

Procesy geomorfologiczne na wybranych wysadach soli w pasie fałdowo-nasuwczym gór Zagros w Iranie

Krzysztof Bukowski¹



Geomorphological processes in selected salt domes in the Zagros fold-thrust belt in Iran. *Prz. Geol.*, 68: 167–177.

Abstract. Presently, about 160 salt domes of various sizes exist in the Zagros fold-thrust belt in southern Iran. The salt domes constitute a unique proving ground for research on salt tectonics. In the dry climate that currently dominates in Iran, forms of horizontal salt formations are created, referred to as salt glaciers, in addition to typical steeply falling salt domes. Consequently, it is possible to conduct observations of geomorphological processes developing on the surface of exposed salt rocks and keep a continuous record of their tectonic activity. Salts occurring in that area represent the Hormuz (Hormoz) Formation of the Ediacaran period (Late Neoproterozoic to Early Cambrian). The rocks of the formation usually present a colourful blend of rock salt, anhydrite, black dolomite, shale, and red volcanic tuff, as well as extrusive magmatic and metamorphosed rocks that are interpreted as fragments of deep basement elevated to the land surface by salt domes. The paper describes the geology and geomorphology of the Jashak (Dashti) salt glacier from the Busher Province and two salt domes located on the Persian Gulf Islands: Hormuz (Hormoz Island) and Namakdan (Qeshm Island). The present-day salt dome geomorphology is a result of both climatic effects (precipitation and air temperature) and diapir uplifting forces.

Keywords: salt glacier, salt tectonics, salt karst, Zagros, Iran

Wysady solne w górach Zagros w Iranie (ryc. 1), które odsłaniają się na powierzchni ziemi, niewątpliwie można zaliczyć do geologicznych cudów świata. Występują one w południowo-wschodniej części pasa fałdowo-nasuwczego gór Zagros (*Zagros fold and thrust belt* – Zagros FTB), uformowanego w wyniku zderzenia płyty arabskiej z płytą euroazjatycką (Jackson, Hudec, 2017; Jahani i in., 2017). Zagros FTB jest jedną z największych prowincji naftowych, zawierającą ok. 7% wszystkich zasobów węglowodorów na świecie, w tym drugie co do wielkości złoża gazu ziemnego. Sole występujące w tym rejonie są zaliczane głównie do formacji Ormuz (Hormuz, Hormoz), której nazwa pochodzi od irańskiej wyspy Ormuz, usytuowanej w cieśninie o tej samej nazwie, oddzielającej Zatokę Perską od Oceanu Indyjskiego. Na wyspie tej stwierdzono występowanie wysadu solnego. Odsłaniające się na powierzchni struktury solne formacji Ormuz stanowią najczęściej kolorowy melanz soli kamiennych, anhydrytu, czarnych dolomitów, łupków, mułowców, piaskowców, a także skał metamorficznych i wulkanicznych,

które są interpretowane jako fragmenty głębokiego podłoża wyniesione na powierzchnię przez diapiry.

W odróżnieniu od Zagros FTB, na Wyżynie Irańskiej występują jedne z największych na świecie słonych równi mułowych. Region ten, znany jako Dasht-e Kavir (w perskim języku farski oznacza płaską, obniżoną równinę), wraz



Ryc. 1. Mapa Iranu z lokalizacją opisywanych wysadów soli – Jashak, Ormuz i Namakdan

Fig. 1. Map of Iran, with the Jashak, Hormuz and Namakdan salt domes described in the text

¹ Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; buk@agh.edu.pl

z solarami w Ameryce Południowej jest zaliczany do kontynentalnych obszarów, na których sól powstaje w wyniku ewaporacji zasolonych wód gruntowych (Warren, 2016). Na tym ogromnym, nieogószczonym obszarze, odpowiadającym ok. $\frac{1}{3}$ powierzchni Polski, występuje kilkadziesiąt słonych jezior otoczonych płaską, mułową, słoną pustynią.

W artykule przedstawiono podstawową wiedzę na temat występowania ewaporatów w Iranie, poszerzoną o wyniki terenowych badań trzech wysadów solnych: Jashak, Ormuz i Namakdan (ryc. 1), przeprowadzonych podczas wyprawy Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego do Iranu. Wyprawa ta odbyła się w dniach 27 października – 7 listopada 2018 r. i wzięło w niej udział 15 osób. Trasa wyprawy obejmowała przelot do Teheranu, a następnie podróż na południe Iranu przez góry Zagros, aż nad Zatokę Perską w rejon cieśniny Ormuz (ok. 2000 km).

Celem artykułu jest przedstawienie stosunkowo mało znanego i do tej pory szerzej nie opisywanego w polskiej literaturze geologicznej fenomenu, jakim jest rejon południowego Iranu, gdzie współcześnie na powierzchni terenu można obserwować diapiry solne o skomplikowanej budowie wewnętrznej oraz płynące grawitacyjnie lodowce solne (namakiery). Przedstawione w artykule wyniki obserwacji mogą być, zdaniem autora, pomocne w szczegółowej interpretacji ewolucji struktur solnych na Niżu Polskim.

LITOSTRATYGRAFIA SERII SOLONOŚNYCH W IRANIE

Do początków XX w. budowa geologiczna Iranu nie była znana. Ograniczone i wyrywkowe informacje o geologii tego kraju, przekazywane głównie przez podróżników, były jedynymi raportami, które docierały wtedy do Europy. Jednym z pierwszych geologów, który opisał wysady solne w Iranie, był prowadzący badania terenowe dla Angielsko-Perskiej Kompanii Naftowej J.V. Harrison (1930, 1931). Po II wojnie światowej przez wiele lat badaniami wysadów solnych w Iranie zajmował się P.E. Kent (1958, 1979, 1987), który szczegółowo opisał kilka diapirów solnych w górach Zagros i sporządził kompletną listę wysadów przebijających się na powierzchnię. Znaczący postęp w rozpoznaniu struktur solnych w Iranie nastąpił w latach 90. XX w. i na początku XXI w. w wyniku zintensyfikowanych poszukiwań węglowodorów (Jahani i in., 2007, 2009, 2017). Do interpretacji ewolucji wybranych wysadów solnych strefy Zagros zastosowano wówczas nowoczesne metody badawcze, wykorzystujące wyniki badań geofizycznych i modelownia tektoniki struktur solnych (m.in. Talbot, Alavi, 1996; Talbot, 1998; Talbot i in., 2000; Callot i in., 2007, 2012; Jackson, Hudec, 2017; Hassanpour i in., 2018).

W Iranie rozpoznano dwie główne formacje solonośne (Jahani i in., 2007, 2017), są to: neoproterozoiczno-kambryjska formacja Ormuz w rejonie gór Zagros i Zatoki Perskiej oraz oligoceńsko-miocenka formacja solonośna, której odpowiednikiem w górach Zagros jest formacja Gachsaran, a na Wyżynie Irańskiej formacje Lower Red i Upper Red. Rozpoznano także dwie ewaporatowe formacje nie zawierające soli – składające się głównie z anhydrytów przeławiconych dolomitami i łupkami. Są to: triasowa formacja Dashtak oraz górnourajaska formacja Hith (ryc. 2).

Formacja Ormuz (Hormoz) jest znana z odsłonięć w rejonach, gdzie doszło do przebiccia się wysadów solnych na powierzchnię. Dotychczas rozpoznano ok. 160 diapirów

solnych występujących w rejonie gór Zagros oraz na ich przedpolu (Jahani i in., 2017). Wiele podobnych struktur zostało także rozpoznanych metodami geofizycznymi pod dnem Zatoki Perskiej podczas poszukiwań złóż węglowodorów (ryc. 3). W południowym Iranie macierzyste sole formacji Ormuz występują pod nakładem młodszych skał osadowych na głębokości od 7 do 10 km, z tego też względu ich pierwotna miąższość nie jest znana. Różni autorzy wymieniają odmienne hipotetyczne wartości miąższości formacji Ormuz – od 1000 m (Kent, 1979) do nawet 2000–4000 m (Verrall, 1978). Formację Ormuz tworzą głównie ewaporaty (sole, gipsy i anhydryty, oraz ciemne wapienie i dolomity), a także łupki i mułowce. W wielu wysadach stwierdzono występowanie wylewnych skał magmowych: ryolitów, ryodacytów, trachitów, diabazów, a także tufów riolitowych i ignimbrytów. Niektóre ze skał magmowych ulegały intensywnym przeobrażeniom i metamorfizmowi, aż do facji amfibolitowych, a także w niektórych rejonach zostały wzbogacone w minerały żelaza lub miedzi (Yazdi i in., 2014).

Formacja Ormuz powstała w prekambryjskim basenie ewaporatowym na przełomie neoproterozoiku i dolnego kambru (Knauth, 1998). Potwierdzają to datowania radiometryczne cyrkonów pochodzących z odsłonięć ryolitów na wyspie Ormuz, wskazujące na wiek 558 ± 7 Ma (Faramarzi i in., 2015), czy też skał magmowych występujących na wysadzie solnym Jahani (547 ± 6 Ma; Alavi, 2004). Datowania te odpowiadają schyłkowi neoproterozoiku (ediakar). Ewaporaty tego samego lub podobnego wieku rozpoznano na dużym obszarze, oprócz południowego Iranu obejmującym współczesny Oman i Katar, a także północne pogranicze Pakistanu i Indii.

W Omanie i Katarze neoproterozoiczno-kambryjskie sole są zaliczane do formacji Ara, w Pakistanie do formacji Salt Range, a w północno-zachodnich Indiach do formacji Hanseran (Husseini, Husseini, 1990). Rekonstrukcje paleogeograficzne wykazały, że ewaporaty tworzyły się w pobliżu ówczesnego równika, na brzegu kontynentu Rodinia i oceanu Panthalassa (Craig i in., 2009; Jackson, Hudec, 2017). Powstawanie soli prekambryjskich prawdopodobnie było związane ze strefą ryftową (Warren, 2016; Jackson, Hudec, 2017), na co wskazuje m.in. współwystępowanie z solami hematytowych tufów wulkanicznych, bogatych w tlenki żelaza, które są np. lokalnym źródłem pigmentu na wyspie Ormuz. Sole formacji Ormuz w wyniku procesów halokinezy i halotektoniki migrowały z dużych głębokości, przebijając się przez skały nakładu w postaci diapirów, a w okresach emersji basenu spływały po powierzchni terenu w postaci solnych lodowców.

Młodsza ewaporatowa formacja Gachsaran tworzyła się od oligocenu do środkowego miocenu na szerokim szelfie o wymiarach ok. 150×2000 km, rozciągającym się od Iranu po Syrię (Sherkati i in., 2005). W rejonie Zagros stanowi ona ważny horyzont dla pułapek ropy naftowej i gazu ziemnego. Osady ewaporatowe formacji Gachsaran podzielono na 7 kompleksów, zawierających m.in. sole kamienne, anhydryty, wapienie, margle oraz łupki bitumiczne (Soleimani, Bahadori, 2015).

Na Wyżynie Irańskiej odpowiednikiem formacji Gachsaran są dwie oligoceńsko-miocenkie formacje ewaporatowe. Dolna – Lower Red Fm. – wieku oligocen–dolny miocen (Morley i in., 2009), zawiera m.in. czystą, białą sól występującą w stropie plastycznych margli i łupków oligoceńskich. Górna – Upper Red Fm. – stanowi rytmiczną sekwencję wielobarwnej soli, towarzyszącą marglom

miocenijskim. Te dwie sekwencje soli są na ogół oddzielone wapieniami formacji Qom (np. Karevan i in., 2014). Formacje Upper Red tworzą głównie osady kontynentalne. Wiek jej depozycji określono na podstawie badań magnetostratygraficznych na przedział pomiędzy 17,5 a 7,5 Ma (Ballato i in., 2008). Wysady solne młodszej formacji ewaporatowej są znane z obszaru otaczającego współczesne solne równie mułowe zlokalizowane na południowy wschód od Teheranu. Niewątpliwie neogeńskie diapiry odgrywają dużą rolę w kształtowaniu krajobrazu, a ulegając częściowemu ługowaniu, stanowią główne źródło zasilania słonych jezior na solnej równi mułowej (Dasht-e Kavir). Kształty

i charakterystyka tych diapirów wskazują, że przeszły one historię przebijania się ku powierzchni podobną do historii starszej soli formacji Ormuz w strefie Zagros (Talbot, Aftabi, 2004).

PAS FAŁDOWO-NASUWCZY GÓR ZAGROS

Pas fałdowo nasuwczy gór Zagros stanowi środkową część alpejsko-himalajskiego łańcucha orogenicznego i rozciąga się w kierunku NW-SE na długości ok. 1800 km – od gór Taurus w NE Turcji po cieśninę Ormuz (ryc. 3). Od północy i północnego wschodu pas ten jest ograniczony

System System	Oddział Series	Grupa Group	Formacja Formation	Sedymentacja/tektonika Sedimentation/tectonics	Litologia Lithology	Skały ewaporatowe Evaporite rocks
czwartorzęd / Quaternary			Bakhtiari, holocen			
neogen Neogene	miocen Miocene	Fars	Agha jari	basen przedgórski pro-foreland basin	kolizja z płytą arabską continental collision	sól kamienna, gipsy, anhydryty, wapienie rock salt, gypsum, anhydrite, limestone
			Mishan			
			Gachsaran			
paleogen Paleogene	oligocen Oligocene eocen Eocene paleocen Paleocene	Bangestan	Asmari	obdukcja ofiolitu ophiolite emplacement		gipsy, anhydryty gypsum, anhydrite
			Kalhur			
			Pabdeh			
kreda Cretaceous	górną Upper	Khami	Tarbur	szelf kontynentalny continental shelf		anhydryty, dolomity anhydrite, dolomite
			Gurpi			
	Ilam-Laffan					
	Sarvak					
	Kahzdumi					
dolną Lower	Dariyan					
jura Jurassic	górną Upper	Khami	Fahliyan			anhydryty, dolomity anhydrite, dolomite
			Hith			
trias Triassic		Kazeron	Najmah	ryft kontynentalny continental rift		anhydryty, dolomity anhydrite, dolomite
			Alan/Mus/Adayah			
perm Permian		Dehram	Dashtak			
			Kangan			
karbon / Carboniferous			Dalan			
			Faraghan			
dewon / Devonian				basen epikontynentalny epicontinental platform		
sylur Silurian		Zard Kuh				
ordowik Ordovician			Ilebeyk			
			Mila			
kambr Cambrian			Zaigun-Lalun			
			Barut			
proterozoik Proterozoic	ediakar Ediacaran		Ormuz	strefa ryftowa rift zone		sól kamienna, sole potasowe, anhydryty, dolomity, intruzje skał wylewnych rock salt, potassium salt, anhydrite, dolomite, intrusions of volcanic rocks
			skały podłoża formacji Ormuz Pre-Hormuz Fm. rocks			

Ryc. 2. Główne formacje geologiczne i fazy tektoniczno-sedymentacyjne ewolucji południowej części Iranu z zaznaczeniem formacji ewaporatowych (według Jahani i in., 2017; Ghandian i in., 2017)

Fig. 2. Main geological formations with the phases of tectonic and sedimentary evolution in southern Iran, and the indication of evaporite formations (based on Jahani et al., 2017; and Ghandian et al., 2017)

głównym uskokiem Zagros i jego kontynuacją – głównym wstecznym uskokiem Zagros (*Main Zagros Fault*, *Main Zagros Reverse Fault*), interpretowanymi jako strefa szwu oceanu Neo-Tetydy (Sherkati i in., 2006). Od południowego zachodu pas fałdowo-nasuwczy Zagros ograniczają wody Zatoki Perskiej. Współcześnie jest on tektonicznie aktywny, a w jego obrębie wydzieliła się trzy główne strefy tektoniczne o różnym stopniu sfałdowania osadów (Jahani i in., 2017).

Podczas geologicznej historii strefa Zagros ulegała wielostopniowym przemianom geodynamicznym, wśród których wyróżnia się fazę ryftową (neoproterozoik), platformową (paleozoik), ponownie ryftową (perm–trias), pasywną strefę marginalną oceanu Neo-Tetydy (jura–dolna kreda), fazę ofiolitową (późna kreda) i wreszcie kolizję płyt arabskiej i euroazjatyckiej (neogen), powodującą fałdowanie i skrócenie orogenu. Na skutek kolizji płyt nastąpiło całkowite zamknięcie Neo-Tetydy, datowane na środkowy oligocen (~26 Ma; Koshnaw i in., 2019). Prawdopodobnie w wyniku zderzenia nastąpiło zerwanie się płyty tektonicznej (*slab break-off*), które z kolei wywołało reakcję izostaticzną, skutkującą gwałtownym wypiętrzaniem całej strefy Zagros (Molinaro i in., 2005). Twórcy współczesnych poglądów na kinematyczny scenariusz utworzenia pasa fałdowo-nasuwego gór Zagros sugerują dwustopniową ewolucję, z główną fazą naskórkową (*thin-skinned*) podczas miocenu oraz z fazą z zaangażowanym tektonicznie podłożem podczas pliocenu. Całkowite skrócenie przestrzeni basenowej jest oceniane na ok. 50 km. Konwergencja jest jeszcze ciągle aktywna, zachodzi ona w kierunku zbliżonym do południkowego (Sella i in., 2002; Vernant i in., 2004), a jej tempo wynosi od ~9 mm (+/- 3 mm) w południowo-wschodnim Zagros do ~5 mm (+/- 3 mm) w północno-zachodnim Zagros (Hessami i in., 2006).

Architektura i kinematyka deformacji ciągle jest przedmiotem dyskusji, szczególnie w kontekście roli, jaką odegrały sole formacji Ormuz zarówno w swym pierwotnym ułożeniu, jak i podczas powstawania wysadów solnych.

MECHANIZM POWSTAWANIA „LODOWCÓW” SOLNYCH W STREFIE ZAGROS

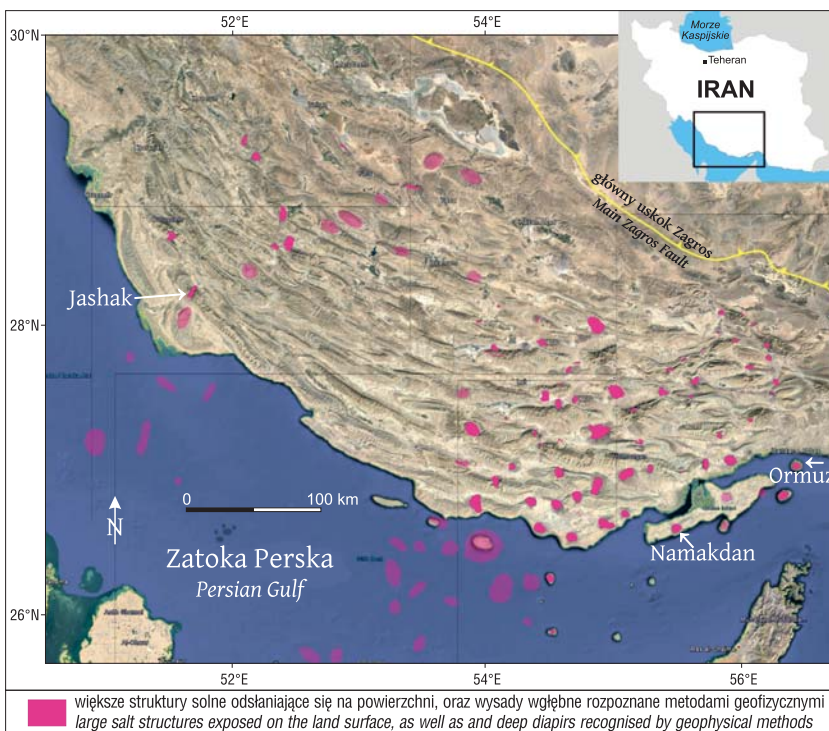
W rejonie Zagros występuje ogromnie dużo diapirów solnych, jednak jak dotąd nie określono precyzyjnie ani czasu inicjacji procesów halokinezy, ani też nie opracowano, wspólnego dla całej strefy, modelu tworzenia się struktur solnych, chociaż pojedyncze wysady szczegółowo zbadano (zob. Jackson, Hudec, 2017). We wschodniej części strefy Zagros wskazywano na wyraźny związek wysadów solnych z regionalnym systemem nieciągłości (Alavi, 2004; Jahani i in., 2007), które przecinają system wydłużonych antyklin o przebiegu NW-SE (ryc. 3).

Uważa się, że na obszarze Iranu wysady soli zaczęły się wypiętrzać we wczesnym paleozoiku, wkrótce po osadzeniu się soli formacji Ormuz (Callot i in., 2012). W wyniku złożonych procesów tektonicznych, w tym przede wszystkim halokinezy (zob. np. Dadlez, Jaroszewski, 1994; Jackson, Hudec, 2017), skały serii solnej utworzyły liczne diapiry i poduszki solne. Struktury te uległy deformacji podczas zderzenia płyty arabskiej i euroazjatyckiej w kenozoiku i wiele z tych diapirów zaczęło się wówczas wydobywać na powierzchnię lądu. Proces ten, z różnym natężeniem, jest kontynuowany od pliocenu do czasów współczesnych (Warren, 2016).

W rejonie Zagros wypływy soli na powierzchnię ziemi często przyjmują formę solnych „lodowców”, nazywanych namakierami (Talbot, Jarvis, 1984) – od słowa *namak* określającego sól w języku farski.

Jackson i Hudec (2017) wyróżnili cztery stadia ewolucji namakierów (ryc. 4). W pierwszym etapie sól wydobywa się na powierzchnię, tworząc paraboliczną kopułę wysadu o wysokości przekraczającej nawet 900 m. Kopuła ta utrzymuje się dzięki ciśnieniu przeciwdziałającemu soli wydobywającej się z wnętrza diapiru. Jackson i Hudec (2017) wskazują, że sól może wznosić się z pnia diapiru w tempie nawet >1 m/rok, przy czym prędkość ta zależy od naporu soli występującej pod wysokim ciśnieniem oraz tektonicznego oddziaływania skał otaczających. Tempo wydobywania się soli maleje w miarę wyczerpywania się źródła soli lub zaciśnięcia się diapiru.

Wysoki stożek kopuły solnej jest niestabilny i sól takiej kopuły zaczyna pod własnym ciężarem rozprzestrzeniać się horyzontalnie, tworząc na powierzchni terenu „lodowiec” solny (etap II). Sól,



Ryc. 3. Zdjęcie satelitarne (Google Earth) pasa fałdowo-nasuwego gór Zagros z zaznaczonymi wysadami solnymi i głównym uskokiem (zestawiono na podstawie Jahani i in., 2007, 2017)

Fig. 3. Satellite image (Google Earth) of the Zagros fold-thrust belt, with marked salt structures and the Main Zagros Fault (compiled based on Jahani et al., 2007, 2017)

tak jak każda substancja płynna, szybciej spływa w dół nachylonej powierzchni niż po płaskim terenie. Na tym etapie namakier nie jest jeszcze mocno skonsolidowany, a ciągle wydobywanie się soli z diapiru przewyższa tempo jej rozprzestrzeniania się na powierzchni, co jest czasami określane jako solna fontanna.

W miarę upływu czasu stopniowo zmniejsza się ilość soli wydobywającej się z wnętrza ziemi (etap III), aż w końcu szczytowa kopuła wysadu zaczyna się zapadać. Wysad, który odsłania się na powierzchni, jest poddawany procesom rozpuszczania przez wody deszczowe i solanki niedosycone NaCl. Tempo rozpuszczania powierzchni wysadu zależy przede wszystkim od czynnika klimatycznego i może być różne, od kilku cm/rok do kilkunastu cm/rok (Jackson, Hudec, 2017). W wyniku stałego rozpuszczania soli na powierzchni wysadu wzrasta wyraźnie udział skał nierozpuszczalnych, tworzących pokrywy brekcji.

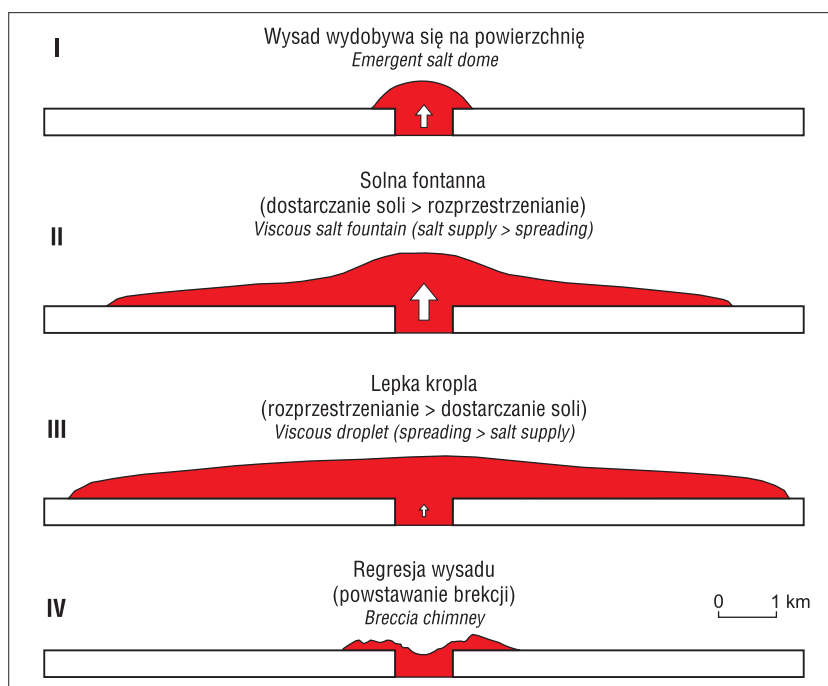
Ostatecznie pozostałością po dawnym wyciskaniu soli (etap IV) są wzgórza składające się głównie ze skał nierozpuszczalnych, które wraz z wysadem zostały wydzwignięte na powierzchnię (np. skał magmowych i tufów wulkanicznych).

Tempo przemieszczania się namakierów w górach Zagros zależy od tempa dostarczania soli z wnętrza ziemi, nachylenia powierzchni, po której płynie lodowiec, a także od wytrzymałości kruchej skorupy suchej soli (o grubości kilku m), która opancerza namakier. W okresach suchych przemieszczanie się lodowca jest ograniczone siłą elastyczności tej suchej warstwy soli. Po intensywnych opadach deszczu kopuła zaczyna się zapadać i solny lodowiec gwałtownie zaczyna spływać w dół. Tak więc płynięcie solnego lodowca po powierzchni nie ma stałego tempa, a jego przepływ jest bardzo epizodyczny i ściśle związany z intensywnymi opadami deszczu. Takie opady, występujące w ciągu kilku tygodni pory deszczowej, spowodowały na przykład, że południowy lodowiec solny wysadu Jashak po dłuższym okresie zastoju przemieścił się o 0,5 do 4 m (w zależności od położenia punktów pomiarowych, Talbot i in., 2000). Te różnice prędkości płynięcia wynikały z kąta nachylenia skłonu, czyli sól w górnej części lodowca płynęła szybciej niż w dolnej (dystalnej) jego części. W osiowych częściach dolin obserwowano także większą prędkość przemieszczania się soli niż w pobliżu ścian dolin.

WSPÓŁCZESNA GEOMORFOLOGIA WYBRANYCH WYSADÓW SOLNYCH W STREFIE ZAGROS

Rzeźba diapirów solnych jest przede wszystkim wynikiem oddziaływania klimatu (opady, temperatura i wilgotność powietrza). W suchym klimacie, jaki obecnie panuje w Iranie, wiele wysadów solnych stale zachowuje wyraźny relief wypukły, który tworzą odsłonięte na powierzchni skały solne.

W artykule opisano wybrane procesy rzeźbotwórcze i krasowe, zachodzące na obszarze trzech różnych wysadów solnych w strefie Zagros. Wysady te zostały dość



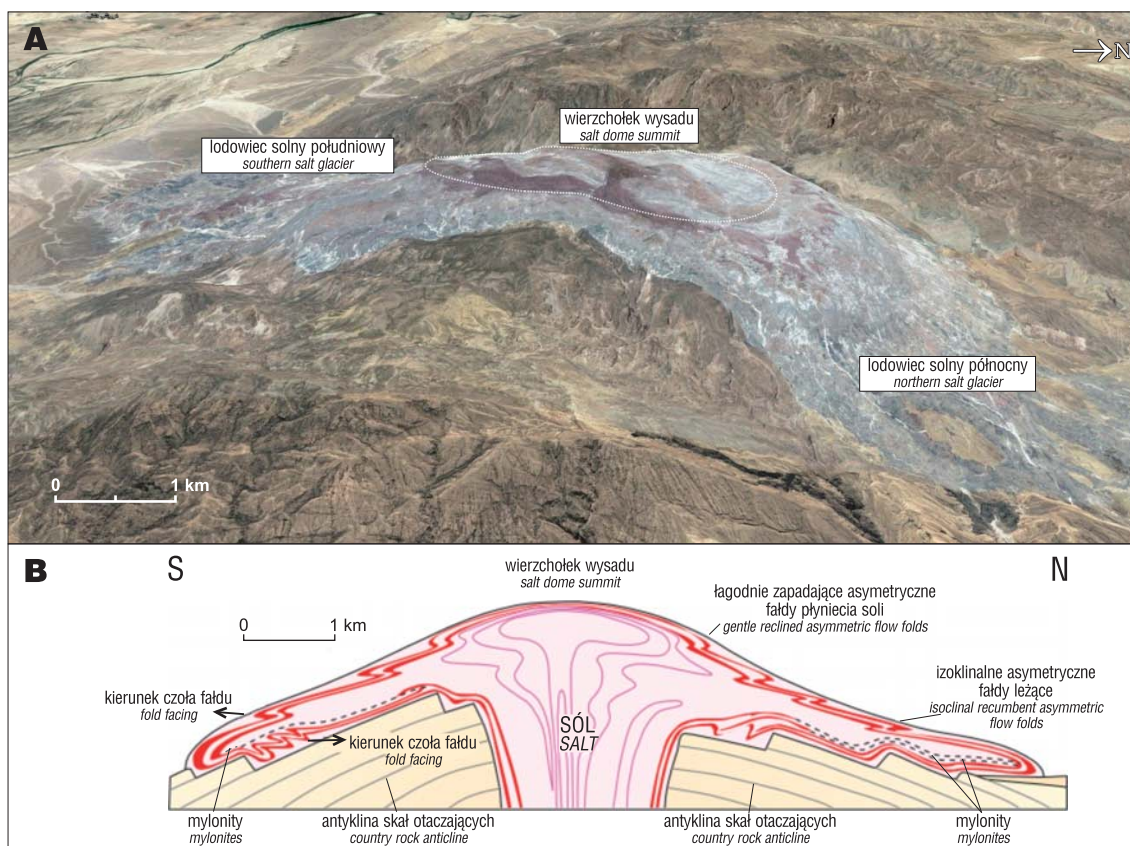
Ryc. 4. Ewolucja wysadów solnych w Iranie w czterech stadiach (I-IV, wg Jackson, Hudec, 2017). Poszczególne etapy mogą się różnić w zależności od tempa wydobywania się soli i rozprzestrzeniania na powierzchni oraz rozpuszczania przez wody opadowe

Fig. 4. Evolution of salt domes in Iran, in four stages (I-IV, after Jackson, Hudec, 2017). Particular stages can differ in respect of the rate of ejection of salt, its spread on the surface, and dissolution by rainwater

dobrze rozpoznane i można je zaliczyć do klasycznych przykładów tektoniki solnej na świecie, mimo że różnią się budową geologiczną i występują w różnych częściach strefy Zagros. Jako klasyczny przykład współczesnego namakiera może posłużyć jeden z najbardziej okazałych i stosunkowo nieźle rozpoznanych wysadów solnych w Iranie – Jashak (Talbot, 1981). Wysad Ormuz to diapir, który jest znany ze współwystępowania z solami skał pochodzenia wulkanicznego (np. Talbot i in., 2009). Na wysadzie Namakdan rozpoznano wiele przykładów rozwijającego się krasu solnego, w tym najdłuższą na świecie jaskinię solną 3N (Bruthans, 2006).

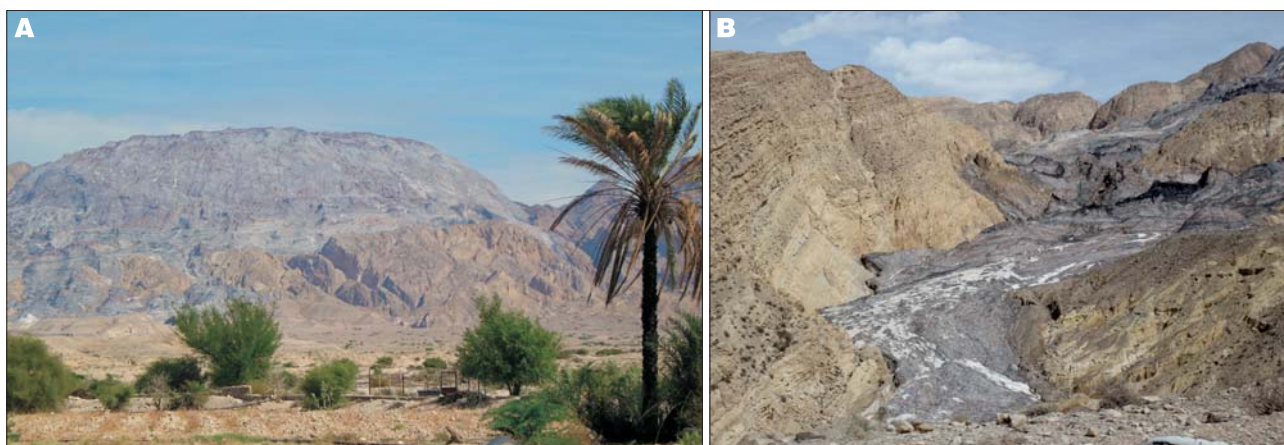
Wysad Jashak

Wysad Jashak (ryc. 5–6), nazywany też Dashti lub Kuh-e-Namak, znajduje się w południowej części Iranu w prowincji Bushehr (28°26'N, 51°71'E). W planie ma kształt elipsy o wymiarach 5600 × 2000 m, z dłuższą osią o kierunku NE-SE. Sól wydobywa się z wnętrza diapiru przebiegającego antyklinę o przebiegu NW-SE (zgodnie z ogólnym trendem strefy fałdowej gór Zagros, ryc. 3). Po obydwu stronach tej antykliny rozwinęły się dwa solne lodowce (ryc. 5–6). Wyniki badań prowadzonych przez Talbota (Talbot, 1981, Talbot, Rogers, 1980) wskazują, że północny lodowiec jest nieco większy niż południowy i mierzy ok. 3 km długości, 2,6 km szerokości, przy miąższości dochodzącej do 100 m. Sól w solnych lodowcach często cechuje się foliacją (przypominającą teksturę gnejsów), zdefiniowaną w większym lub mniejszym stopniu przez kształty i orientacje jednego (lub więcej) z jej trzech składników: porfirokryształów halitu, drobnokrystalicznej masy solnej i składników nierozpuszczalnych, najczęściej anhydrytu, hematytu i dolomitu (ryc. 7 na str. 212). Masa soli odsłaniająca się zarówno w głównym diapirze, jak i w



Ryc. 5. Wysad Jashak. **A** – Lodowce solne wydobywające się z diapiru Jashak spływają po obu stronach antykliny z mezozoicznych wapieni (zdjęcie satelitarne Google Earth). **B** – Schematyczny przekrój przez wysad Jashak (wg Talbot i in., 2009, zob. Jackson, Hudec, 2017) – widoczne zmienne kąty zapadania warstw soli w zależności od położenia w stosunku do centrum wysadu oraz zaburzenia warstw powstałe w wyniku horizontalnego płynięcia soli

Fig. 5. The Jashak salt dome. **A** – Salt glaciers emanating from the Jashak diapir flow down on both flanks of an anticline composed of Mesozoic limestone (Google Earth images). **B** – Schematic cross-section of the Jashak salt dome (Talbot et al., 2009, vide Jackson, Hudec, 2017), showing varying dip angles depending on the position relative to the salt dome centre, and salt layer disturbances created as a result of horizontal salt flow

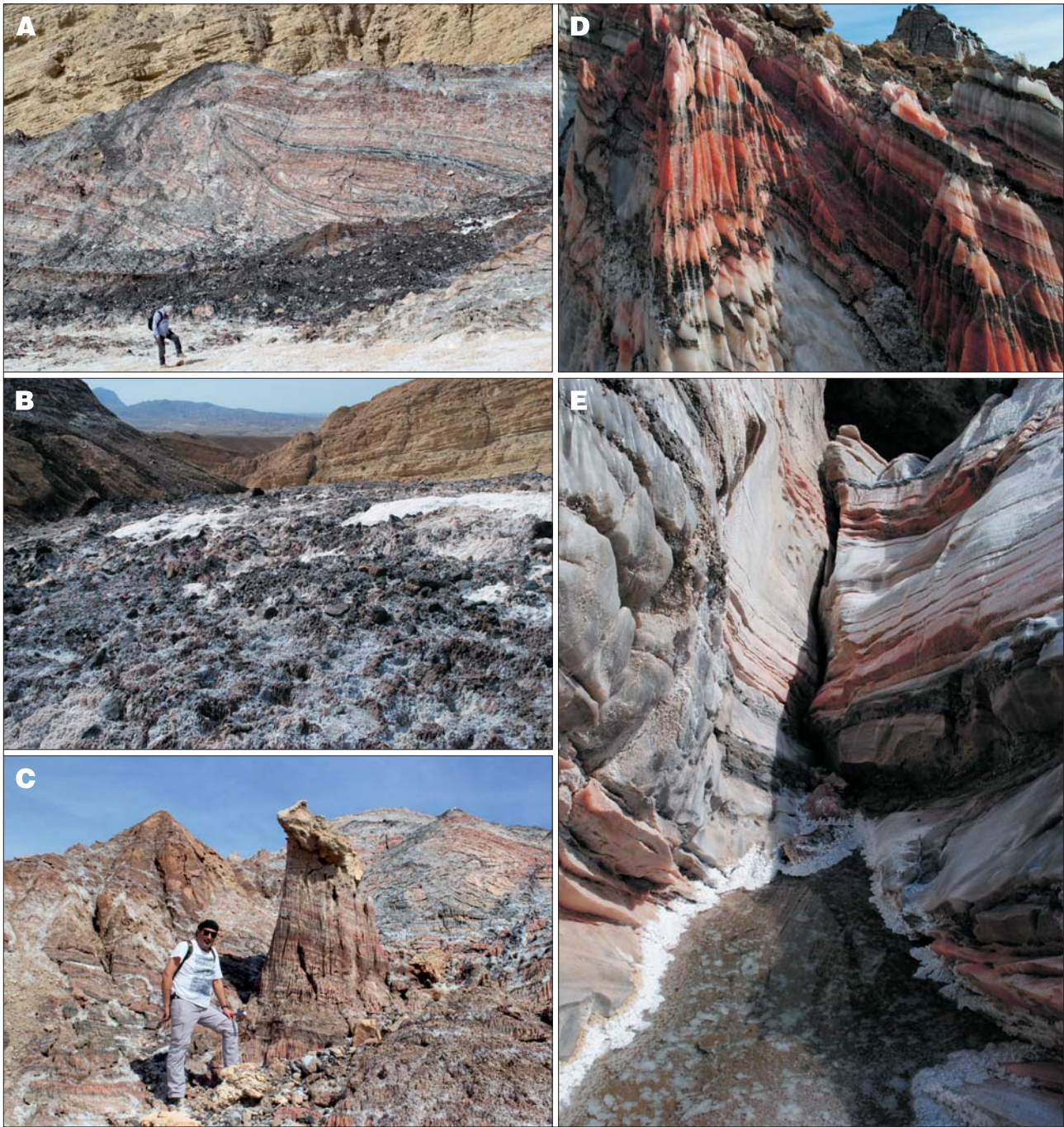


Ryc. 6. **A** – Wysad Jashak tworzy współcześnie górę soli (Kuh-e-Namak) osiągającą wysokość 1450 m n.p.m. **B** – Solne lodowce wydobywające się z wnętrza diapiru Jashak spływają grawitacyjnie po obu skłonach antykliny do sąsiednich dolin. Różnica wysokości pomiędzy wierzchołkiem diapiru a podstawą wynosi >1200 m. Fot. K. Bukowski

Fig. 6. **A** – The Jashak salt dome creates presently a salt mountain (Kuh-e-Namak), reaching 1,450 m a.s.l. in its highest peak. **B** – Salt glaciers, arising from the salt dome, are flowing gravitationally from both peaks of the anticline to the neighbouring valleys. The elevation difference between the salt dome peak and its base is >1,200 m. Photo by K. Bukowski

obydwu lodowcach wykazuje zróżnicowanie zarówno względem wielkości kryształów i ziaren halitu, ilości domieszek części nierozpuszczalnych, odłamków skał płonnych, a także kolorystyki. Obserwowano wiele odmian kolorystycznych soli: brunatnoczarne, ciemnosza-

re, magenta, miodowe, różowe i białe (ryc. 7 na str. 212). Typowa drobnoziarnista sól (<0,5 mm) w kolorze brunatno-różowym zawiera duże ilości rozproszonego hematytu i była spotykana m.in. u podstawy lodowca oraz na jego obrzeżach, w postaci warstw grubości kilku metrów.



Ryc. 8. Formy powstałe w wyniku współczesnych procesów rzeźbotwórczych na wysadzie Jashak: **A** – Fałd izoklinalny rozwinięty w efekcie grawitacyjnego płynięcia soli, widoczny w południowym lodowcu. Fot. K. Bukowski; **B** – Brekcje skał nierozpuszczalnych: czarnych dolomitów i ciemnoszarych mułowców, odkładające się na powierzchni solnego lodowca; **C** – Ostaniec solny chroniony przez „czapkę” z bloku mułowca; **D** – Żebra krasowe (rillenkarren) w centymetrowej skali, oddzielone ostrymi grzbietami i iglicami w zmylonityzowanej soli; **E** – Erozyjne formy powstałe w wyniku rozpuszczania soli przez potoki burzowe i niewielki staw wypełniony solanką. 8B–8E fot. M. Szydło

Fig. 8. Forms developed as a result of present-day geomorphologic processes on the Jashak salt dome: **A** – Isoclinal fold visible on the southern glacier, an effect of gravitational salt flow. Photo by K. Bukowski; **B** – Breccia composed of insoluble rocks: black dolomites and dark grey mudstones deposited on the salt glacier surface; **C** – Salt column protected by a mudstone cap; **D** – Solution grooves (rillenkarren) on a centimetre scale, separated by sharp crests and pinnacles in mylonitic salt; **E** – Erosional forms developed as a result of dissolution of salt by storm streams. The picture shows a small pond filled with brine. Photos 8B–8E by M. Szydło

W efekcie grawitacyjnego płynięcia soli w południowym lodowcu występują deformacje neotektoniczne, takie jak pochylone fałdy izoklinalne (ryc. 8A). Gdy sól na powierzchni ulega rozpuszczaniu, tworzą się formy erozyjne przypominające koryta rzeczne i kaniony, które w bezodpływowych obniżeniach przechodzą w sieć podziemnych jaskiń krasowych. Pozostałe po rozpuszczeniu fragmenty

skał tworzą pokrywy grubości do kilkudziesięciu metrów, przypominające brekcje, składające się z czarnych bloków dolomitów i ciemnoszarych mułowców (ryc. 8B). W wyniku rozpuszczania soli i erozji tworzą się ostańce solne (ryc. 8C) czy też charakterystyczne, oddzielone ostrymi krawędziami, żebra krasowe, tzw. rillenkarren (ryc. 8D), a także solne jaskinie i rynnne erozyjne (ryc. 8E).

Wysad na wyspie Ormuz

Wyspa Ormuz (27°04'N, 56°27'E) leży w cieśninie o tej samej nazwie, w odległości ok. 8 km od wybrzeża Iranu i 20 km od miasta Bandar Abbas (ryc. 3). Ta niewielka owalna wyspa (8 × 7 km) stanowiła przez stulecia niezwykle ważny punkt strategiczny, z którego kontrolowano przepływ statków przez cieśninę Ormuz i handel Arabii z Indiami. Cieśnina, mierząca w najwęższym miejscu 33 km, jest najważniejszą drogą umożliwiającą transport ropy naftowej z Zatoki Perskiej na światowe oceany. Ten szlak komunikacyjny ma ogromne znaczenie strategiczne. Przepływa nim ok. 17,4 mln baryłek ropy dziennie, co stanowi blisko jedną piątą światowego zużycia tego surowca (szacuje się, że to nawet 40% ropy transportowanej drogą morską).

Plaskie północne wybrzeże wyspy Ormuz tworzą holocenijskie tarasy morskie, pokryte osadami aluwialnymi, plażowymi oraz eolicznymi. Na południowym wybrzeżu stoją klify, wysokości nawet do 100 m, w których odsłaniają się pliocenijskie piaskowce i mułowce formacji Aghajari oraz mioceńskie wapienie i łupki formacji Mishan (ryc. 9A–B). Geologia wyspy Ormuz była wcześniej opisywana m.in. przez Hurforda i in. (1984), Kenta (1987) oraz Talbota i in. (2009). Na powierzchni przeważającej części wyspy występują sole kamienne (ryc. 9 C), a także wypiętrzone wraz z wysadami intruzywnie skały wylewne, takie jak ryolity, trachity i tufy, oraz ciemnoszare dolomity. Charakterystycznymi osadami występującymi na wyspie są czerwono-brunatne, hematytowe piaski plażowe i ochry, które powstały w wyniku wietrzenia i przeobrażenia bogatych w tlenki żelaza tufów hematytowych (ryc. 9 D–E). Te unikatowe pod względem jakości nagromadzenia tlenków i wodorotlenków żelaza – hematytu, goethytu i limonitu – były przedmiotem eksploatacji jako źródło pigmentu wykorzystywanego m.in. do produkcji kosmetyków, farb oraz barwienia szkła i emalii. Jeszcze niedawno surowiec ten był eksportowany do wielu krajów, m.in. do Wielkiej Brytanii, Francji, Portugalii i Indii. Ochry znalazły także inne zastosowanie, rdzenni mieszkańcy wyspy do dziś używają jej jako przyprawy. Obecnie pozostałe zasoby ochry na wyspie Ormuz są szacowane na ok. 390 tys. t (Yazdi i in., 2014).

Wulkaniczne tufy współwystępujące wraz z solami formacji Ormuz wskazują, według niektórych autorów (zob. Warren, 2016), na ryfowe środowisko depozycji ewaporatów, analogiczne do współczesnego środowiska wytrącania się soli w depresji Danakill we wschodniej Afryce. Pochodzenie innych skał wylewnych nie jest do końca jasne. Tworzą one izolowane, owalne masy skalne, składające się z ryolitów i trachitów, o średnicy od 40 do 480 m i występują w centralnej części wysadu Ormuz w otoczeniu soli kamiennych (ryc. 9 E). Początkowo uważano, że są to intruzje, które powstały znacznie później niż formacja Ormuz, a ich wiek był szacowany nawet na jurę. Jednak ostatnie datowania Pb-U cyrkonów pochodzących z ryolitów wskazują na wiek 558 ± 7 Ma, czyli skały te mogły intrudować synchronicznie z osadzeniem się ewaporatów i węglanów (Faramarzi i in., 2015).

Wysad Ormuz jest ciągle aktywny – tempo jego wypiętrzania się jest szacowane na 5–6 mm/rok (Jackson, Hudec, 2017). Wraz z towarzyszącymi skałami intruzywnymi tworzy w środkowej części wyspy wzniesienia dochodzące do 186 m n.p.m. Wewnętrzna struktura wysadu nie została jeszcze dobrze rozpoznana. Przypuszcza się, że przypomina ona grzyb solny (*mushroom diapir*, Talbot i in., 2009). Kartowania powierzchni wysadu Ormuz wykazały (Talbot i in., 2009), że lokalnie oprócz różnych gruboziar-

nistych soli kamiennych występują na niej również wtórne sole potasowe, o zawartości od 1 do nawet 22% K₂O. Powstały one prawdopodobnie w wyniku wtórnego wytrącania się minerałów na brzegach lokalnych strumieni, przenoszących solankę wzbogaconą w wyniku rozpuszczania pierwotnego sylwinu. Jest to istotna wskazówka dotycząca pierwotnego występowania facji soli potasowych w prekambryjskich solach formacji Ormuz. Podobne przesłanki są także znane z kilku wysadów soli w rejonie Bandar Abbas i na wyspie Qeshm (Talbot i in., 2009). Współcześnie obserwuje się, że w okresach powodzi w czapie wysadu powstają niewielkie stawy solankowe, w których krystalizują wtórne gipsy. Spośród innych minerałów znajdujących na wyspie i mających wartość kolekcjonerską należy wymienić pirokseny (augit), amfibole, piryty, kwarc, hematyt czy dolomit.

Wysad Namakdan i jaskinie solne na wyspie Qeshm

Wysad Namakdan wypiętrza się w południowo-wschodniej części wyspy Qeshm (26°37'08" N, 55°29'20" E). Jest to owalny diapir o wymiarach ok. 8 × 7 km, przypominający słup solny (ryc. 10). Podobnie jak inne wysady w tym rejonie powstał w wyniku wyciśnięcia soli formacji Ormuz z głębokości ok. 8 km (Mukherjee i in., 2010). Współcześnie wysad ten tworzy wyniesienie terenu osiagające w najwyższym punkcie wysokość 240 m n.p.m.

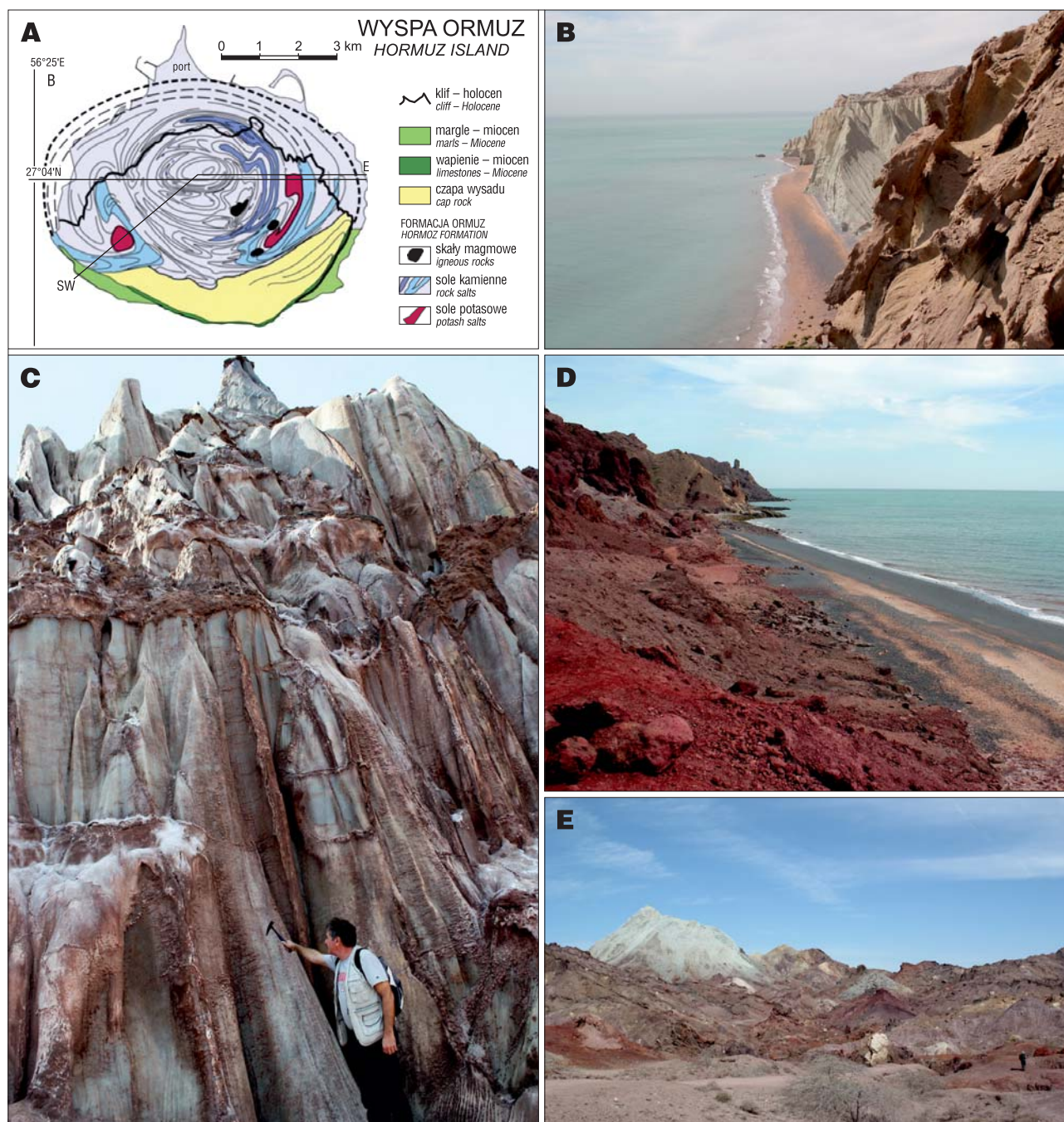
Datowania radiowęglowe szczątków drewna pochodzących z osadów aluwialnych wyspy Qeshm wykazały, że w ciągu ostatnich 50 tys. lat tempo wypiętrzania się wysadu było mniej więcej stałe. Wynosiło ok. 4 mm/rok w odległości 600 m od granicy diapiru i zmniejszało się wraz z odległością od jego centrum (Bruthans i in., 2010). Udokumentowano również wynoszenie się skał osadowych w strefie kontaktowej diapiru, w tempie 0,4–0,6 mm/rok, które jest 2–3 razy szybsze niż tempo wypiętrzania w skali regionalnej.

W zachodniej części wysadu odkryto najdłuższą znaną jaskinię solną świata – długości 6580 m – o nazwie 3N (Tri Nahacu Men; Bruthans i in., 2006). Podobnie jak inne solne jaskinie w Iranie powstała ona w ciągu ostatnich kilku tysięcy lat w wyniku rozpuszczania soli przez potoki wody, tworzące się podczas epizodycznych intensywne opadów. W jaskiniach wysadu Namakdan w wyniku procesów rozpuszczania soli i następnie ponownej jej krystalizacji tworzy się współcześnie bogata szata naciekowa, a w solankowych potokach krystalizuje halit, w formie narostków i pokryw halitowych (ryc. 10).

W ostatnich latach na wyspie Qeshm utworzono pierwszy w Iranie Geopark UNESCO (Qeshm Island Geopark, <http://qeshmgeopark.ir/en>), w którym oprócz jaskiń solnych można zobaczyć m.in. naturalny las mangrowy, a w rejonie tzw. Doliny Gwiazd – formy erozyjne powstałe w wyniku wietrzenia kruchych piaskowców o spoiwie wapiennym (Amrikazemi, 2013).

PODSUMOWANIE

Współcześnie w pasie fałdowo-nasuwczych gór Zagros w południowym Iranie występuje ok. 160 diapirów solnych różnej wielkości, przy czym część z nich tworzy unikalne lodowce solne, które stanowią swoisty poligon do badań tektoniki solnej. Dzięki temu możliwe jest prowadzenie obserwacji zarówno procesów geomorfologicznych, zachodzących na powierzchni odsłoniętych wysadów sol-

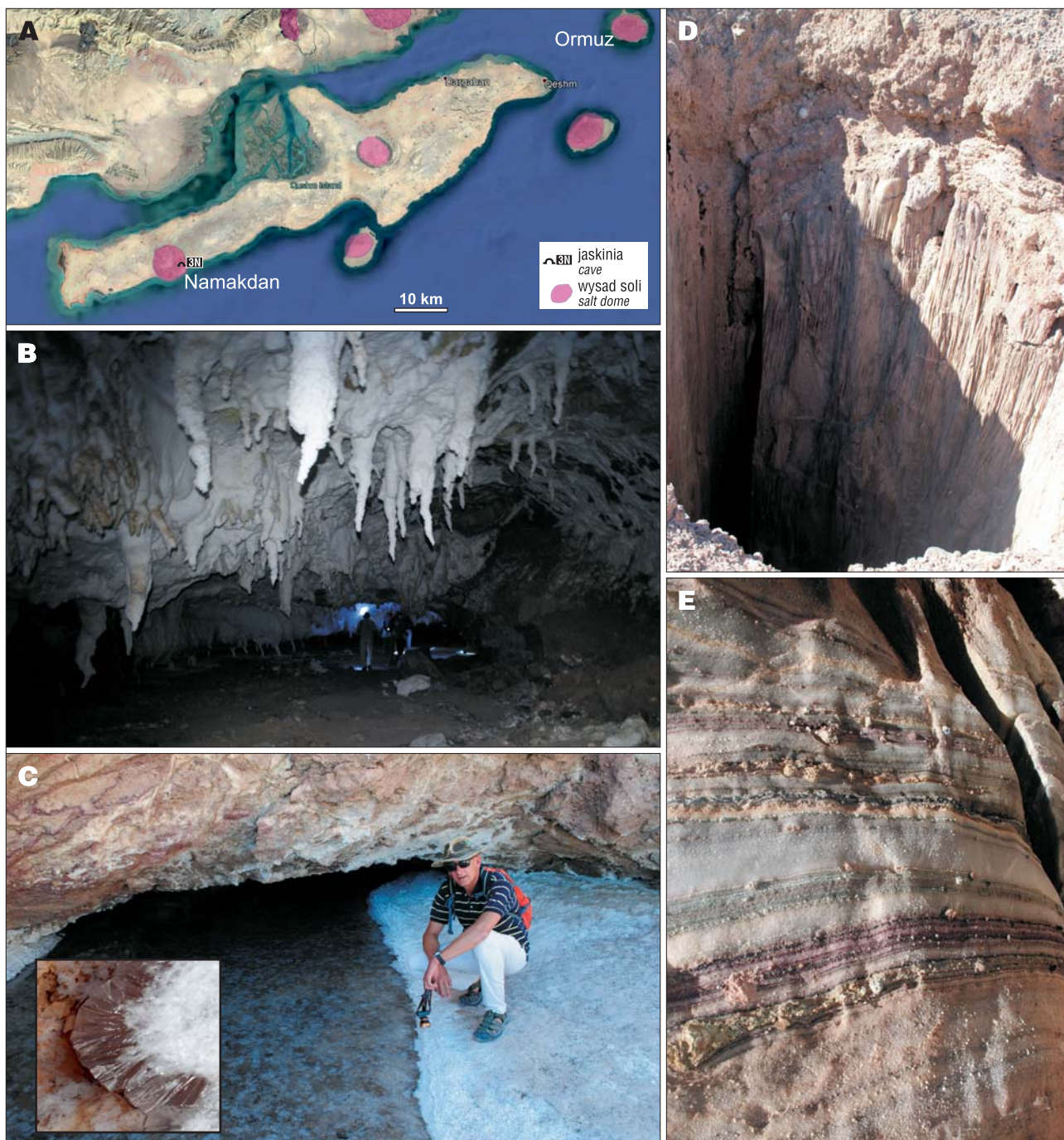


Ryc. 9. Wyspa Ormuz: **A** – Schemat budowy geologicznej (wg Talbota i in., 2009); **B** – Klify na południowym wybrzeżu wyspy. Na pierwszym planie plioceńskie skały klastyczne w kolorze kremowym, a na dalszym planie zielonoszare miocenne wapienie i łupki; **C** – Odślonienie pionowo zapadających warstw soli formacji Ormuz w centralnej części wyspy; **D** – Plaża utworzona z piasków hematytowych oraz powszechnie występującej na wyspie ochry; **E** – Wylewne skały magmowe typu ryolitów (jasnoszary masyw w tle) w otoczeniu przeobrażonych tufów wulkanicznych zawierających duże ilości związków żelaza. Centralna część wysadu soli na wyspie Ormuz. Wszystkie zdjęcia K. Bukowski

Fig. 9. Hormuz Island. **A** – Geological structure of Hormuz Island (Talbot et al., 2009); **B** – Cliffs on the southern coast of the island. Pliocene clastic rocks in the foreground, creamy in colour, and green-grey Miocene limestone and shale in the background; **C** – Exposure of vertical salt layers of the Hormuz Formation in the central part of the island; **D** – What is typical for Hormuz Island is the common occurrence of ochre and hematite sands creating unique beaches; **E** – Extrusive magmatic rocks of rhyolite type (the light green massif in the background), surrounded by metamorphosed volcanic tuff containing large quantities of ferrous compounds. The central section of the salt dome on Hormuz Island. All photos by K. Bukowski

nych, jak również rejestrowanie ciągłej aktywności tektonicznej skał solnych. Badania terenowe wysadów solnych, poparte laboratoryjnymi modelowaniami struktur solnych, wnoszą zupełnie nowe spojrzenie na klasyczne poglądy dotyczące powstawania wysadów solnych i ich tektoniki (zob. Jackson, Hudec 2017). Obserwacje tempa wypiętrza-

nia struktur solnych w zależności od głębokości występowania zwierciadła solnego, klimatu i ilości opadów atmosferycznych pozwalają zrozumieć procesy zachodzące pod wpływem halokinezy i halotektoniki w dawnych epokach geologicznych. Procesy rzeźbotwórcze, kształtujące odślonięte lustra wysadów soli w Iranie, a także brekcje,



Ryc. 10. Jaskinie solne w wysadzie Namakdan na wyspie Qeshm: **A** – Lokalizacja wyspy Qeshm i wysadu Namakdan; **B** – Fragment jednego z korytarzy jaskini solnej, w stropie widoczne różne formy naciekowe – stalaktyty, kalafiory i makarony solne; **C** – Ujście jednego z potoków wypływających z wysadu Namakdan – w powiększeniu wtórne kryształy halitu wzrastające w kierunku dopływającej solanki; **D** – Pionowa studnia o średnicy kilku metrów i głębokości kilkunastu metrów, powstała w wyniku rozpuszczania wysadu soli Namakdan. Fot. K. Bukowski; **E** – Drobnokrystaliczne sole formacji Hormuz laminowane związkami żelaza, odsłaniające się w jaskini w wysadzie Namakdan. 10B–10C i 10E fot. M. Szydło

Fig. 10. Salt caves in the Namakdan salt dome, Qeshm Island: **A** – Locations of Qeshm Island and the Namakdan salt dome; **B** – Part of one of the corridors in the salt cave. Various secondary halite forms: stalactites, cauliflowers and macaroni are visible; **C** – Mouth of one of the streams flowing out of the Namakdan salt dome. The enlarged picture shows halite crystals growing in the direction of the feeding brine; **D** – A vertical well, several metres in diameter and about a dozen of metres deep, resulting from dissolution of the Namakdan salt dome surface. Photo by K. Bukowski; **E** – Finely crystalline salts of the Hormuz Formation, laminated with ferrous compounds, occurring in the exposed sections of the cave in the Namakdan salt dome. Photos 10B–10C and 10E by M. Szydło

składające się ze skał nierozpuszczalnych, czy też związane z rozpuszczaniem skał solnych czy też związane z rozpuszczaniem skał solnych zjawiska krasowe (Filippi i in., 2011), również typowe dla wielu wysadów rejestrowanych zarówno w solach wieku cechszyńskiego, jak i innych formacji solonośnych na świecie (np. Frumkin, 2013).

Serdecznie dziękuję wszystkim uczestnikom wyprawy Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego do Iranu za owocne i interesujące dyskusje, Aleksandrze Szymczyk, iranistce i tłumacze języka perskiego, za nieocenioną pomoc podczas podróży oraz dr Vachik Hairapetian i dr Alizera Nadimi za pomoc w badaniach terenowych. Wyprawę do Iranu dofinansowało Polskie Stowarzyszenie Górnictwa Solnego (www.psgs.agh.edu.pl),

a artykuł został przygotowany w ramach działalności badawczo-naukowej finansowanej z subwencji MNiSW nr 16.16.140.315.

LITERATURA

- ALAVI M. 2004 – Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *Am. J. Science*, 304: 1–20.
- AMRIKAZEMI A. 2013 – Geoheritage Atlas of Iran. *Geol. Sur. of Iran*.
- BALLATO P., NOWACZYK N.R., LANDGRAF A., STRECKER M.R., FRIEDRICH A., TABATABAEI S.H. 2008 – Tectonic control on sedimentary facies pattern and sediment accumulation rates in the Miocene foreland basin of the southern Alborz mountains, northern Iran: *Tectonics*, 27, TC6001.
- BRUTHANS J., FILIPPI M., ZARE M., ASADI N., VILHELM Z. 2006 – 3N Cave (6580 m): Longest salt cave in the world. *The NSS news. National Speleological Society*, 64 (9): 10–18.
- BRUTHANS J., FILIPPI M., ZARE M., CHURÁČKOVÁ Z., ASADI N., FUCHS M., ADAMOVIČ J. 2010 – Evolution of salt diapir and karst morphology during the last glacial cycle: effects of sea-level oscillation, diapir and regional uplift, and erosion (Persian Gulf, Iran). *Geomorphology*, 121: 291–304.
- CALLOT J.P., JAHANI S., LETOUZEY J. 2007 – The role of pre-existing diapirs in fold and thrust belt development, in *Thrust belts and foreland basins. Frontiers in earth sciences, Part V*, Berlin, Springer: 309–325.
- CALLOT J., TROCME V., LETOUZEY J., ALBOUY E., JAHANI S., SHERKATI S. 2012 – Pre-existing salt structures and the folding of the Zagros Mountains, [W:] Alsop G. I., Archer S. G., Hartley A. J., Grant N. T., Hodgkinson R., (red.), *Salt tectonics, sediments and prospectivity*. London, *Geol. Soc., Spec. Publ.*, 363: 545–561.
- CRAIG J., THUROW J., THUSU B., WHITHAM A., ABUTARRUMA Y. 2009 – Global Neoproterozoic petroleum systems and the emerging potential in North Africa. [W:] Craig J., Thurow J., Whitham A., Abutarruma Y. (red.), *Global Neoproterozoic Petroleum Systems: The Emerging Potential in North Africa*. *Geol. Soc., London, Sp. Publ.*, 326: 1–24.
- DADLEZ R., JAROSZEWSKI W. 1994 – *Tektonika*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- FARAMARZI N.S., AMINI S., SCHMITT A.K., HASSANZADEH J., BORG G., MCKEEGAN K., MORTAZAVI S.M. 2015 – Geochronology and geochemistry of rhyolites from Hormuz Island, southern Iran: A new record of Cadomian arc magmatism in the Hormuz Formation. *Lithos*, 236: 203–211.
- FILIPPI M., BRUTHANS J., PALATINUS L., ZARE M., ASADI N. 2011 – Secondary halite deposits in the Iranian salt karst: general description and origin. *Intern. J. Speleol.*, 40 (2), 141–162.
- FRUMKIN A. 2013 – Salt Karst, [W:] Shroder J.F. (red.), *Treatise on Geomorphology*. Elsevier: 402–427.
- GHANADIAN M., FAGHIH A., GASEMANN B., ABDOLLAHIE FARD I., MALEKI M. 2017 – Analogue modeling of the role of multi-level decollement layers on the geometry of orogenic wedge: an application to the Zagros Fold-Thrust Belt, SW Iran. *Int. J. Earth Sci.*: 1–17.
- HARRISON J.V. 1930 – The geology of some salt diapirs in Laristan, Quar. *Jour. Geol. Soc. London*, 86: 463–522.
- HARRISON H. 1931 – Salt domes in Persia. *J. Inst. Petrol. Technologists*, 17 (91): 300–320.
- HASSANPOUR J., JAHANI S., GHASSEMI M.R., ALAVI S.A., ZEINALI F. 2018 – Evolution of the Karebas Fault System and adjacent folds, central Zagros fold-and-thrust belt, Iran: Role of pre-existing halokinesis (salt structures and minibasins) and detachment levels. *J. Asian Earth Sci.*, 164: 125–142.
- HESSAMI K., NILFOUROUSHAN F., TALBOT C.J. 2006 – Active deformation within the Zagros Mountains deduced from GPS measurements. *J. Geol. Soc., London*, 163: 143–148.
- HURFORD A.J., GRUNAU H.R., STÖCKLIN J. 1984 – Fission track dating of an apatite crystal from Hormoz Island, Iran. *J. Petrol. Geol.*, 7: 365–380.
- HUSSEINI M.I., HUSSEINI S.I. 1990 – Origin of the Infracambrian Salt Basins of the Middle East. [W:] Brooks J. (red.), *Classic Petroleum Provinces*. *Geol. Soc., London. Spec. Publ.*, 50: 279–292.
- JACKSON M.P.A., HUDEC M.R. 2017 – *Salt Tectonics. Principles and Practice*. Cambridge Univ. Press.
- JAHANI S., CALLOT J.P., FRIZON DE LAMOTTE D., LETOUZEY J., LETURMY P. 2007 – The salt diapirs of the eastern Fars province (Zagros, Iran): a brief outline of their past and present. [W:] Lacombe O., Lave J., Roure F., Verges J. (red.), *Thrust Belts and Foreland Basins*. Springer, Berlin: 289–308.
- JAHANI S., CALLOT J.P., LETOUZEY J., FRIZON DE LAMOTTE D. 2009 – The eastern termination of the Zagros Fold-and-Thrust Belt, Iran: structures, evolution, and relationships between salt plugs, folding, and faulting. *Tectonics*, 28 (6), TC6004.
- JAHANI S., HASSANPOUR J., MOHAMMADI-FIROUZ S., LETOUZEY J., FRIZON DE LAMOTTE D., ALAVI S.A., SOLEIMANY B. 2017 – Salt tectonics and tear faulting in the central part of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran. *Mar. Petrol. Geol.*, 86: 426–446.
- KAREVAN M., VAZIRI-MOGHADDAM H., MAHBOUBI A., MOUSAVI-HARAMI R. 2014 – Biostratigraphy and paleo-ecological reconstruction on Scleractinian reef corals of Rupelian-Chatian succession (Qom Formation) in northeast of Delijan area. *Geopersia*, 4 (1): 11–24.
- KENT P.E. 1958 – Recent studies of south Persian salt plugs. *AAPG Bull.*, 42: 2951–2972.
- KENT P.E. 1979 – The emergent Hormuz salt plugs of southern Iran. *J. Petrol. Geol.*, 2: 117–144.
- KENT P.E. 1987 – Island salt plugs in the Middle East and their tectonic implications. [W:] Lerche I., O'Brien J.J. (red.), *Dynamical geology of salt and related structures*. Orlando, Academic Press: 3–37.
- KNAUTH L.P. 1998 – Salinity history of the Earth's early ocean. *Nature*, 395: 554–555.
- KOSHNAW R.I., STOCKLI D.F., SCHLUNEGGER F. 2019 – Timing of the Arabia-Eurasia continental collision-Evidence from detrital zircon U-Pb geochronology of the Red Bed Series strata of the northwest Zagros hinterland, Kurdistan region of Iraq. *Geology*, 47 (1): 47–50.
- MOLINARO M., ZEYEN H., LAURENCIN X. 2005 – Lithospheric structure underneath the SE Zagros Mountains, Iran: recent slab break-off? *Terra Nova*, 17 (1): 1–6.
- MORLEY C.K., KONGWUNG B., JULAPOUR A.A., ABDOLGHAFOURIAN M., HAJIAN M., WAPLES D., WARREN J., OTTERDOOM H., SRISURIYON K., KAZEMI H. 2009 – Structural development of a major late Cenozoic basin and transpressional belt in central Iran: The Central Basin in the Qom-Saveh area. *Geosphere*, 5: 325–362.
- MUKHERJEE S., TALBOT C.J., KOYI H.A. 2010 – Viscosity estimate of salt in the Hormuz and Namakdan salt diapirs, Persian Gulf. *Geol. Mag.*, 147: 497–507.
- SELLA G.F., DIXON T.H., MAO A. 2002 – A model for recent plate velocities from space geodesy. *J. Geophys. Res.*, 107.
- SHERKATI S., MOLINARO M., FRIZON DE LAMOTTE D., LETOUZEY J. 2005 – Detachment folding in the Central and eastern Zagros fold-belt (Iran): salt mobility, multiple detachments and final basement control. *J. Struct. Geol.*, 27: 1680–1696.
- SHERKATI S., LETOUZEY J., FRIZON DE LAMOTTE D. 2006 – Central Zagros fold-thrust belt (Iran): New insights from seismic data, field observation, and sandbox modeling. *Tectonics*, 25, TC4007, 1–27.
- SOLEIMANI B., BAHADORI A. 2015 – The Miocene Gachsaran Formation evaporite cap rock, Zeloil oilfield, SW Iran. *Carbonates Evaporites*, 30: 287–306.
- TALBOT C.J. 1979 – Fold trains in a glacier of salt in southern Iran. *J. Structural Geol.*, 1: 5–18.
- TALBOT C.J. 1981 – Sliding and other deformation mechanisms in a glacier of salt in S. Iran. [W:] McClay K.R., Price N.J. (red.), *Thrust and nappe tectonics*. London, *Geol. Soc., Sp. Publ.*, 9: 173–183.
- TALBOT C.J. 1998 – Extrusions of Hormuz salt in Iran. [W:] Blundell D.J., Scott A.C. (red.), *The Past is the Key to the Present*. *Geol. Soc. London, Sp. Publ.*, 143, 315–334.
- TALBOT C.J., AFTABI P. 2004 – Geology and models of Qum Kuh central Iran. *J. Geol. Soc. London*, 161: 1–14.
- TALBOT C.J., ALAVI M. 1996 – The past of a future syntaxis across the Zagros. [W:] Alsop G.L., Blundell D.L., Davison I. (red.), *Salt tectonics*. *Geol. Soc. London, Sp. Publ.*, 100: 89–109.
- TALBOT C.J., JARVIS R.J. 1984 – Age, budget and dynamics of an active salt extrusion in Iran. *J. Struct. Geol.*, 6: 521–533.
- TALBOT C.J., ROGERS E.A. 1980 – Seasonal movements in a salt glacier in Iran. *Science*, 208: 395–397.
- TALBOT C.J., AFTABI P., CHEMIA Z. 2009 – Potash in a salt mushroom at Hormoz Island, Hormoz Strait, Iran. *Ore Geol. Rev.*, 35: 317–332.
- TALBOT C.J., MEDVEDEV S., ALAVI M., SHAHRIVAR H., HEIDARI E. 2000 – Salt extrusion rates at Kuh-e-Jahani, Iran: June 1994 to November 1997. [W:] Vendeville B.C., Mart Y., Vigneresse J.L., (red.), *Salt, shale and igneous diapirs in and around Europe*. *Geol. Soc. London, Sp. Publ.*, 174: 93–110.
- VERNANT P., NILFOUROUSHAN F., HATZFELD D., ABBASSI M.R., VIGNY C., MASSON F., NANKALI H., MARTINOD J., ASHTIANI A., BAYER R., TAVAKOLI F., CHÉRY J. 2004 – Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophys. J. Int.*, 157: 381–398.
- VERRALL P. 1978 – The significance of thickness variations in the Gachsaran formation. *NIOC Exploration*.
- WARREN J.K. 2016 – *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- YAZDI A., ARIAN M.A., TABARI M.M.R. 2014 – Geological and Geotourism Study of Iran Geology Natural Museum, Hormoz Island. *Open J. Ecol.*, 4: 703–714.

Praca wpłynęła do redakcji 18.11.2019 r.
Akceptowano do druku 10.02.2020 r.

PRZEGLĄD

GEOLOGICZNY



MINISTERSTWO
KLIMATU



Cena 12,60 zł (w tym 8% VAT)

TOM 68 Nr 3 (MARZEC) 2020

Indeks 370908 ISSN-0033-2151



Geotermia w Polsce

**Geomorfologia obszarów wysadowych soli
w górach Zagros w Iranie**

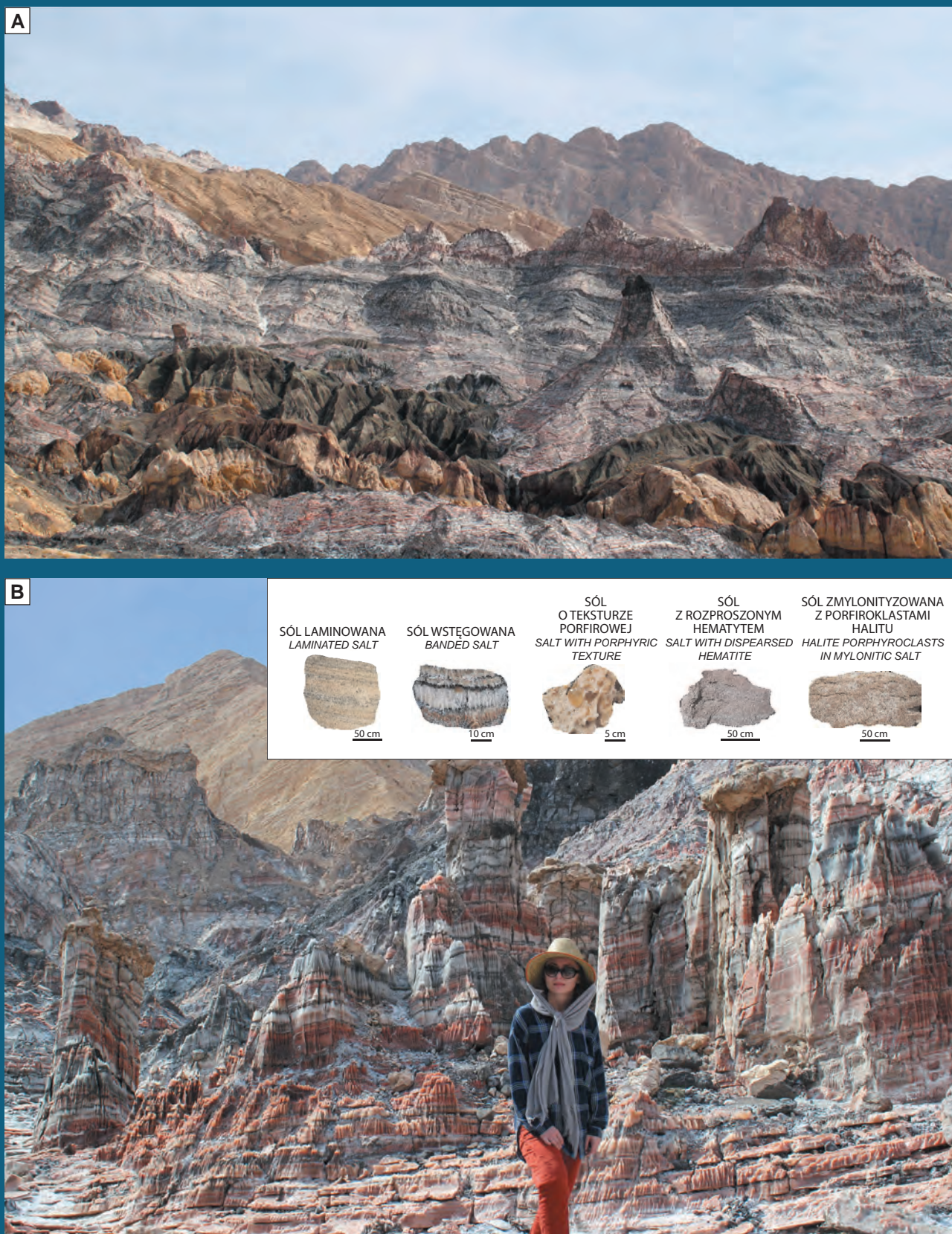
Ruchy wysadu solnego Inowrocławia

Zdjęcie na okładce: Wysad solny Ormuz w Iranie – kontakt zwierciadła solnego z częściowo zerodowaną czapą wysadu (zobacz artykuł K. Bukowskiego na str. 167). Fot. K. Bukowski

Cover photo: The Hormuz salt dome in Iran – contact of salt mirror with a partly eroded weathering cap rock (see article by K. Bukowski on p. 167). Photo by K. Bukowski

Procesy geomorfologiczne na wybranych wysadach soli
w pasie fałdowo-nasuwcym gór Zagros w Iranie (patrz str. 167)

Geomorphological processes in selected salt domes in the Zagros fold-thrust belt in Iran (see p. 167)



Ryc. 7. Południowy lodowiec diapiru solnego Jashak w Iranie: **A** – Zafaldowania warstw i foliacja, które rozwinęły się w dolnej części lodowca w wyniku płynięcia soli po powierzchni terenu; **B** – Odmiany soli kamiennych oraz formy erozyjne – kolumny i wieże solne. Fot. M. Szydło
Fig. 7. The southern glacier of the Jashak salt dome in Iran: **A** – Layer disturbances and foliation observed in the lower section of the glacier indicating a mechanism of propagation resulting from internal salt flow; **B** – Various types and colours of rock salts and geomorphological forms – salt columns and towers. Photos by M. Szydło