

## Modele genetyczne badeńskich anhydrytów w zapadlisku przedkarpackim na obszarze Polski

Alicja Kasprzyk\*



A. Kasprzyk

**Genetic patterns of Badenian anhydrite deposits in the Carpathian Foredeep, southern Poland.** *Prz. Geol.*, 53: 47–54.

*S u m m a r y.* The Badenian (Middle Miocene) sulphate deposits in the Polish Carpathian Foredeep basin have undergone varying degrees of diagenetic changes. They are preserved mainly as primary gypsum in the peripheral part of the basin, whereas toward the basin centre gypsum has been partly or totally transformed into anhydrite. The facies variation and fabrics succession reflect different genetic patterns of anhydrite, depending on both palaeogeographic and burial controls. The sedimentary and petrographic observations indicate that anhydritization of gypsum deposits was a complex process starting under synsedimentary conditions and continued in burial (during early to late diagenesis). Different genetic patterns of anhydrite involve both synsedimentary anhydritization of gypsum at the surface and successive phases (syndepositional *de novo* growth, early to late diagenetic replacement of gypsum) of anhydrite formation with progressive burial.

**Key words:** anhydrite deposits, diagenesis, Badenian, Carpathian Foredeep

Badeńskimi skałami siarczanowymi w zapadlisku przedkarpackim są gipsy pierwotne, anhydryty i gipsy wtórne (ryc. 1). Anhydryty występują jedynie na znacznej głębokości (>250 m), natomiast gipsy pierwotne są ograniczone do peryferyjnej części basenu, gdzie są znane z licznych odsłoneń i płytkich wierceń (Kasprzyk, 1991; Kubica, 1992). Wraz ze wzrostem głębokości występowania gipsy są częściowo lub całkowicie zastąpione przez anhydryty, a efekty przemian gipsów w anhydryty można obserwować w rdzeniach licznych otworów wiertniczych, co pozwala odtworzyć zmiany diagenetyczne tych skał. Wyniki dotychczas przeprowadzonych badań wykazały, że badeńskie osady siarczanowe w sukcesjach basenowych i brzeżnych przeszły odmienną ewolucję diagenetyczną, ale jej szczegółowsze rozpoznanie wymaga kontynuowania badań litofacjalnych i petrograficznych.

Przedmiotem niniejszego opracowania są badeńskie osady siarczanowe rozpoznane w głębokich otworach wiertniczych, zlokalizowanych w różnych częściach zapadliska przedkarpackiego na obszarze Polski (ryc. 1). Utwory te zostały poddane szczegółowej analizie sedymentologicznej i petrograficznej w celu odtworzenia warunków depozycji i diagenetyzacji badeńskich osadów siarczanowych w zapadlisku przedkarpackim. W szerszym kontekście wyniki zrealizowanych badań mogą być przydatne do badań ewolucji diagenetycznej osadów siarczanowych w innych peryferyjnych basenach ewaporatowych.

### Zarys poglądów na genezę anhydrytów

Na powierzchni ziemi anhydryt występuje niezwykle rzadko, natomiast na dużej głębokości jest najbardziej pospolitym minerałem siarczanowym. Eksperymentalnie udowodniono, że anhydryt może tworzyć się w wyniku (i) bezpośredniej precypitacji z przesyconych roztworów lub (ii) diagenetycznych przeobrażeń (dehydratacji) gipsu w warunkach wysokiej temperatury, wysokiego zasolenia wód porowych i/lub znacznego pogrzebania (np. Hardie, 1967; Braitsch, 1971; Møller, 1988; Jowett i in., 1993). Anhydryt znany jest ze współczesnych środowisk ewaporacyjnych jako produkt interstycyjnego wzrostu kryształów w czasie wczesnej diagenetyzacji w strefie wadycz-

nej równi przybrzeżnych, sebh i playi (np. na obszarach sebh Zatoki Perskiej i wybrzeży Morza Śródziemnego) (np. Butler, 1969; Warren & Kendall, 1985; Kendall & Harwood, 1996) lub zastępowania gipsu przez anhydryt (proces zwany anhydrytyzacją) w warunkach zarówno powierzchniowych, jak i — częściej — na dużej głębokości, wskutek oddziaływania solanek porowych o wysokim zasoleniu lub wysokiej temperatury i podwyższonego ciśnienia (Moiola & Glover, 1965; Shearman, 1985). Solanki naturalne rzadko osiągają stan przesylenia względem anhydrytu (Zen, 1965; Schreiber & Walker, 1992). Główną barierą kinetyczną dla tworzenia się anhydrytu w środowiskach naturalnych jest odwodnienie jonów  $\text{Ca}^{2+}$  (Gunatilaka, 1990). Zdaniem Perthuisota (1977) zasadniczym czynnikiem umożliwiającym powstanie anhydrytu jest środowisko utleniające, aczkolwiek minerał ten może występować również w warunkach beztlenowych (Gunatilaka, 1990). W wyniku wielu prac doświadczalnych i modelowań termodynamicznych określono główne czynniki warunkujące anhydrytyzację, z których najważniejsze to: temperatura, zasolenie, aktywność wody w płynach porowych, ciśnienie płynów porowych i zanieczyszczenia roztworów (MacDonald, 1953; Hardie, 1967; Sonnenfeld, 1984). We współczesnych środowiskach ewaporacyjnych duże znaczenie dla procesu anhydrytyzacji mają uwarunkowania klimatyczne i biologiczne (Gunatilaka, 1990), natomiast w warunkach wglębnych czynniki litologiczne, hydrogeologiczne i tektoniczne (Jowett i in., 1993). Niezależnie od warunków i środowiska powstania anhydryty mogą wykazywać bardzo podobne cechy strukturalne i teksturalne (Ortí & Rosell, 1981; Rosen & Warren, 1990; Kendall, 1992; Rouchy i in., 1994), z czym wiąże się problem interpretacji ich genezy w wielu kopalnych formacjach ewaporatowych.

Anhydryty badeńskie w zapadlisku przedkarpackim, były w starszej literaturze interpretowane jako pierwotne ewaporaty basenowe (środkowa część zapadliska), powstałe w wyniku precypitacji z solanek o wysokim zasoleniu (Ney i in., 1974; Garlicki, 1979; Liszkowski, 1989) lub jako facje diagenetyczne powstałe na drodze dehydratacji gipsu w warunkach pogrzebania — peryferyjna część zapadliska (Kubica, 1992).

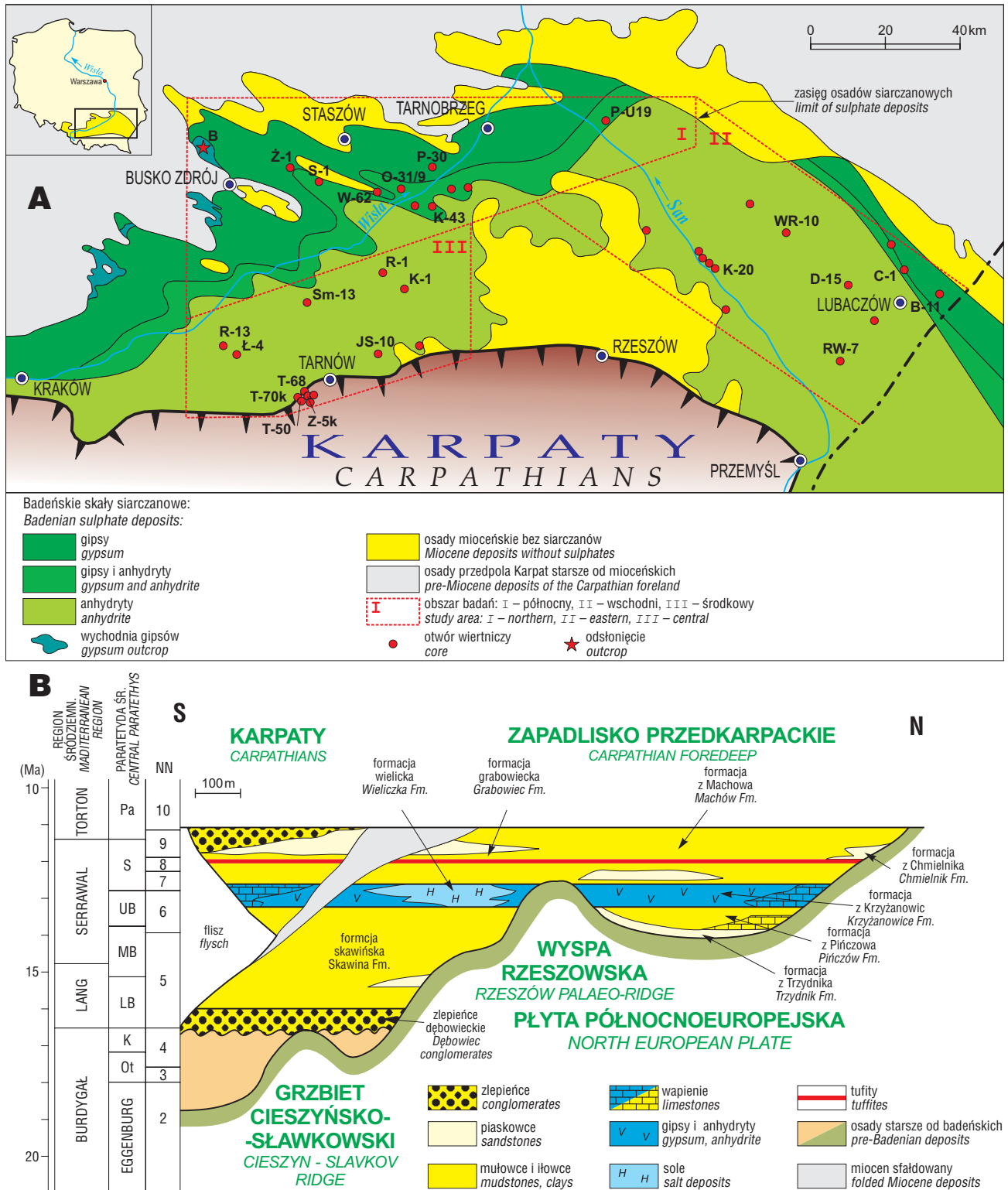
Wyniki badań autorki sugerują duży udział w powstaniu anhydrytów procesów synsedymencyjnych i wczesnodiaagenetycznych, obejmujących zarówno wzrost anhydrytu *de novo* jak i anhydrytyzację wcześniej

\*Państwowy Instytut Geologiczny, Oddział Świętokrzyski, ul. Zgoda 21, 25-953 Kielc; alicja.kasprzyk@pgi.gov.pl

powstałych osadów gipsowych (Kasprzyk, 1995, 2003; Kasprzyk & Ortí, 1998). W porównaniu z dotychczasowymi poglądami na temat genezy anhidrytów w środkowej części zapadliska jest to interpretacja nowa, poparta przez wyniki ostatnio zrealizowanych badań autorki (Kasprzyk, 2005).

### Środowisko depozycji i diagenety

Zróżnicowanie litofacjalne i petrograficzne badań osadów siarczanowych wskazuje na zmienne warunki sedimentacji w zbiorniku ewaporacyjnym przedpola Karpat. Warunki te, zrekonstruowane na podstawie analogii facjalnych do dobrze rozpoznanych współczesnych i



Ryc. 1. Badeńskie osady siarczanowe w zapadlisku przedkarpackim — litofacie (A) i ich pozycja stratygraficzna (B) — wg Kubicy (1992) i Oszczyпки (1996 — uzupełnione)  
 Fig. 1. The Badenian sulphate deposits in the Carpathian Foredeep — lithofacies (A) and their stratigraphic position (B) — after Kubica (1992) and Oszczyпки (1996 — supplemented)

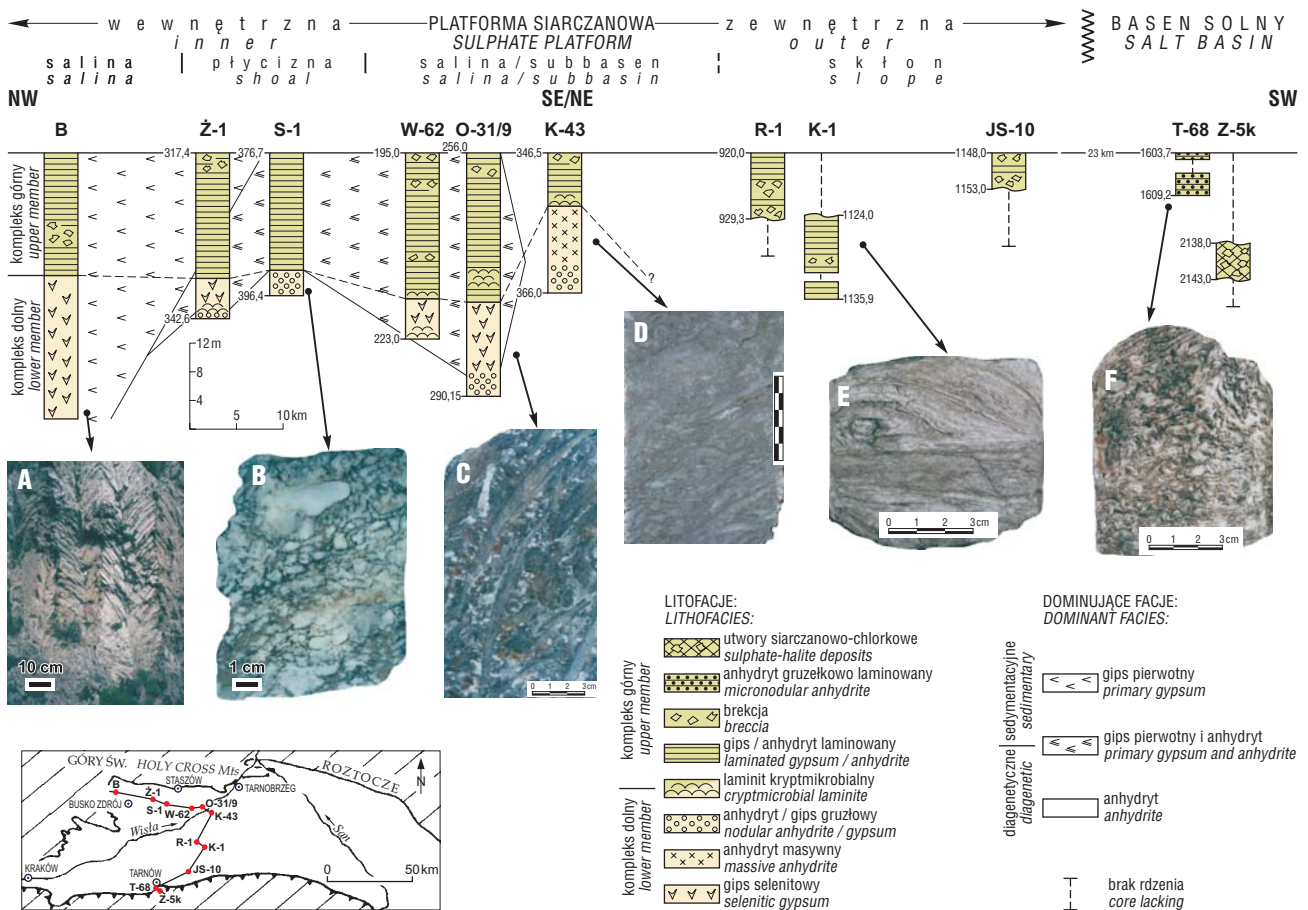
kopalnych środowisk ewaporacyjnych, reprezentują główne systemy depozycyjne platformy siarczanowej i proksymalnej części basenu solnego (Kasprzyk, 1999; Peryt, 2000) (ryc. 2). Osady powstałe w tych środowiskach poddane były różnym przeobrażeniom w czasie diagenety i przeszły różną ewolucję diagenetyczną (Kasprzyk & Ortí, 1998).

### Wewnętrzna (proksymalna) część platformy siarczanowej

Dolną część sukcesji osadów siarczanowych (kompleks dolny) peryferyjnej części platformy budują głównie autochtoniczne gipsy selenitowe oraz anhydryty charakteryzujące się strukturami masowymi, mozaikowymi, gruzłowo-mozaikowymi i gruzłowymi (ryc. 2), z których niektóre są interpretowane jako pseudomorfeiczne po strukturach krystalicznych gipsów selenitowych (Kasprzyk, 1995; Peryt, 1996). Anhydryty i gipsy gruzłowe w najniższej części sukcesji osadów siarczanowych na płyciźnie centralnej (otwory: Ż-1 i S-1; ryc. 2) reprezentują fację sebhya, istniejącą w początkowym etapie sedimentacji ewaporatów w czasie niskiego stanu wód, równocześnie lub pod koniec sedimentacji gipsów szklicowych w przyległych płytkich (o głęb. do kilku metrów) subbasenach i

salinach (Kasprzyk, 1999; Babel, 2004). Te litofacje gruzłowe można porównać z gruzłami siarczanowymi powstałymi we współczesnych playach Zachodniego Teksasu w wyniku wczesnodiagenetycznych przeobrażeń (sebhazyacji) wcześniejszych osadów gipsowych (Hussain & Warren, 1989). Pozostałe odmiany anhydrytów gruzłowych, gruzłowo-mozaikowych i mozaikowych sukcesji platformowych mają struktury pseudomorfeiczne po gipsach selenitowych (ryc. 2D) i inne cechy sedimentologiczne i petrograficzne (Kasprzyk & Ortí, 1998), charakterystyczne dla anhydrytu tworzącego się w warunkach syndepozycyjnych i wczesnodiagenetycznych we współczesnych środowiskach ewaporacyjnych (Shearman, 1985; Rouchy i in., 1994; Kendall & Harwood, 1996). Wszystkie te obserwacje wskazują na powstanie struktur gruzłowych w anhydrytach badenijskich w środowisku sebhya lub w wyniku anhydrytyzacji freatycznej w warunkach syndepozycyjnych i wczesnodiagenetycznych (ryc. 3).

Górna część sukcesji osadów siarczanowych (kompleks górny) proksymalnej części platformy jest zbudowana z utworów laminowanych i brekcji (ryc. 2). Niektórzy autorzy przyjmują pogląd, że osady dolnego kompleksu uległy częściowo wynurzeniu, erozji i redepozycji przez grawitacyjne ruchy masowe i sploty turbidytowe (Peryt &



**Ryc. 2.** Wybrane sukcesje osadów siarczanowych w przekroju poprzecznym przez badenijski basen ewaporatowy (wzdłuż linii zaznaczonej na szkicu lokalizacyjnym). A — wielkie zrosty krystaliczne (*gipsy szklicowe*) w najniższej części sukcesji osadów gipsowych w Marzęcinie k/ Buska. Ołówek jako skala o długości 20 cm, B — anhydryt gruzłowy o strukturze typu *chicken-wire*, C — gips szablasty ze skupieniami jasnoszarego anhydrytu zastępującego gips, D — anhydryt z pseudomorfozami po szablastych kryształach gipsu, E — anhydryt o laminacji zaburzonej, F — anhydryt gruzłkowo-laminowany o laminacji trzewiowcowej

**Fig. 2.** Selected successions of sulphate deposits through the Badanian evaporite basin (along the line shown in a location sketch map). A — giant gypsum intergrowths (*szklica gypsum*) in the lowermost part of the gypsum succession at Marzęcin nearby Busko. Pencil as a scale (length 20 cm), B — nodular anhydrite of a chicken-wire pattern, C — sabre-like gypsum with replacive anhydrite patches (white), D — anhydrite with pseudomorphs after sabre-like gypsum crystals, E — distorted laminated anhydrite, F — Micronodular-laminated anhydrite of an enterolith pattern

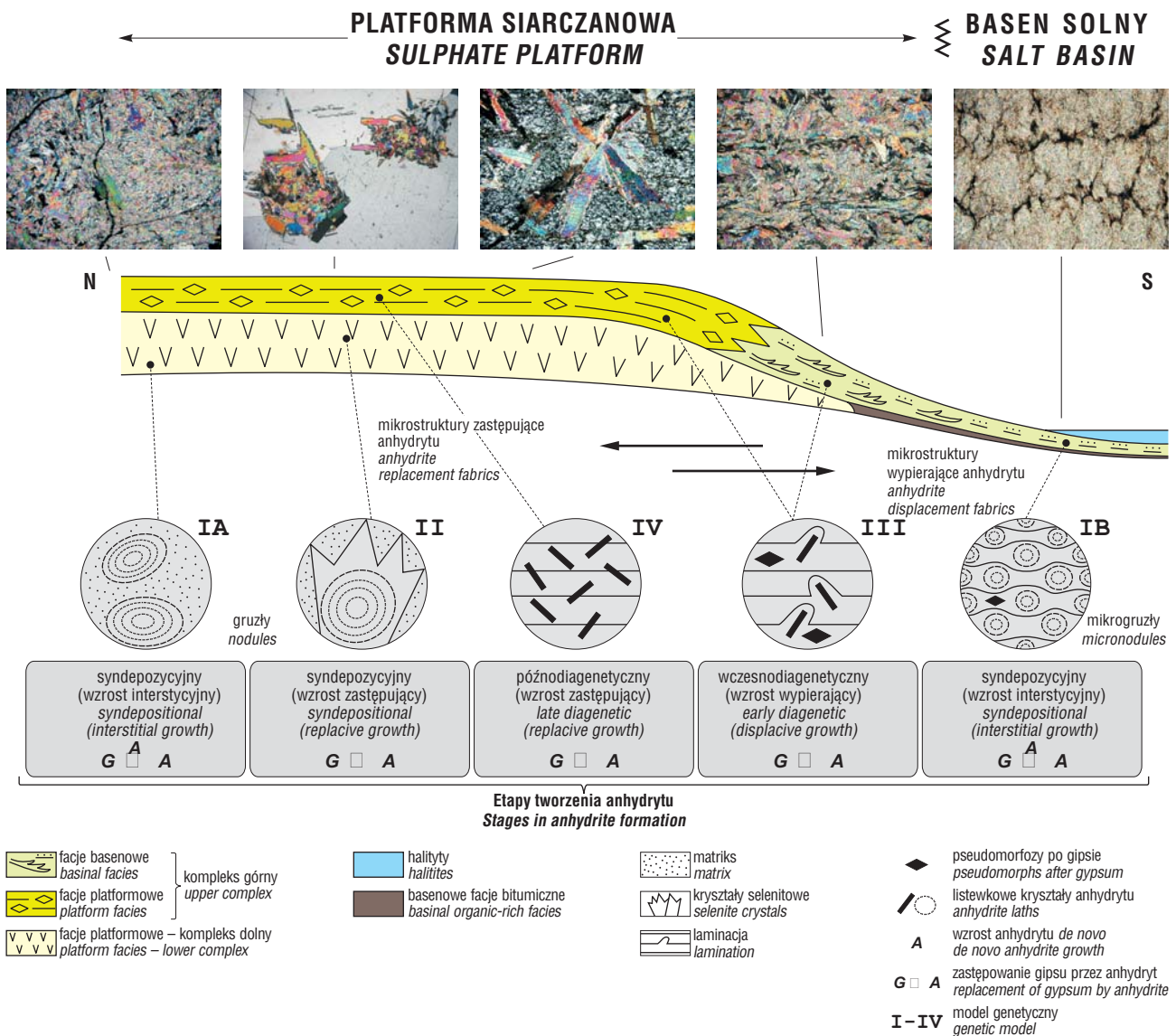


Kasprzyk, 1992; Kasprzyk, 1993; Peryt & Jasionowski, 1994). Występowanie brekcji *in situ*, przechodzących lateralnie w osady laminowane (ryc. 2) sugeruje syndepozycyjne deformacje i brekcowanie osadu (Kwiatkowski, 1972; Bąbel, 1999), być może związane z okresową aktywnością sejsmiczną na przedpolu nasuwających się od południa Karpat (Peryt & Jasionowski, 1994). Wyniki badań facjalnych i petrograficznych przeprowadzonych przez autorkę pozwalają sądzić, że anhydryty laminowane i brekcje kompleksu górnego na obszarze platformy były pierwotnie zbudowane z gipsów klastycznych (Kasprzyk & Ortí, 1998; Kasprzyk, 2003). Wskazuje na to występowanie mieszanych osadów gipsowo-anhydrytowych i sukcesji przejściowych (od gipsów pierwotnych do anhydrytów), obecność licznych pseudomorfoz po gipsie i intraklastów skał siarczanowych i węglanowych oraz znaczny udział materiału terygenicznego w anhydrytach. Występowanie lokalnie w laminowanych anhydrytach pseudomorfoz po kryształach gipsu wzrosłych na dnie jest wskaźnikiem okresowych zmian warunków sedimentacji. Anhydryty kompleksu górnego wykazują mikrostruktury pryzmatyczne, charakteryzujące się obecnością silnie wydłużonych i chaotycznie rozmieszczonych, listewko-

wych kryształów anhydrytu o cechach wzrostu zastępującego i nieznacznej deformacji (*decussate fabric*, Ortí & Rosell, 1981; ryc. 3).

**Zewnętrzna (dystalna) część platformy siarczanowej**

W środkowej części zapadliska przedkarpackiego osady siarczanowe to (ryc. 2) anhydryty laminowane i brekcje, lokalnie z przewarstwieniami osadów silikoklastycznych i halitytu, reprezentujące kompleks górny (Połtowicz, 1993; Kasprzyk & Ortí, 1998; Peryt, 2000). Osady te, wcześniej interpretowane jako facje głębokowodne (Garlicki, 1979; Kolasa & Ślącza, 1985; Ślącza, 1994), wykazują cechy osadów redeponowanych — uziarnienie frakcjonalne, warstwowanie zaburzone, struktury osuwiskowe (ryc. 2). Mikrostruktury cechuje silna deformacja pierwotnie wydłużonych kryształów anhydrytu (ryc. 3). Deformacje kryształów są wyraźniejsze w anhydrytach dystalnej części platformy w porównaniu z platformą wewnętrzną. Badania autorki wskazują, że anhydryty te to pierwotnie klastyczne osady gipsowe poddane przemianie diagenetycznej (anhydrytyzacji) w warunkach wgłębnych (Kasprzyk, 2003). Pomimo tych zmian i znacznego pogrzebania (>1000 m)



Ryc. 3. Modele genetyczne badenickich anhydrytów w zapadlisku przedkarpackim. Rzeczywiste pole widzenia na mikrofotografiach to 4,9 mm

Fig. 3. Genetic models of Badenian anhydrite in the Carpathian Foredeep. Field of view in microphotographs is 4.9 mm



w toni wodnej, czy też klastyczną depozycję tego minerału (por. Rouchy i in., 1995). Ponadto, anhydryty basenowe są w porównaniu z gipsami peryferyjnej części basenu wyraźnie zubożone w stront (Kasprzyk, 2003), uważany za wskaźnik zasolenia wód w stadium precypitacji siarczanów (np. Kushnir, 1982; Rosell i in., 1998), co również sugeruje diagenetyczny charakter tych osadów.

### Modele genetyczne badeńskich anhydrytów

Efekty przeobrażeń diagenetycznych badeńskich skał siarczanowych są zróżnicowane i zasadniczo różne dla części peryferyjnej i środkowej basenu, co wskazuje na wyraźną zależność rozwoju diagenetycznego od położenia paleogeograficznego (Kasprzyk & Ortí, 1998) (ryc. 2, 3). Uwzględniając tę zależność oraz specyfikę i sukcesję procesów depozycyjnych i diagenetycznych można wyróżnić cztery podstawowe modele genetyczne badeńskich anhydrytów, tj. syndepozycyjny wzrost anhydrytu *de novo*, anhydrytyzacja syndepozycyjna, anhydrytyzacja wczesnodiaagenetyczna i anhydrytyzacja późnodiaagenetyczna (ryc. 3). Parametry warunkujące anhydrytyzację, wspólnie dla każdego modelu, to aktywność wody w płynach porowych i ciśnienie płynów porowych (MacDonald, 1953; Hardie, 1967). Specyfikę każdego modelu określają: czasowe i przestrzenne relacje procesów depozycyjnych i diagenetycznych, pozycja stratygraficzna i paleogeograficzna osadów oraz ich zmienność facjalna i mineralogiczno-petrograficzna.

### Syndepozycyjny wzrost anhydrytu *de novo* i anhydrytyzacja syndepozycyjna

Anhydryt utworzył się w warunkach syndepozycyjnych w strefie brzegowej i w basenie solnym (ryc. 3).

**Strefa brzegowa — sebhā-salina przybrzeżna (kompleks dolny).** Anhydryty budujące kompleks dolny charakteryzują się strukturami masywnymi, mozaikowymi, gruzłowo-mozaikowymi i gruzłowymi, z których niektóre są interpretowane jako pseudomorficzne po strukturach krystalicznych gipsów selenitowych (ryc. 2) (por. Kasprzyk, 1995; Peryt, 1996). Aczkolwiek gruzły anhydrytowe mogą tworzyć się w różnych środowiskach i warunkach (np. Ortí & Rosell, 1981; Shearman, 1985; Machel & Burton, 1991), to jednak anhydryt gruzłowy o cechach wzrostu wypierającego jest charakterystyczny dla supralitoralnych środowisk sebhā przybrzeżnej w klimacie suchym i półsuchym (West i in., 1979; Butler i in., 1982). Główne cechy tych osadów (gruzły akrecyjne, struktury enterolityczne, laminacja kryptomikrobialna), pozwalające na identyfikację kopalnych anhydrytów środowisk sebhā, zostały rozpoznane (otwory S-1 i Ż-1; ryc. 1, 2) w najniższej części sukcesji osadów siarczanowych na obszarze płycizny centralnej (Kasprzyk, 2003). Lokalny brak osadów siarczanowych i ich zmienność lateralna wyrażona przejściem gipsów selenitowych w anhydryty gruzłowe (ryc. 2) pozwalają sądzić, że otwory te rozwinęły się na lokalnym morfologicznym wyniesieniu podłoża w początkowym etapie depozycji siarczanowej w czasie niskiego stanu wód, równocześnie lub pod koniec rozwoju gipsów selenitowych w przyległych subbasenach — salinach (Kasprzyk, 1999). Inne litofacje gruzłowe anhydrytów badeńskich mogły utworzyć się, podobnie jak gruzły siarczanowe, we współczesnych playach Zachodniego Teksasu (Schreiber i in., 1982; Hussain & Warren, 1989), w wyniku przemiany wczesnodiaagenetycznej („sebhātyza-

cji”) wcześniej powstałych osadów gipsowych (ryc. 3). Shearman (1985) oraz Rouchy i in. (1994) tłumaczą genezę anhydrytów gruzłowych innych formacji ewaporatowych anhydrytyzacją różnych odmian gipsów pierwotnych odsłoniętych na powierzchni w klimacie suchym i gorącym i/lub poddanych działaniu wysoko skoncentrowanych rozтворów w warunkach synelementacyjnych.

W nawiązaniu do tych interpretacji, nieregularne rozmieszczenie anhydrytu w sekwencji badeńskich gipsów pierwotnych (kompleks dolny) w peryferyjnej części platformy siarczanowej (ryc. 2C) może sugerować, że jest on produktem wczesnego przeobrażenia pierwotnych facji selenitowych (cf. Kasprzyk, 1995; Peryt, 1996) (ryc. 3). Dodatkowych dowodów na taką interpretację dostarczają obserwacje petrograficzne wskazujące na: (1) ekspansywny rozrost gruzłów anhydrytowych poprzez tworzenie nowych kryształów anhydrytu wewnątrz gruzłów; (2) dominację mikrostruktur pryzmatycznych anhydrytu, charakteryzujących się wiązkowym lub chaotycznym rozmieszczeniem kryształów (*fascicular, decussate and felted fabrics*, Ortí & Rosell, 1981; Shearman, 1985), (3) duży udział kryształów listewkowych silnie kompakcyjnie zdeformowanych (ryc. 3). Cechy te są charakterystyczne dla anhydrytu tworzącego się syndepozycyjnie i/lub wczesnodiaagenetycznie we współczesnych środowiskach ewaporacyjnych (Shearman, 1985; Gunatilaka, 1990; Rouchy i in., 1994). Ponadto anhydryty kompleksu dolnego w sukcesjach platformowych peryferyjnej części zapadliska nie wykazują cech charakterystycznych dla anhydrytów późnodiaagenetycznych, powstałych w wyniku pograżenia na dużą głębokość (por. Machel & Burton, 1991). Wszystkie te obserwacje wskazują na powstanie struktur gruzłowych badeńskich anhydrytów w środowisku sebhā lub w wyniku freaticznej anhydrytyzacji w warunkach syndepozycyjnych lub podczas wczesnej diagenety (ryc. 4). Interpretacja ta jest zgodna z wynikami wcześniejszych badań sedimentologicznych i litofacjalnych anhydrytów badeńskich w zapadlisku przedkarpackim na obszarze Polski i Ukrainy Zachodniej (Kasprzyk, 1995, 2003; Peryt, 1996, 2000; Kasprzyk & Ortí, 1998).

Proces anhydrytyzacji kompleksu dolnego w peryferyjnej części zapadliska był prawdopodobnie zapoczątkowany przez wzrost zasolenia i/lub temperatury rozтворów porowych w warunkach niskiego stanu wód i częściowego odsłonięcia gipsów (ryc. 4). Wynurzenie to mogło mieć miejsce zarówno podczas, jak i pod koniec depozycji gipsów selenitowych, na co wskazują zmiany litofacjalne od gipsów selenitowych do utworów mikrobialnych oraz powierzchnie erozyjne i/lub rozpuszczania (Kasprzyk, 1999; Babel, 2004). Zatem, litofacje gruzłowe w sukcesjach badeńskich osadów siarczanowych mogą częściowo przypominać swą genezę gruzły anhydrytowe w mioceńskich osadach wybrzeży Zatoki Sueskiej i Morza Czerwonego, powstałe w gipsach subakwalnych w wyniku reakcji z solankami o wysokim zasoleniu (Shearman, 1985; Kendall, 1992; Rouchy i in., 1994).

**Basen solny (kompleks górny).** Litofacje podobne do anhydrytów gruzłowo-laminowanych reprezentujących basenowe litofacje siarczanowe (ryc. 2) były w literaturze różnie interpretowane i wiązane z procesami zarówno syndepozycyjnymi, jak i diagenetycznymi (np. Busson, 1979; Richter-Bernburg, 1985; Rosen & Warren, 1990). Cechy petrograficzne badeńskich anhydrytów gruzłowo-laminowanych wskazują na syndepozycyjną genezę gruzłków anhydrytowych, które prawdopodobnie utworzyły się w wyniku wzrostu wypierającego kryształów anhydrytu w obrębie laminowanego osadu dennego i częściowo wczesnodiaagenetycznej anhydrytyzacji gipsu klastyczne-



go w obecności solanek o wysokim zasoleniu (ryc. 3). Gruźelki rozrastały się poprzez przyrost nowych kryształów anhydrytu, prawdopodobnie w efekcie dyfuzji jonów siarczanowych solanek interstycyjnych nasyconych względem anhydrytu, podobnie jak to miało miejsce we współczesnych playach Bristol Dry Lake w Kaliforni (Rosen & Warren, 1990). Formy pionowo wydłużonych gruzełków wskazują na ich wzrost w miękkim, nieskonsolidowanym osadzie w pobliżu powierzchni osad-woda (ryc. 4). Ponieważ rozpuszczalność gipsu w solankach o wysokiej koncentracji chlorków jest większa niż anhydrytu (Schreiber & Walker, 1992), roztwory porowe o wysokim zasoleniu i sile jonowej (niska aktywność wody) sprzyjały dehydratacji gipsu w osadzie dennym. Słabe zachowanie pseudomorfoz anhydrytu po kryształach gipsu w badeńskich anhydrytach gruzełkowo-laminowanych prawdopodobnie wynika z dominacji w pierwotnym osadzie gipsowym frakcji bardzo drobnziarnistej oraz bardzo wczesnego, towarzyszącego dehydratacji gipsu, wzrostu anhydrytu w obrębie matriks. Reorientacja mikrostruktur anhydrytu to efekt deformacji plastycznej (przed lityfikacją) pod wpływem stresu mechanicznego związanego z kompaktacją (por. Ortí & Rosell, 1981). Jest prawdopodobne, że przedłużony kontakt osadu gipsowego z roztworami porowymi, nasyconymi względem anhydrytu w zbiorniku ewaporacyjnym zapadliska przedkarpackiego sprzyjał dehydratacji gipsu w warunkach syndepozycyjnych i/lub wczesnodiagenetycznych z zachowaniem pierwotnej laminacji osadu gipsowego, jak to było interpretowane dla ewaporatów permskich w basenie Palo Duro (Hovorka, 1992) (ryc. 4). Wyniki badań sugerują, że basenowe anhydryty laminowane w zapadlisku przedkarpackim to głównie produkt synsedymencyjnego wzrostu *de novo* anhydrytu w obrębie laminowanego, bitumicznego osadu dennego oraz wczesnodiagenetycznego zastępowania gipsu przez anhydryt (ryc. 3).

### Anhydrytyzacja wczesnodiagenetyczna

Anhydrytyzacja ta objęła platformę zewnętrzną (kompleks górny) (ryc. 3). Anhydryty laminowane i brekcje anhydrytowe w głębszej części zapadliska w starszej literaturze były interpretowane jako facje głębokowodne, powstałe w wyniku precypitacji z roztworów o wysokim zasoleniu, nasyconych względem anhydrytu (Ney i in., 1974; Garlicki, 1979; Liszkowski, 1989). Badania autorki wskazują, że anhydryty w sukcesjach dystalnej części platformy to produkt diagenetycznego przeobrażenia (anhydrytyzacji) klastycznych osadów gipsowych (ryc. 4) powstałych głównie w wyniku redepozycji wcześniejszych osadów siarczanowych (Kasprzyk & Ortí, 1998; Kasprzyk, 2003). Mikrostruktury anhydrytu o cechach wzrostu wypierającego w miękkim, nie w pełni zlityfikowanym, laminowanym osadzie sugerują, że anhydrytyzacja gipsów detrytycznych poprzedziła lityfikację osadu i głębokie pogrzebanie (ryc. 3). W konsekwencji kryształy anhydrytu, jako wczesnodiagenetyczne, uległy znacznym deformacjom wskutek kompaktacji. Stopniowe zmiany intensywności tych deformacji w anhydrytach różnych części badeńskiego basenu ewaporatowego może wskazywać na progresywny proces anhydrytyzacji kompleksu górnego, który — rozpoczęty w środkowej części basenu — postępował ku jego peryferiom wraz ze wzrastającym pogrzebaniem i kompaktacją osadów (Kasprzyk & Ortí, 1998). W dystalnej części platformy lityfikacja poprzedziła znaczne pogrzebanie osadów, lokalnie przekraczające 1000 m, co nie zatarło całkowicie pierwotnych struktur skał gipsowych (ryc. 2).

### Anhydrytyzacja późnodiagenetyczna

Anhydrytyzacja ta objęła platformę wewnętrzną — kompleks górny (ryc. 3). Osady proksymalnej części platformy (anhydryty laminowane, brekcje anhydrytowe) były pierwotnie zbudowane z gipsów klastycznych (Kasprzyk & Ortí, 1998). Na tym obszarze anhydrytyzacja była niekompletna lub w stadium początkowym, w rezultacie czego powstały utwory mieszane gipsowo-anhydrytowe (np. otwory Ż-1, S-1, W-62 i O-31/9, ryc. 2). W peryferyjnej części basenu maksymalne pogrzebanie nie przekraczało 500 m, zatem anhydrytyzacja gipsów zachodziła tu w warunkach względnie płytkiego pogrzebania. Obecność chaotycznie rozmieszczonych, listewkowych kryształów anhydrytu o cechach wzrostu zastępowającego i znikomych efektach kompaktacji sugeruje, że proces ten przebiegał w zaawansowanym stadium lityfikacji osadów (ryc. 3). Można więc sądzić, że anhydrytyzacja gipsów kompleksu górnego w proksymalnej części platformy zachodziła w czasie późnej diagenety (ryc. 4).

### Podsumowanie

Sukcesja i zmienność litofacjalna skał siarczanowych wskazują na zróżnicowane i zmienne warunki depozycji i diagenety. Anhydryty tworzyły się w warunkach syndepozycyjnych w wyniku wzrostu anhydrytu *de novo* z solanek o wysokim zasoleniu, jak i w warunkach wgłębnych na drodze anhydrytyzacji wcześniej powstałych osadów gipsowych w różnych stadiach diagenety.

Efekty przeobrażeń diagenetycznych skał siarczanowych są zasadniczo różne dla części peryferyjnej i środkowej basenu, co wskazuje na wyraźną zależność rozwoju diagenetycznego od położenia paleogeograficznego w basenie ewaporatowym przedpola Karpat. Uwzględniając tę zależność oraz specyfikę i sukcesję procesów depozycyjnych i diagenetycznych, biorących udział w powstaniu anhydrytów, wyróżniono cztery podstawowe modele genetyczne tych skał: (I) syndepozycyjny wzrost anhydrytu *de novo*, (II) anhydrytyzacja syndepozycyjna, (III) anhydrytyzacja wczesnodiagenetyczna, oraz (IV) anhydrytyzacja późnodiagenetyczna. Główne czynniki warunkujące anhydrytyzację, wspólne dla każdego modelu, to aktywność wody w płynach porowych i reżim ciśnienia płynów porowych. Specyfikę każdego modelu określają czasowe i przestrzenne relacje procesów diagenetycznych, pozycja stratygraficzna i paleogeograficzna pierwotnych osadów siarczanowych oraz ich zmienność facjalna i mineralogiczno-petrograficzna.

Wyniki badań, w tym głównie rozpoznanie warunków i sukcesji przemian gipsu w anhydryt, są przydatne dla analizy rozwoju miocenijskiego basenu sedimentacyjnego w zapadlisku przedkarpackim. Uzyskane wyniki mogą być wykorzystane do badań genezy podobnych litofacji anhydrytowych, współwystępujących z utworami solnymi w innych basenach ewaporatowych.

Autorka serdecznie dziękuje Recenzentom, dr M. Bąblowi (Uniwersytet Warszawski, Warszawa) i doc. A. Gąsiewiczowi (Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa) za wnikliwą ocenę pracy oraz cenne uwagi i sugestie zmian.

### Literatura

BĄBEL M. 1999 — Facies and depositional environments of the Nida Gypsum deposits (Middle Miocene, Carpathian Foredeep, southern Poland). *Geol. Quart.*, 43: 405–428.

- BABEL M. 2004 — Models for evaporite, selenite and gypsum microbialite deposits in ancient saline basins. *Acta Geol. Pol.*, 54: 219–249.
- BRAITSCH O. 1971 — Salt Deposits, Their Origin and Composition: Minerals, Rocks and Inorganic Materials. Monograph Ser. Theor. and Exper. Stud., Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–New York.
- BUSSON G. 1979 — Successions carbonatées anhydritiques et salifères dans le Dévonien moyen de forages du nord-est de l'Alberta (Canada Occidental). [In:] G. Busson (ed.), Dépôts évaporitiques. Illustration et interprétation de quelques séquences. Éditions Technip, Paris: 23–28.
- BUTLER G.P. 1969 — Holocene gypsum and anhydrite of the Abu Dhabi sabkha, Trucial Coast: an alternative explanation of origin. [In:] J.L. Rau & L.F. Dellwig (eds.), Third Symposium on Salt. The Northern Ohio Geological Society, Inc., 1: 120–152.
- BUTLER G.P., HARRIS P.M. & KENDALL C.G.S.C. 1982 — Recent evaporites from the Abu Dhabi coastal flats. [In:] C.R. Handford, R.G. Loucks & G.R. Davies (eds) — Depositional and Diagenetic Spectra of Evaporites — A Core Workshop SEPM, Core Workshop No. 3: 33–64. Calgary, Canada: 33–64.
- GARLICKI A. 1979 — Sedymentacja soli miocenijskich w Polsce. *Pr. Geol.*, 119: 1–66.
- GUNATILAKA A. 1990 — Anhydrite diagenesis in a vegetated sabkha, Al-Khiran, Kuwait, Arabian Gulf. *Sedim. Geol.*, 69: 95–116.
- HARDIE L.A. 1967 — The gypsum-anhydrite equilibrium at one atmosphere pressure. *Am. Mineral.*, 52: 171–200.
- HOVORKA S. 1992 — Halite pseudomorphs after gypsum in bedded anhydrite — clue to gypsum-anhydrite relationships. *J. Sedim. Petrol.*, 62: 1098–1111.
- HUSSAIN M. & WARREN J.K. 1989 — Nodular and enterolithic gypsum: the „sabkha-tization” of Salt Flat playa, west Texas. *Sedim. Geol.*, 64: 13–24.
- JOWETT E.C., CATHLES III L.M. & DAVIS B.W. 1993 — Predicting depths of gypsum dehydration in evaporitic sedimentary basins. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, 77: 402–413.
- KASPRZYK A. 1991 — Analiza litofacyjna utworów siarczanowych badanu południowego obrzeżenia Gór Świętokrzyskich. *Prz. Geol.*, 39: 213–223.
- KASPRZYK A. 1993 — Lithofacies and sedimentology of the Badenian (Middle Miocene) gypsum in the northern part of the Carpathian Foredeep, southern Poland. *Ann. Soc. Geol. Pol.*, 63: 33–84.
- KASPRZYK A. 1995 — Gypsum-to-anhydrite transition in the Miocene of southern Poland. *J. Sedim. Res.*, A65: 348–357.
- KASPRZYK A. 1999 — Sedimentary evolution of Badenian (Middle Miocene) gypsum deposits in the northern Carpathian Foredeep. *Geol. Quart.*, 43: 449–465.
- KASPRZYK A. 2003 — Sedimentological and diagenetic patterns of anhydrite deposits in the Badenian evaporite basin of the Carpathian Foredeep, southern Poland. *Sedim. Geol.*, 158: 167–194.
- KASPRZYK A. 2005 — Model anhydrytyzacji gipsów badeńskich w zapadlisku przedkarpackim. *Biul. Państw. Inst. Geol.*
- KASPRZYK A. & ORTÍ F. 1998 — Palaeogeographic and burial controls on anhydrite genesis: the Badenian basin in the Carpathian Foredeep (southern Poland, western Ukraine). *Sedimentology*, 45: 889–907.
- KENDALL A.C. 1992 — Evaporites and diagenesis: Quantitative diagenesis. [In:] Recent Developments and Applications to Reservoir Geology — Abstracts. North Atlantic Treaty Organization (NATO), Advanced Study Institute, University of Reading.
- KENDALL A.C. & HARWOOD G.M. 1996 — Marine evaporites: arid shorelines and basins. [In:] H.G. Reading (ed.) — Sedimentary environments: Processes, Facies and Stratigraphy. Blackwell Science: 281–324.
- KOLASA K. & ŚLĄCZKA A. 1985 — Uwagi o genezie wielkiego złoża soli. *Studia i Materiały do Dziejów Żup Solnych w Polsce*, 14: 7–49.
- KUBICA B. 1992 — Rozwój litofacyjny osadów chemicznych badanu w północnej części zapadliska przedkarpackiego. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 133: 1–64.
- KUSHNIR J. 1982 — The composition and origin of brines during the Messinian deiccation event in the Mediterranean basin as deduced from concentrations of ions coprecipitated with gypsum and anhydrite. *Chem. Geol.*, 35: 333–350.
- KWIATKOWSKI S. 1972 — Sedymentacja gipsów miocenijskich Polski południowej. *Pr. Muz. Ziemi*, 19: 3–94.
- LISZKOWSKI J. 1989 — Orogeniczno-descensyjny model genetyczny miocenijskich formacji salinarnych regionu karpackiego wschodnich obszarów Centralnej Paratetydy. *Pr. Nauk. Uniw. Śląsk.*, 1019: 1–102.
- MACDONALD G. J.F. 1953 — Anhydrite-gypsum equilibrium relations. *Am. J. Sc.*, 251: 884–898.
- MACHEL H.G. & BURTON E.A. 1991 — Burial diagenetic sabkha-like gypsum and anhydrite nodules. *J. Sedim. Petrol.*, 61: 394–405.
- MOIOLA R.J. & GLOVER E.D. 1965 — Recent anhydrite from Clayton Playa, Nevada. *Am. Mineral.*, 50: 2063–2069.
- MØLLER N. 1988 — The prediction of mineral solubilities in natural waters: a chemical equilibrium model for the Na–Ca–Cl–SO<sub>4</sub>–H<sub>2</sub>O system, to high temperature and concentration. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52: 821–837.
- NEY R., BURZEWSKI W., BACHLEDA T., GÓRECKI W., JAKÓB-CZAK K. & ŚLUPCZYŃSKI K. 1974 — Zarys paleogeografii i rozwoju litologiczno-facjalnego utworów miocenu zapadliska przedkarpackiego. *Pr. Geol.*, 82: 1–65.
- ORTÍ F. & ROSELL L. 1981 — Fábricas cristalinas de la anhidrita nodular y laminada. *Acta Geol. Hisp.*, 16: 235–255.
- OSZCZYPKO N. 1996 — Miocenijska dynamika polskiej części zapadliska przedkarpackiego. *Prz. Geol.*, 44: 1007–1018.
- PERTHUISOT J.P. 1977 — Le Sabkha de Doukhane (Qatar) et la transformation gypse → anhydrite + eau. *Bull. Géol. Soc. Fr.* 19: 1145–1149.
- PERYT T.M. 1996 — Sedimentology of Badenian (middle Miocene) gypsum in eastern Galicia, Podolia and Bukovina (West Ukraine). *Sedimentology*, 43: 571–588.
- PERYT T.M. 2000 — Resedimentation of basin centre sulphate deposits: Middle Miocene Badenian of Carpathian Foredeep, southern Poland. *Sedim. Geol.*, 134: 331–342.
- PERYT T.M. & JASIONOWSKI M. 1994 — In situ formed and redeposited gypsum breccias in the Middle Miocene Badenian of southern Poland. *Sedim. Geol.*, 94: 153–163.
- PERYT T.M. & KASPRZYK A. 1992 — Earthquake-induced resedimentation in the Badenian (middle Miocene) gypsum of southern Poland. *Sedimentology*, 39: 235–249.
- POŁTOWICZ S. 1993 — Palinspastyczna rekonstrukcja paleogeografii badeńskiego salinarnego zbiornika sedymentacyjnego w Polsce. *Geologia*, 19: 203–233.
- RICHTER-BERNBURG G. 1985 — Zechstein-Anhydrite. *Fazies und Genese. Geol. J.*, A85: 1–82.
- ROSELL L., ORTÍ F., KASPRZYK A., PLAYÁ, E. & PERYT T. 1998 — Strontium geochemistry of Miocene primary gypsum: Messinian of SE Spain and Sicily and Badenian of Poland. *J. Sedim. Res.*, 68: 63–79.
- ROSEN M.R. & WARREN J.K. 1990 — The origin and significance of groundwater-seepage gypsum from Bristol Dry lake, California, USA. *Sedimentology*, 37: 983–996.
- ROUCHY J.-M., BERNET-ROLANDE M.C. & MAURIN A.F. 1994 — Descriptive petrography of evaporites: application in the field, subsurface and laboratory. [In:] *Evaporitic Sequences in Petroleum Exploration*, TECHNIP Édition, Paris: 70–123.
- ROUCHY J.-M., PIERRE C. & SOMMER F. 1995 — Deep-water resedimentation of anhydrite deposits in the Middle Miocene (Belayim Formation) of the Red Sea, Egypt. *Sedimentology*, 42: 267–282.
- SCHREIBER B.C. & WALKER D. 1992 — Halite pseudomorphs after gypsum: a suggested mechanism. *J. Sedim. Petrol.*, 62: 61–70.
- SCHREIBER B.C., ROTH M.S. & HELMAN M.L. 1982 — Recognition of primary facies characteristics of evaporites and the differentiation of these forms from diagenetic overprints. [In:] C.R. Handford, R.G. Loucks & G.R. Davies, G.R. (eds) — Depositional and Diagenetic Spectra of Evaporites — A Core Workshop SEPM, Core Workshop No. 3. Calgary, Canada: 1–32.
- SHEARMAN D.J. 1985 — Syndepositional and late diagenetic alteration of primary gypsum to anhydrite. [In:] B.C. Schreiber & H. L. Harner (eds) — Sixth International Symposium on Salt. Salt Institute, Alexandria, Virginia, 1: 41–50.
- SONNENFELD P. 1984 — Brines and Evaporites. Academic Press, Orlando.
- ŚLĄCZKA A. 1994 — Redeponowane osady w basenach ewaporacyjnych. *Prz. Geol.*, 42: 51–255.
- WARREN J.K. & KENDALL C.G.S.C. 1985 — Comparison of marine sabkhas (subaerial) and salina (subaqueous) evaporites: modern and ancient. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, 69: 1013–1023.
- WEST I.M., ALI Y.A. & HILMY M.E. 1979 — Primary gypsum nodules in a modern sabkha on the Mediterranean coast of Egypt. *Geology*, 7: 354–358.
- ZEN E.A. 1965 — Solubility measurements in the system CaSO<sub>4</sub>–NaCl–H<sub>2</sub>O at 35°, 50°, and 70°C and one atmosphere pressure. *J. Petrol.*, 6: 124–164.