

inclusions in the crystals and datings made by U-Th method of the recrystallized halites sampled in the Crystal Caves' zone provided a new data allowing for the following conclusions:

1. There are numerous liquid-gaseous inclusions inside the halite crystals (Figs. 8.1–8.4). Solutions closed in the crystals are the brine (Tabs. 8.I and 8.II). Isotopic composition points out their meteoric origin (Tab. 8.III, Figs. 8.5 and 8.6). Therefore the halite crystallization was conditioned by infiltration water which percolating down was saturated with sodium chloride originating from salt leaching. That statement corresponds with S. Kreutz opinion (1928). He thought that flowing down water was saturated with salt in the zone situated over the caves.

2. Precipitation of halite crystals could not occur in consequence of short-term thermal changes within the deposit, because all oscillations which took place on the ground were equalized with the increase of the depth and they practically did not exist on the level of the Crystal Caves. S. Kreutz (1928) was of the same opinion. Solubility of sodium chloride in water does not depend much on little differences of the temperature. Evaporation of saline solution in such conditions was the main factor causing NaCl supersaturation of infiltration water and halite crystallization. Over-cooling of the ground in the permafrost zone at the head of the ice-sheet during the Pleistocene glaciations, which was a slow process, was the condition which modified such a process. The depth of over-cooling could reach down to the Crystal Caves Dome. Now in the polar areas the thickness of permafrost zone is several hundred meters (Jahn 1970).

3. Estimated initial values of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ of liquid inclusion inside the halite crystals (with the assumption of high humidity during evaporation) are significantly lower than those recorded in contemporary rain water of Cracow region (Tab. 8.III, Figs. 8.5 and 8.6). This fact suggests the water supply took place in a cooler climatic conditions than now. The earlier decrepitation examinations pointed out low-temperature origin of the halite crystals (Pawlikowski and Wiewiórka 1988).

4. Disturbances in radioactive equilibrium of uranium series stated in the halites sampled in the Crystal Caves' zone distinctly testify to halite recrystallization. That confirmed all earlier foundations dealing with the origin of the Crystal Caves.

5. The results of uranium-thorium analyses allowed to state that halite crystallization took place during the cool phases of the Quaternary (Tab. 8.IV and Fig. 8.7). Three generations of halite crystals in the Crystal Caves' zone have been distinguished:

- the older generation connected with the one of the south Polish glaciations (Nidanian and Sanian glaciations) or with the Mazovian interglacial; the crystals occurring over the bottom of the vestibule leading to the caves originated in that period,
- the younger generation corresponding to the Wartian glaciation (the younger glaciation of the south Polish glaciations); the crystals occurring in the caves' vestibule and in the Lower Crystal Cave,
- the youngest generation corresponding to the early stage of the Vistulian glaciation (the north Polish glaciation); the crystals occurring in the Upper Crystal Cave.

Particular generations of studied halite crystals differ in the state of preservation i.e. in the degree of the corrosional process development (Figs. 8.8–8.15).

Quaternary age of the halite crystals from the caves was expressed in the earlier papers by Pawlikowski and Wiewiórka (1988) and by Wiewiórka (1996).

8.4. Geneza halitowych pokryw krystalicznych – hipoteza

Zofia Alexandrowicz

Wyniki analiz uranowo-torowych wykazały, że kryształy halitu występujące w strefie Grot Kryształowych są znacznie młodsze od soli tworzących złożę wielickie, a więc są one pochodzenia wtórnego. W rozważaniach o mechanizmie ich powstawania pojawia się zasadnicze pytanie: czy krystalizowały one w solance wypełniającej

szczeliny i pustki, czy też narastały w miejscach nie wypełnionych roztworem. Wszelkie przesłanki geologiczne wskazują, że złoża soli nigdy nie znajdowało się ponad poziomem wody gruntowej, a więc w strefie aeracji. Dopiero w okresie jego udostępnienia i eksploatacji likwidowano zawadzenie utrudniające lub wręcz uniemożliwiające prowadzenie prac wydobywczych (patrz rozdziały 3 i 5). Przed ingerencją górniczą górotwór był przesycony wodą (czyli znajdował się w strefie saturacji), w której mogło następować zarówno rozpuszczanie jak i wytrącanie soli.

Przeprowadzone badania izotopowe roztworów zamkniętych w inkluzjach halitu ze strefy grot, wskazały na możliwość powstawania kryształów wskutek ewaporacji solanki. Czynnikiem, który sprzyjał temu procesowi mogło być przechłodzenie górotworu związane z tworzeniem się wiecznej zmarzliny w peryglacialnej strefie na przedpolu lądolodów w czasie kolejnych zlodowaceń plejstocenijskich. Taka interpretacja jest zasadniczo zgodna z wynikami datowań krystalicznej soli, które wskazują na czasowy związek jej powstawania z zimnymi okresami mezo- i neoplejstocenu. Jakże zatem musiały zaistnieć warunki przestrzenne, umożliwiające odparowywanie i przesyconie solankowych roztworów w strefie saturacji? Rozważenie tego zagadnienia skłania do podjęcia dyskusji o genetycznych uwarunkowaniach krystalicznego wystroju strefy grot. Interpretacja odrębna od dotychczasowych, zakłada możliwość swobodnego odparowywania solanki. Pogląd taki uzasadniają następujące obserwacje.

1. Doświadczenie przeprowadzone przez autorkę, polegające na zamknięciu w dwóch szczelnych naczyniach nasyconej solanki, wypełniającej ich część. Po relatywnie krótkim okresie (kilka miesięcy) w obu nastąpiło wytrącanie kryształów halitu i obrastanie nimi ścian naczynia ponad roztworem. W jednym z nich, oziębionym do temperatury w granicach 0–4°C wykształciła się znacznie bardziej obfita powłoka złożona z kryształów większych niż w naczyniu pozostawionym w temperaturze pokojowej.

2. Na obrzeżach słonych jezior znane są nagromadzenia krystalicznej soli, wytrącającej się poza zasięgiem zbiorników.

3. W podziemnych jeziorkach kopalni Wieliczka można obserwować współczesne wytrącanie i narastanie kryształów halitu, które zachodzi na wystających ponad powierzchnię solanki, częściowo zanurzonych w niej przedmiotach, takich jak deski, gałęzie czy narzędzia. Zjawisko to wykorzystywane jest od dawna przez górników dla „hodowania” kryształów soli.

Podane powyżej obserwacje świadczą o krystalizacji halitu poza roztworem solankowym, tuż ponad nim lub w jego najbliższym sąsiedztwie. Możliwość wyjaśnienia genezy kryształów w takich warunkach wymaga założenia, że w obrębie górotworu znajdującego się w strefie saturacji, istniały pustki nie wypełnione całkowicie solanką, a zajęte przez gaz. W formacjach miocenijskich przedpola Karpat jest to sytuacja stwierdzana powszechnie w złożach gazu ziemnego, którego głównym składnikiem jest metan (Depowski 1970). Potwierdza to możliwość migracji tego gazu pod dużym ciśnieniem i tworzenia jego nagromadzeń zarówno w porowatych skałach, jak też w rozwierających się szczelinach.

Istnienie takich nagromadzeń czyli bąbli gazowych (metanowych) było wielokrotnie obserwowane w czasie działalności górniczej. Podczas eksploatacji soli w wielkiej kopalni następowały w różnych okresach wyrzuty metanu (patrz rozdz. 3). O jego pojawach w Komorze Baum wspominał L. Zejszner (1843). Duże wyrzuty gazu w latach 1820–30 były spalane na miejscu. Niekiedy miało to formę widowisk atrakcyjnych dla zwiedzających kopalnię. O gazowości złoża świadczą również inkluzje, zawierające bańki gazu, głównie metanu, powszechnie występujące w różnych typach soli. W wielu relacjach o przebiegu eksploatacji złoża notowane były informacje świadczące, że wypływ wody był poprzedzony pojawem gazu.

Fakty geologiczne, świadczące o istnieniu w pierwotnym górotworze pustek wypełnionych gazem, zostały opisane przez J. Motykę i M. Szuwarzyńskiego (1989) z kopalni złóż rud cynku i ołowiu na Górnym Śląsku. W pustkach tych występują wtórne nacieki siarczkowe (rzadziej węglanowe), drobno- i grubokrystaliczne. Przybierają one postać typową dla pokryw i form powstających w obrębie pustek krasowych istniejących w wadycznej strefie krasu. Tworzyły się one jednak w strefie saturacji (a więc freatycznej) w obrębie zamkniętych w górotworze bąbli gazowych. Istnienie takich pułapek wypełnionych gazem występującym pod znacznym ciśnieniem jest tam potwierdzone wyrzutami gazu poprzedzającymi wypływy wód, a więc zjawiskami analogicznymi do tych, które są notowane w kopalni w Wieliczce.

Godne podkreślenia jest skojarzenie występowania nagromadzeń dużych i pięknie wykształconych kryształów halitu z przejawami wulkanizmu trzeciorzędowego i towarzyszącą im migracją dwutlenku węgla. Zwrócił na to uwagę T. Schultheiss (1992), opisując grotę kryształową odkrytą w kopalni Merkers, która udostępnia jedno ze złóż cechsztyńskich soli kamiennych i potasowych w Turyngii. Grota ta, o wielkości około 4000 m³, znajduje się na głębokości 750 m. Ściany jej są obrosnięte przezroczystymi i matowymi kryształami o krawędziach osiagających nawet 40–100 cm. Jako unikatowy obiekt geologiczny została ona zaproponowana do wpisania na Listę Światowego Dziedzictwa UNESCO (Grube i Wiedenbein 1992). Podobnie jak w kopalniach polskich i tu notowane były spontaniczne wyrzuty gazu pod dużym ciśnieniem. Badacze niemieccy wprawdzie nie odnieśli się do warunków powstania krystalicznego wystroju pustki, ale podobieństwa między grotami kryształowymi w kopalni Wieliczka i w kopalni Merkers są tak znaczne, że mogą sugerować ich podobną genezę.

Przedstawione powyżej dane nasuwają następujące, hipotetyczne wnioski, odnoszące się do genezy pokryw krystalicznych w grotach wielickich.

1. Pustki w obrębie Kopuły Grot Kryształowych powstały pierwotnie jako szczeliny wskutek tensji w procesie tektonicznego formowania się złoża, a następnie intensywnego rozpuszczania soli przez wody infiltracyjne. Były one wypełnione solanką o różnym stopniu stężenia.

2. Dyfuzyjna migracja gazów występujących w miocęńskim górotworze pod znacznym ciśnieniem i formujących złożowe nagromadzenia mogła lokalnie doprowadzać do częściowego spychania solankowych roztworów i tworzenia układów warstwowych (solanka w części dolnej – gaz ponad nią), typowych dla pułapek gazowych.

3. Bąble gazowe tworzyły się w szczelinach zamkniętych od góry i izolowanych przez grube pakiety utworów ilastych. Takie układy geologiczne są znane w strefie Grot Krysztalowych.

4. W pustkach zajętych częściowo przez metan następowało odparowywanie solanki i wzrost jej koncentracji. Podobnie jak w opisanym uprzednio doświadczeniu, mogły powstawać wówczas kryształy halitu, narastające na jej ścianach w atmosferze gazowej. Przechładzanie górotworu w czasie kolejnych zlodowaceń i związane z nim obniżanie rozpuszczalności soli było czynnikiem sprzyjającym temu procesowi.

5. Obrastanie ścian szczelin wypełnionych metanem może być również wynikiem lateralnej sekrecji polegającej na wyprowadzaniu solanek krążących w porach skał otaczających pustki. Tworzenie pokryw halitowych na ich ścianach byłoby wówczas analogiczne do zjawisk zachodzących przy powstawaniu geod wypełnionych kryształami.

6. W pierwszym etapie tworzenia się wystroju grot w obrębie bąbli gazowych dochodziło zapewne do powstawania pokryw złożonych z drobnych kryształków halitu, które w wyniku stopniowo postępującej krystalizacji przekształcały się w agregaty bardziej grubokrystaliczne, a w końcu w nagromadzenia wzajemnie przerastających się kryształów o różnej wielkości. Takie następstwo sugerują obserwacje dokonane bezpośrednio w grotach, a także na okazach muzealnych, gdzie z drobnokrystalicznych agregatów pokrywających powierzchnie skał płonnych wyrastają kryształy halitu o większych rozmiarach. Znajduje tu potwierdzenie prawo Oswalda, tłumaczące wzrost kryształów większych kosztem mniejszych (Sunagawa 1994).

Przedstawiony sposób narastania pokryw halitowych zdaje się być najbardziej prawdopodobny. Odnosi się to nie tylko do Grot Krysztalowych, ale także do wcześniej od nich odkrywanych stref, z których pochodzą niektóre, eksponowane w muzeach okazy halitu, jak też pustki o ścianach pokrytych powłoką krystaliczną, stwierdzonej ostatnio wierceniem w niedostępnej części złoża (patrz rozdział 12).

Origin of the halite crystalline covers – hypothesis

Results of uranium-thorium analyses proved, that halite crystals occurring in the Crystal Caves' zone are much younger than salts of the Wieliczka deposit, therefore they are of secondary origin. Considering the mechanism of their creation a principal question has to be asked: did they crystalize in the brine which filled the crevices and voids or did they grow in spaces not filled with any solution. All geological evidence shows that salt deposit has never occurred over the subterranean water level, in vadose zone. The flooding making difficult or imposible mining works was eliminated during the period of first driving and excavation (see chapters 3 and 5). Before mining works the deposit was supersaturated with water, so it was in freatic zone where salt dissolution and precipitation could take place.

Isotopic studies of solutions inside inclusions in halite crystals from the Crystal Caves' zone pointed out the possibility of crystals creation through brine evaporation. Super-cooling of the rock mass connected with generation of permafrost in periglacial zone during the Pleistocene glatiations was the factor which was favourable for this process. Such an interpretation is fundamentally conformable to the results of datings of salt which points out the time connexion of salt origin with cool periods of mezo- and neo-Pleistocene.

What were the conditions which enabled evaporation and supersaturation of brine solutions in freatic zone? Consideration of this problem allows to accept genetic interpretation of crystalline decora-

tion origin of caves' zone or its fragments which are different than existing earlier. This interpretation assumes the possibility of free brine evaporation. The following observations can be taken into consideration as the basis of such an opinion.

1. The author made an experiment where saturated brine was kept in two hermetic vessels and filled only a part of them. In a relatively short time (several months), precipitation took place and halite crystals started to grow over a brine level on the walls of the vessels. In the first vessel cooled to the temperature about 0–4°C, a thicker cover formed. It was composed of bigger crystals than in the second vessel left in room temperature.

2. On the banks of salt lakes appear accumulations of crystalline salts precipitated out of fringes of these lakes.

3. In underground lakes in the Wieliczka mine contemporary precipitation and growth of halite crystals are observed. These processes take place on different objects – boards, branches or mining tools – partly dipped in brine and protruding over its level. The miners have utilized this phenomenon for production of salt crystals for a long time.

Described observations prove the halite crystallization beyond the brine, just above it or close to it. The possibility of explanation of crystal origin in such conditions needs the assumption that within the deposit existing the vadose zone were voids which were not fully filled with brine but filled with gas. In the Miocene formations of the Carpathian foreland such a situation is common for natural gas deposits, where the methane is the main component (Dępowski 1970). This confirms the possibility of this gas migration being under strong pressure and formation of its accumulation in the porous rocks as well as in the opening crevices.

Existence of such accumulations – gas (methane) bubbles was often observed during mining activity. During salt excavation in the Wieliczka mine the methane squealers took place in different periods (see chapter 3). L. Zejszner (1843) mentioned the methane appearances in the Baum Chamber. Big squealers occurring in 1820–1830 were burnt on the spot and sometimes there were the very attractive spectacles for visitors. Inclusions with gas bubbles mainly methane ones occurring commonly in different types of salts testify high gas content of the deposit. Many reports referring to the progress in deposit excavation contain information that water effluence was preceded by gas appearance.

J. Motyka and M. Szuwarzyński (1989) described geological data testifying existence of voids filled with gas in the primary rock mass in zinc and lead deposits in Upper Silesia. Secondary sulfide (rarely carbonate), fine- or coarse-crystalline sinters occur in the voids. They have typical shape of covers and forms which grow within the karst voids occurring in the vadose zone. Nevertheless they were formed in the freatic zone within gas bubbles closed in the rock mass. Occurrence of such traps filled with gas under the high pressure is confirmed by squealers preceding water effluences and these phenomena have been registered in the mine in Wieliczka.

It is worth emphasizing that there is the link between the occurrence of accumulations of big and well formed halite crystals with features of the Tertiary vulcanism and accompanying with them carbon dioxide migration. T. Schultheiss (1992) paid attention to this fact when he described crystal cave in the Merkers mine (Germany) where one of the Zechstein deposits of rock and potash salts is excavated. The cave has volume of about 4000 m³ and is situated 750 m below the ground level. There are transparent and dull crystals with edges even up 40–100 cm long. As the unique geological object it was proposed to the List of World Heritage UNESCO (Grube and Wiedenbein 1992). Similarly to the Polish mines, squealers of gas under the high pressure were registered. Although German scientists did not deal with the conditions of crystalline decoration genesis in the void, but similarities between crystal caves in both mines are so significant that they may suggest their similar origin.

The above data allow to hypothetical conclusions referring to the origin of crystalline covers in the Wieliczka caves.

1. The voids occurring in the Crystal Caves Dome were primary formed as tension fissures during tectonic formation of deposit and next intensive dissolution of salt by infiltration waters. They were filled with brine of different concentration.

2. Diffusive migration of gases occurring in the Miocene rock mass which are under a high pressure and forming deposit accumulations could locally cause the partial pushing of brines and formation of laminar system i.e. the brine at the lower part and gas above it – typical gas trap.

3. Gas bubbles were formed in the fissures closed at the top and isolated with thick argillous sediments. Such geological situation is known from the Crystal Caves' zone.

4. In the voids partly filled with methane, brine was evaporating and its concentration increased. Similarly to described experiment, the halite crystals could be formed on the walls of voids in gaseous atmosphere. Cooling of the deposit during glaciations and connected with them decrease of salt solubility were factors favourable to that process.

5. Fissures were filled with the methane, on their walls halite crystals could be growing as the result of lateral secretion consisting in leading out the brines circulating in pores of rocks enclosing the voids. Formation of halite covers on voids walls would be analogical to the phenomena occurring at formation of geodes filled with crystals.

6. At the first stage of formation of decoration in the caves within gas bubbles probably covers of fine-grained crystals were formed. As the result of crystallization the crystals were transformed into the aggregates of coarse-grained crystals and at the end they formed the accumulations of mutually overgrown crystals of different sizes. Observations made in the caves and museum specimens where the crystals of relatively bigger sizes grow up from the fine-grained aggregates covering the surfaces of barren rocks suggest such a succession. Oswald's law explaining growth of bigger crystals at the cost of smaller ones is confirmed here (Sunagawa 1994).

The described way of halite covers growth seems to be the most probable one. That refers not only to the Crystal Caves but also to zones discovered earlier, from which some halite crystals exhibited in the museums come. This also refers to the void with the crystalline cover which was located by a borehole drilled in the unaccessible part of the deposit (see chapter 12).