

# STRUKTURA WEWNĘTRZNA I GENEZA WSPÓŁCZESNEJ POKRYWY SOLNEJ SOLNISKA SALAR DE UYUNI (BOLIWIA) W ŚWIETLE BADAŃ TOMOGRAFICZNYCH

## Internal structure and origin of modern salt crust of Salar de Uyuni (Bolivia) salt pan based on topographic research

Stanisław BURLIGA<sup>1</sup> & Marek DOHNALIK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych;

pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław; email: [stanislaw.burliga@ing.uni.wroc.pl](mailto:stanislaw.burliga@ing.uni.wroc.pl)

<sup>2</sup>Instytut Nafty i Gazu; ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków; email: [dohnalik@inig.pl](mailto:dohnalik@inig.pl)

**Treść:** W pracy przedstawiono rezultaty badań budowy wewnętrznej współczesnej pokrywy solnej solniska Salar de Uyuni w południowo-zachodniej Boliwii. Analizie poddano również budowę wypełnień szczelin z wysychania. Podstawową techniką badawczą była mikrotomografia rentgenowska, obrazująca pełną strukturę wewnętrzną prób bez ich destrukcji. Badania wykazały trójdzielność struktury pokrywy: obecność powłoki halitowej na powierzchni, warstwy halitytów komórkowych poniżej powłoki oraz warstwy halitytów wieloporowych w części spągowej pokrywy. Szczeliny z wysychania wypełniają halityty pęcherzykowate. Rozmieszczenie materiału mułowego w próbce oraz rozmycia kryształów przypowierzchniowych wskazują na wielokrotność cykli rozpuszczania soli, krystalizacji halitu i depozycji mułów. Na tej podstawie sformułowano wniosek, iż obserwowane w skałach warstwowanie nie odzwierciedla rocznych cykli sedymentacyjno-ewaporacyjnych, lecz cykle wieloletnie. Tłumaczy to niskie średnie tempo przyrostu osadów na solnisku.

**Słowa kluczowe:** Salar de Uyuni, współczesne osady solne, poligony z wysychania, mikrotomografia rentgenowska

**Abstract:** This paper presents the results of a study on the internal structure of modern salt crust of Salar de Uyuni in SW Bolivia. Additionally, the structure of desiccation fissure infill was investigated. X-ray microtomography was used as the main analytical method because it enabled the complete structure of the sample's interior to be imaged without its destruction. Based on microtomographic images three layers were distinguished in the crust between the surface and its base: a halite shell at the top, a cellular halite layer in the middle and a large-pore halite layer at the base. Results revealed that the desiccation fissures are filled with extremely porous bubble-halite. Distribution of mud in the sample as well as wash-out of the surficial halite crystals indicate the cyclicity of halite dissolution, its crystallisation and mud accumulation. These observations provide an explanation for low rate salt accumulation in the salt pan. This leads to the conclusion that the observed layering in the rocks does not reflect annual sedimentation-evaporation cycles but rather long-term cycles.

**Key words:** Salar de Uyuni, modern salt deposits, desiccation polygons, X-ray microtomography

## WSTĘP

Podstawowym źródłem informacji o genezie kopalnych osadów chlorkowych są ich współczesne środowiska sedymentacyjne. Pomimo ponadpółtorowiecznej historii badań nad powstawaniem złóż soli kamiennych szereg zagadnień w dalszym ciągu wzbudza kontrowersje. Należy do nich między innymi pochodzenie rozległych pokładów soli warstwowych o kilkusetmetrowej miąższości, nagromadzonych w krótkim okresie czasu geologicznego, których przykładem są cechszyńskie i mioceńskie złoża soli w Europie. Podobnie dyskusyjna pozostaje geneza tzw. struktur poligonalnych w solach, udokumentowanych zarówno w osadach kopalnych, jak i współczesnych. Problematyczność ustalenia genezy osadów chlorkowych i ich struktur wynika z fizykochemicznych własności halitu, szczególnie z jego łatwości rozpuszczania się w wodzie i szybkiej krystalizacji z nasyconej solanki. W przypadku osadów kopalnych problemy te wynikają również z łatwej rekrytalizacji halitu pod wpływem względnie niewielkich naprężeń. Własności te prowadzą do przebudowy pierwotnych cech i struktur sedymentacyjnych soli, inicjowanej niemal natychmiast po osadzeniu halitu na dnie basenu sedymentacyjnego. Poprawna interpretacja procesów transformacji osadów chlorkowych wymaga zatem rozpoznania i rozdzielenia efektów procesów sedymentacyjnych i diagenetycznych w młodym osadzie. Niestety własności halitu stanowią również wyzwanie w badaniach współczesnych osadów chlorkowych. Ze względu na wielkość kryształów i ziaren halitu do analizy struktury soli niezbędne są próby wielokrotnie większe niż w przypadku badań innych skał osadowych, a dodatkowo niezbędne jest zastosowanie bardziej wyrafinowanej preparatyki skał, zapobiegających destrukcji słabo scementowanego, łatwo rozpuszczającego się osadu.

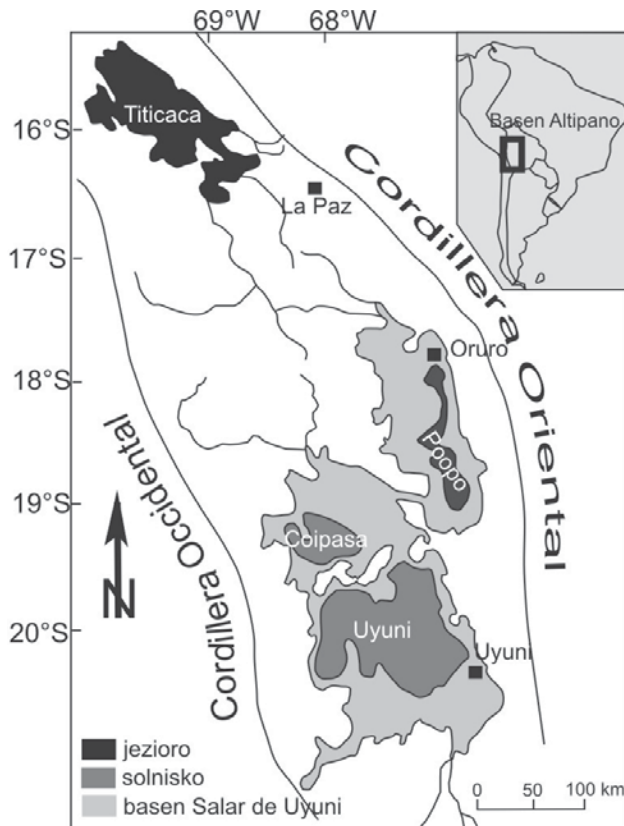
Niniejsza praca przedstawia możliwości wykorzystania rentgenowskiej tomografii komputerowej do analizy struktury wewnętrznej współczesnych osadów chlorkowych. Materiał badawczy pozyskano z największego obszaru współczesnej lądowej depozycji osadów solnych – z solniska Salar de Uyuni w Boliwii.

## ZARYS BUDOWY GEOLOGICZNEJ OBSZARU UYUNI

Solnisko Salar de Uyuni jest fragmentem basenu Salar de Uyuni wyodrębnianego w południowej części rozległego śródgórskiego basenu Altiplano, który usytuowany jest w południowo-zachodniej Boliwii pomiędzy Kordylierą Zachodnią i Kordylierą Wschodnią (Guyot et al. 1990, Wirmann 1995, Svendsen 2003). Powierzchnia basenu Altiplano wynosi ok. 200 000 km<sup>2</sup>, natomiast powierzchnia basenu Salar de Uyuni ok. 46 000 km<sup>2</sup>, z czego solnisko Salar de Uyuni zajmuje ok. 10 000 km<sup>2</sup> i stanowi największą współczesną równię solną.

Sedymentacja jeziorna w obrębie basenu Altiplano trwa od wczesnego czwartorzędu (Baucom & Rigsby 1999). Obecny system jeziorny jest wyraźnie dwudzielny. W części północnej i centralnej basenu Altiplano występują jeziora stałe: Titicaca (3806 m n.p.m.) i Poopo (ok. 3685 m n.p.m.) połączone rzeką Rio Desguadero (Fig. 1). W okresach deszczowych trwających od grudnia do marca dochodzi do przepełnienia jeziora Poopo i spływu wód do jezior okresowych (solnisk) położonych w południowej części Altiplano – jezior Coipasa (3656 m n.p.m.) i Uyuni (3653 m n.p.m.), które stanowią pozostałość po ko-

palnym jeziorze Tauca (Risacher & Fritz 1990, Fornari *et al.* 2001). W obrębie Salaru de Uyuni poziom wód solankowych osiąga w porze deszczowej głębokość 10–50 cm (Svendsen 2003). W porze suchej dochodzi do całkowitego wyschnięcia jeziora i wytrącenia warstwy osadów solnych, a solanka występuje wówczas wyłącznie w postaci solanki porowej poniżej głębokości 5–10 cm pod powierzchnią osadu. Główny poziom solankowy wg Rettiga *et al.* (1980) występuje znacznie głębiej, poniżej ok. 10 m pod powierzchnią solniska i koreluje się z jeziornymi osadami mułowymi.



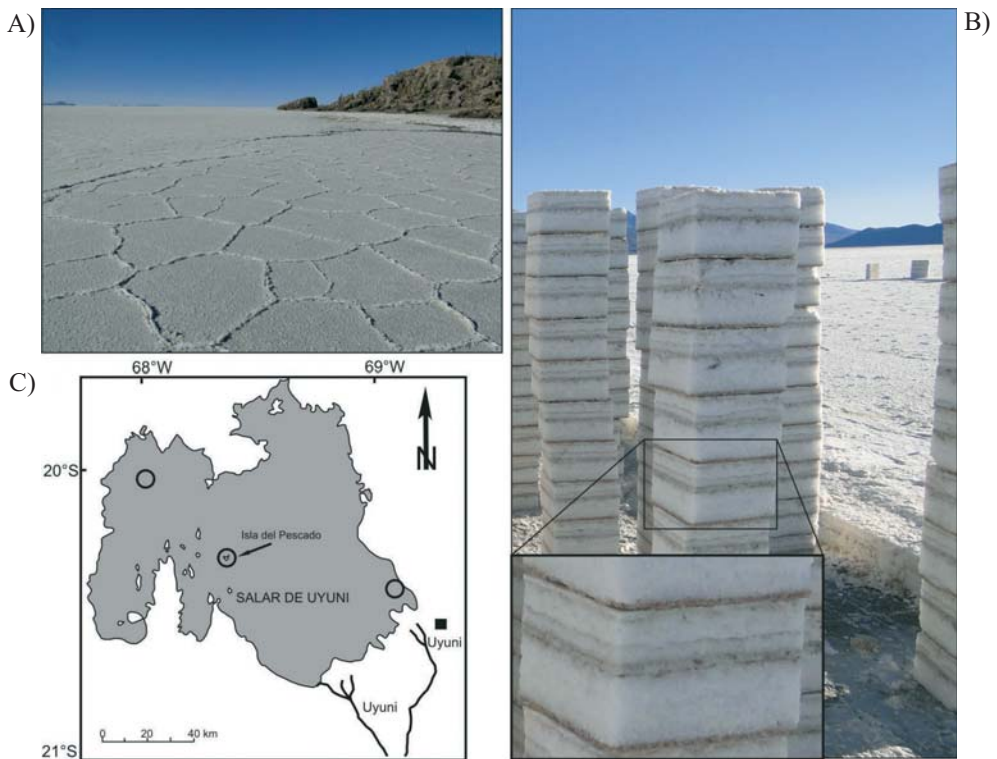
**Fig. 1.** Usytuowanie solniska Salar de Uyuni w systemie hydrograficznym basenu Altiplano w południowo-zachodniej Boliwii (na podst. Svendsena 2003)

**Fig. 1.** Location of the Salar de Uyuni salt pan in the hydrographic system of Altiplano Basin in SW Bolivia (based on Svendsen 2003)

Stratygrafię najwyższej części osadów basenu Salar de Uyuni ustalono na podstawie odwiertu wykonanego w centralnej części solniska (Fornari *et al.* 2001). Stwierdzono cykliczną sedymentację solno-mułową, odpowiadającą wielkoskalowym cyklom ewaporacyjno-jeziornym. Trwający obecnie cykl ewaporacyjny rozpoczął się ok. 12 980 (+160, –280) lat temu, po zakończeniu sedymentacji jeziornej (osady mułowe) w jeziorze Tauca. Powstały

w tym okresie 6-metrowej miąższości profil osadów solnych budują sole kamienne rytmicznie laminowane materiałem mułowym. Zawartość składników nierozpuszczalnych w solach nie przekracza 10% (Svendsen 2003). Osady uległy bardzo słabej kompaktacji. Porowatość soli kamiennych oszacowano na 15–30%, natomiast podścielających je mułów jeziornych – na 30–50% (Fornari *et al.* 2001). Parametry powyższe tłumaczą przyczynę głębokiego występowania głównego poziomu solankowego w osadach południowej części basenu Altiplano.

Charakterystycznym elementem morfologicznym solniska Salar de Uyuni powstającym po odparowaniu solanki są struktury poligonalne (Fig. 2A). Mimo że geneza tych struktur jest prawdopodobnie złożona, ze względu na ich uwidacznianie się w okresach suchych w dalszej części pracy określane będą mianem poligonów z wysychania.



**Fig. 2.** Morfologia solniska Salar de Uyuni i miejsca opróbowania pokrywy solnej: A) poligony z wysychania w rejonie wyspy Isla del Pescado; średnica poligonów osiąga od 0.5 m do ok. 1.5 m; B) płytki łomik do pozyskiwania materiału solnego do celów budowlanych; grubość cegieł solnych wynosi ok. 20 cm; C) schematyczna lokalizacja miejsc badań geologicznych (na podst. Svendsena 2003 oraz GoogleEarth)

**Fig. 2.** Morphology of the Salar de Uyuni salt pan and salt crust sampling sites: A) desiccation polygons near Isla del Pescado; polygons range between 0.5 m and 1.5 m in diameter; B) shallow pit in salt crust for excavation of rock salt bricks; thickness of individual brick is about 20 cm; C) schematic location of investigation sites (based on Svendsen 2003 and GoogleEarth)

Struktury te rozwijają się na powierzchni całego solniska. Ich geometria, wielkość i kształt przestrzenny są zmienne, zależne od lokalnej topografii i hydrografii solniska, co zauważalne jest już przy obserwacjach rekonesansowych. Niestety w ogólnodostępnej literaturze naukowej nie ma prac szczegółowo analizujących zależność cech poligonów od warunków lokalnych. Poligony z wysychania mają zarys wieloboczny w planie, a w przekroju poprzecznym są V-kształtnymi szczelinami prostopadłymi do warstwowania, rozszerzającymi się ku górze. Powstałe podczas wysychania solniska szczeliny wewnątrz i ponad osadem zabudowane są porowatymi solami

## CEL I ZAKRES BADAŃ

Udokumentowana przez Fornariego *et al.* (2001) 6-metrowa miąższość osadów solnych nagromadzonych podczas ostatnich ok. 13 000 lat na obszarze Salaru de Uyuni wskazuje na bardzo wolny przyrost serii solnej (4.6 cm/100 lat), pomimo cyklicznych zalewów i ewaporacji solanki. Sugeruje to, iż obserwowane w osadach warstwowanie nie odzwierciedla rocznych cykli ewaporacyjnych. Głównym celem badań była analiza wewnętrznej struktury najmłodszej pokrywy osadowej solniska i podjęcie próby wyjaśnienia powodów logicznej niespójności pomiędzy systematyczną sedymentacją, widocznym w skale warstwowaniem a nikłym tempem przyrostu osadu. Dodatkowo analizie poddano wypełnienia szczelin poligonów z wysychania w celu identyfikacji ich struktury.

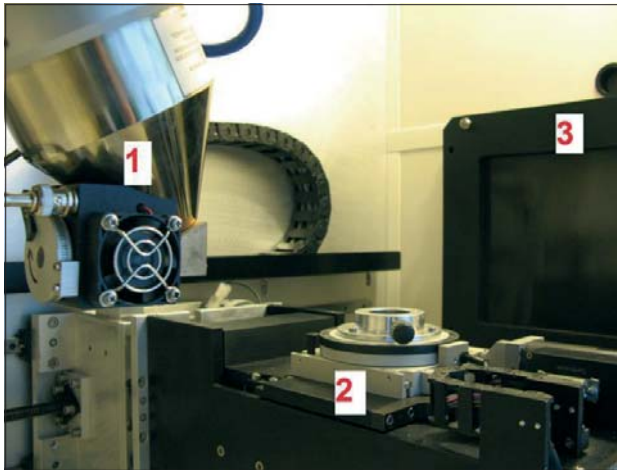
## MATERIAŁ BADAWCZY I METODYKA BADAŃ

Makroskopowe obserwacje budowy przypowierzchniowej części profilu solniska przeprowadzono we wschodniej (rejon miasta Uyuni), środkowej i północno-zachodniej (rejon Jarumy) części Salaru de Uyuni. W części wschodniej i zachodniej analizowano profil w płytkich (ok. 20 cm) wrębach powstałych na skutek eksploatacji warstw solnych do celów budowlanych (Fig. 2B). Próby do badań prezentowanych w niniejszej pracy pobrano w centralnej części solniska Salar de Uyuni, w pobliżu północnego brzegu wyspy Isla del Pescado (Fig. 2C), skąd pozyskano pięć prób do badań laboratoryjnych. Próby zostały odłączone z solanki i zabezpieczone przed dezintegracją. Badania laboratoryjne obejmowały analizę składu mineralnego oraz struktury wewnętrznej pokrywy solnej.

Określając skład mineralny, uwzględniono wyłącznie składniki nierozpuszczalne, występujące w śródsolnych przewarstwieniach mułowych oraz w wypełnieniach szczelin poligonów z wysychania. Materiał wyseparowano ze skały mechanicznie i poddawano płukaniu w wodzie destylowanej do momentu usunięcia z separatu chlorków. Sucha próba przebadana została rentgenograficznie.

Do badań wewnętrznej struktury skały zastosowano metodę mikrotomografii komputerowej. Jest to niedestrukcyjna metoda badawcza, która pozwala na zobrazowanie wewnętrznej struktury obiektu, praktycznie bez potrzeby specjalnego preparowania. Tomografia została zaimplementowana do badań w szeroko pojętych naukach geologicznych, w połowie lat 80. ubiegłego wieku, natomiast dopiero od połowy lat 90. możliwe jest obrazowanie z wykorzystaniem mikrotomografii, czyli tomografii o rozdzielczości rzędu mikrometra (Van Geet *et al.* 2000, Ketcham & Carlson 2001).

Do badań wykorzystano mikrotomograf rentgenowski Benchtop CT 160Xi wyprodukowany przez X-tek (Nikon), powstający na wyposażeniu Instytutu Nafty i Gazu od roku 2008. Najważniejszymi elementami budowy tego urządzenia są (Fig. 3): źródło promieniowania rentgenowskiego (1), manipulator (2) detektor promieniowania rentgenowskiego (3).



**Fig. 3.** Widok komory roboczej mikrotomografu rentgenowskiego i główne elementy składowe: 1 – źródło promieniowania rentgenowskiego, 2 – manipulator, 3 – detektor promieniowania rentgenowskiego

**Fig. 3.** Overall view of the X-ray microtomograph's work chamber and its main units: 1 – the source of X-rays; 2 – manipulator; 3 – X-ray detector

Zastosowane urządzenie pozwala na badanie prób o rozmiarze od kilku milimetrów do ok. 20 cm, o masie do 5 kg. Jest ono wyposażone w lampę rentgenowską, o zakresie napięcia przyspieszającego 40–160 kV, maksymalna rozdzielczość emitowanej wiązki fotonów wynosi ok 4  $\mu\text{m}$ . Elementem odpowiedzialnym za rejestrację obrazów jest detektor promieniowania o wymiarach 19  $\times$  24 cm, składający się z 1516  $\times$  1900 pikseli o rozmiarze 127  $\times$  127  $\mu\text{m}$  każdy.

Do badań mikrotomograficznych wytypowano jedną próbę powierzchniowej warstwy osadów solniska Salar de Uyuni z fragmentem szczeliny poligonu z wysychania. Pomiar obejmował dwa etapy:

1. akwizycję danych – dwuwymiarowych zdjęć rentgenowskich zwanych projekcjami,
2. rekonstrukcję (odtworzenie) wewnętrznej struktury próby soli na podstawie wcześniej uzyskanych obrazów.

Zastosowano następujące parametry lampy rentgenowskiej: 145 kV, 38 FA. Czas ekspozycji każdej projekcji wynosił 0.708 s. W czasie pomiaru próbka wykonała pełen obrót, podczas którego zgromadzono 2669 projekcji, co 0.135° każda. W mikrotomografii rozdzielczość pomiaru zależy od uzyskanego powiększenia geometrycznego badanego obiektu (Stock 2009). Ze względu na duży rozmiar badanej próby rozdzielczość zrekonstruowanego obrazu wyniosła zaledwie 59.7  $\mu\text{m}$ .



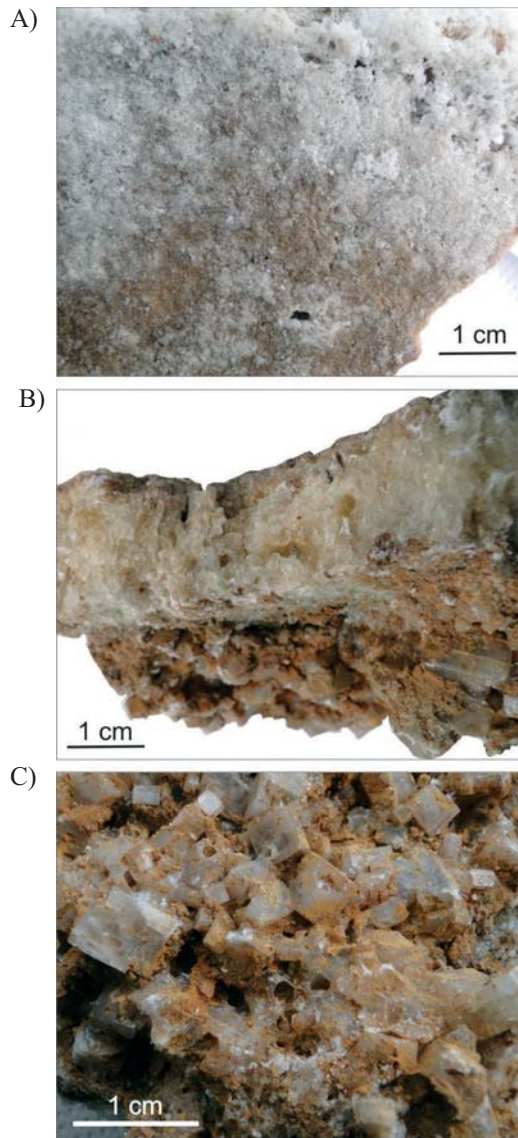
Zaletą mikrotomografii komputerowej jest możliwość obrazowania dowolnych przekrojów przez próbę za pomocą darmowych programów do analizy obrazu. W niniejszej pracy do obrazowania przekrojów przez próbę wykorzystano program do analizy obrazów ImageJ udostępniany bezpłatnie przez amerykański National Institute of Health.

## WYNIKI

Obserwacje makroskopowe studium profilu najwyższej części pokrywy solnej solniska Salar de Uyuni przeprowadzone bezpośrednio w odsłonięciach oraz na pobranych próbach jednoznacznie wskazują na cykliczność sedymentacji solnej. Podkreślają ją przewarstwienia soli wzbogacone w osady mułowe o brązowym zabarwieniu (Fig. 2B). Miąższość warstw solnych jest zmienna, w granicach od ok. 1 cm do ponad 10 cm. Warstewki wzbogacone w osady mułowe na ogół nie przekraczają 2 cm miąższości i mają nieostre granice. W badanych próbach wyraźniej zaznaczona jest granica stropowa warstwy soli z mułem, natomiast granica spągowa ma przebieg nieregularny, widoczne są w niej również kieszeniowe wypełnienia osadem mułowym. Cechą charakterystyczną profili jest niewielka miąższość powierzchniowej warstewki halitytowej w porównaniu z miąższością warstwy halitytowej zalegającej poniżej, oddzielonej warstewką halitytu z materiałem detrytycznym (muł). Prawdliwość powyższą obserwowano we wszystkich częściach solniska.

Oprócz zmian miąższości, w najwyższej części profilu makroskopowo zauważalna jest zmienność porowatości i pokroju kryształów halitu. Powierzchnia pokrywy solnej (<0.5 cm miąższości) jest masywna, z rzadko rozmieszczonymi porami i kanalikami (Fig. 4A). Halityty występujące pod nią są wyraźnie porowate, skała jednakże jest zwięzła, silnie scementowana, a pokrój kryształów makroskopowo trudny do określenia (Fig. 4B). Miąższość warstwy osiąga od jednego do kilku centymetrów. W odsłonięciach analizowanych w rejonie Isla del Pescado poniżej tej warstwy występowała solanka, a do warstwy halitytów porowatych od spągu dobudowane były hality o wyraźnym sześciennym pokroju kryształów (Fig. 4C). Widoczne na zdjęciu celowo uszkodzone sześciennie kryształy halitu mają pustki w środku, zatem mimo klasycznego pokroju sześciennego i masywnego wyglądu zewnętrznego, mają one postać kryształów szkieletowych. W strefie występowania halitytów o pokroju sześciennym uwagę zwraca również stosunkowo duża ilość materiału mułowego pomiędzy kryształami halitu. We wschodniej i północno-zachodniej części solniska poziom solanki występował głębiej – poniżej poziomu eksploatacji bloków solnych (ok. 20 cm). W skałach poniżej powierzchniowej masywnej powłoki występowały jedynie naprzemienne warstwy o zwięzłej strukturze porowatej, zbudowane z halitytów czystych i halitytów z domieszką mułu. Nie obserwowano halitytów o pokroju sześciennym ani wzbogacenia w osad mułowy.

Rentgenograficzna analiza składu mineralnego części nierozpuszczalnych z warstw halitytów zanieczyszczonych mułem wykazała obecność plagioklazów, kwarcu, illitu oraz gipsu. Część składników jednakże nie została rozpoznana. Podobny skład składników nierozpuszczalnych w wodzie uzyskano również w przypadku wypełnień szczelin z wysychania. Podkreślić należy, iż na obszarze solniska znajdowano powleczone otoczkami halitytowymi lapille i bomby wulkaniczne, co sugeruje piroklastyczną genezę części materiału frakcji mułowej.

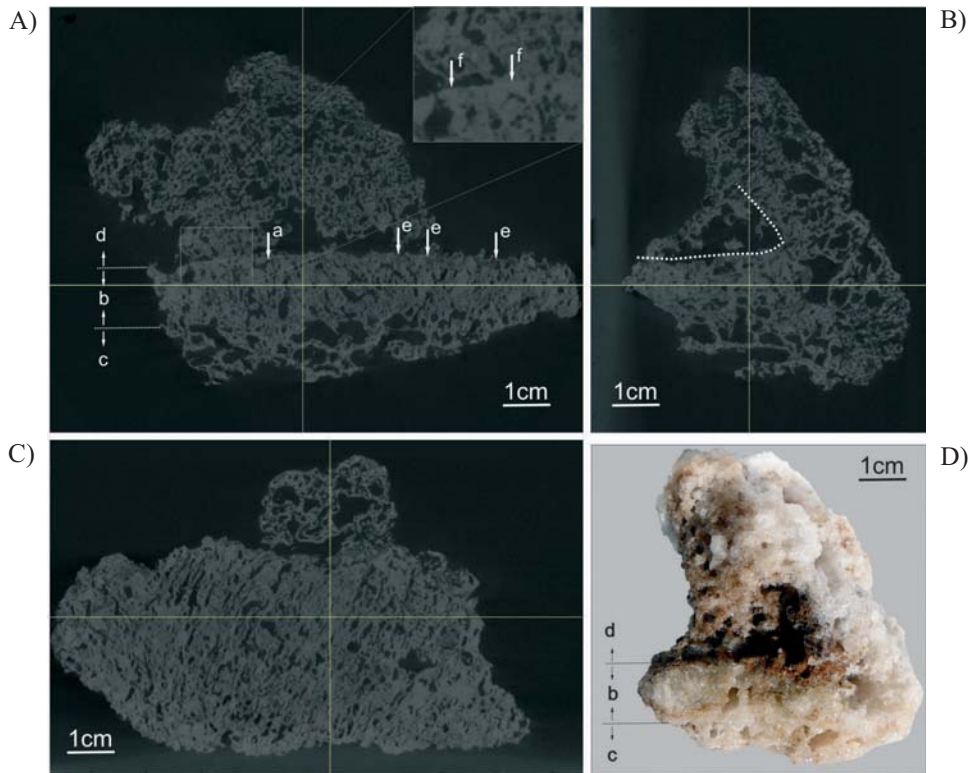


**Fig. 4.** Makroskopowe cechy struktury pokrywy solnej: A) masywna powłoka halitowa na powierzchni solniska z nielicznymi porami; jasne, bardziej porowate sole widoczne w prawym górnym narożniku są wypełnieniem szczeliny z wysychania; B) porowata, lecz względnie masywna warstwa halityu oddzielająca niżejleżącą warstwę halitytów zbudowanych z halitu o pokroju sześciennym od powierzchni; C) hality sześciennie w zbliżeniu; uszkodzone kryształy wskazują, iż przynajmniej część z nich jest pusta wewnątrz

**Fig. 4.** Meso-scale features of the salt crust structure: A) massive halite shell covering the salt pan surface with rare pores (top view); white salt in the upper right corner is the infill of desiccation fissure; B) porous but relatively massive layer of halite separating the layer composed of cubic halites from the surface; C) cubic halites in details; note the at least some broken crystals are empty inside



Najdokładniejszych informacji o wewnętrznej strukturze przypowierzchniowej warstwy osadowej solniska dostarczyły obrazy mikrotomograficzne. Pomimo relatywnie niskiej rozdzielczości obrazowania (59.7  $\mu\text{m}$ ), wynikającej z rozmiarów próby (Fig. 5), rozmieszczenie kryształów, pustek i materiału mułowego jest czytelne.



**Fig. 5.** Obrazy mikrotomograficzne próby solnej z solniska Salar de Uyuni: A)–C) trzy wzajemnie prostopadłe przekroje przez próbkę; linie białe wskazują płaszczyzny cięcia; kolory w obrazie tomograficznym odzwierciedlają odpowiednio: jasnoszary – halit, ciemniejszy szary – muł, czarny – pustki i pory w skale; D) makroskopowy obraz próby soli w układzie analogicznym do figury C. Objasnienia liter: a – masywna powłoka halitowa na powierzchni solniska; b – strefa występowania warstwy halitytu komórkowego; c – strefa występowania warstwy halitytu wielkoporowego; d – strefa występowania halitytu pęcherzykowego ponad powierzchnią solniska; e – przykładowe kieszeniowe wypełnienia mułem kanałów i wewnątrz kryształów solnych; f – rozmycia litych kryształów halitu na powierzchni solniska. Linia kropkowana na figurze B wskazuje podgięcie wierzchnich warstw solniska

**Fig. 5.** Microtomographic images of the salt sample from the Salar de Uyuni salt pan: A–C) three perpendicular cross-sections throughout the sample; white lines indicate location of the cross-section planes; pale grey, darker grey and black colours correspond to halite, mud and void occurrence in the rock, respectively; D) meso-scale image of the sample corresponding to picture C. Letters description: a – massive halite shell on the salt pan surface; b – zone of cellular halite layer; c – zone of large-pore halite layer; d – zone of bubble halite above the salt pan surface; e – examples of channel and pocket infill by mud; f – leached lithic halite crystals on the salt pan surface. Dotted line on figure B indicates bending of the uppermost crust layer

Na figurze 5A–C przedstawiono przykładowe trzy wzajemnie prostopadłe przekroje przez próbę, wygenerowane za pomocą standardowej aplikacji programu ImageJ. Usytuowanie poszczególnych powierzchni cięcia ilustrują linie, których położenie można dowolnie pozycjonować. Odcienie szarości widoczne na zdjęciach odzwierciedlają względną gęstość obiektów budujących próbę. W ogólnym ujęciu, im jaśniejszy kolor obrazu, tym większa gęstość wizualizowanej materii. W przypadku badanej próby czarny kolor odzwierciedla pustki w skale, kolor jasnoszary – rozmieszczenie halitu, natomiast ciemniejszy kolor szary obrazuje występowanie materiału mułowego. Pozorna niezgodność gęstości halitu i mułów sugerowana przez powyższą skalę szarości wynika z niewielkiej rozdzielczości i wysokiej porowatości mułu.

Poddana tomografii próba (Fig. 5D) pochodzi ze stropowej części pokrywy solnej przylegającej do szczeliny powstałej na skutek wysychania. Uwidacznia ona zatem budowę zarówno pokrywy jak i części wypełnienia szczeliny wraz ze strukturą nabudowującą się ponad szczeliną na powierzchni solniska (struktura ta widoczna jest na figurze 2A–C). Obraz mikrotomograficzny potwierdza wyniki makroskopowych obserwacji budowy wewnętrznej pokrywy solnej i jej wyraźną trójdzielność. Najwyższą część pokrywy stanowi niemal ciągła powłoka masywnego halitytu o miąższości ok. 1–3 mm, z rzadka przecinana kanalikami wiodącymi w głąb skały solnej. Powłoka nie jest jednakże płaska – jej topografię stanowią relikty szkieletowych kryształów halitu wystające ponad powierzchnię lub zagłębiające się w nią. Uwagę zwraca fakt, iż zasadniczo tylko w strefie przypowłokowej występują kryształy litego halitu, przy czym część z nich jest wyraźnie poziomo ścięta na powierzchni powłoki halitytowej (Fig. 5A). Ponadto wewnątrz niektórych kryształów szkieletowych w obrębie powłoki wypełnia materiał mułowy. Materiał ten wypełnia także niektóre kanaliki, lecz najobficiej występuje poniżej powłoki solnej w obrębie stropowej części zwięzłej warstwy porowatej.

Zwięzła warstwa porowata w badanej próbie osiąga 1–3 cm miąższości i zbudowana jest z halitów szkieletowych scementowanych, które na podstawie rozmiarów porów można przyporządkować do dwóch podstawowych klas wielkości: duże i drobne. Duże kryształy szkieletowe mają pogrubione ściany, kształt nieregularny, sześcienny lub prostopadłościenny. W obrębie niektórych dużych kryształów istnieją mostki zbudowane z drobnych kryształów układających się w formy koralikowe. Koralikowo ułożone drobne hality budują także ściany części dużych kryształów oraz przestrzenie pomiędzy dużymi kryształami. Przekrój poziomy przez próbę ujawnia wyraźne uporządkowanie przestrzenne dużych kryształów (Fig. 5C). Są one silnie wydłużone w planie, a ich długość jest wielokrotnie większa od szerokości. Również w przekroju prostopadłym do warstwowania zauważalne jest pionowe wydłużenie niektórych porów oraz kolumnowe uporządkowanie stref występowania halitytów masywnych (Fig. 5A, B). Halityty masywne w zdecydowanie większej ilości występują w stropowej części tej warstwy. Drobne halityty masywne występują także w obrębie zespołów halitów koralikowych. Ze względu na strukturę w odniesieniu do zwięzłej warstwy porowatej w dalszej części pracy stosowana będzie nazwa „halityty komórkowe”.

Poniżej warstwy halitytów komórkowych występują halityty cechujące się bardzo dużymi porami – powyżej 0.5 cm długości. Pory mają kształt nieregularny, jednakże zauważalne jest ich wydłużenie równoległe do warstwowania. Ograniczone są one w przeważającej mierze ścianami zbudowanymi z halitów koralikowych. Hality koralikowe budują

również mostki i kolumny w obrębie dużych porów. Przy niepełnym wykształceniu mostków sąsiadujące ze sobą pory tworzą systemy porów połączonych. Warstwa ta w dalszej części pracy określana będzie jako „halityty wielkoporowe”. Przejście pomiędzy warstwami halitytu komórkowego i halitytu wielkoporowego jest na ogół ostre, a tylko nieliczne wielkie pory częściowo zagłębiają się w warstwę halitytu komórkowego (Fig. 5A i B).

Wypełnienie szczelin powstałych na skutek wysychania pomimo ogólnego podobieństwa struktury i obecności zarówno dużych porów, jak i halitów koralikowych wyraźnie odróżnia się budową od pokrywy solnej. Zasadniczą różnicą jest brak masywnych kryształów halitu, masywnych ścian kryształów oraz wyraźne wydłużenie kolumn halitów koralikowych prostopadle do ściany szczeliny (Fig. 5B). Wszystkie duże pory obudowane są halitami koralikowymi. Pory są nieregularne we wszystkich przekrojach i nie wykazują tak silnego uporządkowania względem ściany szczeliny, jak kolumny halitów koralikowych. Podkreślić należy, iż również w obrębie halitów koralikowych nie zauważa się masywnych drobnych kryształów halitu. Struktura wewnętrzna wypełnienia szczeliny i elementu nabadującego się ponad nią są identyczne. Jedyna zauważalna różnica to obecność wygiętego ku górze fragmentu pokrywy solnej w obrębie nadpowierzchniowej części wypełnienia szczeliny (Fig. 5B). Ze względu na brak masywnych kryształów w wypełnieniach szczelin z wysychania halityty te będą w pracy określane jako „pęcherzykowate”.

## DYSKUSJA

Obraz budowy wewnętrznej pokrywy solnej solniska Salar de Uyuni uzyskany w wyniku zastosowania mikrotomografii rentgenowskiej dostarcza nie tylko informacji o strukturze pokrywy, ale również kilku przesłanek na temat jej ewolucji i przyrostu osadów. Najistotniejszą obserwacją jest bardzo wysoka porowatość osadu pozostałego po odparowaniu solanki. Poza bardzo cienką i masywną powłoką powierzchniową wszystkie głębsze warstwy obfitują w pory. Warstwa halitytu komórkowego stanowi swoisty izolator pomiędzy głębszą strefą halitytów wielkoporowych nasyconych solanką a powierzchniową strefą insolacji. Prawdopodobnie to relatywna masywność powłoki powierzchniowej i wysychającej warstwy halitytów komórkowych odpowiedzialne są za powstawanie poligonów i szczelin powstałych w wyniku wysychania na skutek stopniowego obniżania poziomu solanki i podobnie postępującego odwadniania warstwy od góry. Widoczne na figurze 5B podgięcie warstwy halitytu komórkowego ku górze jest analogiczne do geometrii zwiteków mułowych tworzących się w wysychających mułach. Może to wskazywać na podobny mechanizm powstawania poligonów na solnisku, jednakże proces ten nie został dotąd dobrze rozpoznany i nie był również rozważany przez autorów niniejszego artykułu. Wygięta ku górze warstwa w analizowanej próbie jest wyraźnie ograniczona od strony szczeliny z wysychania halitytem pęcherzykowatym (Fig. 5B). W inicjalnych poligonach powstałych na skutek wysychania halit pęcherzykowaty obserwowany był bezpośrednio nad pęknięciem powłoki solnej i nie obserwowano przy tym podgięcia powłoki ku górze. Implikuje to złożoną genezę struktur poligonalnych. Ich ewolucję rozpoczyna spękanie powłoki solnej w efekcie wysychania, a w dalszym etapie rozwój szczelin i podgięcie wierzchnich warstwy do góry intensywnie wspomaga krystalizacja halitu pęcherzykowatego, który wypycha

warstwy ku powierzchni (wzrost objętości skały w szczelinach). Makroskopowe obserwacje wskazują na symetryczne wypełnienie szczelin z wysychania oraz występowanie przeciwnie skierowanych poddań powłoki halitytowej i warstwy halitytu komórkowego po obu stronach szczeliny z wysychania. Ponieważ struktury te wykształcają się jedynie w etapie wysychania zbiornika, poligony i szczeliny z wysychania nie stanowią klasycznych struktur typu tepee, dla których powstania niezbędny jest cykl dwuetapowy – odwodnienia i zawodnienia osadu (porównaj Warren 1999).

Nadbudowa szczelin z wysychania ponad powierzchnią terenu wskazuje, iż z chwilą powstania poligonów z wysychania dalsza ewaporacja solanki odbywa się głównie kanałowo poprzez szczeliny z wysychania. Poniżej warstwy halitytów komórkowych w obrębie strefy nasyconej solanką dochodzi natomiast do swobodnego wzrostu halitów o pokroju sześciennym i mostków halitowych pomiędzy nimi, tworzących łącznie strefę halitytów wielkoporowych. Pokroje kryształów i rozmiary porów i pustek świadczą o możliwości uwieżnienia warstwy solanki pod poziomem halitytu komórkowego, a tym samym o diagenetycznej genezie części przyrastającej warstwy skał solnych. W tym kontekście znamienne staje się znaczenie widocznej w skałach laminacji, podkreślonej osadem mułowym. Makroskopowo obserwowane przewarstwienia mułowe rozmieszczone są w odstępach ok. 1–10 cm. Biorąc pod uwagę wyznaczone na podstawie wiercenia (Fornari *et al.* 2001) średnie tempo przyrostu osadu 4.6 cm/100 lat, zapisana laminacja mułowa nie może odzwierciedlać rocznych przyrostów osadów powodowanych cyklicznym zalewaniem i ewaporacją solniska.

Według obrazu mikrotomograficznego muł gromadzi się w obrębie zagłębień w powierzchniowej powłoce halitowej, w kanalikach prowadzących w głąb warstwy halitytu komórkowego, lecz najwięcej tego materiału występuje w kieszeniach tworzonych przez poziomo ścięte od góry kryształy halitu o pokroju szkieletowym budujące najwyższą część warstwy halitytów komórkowych bezpośrednio pod powłoką halitytową (Fig. 5A). Oznacza to, iż zarówno kanaliki, jak i kryształy halitu o pokroju szkieletowym musiały istnieć przed zalewem wodami niosącymi muł. Przypuszczalnie wody zalewowe stanowiły nienasyconą solankę, która częściowo rozpuszczała powierzchnię powłoki halitowej i kryształy halitu, tworząc kanały infiltracji wód w głąb warstwy halitytu komórkowego. Infiltrująca solanka jednocześnie wprowadzała osad mułowy w kanaliki utworzone w miejscach rozpuszczonych fragmentów kryształów halitu. Za częściowym rozpuszczaniem osadu przemawia poziome ścięcie kryształów przypowierzchniowych – tak halitów szkieletowych, jak i masywnych. Niewątpliwie najłatwiej rozpuszczalnym elementem były pęcherzykowane wypełnienia i nadbudowa szczelin powstałych na skutek wysychania, zbudowane z cienkościennych halitów koralikowych.

Procesy cyklicznego rozpuszczania najwyższych partii pokrywy solnej, osadzania mułu, ewaporacji, krystalizacji soli i rozwoju poligonów powstałych w efekcie wysychania przypuszczalnie powtarzają się do momentu kolmatacji mułem dróg infiltracji nienasyconych solanek w głąb osadów. Jeśli wnioskowanie powyższe jest poprawne, laminacja mułowa reprezentuje wieloletnie (dziesiątki lat?) cykle sedymentacyjno-ewaporacyjne, a nie cykle zalewów rocznych. Następną trójdzielną sekwencją pokrywy solnej (powłoka halitowa-halitytu komórkowe-halitytu wielkoporowe) rozwija się przez kolejne lata ponad warstwą zbudowaną z masywnych halitów wzbogaconą w muł. Niżejleżące warstwy solne

ulegają stopniowej cementacji, przekształcając się z czasem w halityty masywne, jakie obserwujemy w kopalnych formacjach solnych powstałych w podobnych warunkach sedymentacyjno-ewaporacyjnych.

## WNIOSKI

Rentgenowska mikrotomografia komputerowa to niedestrukcyjna metoda, która pozwala, w relatywnie krótkim czasie uzyskać informacje dotyczące całej objętości badanego obiektu. Zastosowanie powyższej metody do badań struktury wewnętrznej najmłodszej pokrywy solniska Salar de Uyuni uwidoczniło wyraźną trójdzielność pokrywy solnej podkreśloną zmienną porowatością skał. Najwyższą część pokrywy stanowi powłoka solna, pod którą zalega warstwa halitytów komórkowych, izolująca od czynników powierzchniowych położoną głębiej warstwę halitytów wielkoporowych krystalizujących w obrębie poziomu solanki gruntowej. Stopniowe wysychanie osadu solnego od góry prowadzi do rozwoju poligonów i szczelin powstałych na skutek wysychania, wypełnionych i nadbudowanych halitytem pęcherzykowatym o dużej porowatości. Widoczne w obrazie tomograficznym wypełnienia mułowe wskazują na powtarzalność procesów rozpuszczania, ewaporacji i krystalizacji soli w najwyższej części pokrywy, postępujących przypuszczalnie aż do momentu cementacji najwyższych porów oraz kolmatacji pustek i kanałów infiltracyjnych osadem mułowym. Dopiero po tym etapie rozwija się kolejna trójdzielna sekwencja pokrywy. Widoczne w osadach solniska Salar de Uyuni warstwowanie nie odzwierciedla zatem rocznych cykli zalewowych, lecz cykle wieloletnie. Interpretacja powyższa uzasadnia niskie tempo przyrostu osadów mimo cyklicznej sedymentacji. W świetle powyższych spostrzeżeń osady solne powstające w warunkach powtarzających się zalewów basenu sedymentacyjnego i ewaporacji wód mają złożoną genezę. Występują w nich hality powstałe zarówno na skutek krystalizacji z solanki, krystalizujące w stagnującej solance pod warstwą halitytu komórkowego, jak i czysto diagenetyczne, rozwijające się po pogrzebaniu osadu warstwami młodszymi. Solanka zalewająca w porze deszczowej solnisko Uyuni jest nasycona chlorkiem sodu na skutek ługowania osadów poprzednich cykli ewaporacyjnych w zlewni rzeki Rio Desguadero i na solniskach basenu Altiplano.

*Niniejsza praca powstała dzięki wsparciu Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego. Wyrażam serdeczne podziękowania dla Zarządu PSGS za umożliwienie przeprowadzenia badań i pozyskania materiału analitycznego na salarze Uyuni w roku 2010 oraz dla koleżanek i kolegów uczestniczących w wyprawie za wspomaganie mnie w wysokogórskich badaniach terenowych. Wioli Raczek i Stanisławowi Madejowi dziękuję za pomoc w badaniach rentgenograficznych materiału mułowego. Stanisław Burliga.*

*Recenzentom – prof. Maciejowi Pawlikowskiemu oraz dr. Grzegorzowi Czapowskiemu – serdecznie dziękujemy za cenne komentarze i uwagi do artykułu.*

*Badania sfinansowano z funduszy na badania własne i statutowe Instytutu Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego w latach 2010–2011.*



## LITERATURA

- Baucome P.C. & Rigsby C.A., 1999. Climate and lake-level history of the northern Altiplano, Bolivia, as recorded in Holocene sediments of the Rio Desaguadero. *Journal of Sedimentary Research*, 69 (3), 597–611.
- Fornari M., Risacher M. & Feraud G., 2001. Dating of paleolakes in central Altiplano of Bolivia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 172, 269–282.
- Guyot J.L., Roche M.A., Noriega L., Calle H. & Quitanilla J., 1990. Salinities and sediment transport in the Bolivian Highlands. *Journal of Hydrology*, 113, 147–162.
- Ketcham R.A. & Carlson W.D., 2001. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Computers & Geosciences*, 27, 381–400.
- Rettig S.L., Jones B.F. & Risacher F. 1980. Geochemical evolution of brines in the Salar de Uyuni. *Chemical Geology*, 30, 57–79.
- Risacher F. & Fritz B., 2000. Bromine geochemistry of Salar de Uyuni and deeper salt crusts, Central Altiplano, Bolivia. *Chemical Geology*, 167, 373–392.
- Stock S.R., 2009. *MicroComputed Tomography: Methodology and Applications*. Crc Press, 49–53.
- Svendsen J.B., 2003. Parabolic halite dunes on the Salar de Uyuni, Bolivia. *Sedimentary Geology*, 155, 147–156.
- Van Geet M., Swennen R. & Wevers M., 2000. Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerized tomography. *Sedimentary Geology*, 132, 25–36.
- Wirmann D., 1995. Late Quaternary spatio-temporal limnological variations in the Altiplano of Bolivia and Peru. *Quaternary Research*, 43, 344–354.
- Warren J.K., 1999. *Evaporites. Their Evolution and Economics*. Blackwell Science, Oxford.

## Summary

This paper presents the results of studies conducted on the internal structure of modern salt deposits, accumulated in Salar de Uyuni within the Altiplano Basin in SW Bolivia (Fig. 1). The investigation focuses on both the structure of salt crust and the infill of fissures separating desiccation polygons (Fig. 2). The main method used to image the salt crust and fissure interior was a non-destructive technique known as X-ray microtomography (Fig. 3). Macroscopic observations of salt crust revealed its cyclic layering (Fig. 2B) which is ascribed to repetitive rock salt-mud sedimentation. The surficial halite shell is massive with rare pores and channels (Fig. 4B). It covers a porous layer of halite (Fig. 4C) which overlies a layer containing cubic halite crystals (Fig. 4D). Figure 5 illustrates three perpendicular samples' cross-sections, it is based on microtomographic images and generated by ImageJ software. The images confirm the macroscopic observation. Three layers can be distinguished in the salt crust (Fig. 5A, D): a thin halite shell on the surface, porous halite layer below (termed as cellular halite layer) and a layer of halite containing large pores (large-pore layer). The desiccation fissure is filled with extremely porous halite which also occurs above the fissure on the surface.

The analysis of mud distribution and washing-out, visible in the sample (Fig. 5A), indicate the cyclic dissolution and crystallisation of halite at the salt pan surface, assisted by sedimentation of mud. It can be concluded that the layering observed in the salt crust does not prove annual flooding-evaporation cycles, but rather long-term cycles of sedimentation and evaporation. A new layer of rock salt begins to develop after significant cementation of the uppermost crust, by halite cement and mud, disables infiltration of unsaturated flood brine into sediments. The proposed interpretation provides an explanation for low rate rock salt accumulation in Salar de Uyuni, despite annual flooding and evaporation.