatno-szarej, niekiedy niemal czarnej substancji. Występują one głównie na granicach kryształów, a rzadziej w ich obrębie. Znacznie częściej natomiast i o większych rozmiarach oraz bardziej nieregularnych kształtach podobnie zabarwione skupienia widoczne są w ciemnoszarych partiach skały. Rozmieszczone są na ogół także na granicach halitu. Często towarzyszą im przy tym bardzo drobne kryształy anhydrytu.

Główną masę pasa soli bitumicznych stanowią sole grubokrystaliczne i kryształowe o zabarwieniu od jasno- do ciemnomiodowego. Kryształy halitu mają rozmiary od 5 mm do 15 mm i wykształcone są ksenomorficznie lub hipautomorficznie. W skale widoczne są miejscami liczne skupienia o rozmiarach do 1 mm, niekiedy 2–3 mm, czarnej lub ciemnobrązowej substancji. Poza tymi skupieniami kryształy halitu są czyste, przezroczyste.

W obrębie tych soli bardzo często pojawiają się kryształy halitu o rozmiarach sięgających do 15 cm (Fig. 3E). W kryształach tych miejscami spotykane są kilkumilimetrowej średnicy skupienia czarnej lub brunatnej substancji. Rozmieszczone są one chaotycznie lub układają się wzdłuż powierzchni łupliwości, tworząc miejscami większe koncentracje (Fig. 3F). Makroskopowo duże kryształy wykazują znaczne deformacje tektoniczne w formie spękań skośnych do powierzchni łupliwości, a także zdeformowane powierzchnie łupliwości.

W trzecim rejonie, tj. w chodniku wentylacyjnym, w pierwszym odsłonięciu sole bitumiczne tworzą gniazdo o zarysach nieregularnych ostro oddzielone od soli starszych (Fig. 3G). Są to sole od średniokrystalicznych do kryształowych, z kryształami halitu osiagającymi ponad 4 cm. Zabarczenie skały jest zmienne od ciemnobrunatnego dla mniejszych kryształów do jasnomiodowego dla większych kryształów. W dużych kryształach widoczne są kilkumilimetrowe (2–3 mm) ciemnobrunatne skupienia rozmieszczone równomiernie. W solach tych spotykane są często także ciemnoszare lub czarne skupienia. Mają one rozmiary od 1 mm do kilku centymetrów i często wokół nich halit przyjmuje ciemnomiodowe zabarwienie.

Drugie odsłonięcie w tym wyrobisku zlokalizowane jest około 10 m od pochylni. Stanowią je dwie znacznie wydłużone kawerny powyrzutowe o średnicach około 1.5 m. Ich osie mają przebieg stosunkowo nieregularny i nachylenie zbliżone do pionowego. Długość kawern jest trudna do ustalenia ze względu na brak dostępu do nich oraz znaczne zagrożenia obrywami (Fig. 3H). W widocznej z chodnika wentylacyjnego ich części zaobserwować można, że wzdłuż osi kawern rozprzestrzeniają się smugi i przewarstwienia soli bitumicznych.

Fig. 3. A) concentration and streaks of bituminous salt in the area of crossing of the NE VI gallery and main gallery at level 600; B) torn apart, folded and faded fragments of anhydrite at the surface of discontinuity in the region of crossing of the NE VI gallery and main gallery at level 600; C) bituminous salts from the conglomerations shown on figure A; D) band of bituminous salt in the chamber KS14 at level 600; E) variability of color in the bituminous salt band; F) large halite crystals with visible aggregates of brown bituminous substances located between grains; G) agglomeration of bituminous salt in the ventilating gallery to the chamber KS14 at level 587; H) outburst caverns in the ventilating gallery to the chamber KS14 at level 587

Makroskopowo sole bitumiczne podobnie jak w wyżej wymienionych odsłonięciach są średnio- lub grubokrystaliczne z pojedynczymi większymi kryształami halitu, których rozmiary osiągają około 3 cm. W odróżnieniu od wyżej wspomnianych soli odznaczają się barwą jasnożółtą, rzadziej ciemnożółtą.

PREPARATYKA

Z każdej z pobranych próbek wykonanych zostało po kilka preparatów w formie płytek grubych, reprezentujących różne cechy makroskopowe skał, takich jak zmienność zabarwienia, obecność zanieczyszczeń, wielkość kryształów itp. Preparaty uzyskiwano w dwojaki sposób. Z większych kryształów halitu preparaty otrzymywano w wyniku rozłupywania próbki wzdłuż powierzchni łupliwości, a następnie szlifowano ręcznie na zestawie papierów ściernych do grubości 0.5–1.5 mm i polerowano. W przypadku fragmentów skały o mniejszych kryształach płytki grube otrzymywano w wyniku cięcia piłą wolnoobrotową „Minitom” firmy Struers.

Obserwacje inkluzji fluidalnych wykonano przy użyciu mikroskopu polaryzacyjnego do światła przechodzącego Nikon ECLIPSE E600 wyposażonego w obiektywy o powiększeniu 5×, 10×, 20×, 50×. Jako dodatkowego oświetlenia używano lampy diodowej UV o długości fali 365 nm.

OBSERWACJE MIKROSKOPOWE

Wszystkie analizowane próbki soli bitumicznych, pomimo iż pochodzą z różnych odsłoneń, w obrazie mikroskopowym wykazują bardzo wiele wspólnych cech. Charakteryzuje je duża różnorodność koncentracji zanieczyszczeń oraz rozmieszczenia zespołów inkluzji fluidalnych. Kryształy halitu są na ogół stosunkowo czyste, przezroczyste. Jedyne miejscami zawierają one większe nagromadzenia zanieczyszczeń lub zespołów inkluzji fluidalnych. Mineralem towarzyszącym halitowi w solach bitumicznych jest anhydryt, który tworzy osobniki o rozmiarach od kilkudziesięciu mikrometrów do ponad 1 mm. Drobniejsze jego kryształy są na ogół wykształcone ksenomorficznie lub hipautomorficznie, większe natomiast częściej przyjmują bardziej prawidłowe kształty.

Rozmieszczenie anhydrytu w halicie jest nierównomierne. W bardziej drobnokrystalicznych odmianach soli najczęściej występuje on na granicach kryształów halitu, gdzie towarzyszy mu ciemnobrunatna lub czarna, nieprzezroczysta substancja. Miejscami przy granicach tworzą one gęste nagromadzenia złożone z bardzo drobnych kryształów (Fig. 4A) lub promieniste skupienia zbudowane z dużych, charakterystycznie wykształconych osobników (Fig. 4B). W obu przypadkach towarzyszy anhydrytowi ciemnobrunatna substancja prawdopodobnie pochodzenia bitumicznego. W skupieniach promienistych anhydryt posiada bardzo wydłużone kształty, przy czym ich zarysy są wyraźnie owalne, rurkowate z obłymi i gładkimi zakończeniami (Fig. 4C). Często posiadają one spękania o przebiegu zbliżonym do prostopadłego do dłuższej osi. Na przedłużeniu tych spękań w obrębie halitu obserwuje się zespoły inkluzji o krótkich przebiegach dochodzących do kilkuset mikrometrów zbudowane z bardzo drobnych osobników rzędu kilku mikrometrów.

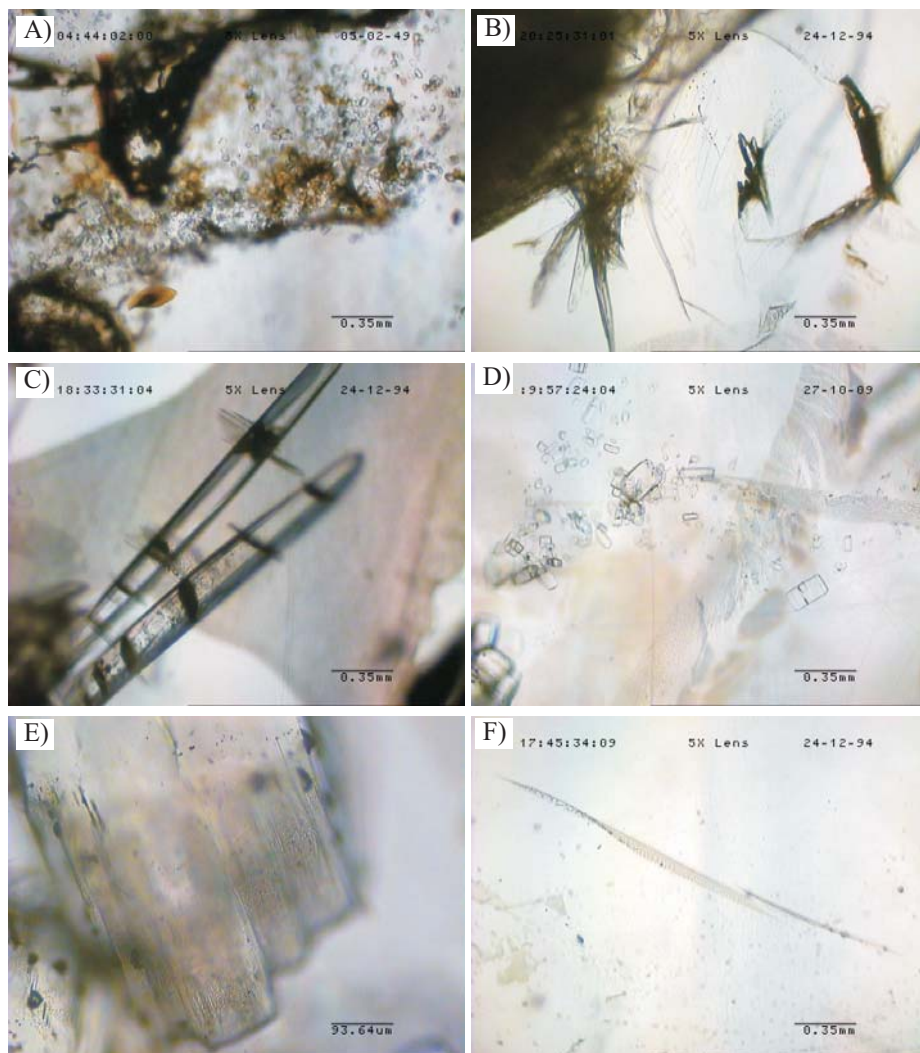


Fig. 4. Obrazy mikroskopowe w świetle przechodzącym (1N): A) skupienia anhydrytu z towarzyszącą brunatną substancją bitumiczną występujące przy granicach kryształów halitu; B) promieniste skupienia dużych, charakterystycznie wykształconych kryształów anhydrytu; C) bardzo duże kryształy anhydrytu o obłych zakończeniach, ze spękaniem o przebiegach prostopadłych do ich osi wypełnionymi ciemnymi węglowodorami; D) nagromadzenia różnej wielkości kryształów anhydrytu w formie smug występujące w większych kryształach halitu; E) duży kryształ anhydrytu z licznymi inkluzjami na powierzchni; F) zespół bardzo małych inkluzji o krótkim przebiegu

Fig. 4. Microphotos in transmitted light (1N): A) concentration of anhydrite with brown bituminous matter located near the boundary of halite crystals; B) radial concentration of large crystals of anhydrite; C) very large crystals of anhydrite with rounded ends and cracks perpendicular to the axis filled with dark hydrocarbons; D) accumulation of anhydrite crystals of various sizes in the form of streaks occurring in larger halite crystals; E) large anhydrite crystals with numerous inclusions on the surface; F) assemblage of very small inclusions of a short course

Zarówno spękania w anhydrycie, jak i inkluzje wypełnione są ciemnymi węglowodorami, które w świetle UV wykazują słabą fluorescencję w barwach ciemnoniebieskich. Inkluzje wypełnione węglowodorami spotykane są także na powierzchniach tych kryształów (Fig. 4C).

W większych kryształach halitu różnej wielkości osobniki anhydrytu tworzą smugi o przebiegach zbliżonych do prostoliniowych lub nieznacznie falistych, często łączących się we wspólnym punkcie (Fig. 4D). W smugach tych znacznie rzadziej występują bituminy, które najczęściej tworzą małe inkluzje rozmieszczone na powierzchniach anhydrytu.

Anhydryt występuje w solach bitumicznych stosunkowo często także w formie pojedynczych bezładnie rozmieszczonych kryształów. Mają one rozmiary około 0.1–0.5 mm i wykształcenie hipautomorficzne, niekiedy prawie automorficzne. Na ich powierzchniach występują liczne inkluzje o rozmiarach rzędu kilku mikrometrów. W niektórych przypadkach ich nagromadzenie jest tak duże, że tworzą gęstą sieć połączonych ze sobą inkluzji (Fig. 4E). Inkluzje te wypełnione są roztworami, węglowodorami lub fazą gazową.

W halicie inkluzje fluidalne tworzą zespoły bardzo zróżnicowane pod względem wielkości budujących je składników oraz medium wypełniającego. Ich przebiegi nie wykazują uprzywilejowanej orientacji, a rozmieszczenie w obrębie kryształów jest nierównomierne. Spotyka się całe kryształy lub znaczne ich fragmenty pozbawione inkluzji. W innych miejscach tworzą one liczne nagromadzenia zbudowane z różnych typów inkluzji często przecinające się lub rozchodzące ze wspólnego punktu. Generalnie wyróżnić można kilka typów zespołów występujących zarówno w dużych, jak i mniejszych kryształach halitu. Pomiędzy poszczególnymi typami obserwuje się szeregi pośrednie co do sposobu wykształcenia inkluzji lub medium wypełniającego je. Poniżej scharakteryzowano jedynie wybrane, najczęściej pojawiające się typy zespołów.

Pierwszy, najczęściej spotykany typ tworzą zespoły złożone z drobnych inkluzji o rozmiarach rzędu od kilku do kilkunastu mikrometrów. Przebieg tego typu zespołów jest najczęściej krótki (do 2–3 mm) i nieco falisty (Fig. 4F). Niekiedy przybierają one przebiegi bardziej złożone, kręte, rozwidlające się lub grzebieniowate (Fig. 5A). Często też towarzyszą innym typom zespołów inkluzji. Tworzące je inkluzje mają kształty regularne, zbliżone do sześciennych. Charakterystyczną cechą tych zespołów jest ich zakończenie przejawiające się stopniowym zmniejszaniem rozmiarów inkluzji aż do ich całkowitego zaniku. We wszystkich analizowanych solach w tego typu zespołach inkluzje najczęściej są jednofazowe, wypełnione węglowodorami. W świetle przechodzącym są one bezbarwne lub o jasnożółtym zabarwieniu, natomiast w świetle UV wykazują bardzo intensywną fluorescencję o barwie jasnoniebieskiej. Tylko w niektórych zespołach obserwowane były fragmenty zbudowane z szeregu inkluzji wypełnionych jedynie gazem (Fig. 5B).

Nieco rzadziej spotykane są podobnie wykształcone pod względem geometrycznym inkluzje wypełnione solankami, którym w różnych proporcjach towarzyszy faza gazowa. Ta ostatnia najczęściej zgromadzona jest głównie w zakończeniach przebiegu całego zespołu, tj. w mniejszych inkluzjach.

Drugi typ zespołów tworzą inkluzje także o prawidłowych, regularnych kształtach, niekiedy nieco wydłużonych, lecz o znacznie większych rozmiarach sięgających kilkudziesięciu mikrometrów. Przebiegi tego typu zespołów są na ogół znacznie dłuższe, a zakończenia podobnie jak w pierwszym typie charakteryzują się zmniejszaniem rozmiarów inkluzji.

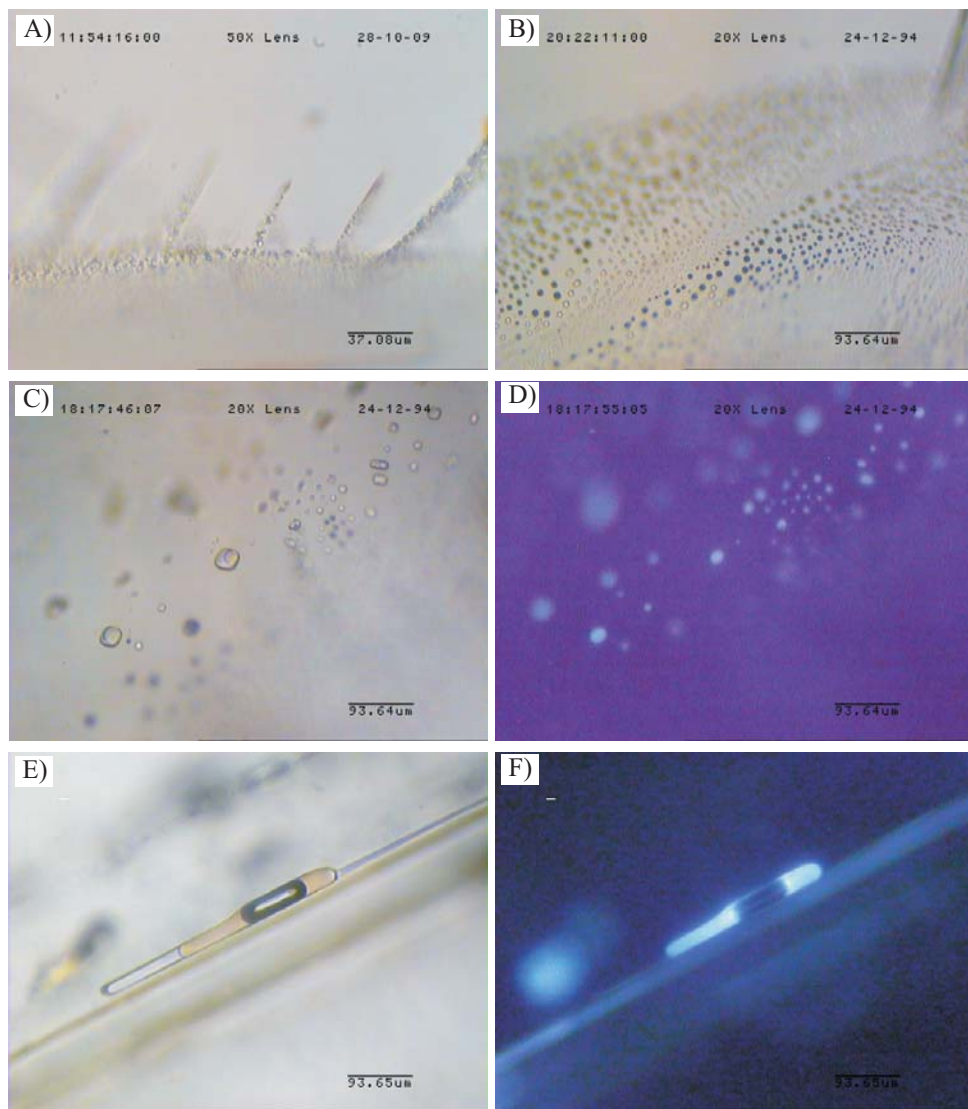


Fig. 5. A) zespół bardzo drobnych inkluzji o grzebieniowatych rozwidleniach (1N); B) zespół bardzo drobnych inkluzji, z których część wypełniona jest jedynie fazą gazową (1N); C) i D) większe inkluzje wypełnione solankami i węglowodorami (C – obraz w świetle przechodzącym (1N), D – obraz w świetle UV); E) i F) silnie wydłużone inkluzje wykazujące proces zmiany kształtu inkluzji wypełnione solanką, węglowodorami i fazą gazową (E – obraz w świetle przechodzącym (1N), F – obraz w świetle UV)

Fig. 5. A) assemblage of very small inclusions of comb bifurcations; B) assemblage of very small inclusions; part of them is filled with gas phase only; C) and D) larger inclusions filled with brines and hydrocarbons (C – microphoto in transmitted light (1N), D – microphoto in UV light); E) and F) strongly elongated inclusions showing the process necking down, filled with brine, hydrocarbons and gas phase (E – microphoto in transmitted light (1N), F – microphoto in UV light)

Pod względem substancji wypełniającej wyróżnić można trzy podtypy:

- 1) inkluzje wypełnione jedynie jasnożółtymi węglowodorami, przy czym sporadycznie towarzyszy im faza gazowa, zawsze w zmiennych proporcjach;
- 2) inkluzje wypełnione solankami, lecz w tym przypadku towarzyszy im w większej ilości faza gazowa w bardzo zmiennych proporcjach, tak że obserwowane jest ciągłe przejście od inkluzji ciekłych po inkluzje z wyraźną przewagą fazy gazowej;
- 3) inkluzje ciekłe wypełnione solankami i węglowodorami o różnej proporcji poszczególnych składników; najczęściej dominującym składnikiem jest solanka, w której występują kuliste skupienia jasnożółtych lub bezbarwnych węglowodorów dobrze widocznych w świetle ultrafioletowym (Fig. 5C, D).

Występujące w tych zespołach węglowodory w świetle UV wykazywały fluorescencję w barwach jasnoniebieskich.

Trzeci typ zespołów budują inkluzje o znacznie większych rozmiarach, bardzo silnie wydłużonych w kierunku przebiegu całego zespołu (Fig. 5E, F). Ich rozmiary sięgają ponad 0.5 mm wzdłuż dłuższej osi, przy średnicach rzędu kilkunastu mikrometrów. W większości przypadków są to inkluzje wypełnione głównie węglowodorami o zabarwieniu w świetle przechodzącym jasnożółtym lub miodowym. W mniejszej ilości towarzyszą im solanki, przy czym proporcje obu składników są na ogół bardzo zmienne. Inkluzje w tym typie miejscami wykazują także proces zmiany kształtu (*necking down*), związany z występowaniem większej ilości solanek. W niektórych inkluzjach pojawiają się również znaczne ilości fazy gazowej (Fig. 5E).

W niektórych fragmentach tych zespołów inkluzje przybierają bardziej regularne kształty w formie prostopadłościanów. Na ogół wówczas obserwuje się w nich przewagę roztworów solankowych nad węglowodorami, które pojawiają się w formie kulistych skupień (Fig. 6A, B). Często towarzyszy im przy tym także faza gazowa. Występujące w tych zespołach węglowodory w świetle UV wykazują bardzo intensywną fluorescencję w barwach jasnoniebieskich (Fig. 5F, 6B).

Czwarty typ występuje jedynie w niektórych większych kryształach halitu. Budują go zespoły połączonych ze sobą inkluzji tworzących stosunkowo gęstą i regularną sieć. Inkluzje wchodzące w ich skład mają kształty silnie wydłużone, rurkowate z obłymi wypustkami (Fig. 6C). Wypełnione są one jedynie bezbarwnymi lub jasnożółtymi węglowodorami. Miejscami stopniowo połączenia między inkluzjami zanikają, a zespoły składają się z pojedynczych nieregularnych, wydłużonych i powyginanych inkluzji. W dalszej kolejności mogą one przechodzić w inkluzje o zarysach owalnych (Fig. 6D). W zespołach tych węglowodory wykazywały w świetle UV słabe wzbudzenie o barwach żółtopomarańczowych lub rzadziej ciemnoniebieskich.

Stosunkowo często w obrębie kryształów halitu spotykane są zespoły piątego typu. Zbudowane są z inkluzji o rozmiarach od kilkudziesięciu mikrometrów do ponad 300 μm , niejednokrotnie występujące w postaci sieci połączonych inkluzji (Fig. 6E, F). Charakterystyczną ich cechą są silnie spłaszczone kształty co sprawia, że są słabo widoczne przy świetle przechodzącym. Na ogół ich zarysy są nieregularne z silnie powyginanymi krawędziami. Niekiedy jednak przybierają bardziej regularne formy z brzegami o przebiegu zbliżonym do prostoliniowego. Inkluzje te wypełnione są najczęściej jasnożółtymi węglowodorami wykazującymi stosunkowo słabą fluorescencję w barwach jasnoniebieskich (Fig. 6F). Niekiedy towarzyszą im w niewielkich ilościach solanki lub rzadziej faza gazowa.

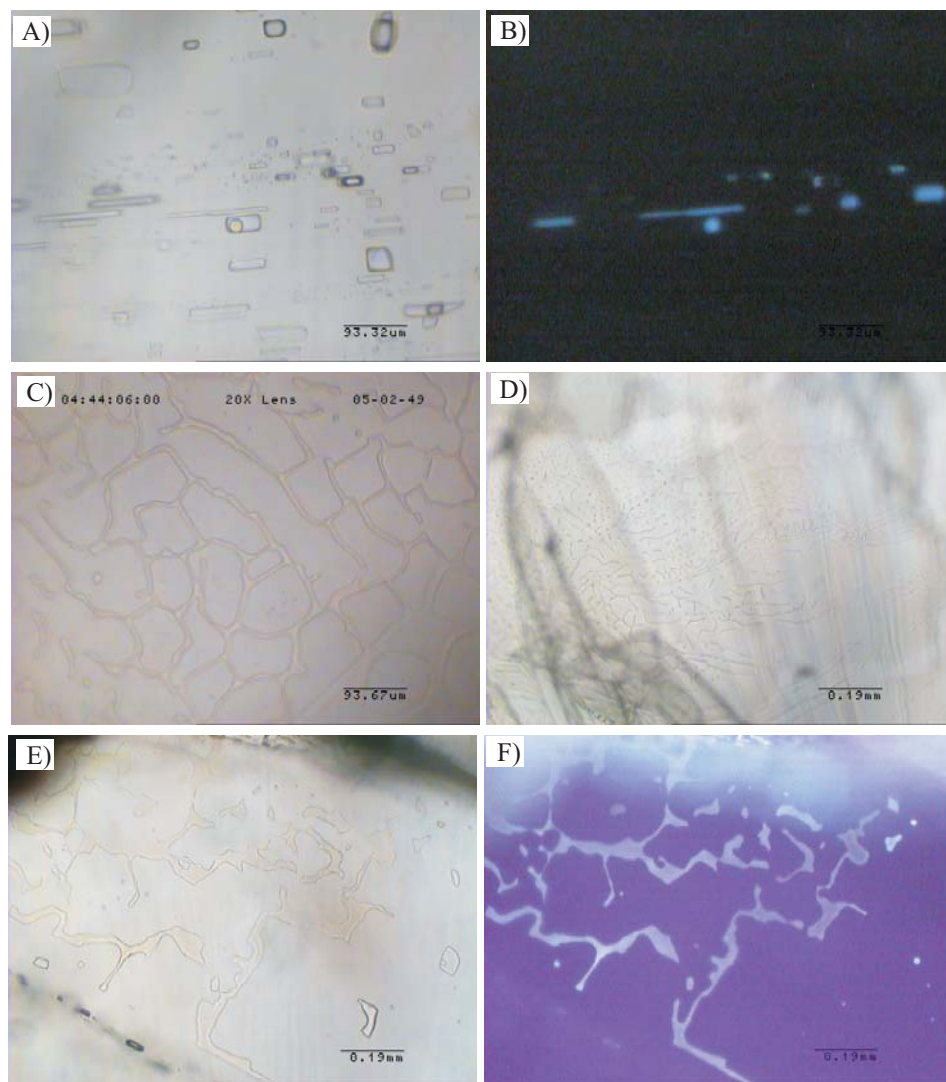


Fig. 6. A) i B) inkluzje o bardziej regularnych kształtach wypełnione solanką i węglowodorami, a niekiedy także fazą gazową (A – obraz w świetle przechodzącym (1N), B – obraz w świetle UV); C) sieć połączonych ze sobą rurkowatych inkluzji wypełnionych węglowodorami (1N); D) fragment zespołów inkluzji jak na obrazie C wykazujący stopniowy zanik połączeń pomiędzy inkluzjami i zmiany kształtu na bardziej owalne (1N); E) i F) zespół silnie spłaszczonych inkluzji wypełnionych węglowodorami (E – obraz w świetle przechodzącym (1N), F – obraz w świetle UV)

Fig. 6. A) and B) inclusions of more regular shapes filled with solutions and hydrocarbons and sometimes gas phase too (A – microphoto in transmitted light (1N), B – microphoto in UV light); C) network of connected inclusions filled with hydrocarbons (1N); D) part of FIA as in microphoto C showing the gradual disappearance of the connections between inclusions and change of their shapes to more oval (1N); E) and F) FIA with strongly flattened inclusions filled with hydrocarbons (E – microphoto in transmitted light (1N), F – microphoto in UV light)

Kolejny, szósty typ zespołów inkluzji wyróżnia się spośród wyżej wymienionych cechami petrologicznymi oraz substancją wypełniającą. Wchodzące w jego skład inkluzje posiadają zmienne rozmiary, wahające się od kilku mikrometrów do ponad 100 μm , i bardzo nieregularne, obłe, niekiedy kuliste kształty (Fig. 7A, B). Przebieg tych zespołów jest także nieregularny, zmienny. Wypełnione są one bezbarwnymi węglowodorami ciekłymi, którym towarzyszy faza gazowa. Proporcje pomiędzy oboma fazami są bardzo zmienne, od inkluzji całkowicie ciekłych do gazowych. Występujące węglowodory wykazują bardzo intensywną fluorescencję w barwach jasnoniebieskich (Fig. 7B).

Siódmy typ inkluzji spotykany we wszystkich analizowanych próbkach jest łatwy do identyfikacji i bardzo charakterystycznie wykształcony. Wyróżniają go od pozostałych typów duże rozmiary inkluzji wahające się w granicach od około 0.1 mm do niekiedy ponad 1 mm. Inkluzje te występują najczęściej w formie pojedynczych, odosobnionych elementów lub w szeregach złożonych z kilku osobników. Mają one stosunkowo regularne kształty z zaokrąglonymi narożami i nieco wypukłymi ścianami (Fig. 7C). Niekiedy ich kształty są bardzo nieregularne, wyraźnie rozarte lub rozbite na kilka drobniejszych inkluzji. Towarzyszą im wówczas powierzchnie spękań zaznaczone przez zespoły inkluzji wtórnych (Fig. 7C). Najczęściej tworzą je inkluzje bardzo małe przypominające pod względem wykształcenia zespoły pierwszego typu. Wypełnione są one przezroczystymi węglowodorami wykazującymi silną fluorescencję w świetle UV w barwach jasnoniebieskich lub solankami, którym towarzyszy faza gazowa.

Drugą cechą pozwalającą na ich łatwą identyfikację są ciemnobrunatne węglowodory wypełniające je, którym towarzyszy faza gazowa występująca w stałych do nich proporcjach wynoszących około 30% objętości inkluzji. Brak fazy gazowej lub jej znacznie większy udział obserwowany jest tylko w tych inkluzjach, które uległy późniejszym przemianom. W świetle przechodzącym węglowodory te wyróżniają także własności optyczne niezaobserwowane w innych typach inkluzji. Przy skrzyżowanych nikolach były one dobrze widoczne, wykazując barwne obrazy wywołane najprawdopodobniej skręcalnością polaryzacji światła (Fig. 7D). Najczęściej powstają barwy od ciemnożółtej poprzez czerwonawą do brązowej. W świetle UV węglowodory te wykazują na ogół słabą fluorescencję w barwach żółtopomarańczowych lub nieco silniejszą niebieskawą.

Rzadziej w większych kryształach halitu, a stosunkowo często w bardziej drobnokryształicznych odmianach soli kamiennej spotykane są powierzchnie wypełnione brunatną substancją (Fig. 7E). Przebiegają one prostolinijnie na odcinkach 2–3 mm od granic kryształów ku ich centrom. W końcowej części bardzo często przechodzą one w zespół połączonych ze sobą inkluzji, a następnie w pojedyncze inkluzje, których rozmiary stopniowo maleją aż do zaniku całego zespołu. W tych fragmentach także wyraźnie zaznacza się obecność solanek towarzyszących węglowododom (Fig. 7E). Charakterystyczną cechą jest zachowanie się węglowodorów w świetle UV, które na powierzchniach pęknięć oraz w inkluzjach posiadających połączenie z powierzchnią nie wykazują fluorescencji lub jest to bardzo słaby efekt w barwach czerwonawych (Fig. 7F). Inkluzje nieposiadające połączenia z powierzchnią wykazują natomiast bardzo intensywną fluorescencję w barwach jasnoniebieskich.

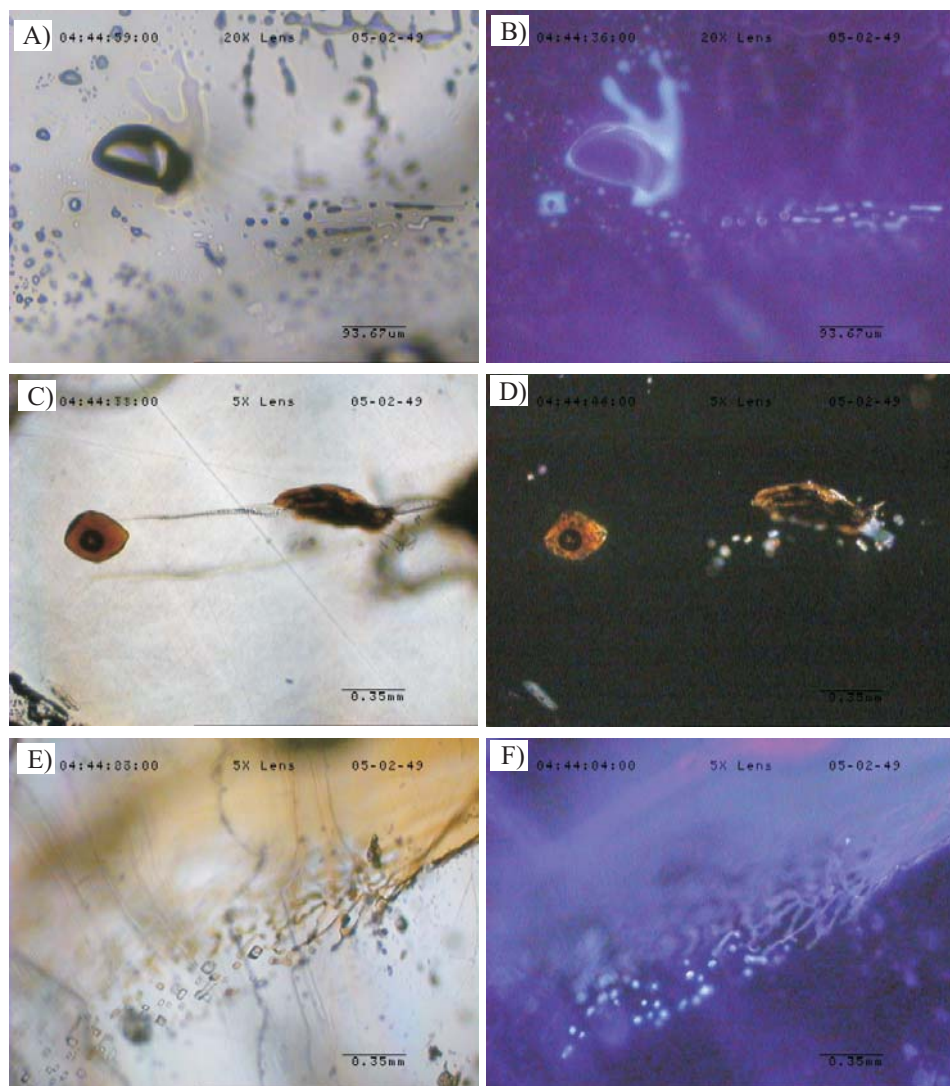


Fig. 7. A) i B) zespół złożony z inkluzji o zmiennych rozmiarach i bardzo nieregularnych kształtach wypełnionych bezbarwnymi węglowodorami oraz fazą gazową (A – obraz w świetle przechodzącym (1N), B – obraz w świetle UV); C) i D) duże inkluzje wypełnione ciemnobrunatnymi węglowodorami i fazą gazową (C – obraz w świetle przechodzącym (1N), D – obraz przy NX); E) i F) – powierzchnie spękań w halicie wypełnione brunatnymi węglowodorami przechodzące w zespół inkluzji zawierających solanki i węglowodory (E – obraz w świetle przechodzącym (1N), F – obraz w świetle UV)

Fig. 7. A) and B) FIA composed of inclusions of variable sizes and very irregular shapes, filled with colourless hydrocarbon and gas phase (A – microphoto in transmitted light (1N), B – microphoto in UV light); C) and D) large inclusions filled with dark brown hydrocarbons (A – microphoto in transmitted light (1N), B – microphoto in NX); E) and F) the cracks in halite filled with brown hydrocarbons passing into the set and brine inclusions containing hydrocarbons (E – microphoto in transmitted light (1N), F – microphoto in UV light)

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone obserwacje wykazały, że sole bitumiczne pochodzące z różnych rejonów kopalni kłodawskiej mają podobne cechy makroskopowe. Budują je najczęściej sole grubokrystaliczne i kryształowe, rzadziej średniokrystaliczne. W zdecydowanej większości nie wykazują one tekstur uporządkowanych wskazujących na sedymentacyjny charakter utworów. Występują one przeważnie w formie nieregularnych skupień lub smug, znacznie rzadziej natomiast rozprzestrzeniają się w postaci warstw, jak przy wejściu do komory KS14 na poziomie 600. We wszystkich tych przypadkach można dostrzec jednak przejawy rekryształizacji lub przemian metamorficznych, a także niekiedy wyraźne ślady zaangażowania tektonicznego, takie jak deformacje kryształów halitu.

Wszystkie analizowane próbki z poszczególnych odśnieżeń w obrazach mikroskopowych wykazują szereg wspólnych cech. Przede wszystkim utwory te charakteryzują się dużą różnorodnością zespołów inkluzji fluidalnych. Zróżnicowanie to dotyczy zarówno cech petrologicznych, takich jak wielkość i kształt inkluzji, jak również medium wypełniającego je. Pod względem sposobu ich rozprzestrzeniania w obrębie kryształów halitu wszystkie te zespoły wykazują własności typowe dla inkluzji wtórnych lub pseudowtórnych (Roedder & Belkin 1979, 1980b, 1981, Roedder 1984a, b, c, 1990, Goldstein & Reynolds 1994). Stanowią one zatem ślady po powierzchniach spekań, którymi następowała migracja. Jednocześnie brak zespołów inkluzji pierwotnych sugeruje, że utwory te uległy daleko posuniętym przeobrażeniom.

Duża różnorodność wykształcenia wtórnych zespołów inkluzji fluidalnych, jak również wyraźna zmienność składu chemicznego medium wypełniającego je pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- Migracja węglowodorów była wieloetapowa, przy czym w poszczególnych okresach wędrówce podlegały różnego typu węglowodory. Świadczy o tym zmienność ich zachowania się w poszczególnych zespołach w świetle UV, jak również różne własności optyczne w świetle przechodzącym.
- W poszczególnych okresach środowisko migracji ulegało wyraźnym zmianom. Część zespołów inkluzji jest wyraźnie jednofazowa, wypełniona jedynie węglowodorami lub solankami, co sugeruje, że okresowo środowisko migracji było homogeniczne (m.in. Goldstein & Reynolds 1994), w którym tylko jedno z tych mediów podlegało wędrówce. Istnienie jednak stosunkowo licznych zespołów inkluzji, w których obserwuje się obecność w różnych proporcjach solanek i węglowodorów, wskazuje, że oba składniki często jednocześnie się przemieszczały. W znacznej jednak części zespołów pojawia się także w bardzo zmiennych proporcjach faza gazowa, co z kolei wskazuje na zmianę środowiska na heterogeniczne.
- Sole bitumiczne podlegały zróżnicowanym w czasie stanom naprężeń tektonicznych, co prawdopodobnie powodowało zmiany kształtów inkluzji. Tego typu stany naprężeń związane mogły być ze strefami ścinania i powstawaniem nieciągłości.
- Strefy nieciągłości miały prawdopodobnie połączenia hydrauliczne z otoczeniem wysadu, skąd mogło dochodzić do migracji znacznej ilości węglowodorów i ich wychwylenia przez rekryształizujący halit.

Analiza petrologiczna soli bitumicznych wskazuje, że utwory te uległy znacznym przeobrażeniom, a procesy prowadzące do ich obecnego ukształtowania były skomplikowane i zmienne w czasie. Występowanie tych utworów jest wyraźnie związane z strefami tektoniki nieciągłej będącymi jednocześnie drogami migracji węglowodorów, gazów i solanek.

Praca finansowana z badań własnych AGH nr 10.10.140.680.

LITERATURA

- Aplin A.C., Macleod G., Lartera S.R., Pedersenb K.S., Sorensenb H. & Boothc T., 1999. Combined use of Confocal Laser Scanning Microscopy and PVT simulation for estimating the composition and physical properties of petroleum in fluid inclusions. *Marine and Petroleum Geology*, 16, 97–110.
- Aplin A.C., Larter S.R., Bigge M.A., Macleod G., Swarbrick R.E. & Grunberger D., 2000. PVTX history of the North Sea's Judy oilfield. *Journal of Geochemical Exploration*, 69–70, 641–644.
- Bodnar R.J. 1990. Petroleum migration in the Miocene Monterey Formation, California, USA: constraints from fluid-inclusion studies. *Mineralogical Magazine*, 54, 295–304.
- Bourdet J., Pironon J., Levresse G. & Tritlla J., 2008. Petroleum type determination through homogenization temperature and vapour volume fraction measurements in fluid inclusions. *Geofluids*, 8, 46–49.
- Burliga S., 1994. Blizny tensyjne w dolomicie płytowym w południowo-zachodniej części wysadu solnego Kłodawy – implikacja kinematyczna. *Przegląd Geologiczny*, 2, 99–102.
- Burliga S., 1997. Tektoniczna ewolucja wysadu solnego Kłodawy. *Materiały Konferencji, PSGS pt. „Naturalne zagrożenia w kopalniach soli”*, Ślesin k/Konina 16–18 października 1997, 69–71.
- Burliga S., 1998. *Struktura i kinetyka wysadu solnego Kłodawy*. Archiwum Zakładu Złóż Rud i Soli AGH, Kraków (praca doktorska, maszynopis).
- Burliga S., 2006. Mezo- i mikrostruktury tektoniczne w permskich utworach solnych w Polsce – wskaźniki szczegółowej budowy wewnętrznej złóż soli. *Przegląd Geologiczny*, 54, 4, 314–315.
- Burliga S., Kolonko P., Misiek G. & Czapowski G., 1995. Kłodawa salt mine. W: Małecka J. (Ed.), Upper Rotliegend – Zechstein: Terrestrial – Marine Sedimentary Succession in Polish Permian Basin, *XIII International Congress on Carboniferous-Permian, August 28 – September 2, 1995, Guide to Excursion A3*, Kraków, Poland, 45–54.
- Burliga S. & Misiek G., 1997. Kopalnia soli Kłodawy – struktura i rozwój wysadu solnego Kłodawy. *Materiały konferencji „Tektonika solna rejonu kujawskiego”*, Wyd. Wind, Wrocław, 66–76.
- Charysz W., 1973. Cechsztyńskie piętro soli młodszych (Z3) w regionie kujawskim (Zechstein stage of Younger Salts (Z3) in Kujawy region). *Prace Geologiczne*, 75, 68.

- Depowski S., Peryt T.M., Piątkowski T.S. & Wagner R. 1978. Sedymentacja i paleogeografia cechsztyńskiego dolomitu głównego a jego ropo- i gazonośność. *Przegląd Geologiczny*, 3, 141–146.
- Garlicki A. & Szybist A., 1986. Salinarne osady polskiego cechsztynu z solami potasowo-magnezowymi. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 2, 3–4, 389–404.
- Garlicki A. & Szybist A., 1991. Pierwiastki śladowe w solach kopalni kłodawskiej. *Prace Specjalne PTMin.*, 1, 71–76.
- Goldstein R.H. & Reynolds T.J. 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. *SEPM Short Course 31, Tulsa*, 199.
- Karnkowski P., 1993. *Złoża gazu ziemnego i ropy naftowej w Polsce. T. 2*. Kraków.
- Karnkowski P., 2000a. Rozwój prac poszukiwawczych w utworach cechsztynu na Niżu Polskim w latach 1945–2000. *Przegląd Geologiczny*, 48, 5, 423–428.
- Karnkowski P., 2000b. Modelowanie procesów generacji węglowodorów w utworach cechsztyńskich basenu polskiego. *Przegląd Geologiczny*, 48, 5, 443–447.
- Kiersnowski H., Paul J., Peryt M.T. & Smith D.B., 1995. Facies, Paleogeography, and Sedimentary History of the Southern Permian Basin in Europe. W: Scholle P.A., Peryt T.M. & Ulmer-Scholle D.S. (Eds), *The Permian of Northern Pangea, Sedimentary Basins and Economic Resources*, 2, 119–136.
- Kotarba M.J., Więclaw W. & Stecko Z., 2000a. Skład, geneza i środowisko generowania gazu ziemnego w utworach dolomitu głównego zachodniej części obszaru przedśudeckiego. *Przegląd Geologiczny*, 48, 5, 429 – 435.
- Kotarba M.J., Więclaw D. & Kowalski A., 2000b. Skład, geneza i środowisko generowania ropy naftowej w utworach dolomitu głównego zachodniej części obszaru przedśudeckiego. *Przegląd Geologiczny*, 48, 5, 436 – 442.
- Kovalevych V.M., Peryt T., Więclaw D. & Lytvyniuk F.M., 2008. Geochemical Aureoles Around Oli and Gas Accumulation in Zechstein (Upper Permian) of Poland: Analysis of Fluid Inclusions in Halite and Bitumines in Rock Salts. *Journal of Petroleum Geology*, 31(3), 245–262.
- Kucia Z., 1970. Nowe człony stratygraficzne cechsztynu w kopalni „Kłodawa”. *Przegląd Geologiczny*, 7, 345–346.
- Liu D.H., Xiao X.M., Mi J.K., Li X.Q., Shen J.K., Song Z.G. & Peng P.A., 2003. Determination of trapping pressure and temperature of petroleum inclusions using PVT simulation software – a case study of Lower Ordovician carbonates from the Lunnan Low Uplift, Tarim Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 20, 29–43.
- Munz I.A., 2001. Petroleum inclusions in sedimentary basins: systematics, analytical methods and applications. *Lithos*, 55, 195–212.
- Natkaniec-Nowak L., Heflik W. & Pawlikowski M., 2001a. Wyniki badań petrochemicznych kłodawskich soli bitumicznych. *Wiadomości Naftowe i Gazownicze*, 6(38), 9–15.
- Natkaniec-Nowak L., Heflik W., Pawlikowski M. & Sikora M., 2001b. Petrochemia soli bitumicznych piętra PZ2 z kopalni soli w Kłodawie. *Geologia* (kwartalnik AGH), 27, 2–4, 383–410.

- Parnell J., Carey P.F. & Monson B., 1996. Fluid inclusion constraints of petroleum migration from authigenic quartz in bitumen veins. *Chemical Geology*, 129, 217–226.
- Poborski J., 1957a. Cechsztyńska struktura solna Izbica – Łęczyca. *Przegląd Geologiczny*, 1, 31–32.
- Poborski J., 1957b. O wstępnych badaniach struktury solnej pod Łęczycą. *Prace Instytutu Geologicznego, Biuletyn*, 105, 161–186.
- Poborski J. & Marek S., 1970. Renesans poszukiwań naftowych na strukturach solnych regionu kujawskiego. *Przegląd Geologiczny*, 7, 315–320.
- Poborski J. & Werner Z., 1956. O wyciekach ropy naftowej w kopalniach soli na Kujawach. *Przegląd Geologiczny*, 12, *Komunikaty*, 574.
- Roedder E., 1979. Fluid inclusion evidence on the environments of sedimentary diagenesis, a review. *SEMP Special Publication*, 26, 89–107.
- Roedder E., 1984a. Fluid inclusions. W: Ribbe P.H. (Ed.), *Reviews in Mineralogy. Short Course Notes*, Mineralogical Society of America, 12, 644.
- Roedder E., 1984b. The fluid in salt. *American Mineralogist*, 69, 413–439.
- Roedder E., 1984c. *Final report on a study of fluid inclusions in core from Gibson Dome No. 1 bore, Paradox Basin, Utha*. Open-File Report 84-696, Department of the Interior.
- Roedder E., 1990. Fluid inclusions analysis – prologue and epilogue. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, 495–507.
- Roedder E. & Belkin H.E., 1979. *Application of studies of fluid inclusions in Permian Salado salt, New Mexico, to problems of siting the Waste Isolation Pilot Plant*. Scientific Basis for Nuclear Waste Management, 1, G.J. McCarthy, Editor: New York, Plenum Pub. Corp., 313–321.
- Roedder E. & Belkin H.E., 1980. Migration of fluid inclusions in polycrystalline salt under thermal gradients in the laboratory and in Salt Block II (abst.). *Proceedings of the 1980 National Waste Terminal Storage Program Information Meeting*, 212, 361–363.
- Roedder E. & Belkin H.E., 1981. *Petrographic study of fluid inclusions in salt core samples from Asse mine, Federal Republic of Germany*. United States Geological Survey Openfile Report 81-1128.
- Szybist A., 2003. Struktury solne regionu kujawskiego. W: Bujakowski W. (red.), *Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, 15–37.
- Szybist A., 2008. Geologiczna charakterystyka wybranych struktur solnych na Niżu Polski. W: Kortas G. (red.), *Ruch górotworu w rejonie wysadów solnych*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, 13–65.
- Szybist A. & Garlicki A., 2003. Geologiczna charakterystyka regionu kujawskiego. W: Bujakowski W. (red.), *Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych*, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, 7–14.
- Tarka R., 1992. Tektonika wybranych złóż soli w Polsce na podstawie badań mezostrukturalnych (Tectonics of Some Salt Deposits in Poland Based on Mesostructural Analysis). *Prace PIG*, CXXXVII, 1–47.

- Thiéry R., Pironon J., Walgenwitz F. & Montelc F., 2000. PIT (Petroleum Inclusion Thermodynamic): a new modeling tool for the characterization of hydrocarbon fluid inclusions from volumetric and microthermometric measurements. *Journal of Geochemical Exploration*, 69–70, 701–704.
- Tseng Hsin-Yi & Pottorf Robert J., 2003. The application of fluid inclusion PVT analysis to studies of petroleum migration and reservoirs. *Journal of Geochemical Exploration*, 78–79, 433–436
- Volk H., Mann U., Burde O., Horsfield B. & Suchy V., 2000. Petroleum inclusions and residual oils: constraints for deciphering petroleum migration. *Journal of Geochemical Exploration*, 71, 307–311.
- Wagner R., 1994. Stratygrafia osadów i rozwój basenu cechsztyńskiego na niżu polskim. (Stratigraphy and evolution of the Zechstein Basin in the Polish lowland). *Prace PIG*, CXLVI, 71.

Summary

The Kłodawa Salt Dome is located in the central Poland and belongs to Izbica Kujawska – Łęczyca salt ridge (Fig. 1). It is considered as the largest diapir in Poland. Studies of the diapir structure indicated that it is about 26 km long, 0.5–2 km wide and elongates in NW-SE direction. Diapir rises from the depth of 7000–8000 m. The cross-sections show the asymmetrical shape of the diapir (Fig. 2). Its NE side dips moderately (55–70°) eastward and the SW side dips almost vertically. It is surrounded by deformed Mesozoic (Triassic–Jurassic) and partly Tertiary deposits and covered by Quaternary and Tertiary sediments.

The Kłodawa salt deposit is mainly built of rocks, which belong to fully developed PZ2-PZ4 cyclothems. The lowermost unit (PZ1 cycle) consists of Kupferschiefer (T1), Zechstein Limestone (Ca1), Lower Anhydrite (A1d) and is known only as tectonically transported blocks. An occurrence of the Oldest Salt (Na1) is questionable because of its petrological similarity to the Older Salt (Na2).

The internal structure of the Kłodawa diapir is complicated as a result of salt series deformations. Older salts pierced by younger and the youngest ones, tectonic tailing out and occurrence of narrow folds with high amplitude are effects of deformations and result from various reological properties of rocks. Character and style of deformations change throughout the Kłodawa diapir. In general outline, two anticlines elongated in NW-SE direction predominate in the SW and NE parts of diapir. Anticlines are separated by the deep central syncline composed of the youngest salt layers.

The bituminous salts occurring in the Kłodawa Salt Dome form a very diverse agglomerations in respect to size, intensity of colour and shape. Most often they form streaks, lenses or layers parallel to the bedding of surrounded sediments (Fig. 3A, B, D, E). Very often they occur in the form of nests with irregular shapes sharply separated from the surrounding rocks (Fig. 3G) or sometimes as bands with fuzzy boundaries (Fig. 3H).

The bituminous salts are coarse-grained or crystal salts with size of the crystals reaching several centimetres (Fig. 3C, F). Their colour changes from light yellow to dark brown. In thick plates they show presence of anhydrite inclusions and very diversified fluid inclusion assemblages (FIA). Small anhydrite crystals, up to 50 μm , are most often in form of agglomerations, which are deployed on the borders of halite crystals (Fig. 4A). They are accompanied by dark brown bituminous matter. Sometimes they form highly elongated, oval endings and fractured crystals which ingrown in halite crystals (Fig. 4B, C). Within the halite crystals anhydrite often make narrow streaks or single crystals with numerous fluid inclusions on the surface (Fig. 4D, E).

The FIAs vary in size of inclusions, their shapes, the ratio of the gas to liquid phase and the ratio of solutions to hydrocarbons. In this respect, seven main types of FIA has been distinguished. Among them there are intermediate types. The main types are:

- 1) The FIAs built of small inclusions from a few to dozen/several micrometers and with regular shapes (Figs 4F, 5A, B). They are filled with transparent or light yellow hydrocarbons in visual light and light blue fluorescence colour.
- 2) The FIAs built of much larger inclusions, up to 100 μm , also with regular shapes (Fig. 5C, D). Such FIAs are filled with solutions, hydrocarbons and gas phase of very different proportions.
- 3) The FIAs built of very elongated inclusions with size exceeding 0.5 mm (Figs 5E, F, 6A, B). They are filled with solutions, hydrocarbons and gas phase of very different proportions.
- 4) The FIAs which consist of tubular, sometimes a bit bent inclusions, which are connected to each other forming nests (Fig. 6C, D). In some parts the connection between them gradually disappear and they form separate inclusions with bent tubes or oval shapes. All such inclusions are filled with hydrocarbons only which show light blue fluorescence.
- 5) The FIAs consisting of inclusions with very irregular and flattened shapes. Their size ranges from several dozen to over 300 μm (Fig. 6E, F). They are filled with light yellow hydrocarbons which show very weak fluorescence.
- 6) The FIAs built of very irregular, oval-shaped inclusions which size ranges from several to sometimes much more than 200 μm (Fig. 7A, B). They are filled with hydrocarbons and gases of very different proportions. The hydrocarbons show very strong light blue fluorescence.
- 7) The FIAs consisting of large inclusions (from 0.1 to over 1 mm) filled with dark brown hydrocarbons accompanied by gases with constant ratio of about 30% (Fig. 7C, D). In the cross nicols they show some kind of colours, which is probably caused by the rotation of the polarized light.

Within the halite crystals there also occur short cleavages filled by dark brown bitumens (Fig. 7E). They do not show fluorescence (Fig. 7F). In their end parts they transform into separate inclusions filled with hydrocarbons showing intensive light fluorescence.

Based on petrological observations of bituminous salts one can state that the processes that led to their origin were complex. Apparently, they were subjected to considerable tectonic disturbance and were a pathway for hydrocarbons migration from the ambient sediments of the salt dome.