

Geneza form wietrzeniowych tafoni – przegląd literatury

*Origins of 'tafoni' weathering forms
– a literature review*

KATARZYNA ZWALIŃSKA

Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Uniwersytet Warszawski
00-927 Warszawa, Krakowskie Przedmieście 30; kasia.zwalinska@gmail.com

Zarys treści. W artykule zostały zaprezentowane i porównane aktualne poglądy na temat procesów powstawania tafoni. Formy te są obecne na powierzchni różnych typów skał, zarówno w okresowo wilgotnych, silnie przewiewanych obszarach przybrzeżnych, gdzie następuje na przemian zwilżanie i wysuszenie powierzchni skalnych, jak na obszarach z długotrwałymi suszami, gdzie w wysokich temperaturach zachodzi znaczne parowanie. W wielu miejscach na świecie złożone procesy doprowadzają do wykształcania się tafoni na kamiennych ścianach zabytkowych budynków i falochronach oraz w obrębie nadmorskich klifów. Teorie powstawania tafoni można podzielić na 6 grup, w których zakłada się: (1) wietrzenie fizyczne – rozpad ziarnisty, (2) wietrzenie podpowierzchniowe, (3) endogeniczne pochodzenie tafoni, (4) wpływ czynników biologicznych – udział mikroorganizmów, (5) wietrzenie chemiczne – krystalizację soli, (6) wietrzenie konkrecji węglanowych.

Słowa kluczowe: tafoni, geomorfologia klimatyczna, formy wietrzeniowe, wietrzenie.

Wstęp

Tafone jest to hemisferyczna (kolista) zwietrzała pustka w skale – zarówno na powierzchniach skalnych, jak i w jaskiniach (Jennings, 1968; Goudie, 2004c). Istnieje kilka hipotez odnoszących się do powstawania tych form. Naukowcy nie potrafią dokładnie wytłumaczyć obecności tafoni w różnych typach skał i zróżnicowanym klimacie. Na ten temat wypowiedali się między innymi: E. Blackwelder (1929), B.J. Smith (1982), R. Pestrong (1988), A.V. Turkington (1998), E. Hejl (2005) oraz J.Z. Boxerman (2006). Podstawowym problemem badawczym podejmowanym w niniejszym artykule jest charakterystyka i geneza form tafoni. Zadaniem artykułu jest przedstawienie i porównanie aktualnych poglą-

dów na temat mechanizmów powstawania tafoni w zróżnicowanych warunkach klimatycznych oraz litologicznych. W artykule zaprezentowano i uporządkowano poglądy na temat genezy tafoni, opierając się, w głównej mierze, na ogólnodostępnej literaturze dotyczącej tematu oraz na własnych analizach.

Tafoni występują zarówno w suchym klimacie Antarktydy, nadbrzeżnych regionach Morza Śródziemnego, jak i w półpustynnych regionach Stanów Zjednoczonych, a nawet na Marsie (Hacker, 2003 za: Cooke i inni, 1993). Region śródziemnomorski jest obszarem, w obrębie którego tafoni występuje często. Spotykane we wszystkich typach klimatów tafoni zlokalizowane są głównie w obszarach pływowych, takich jak klify morskie (fot. 1). Czynniki stymulujące wietrzenie w obrębie klifu, to między innymi silny wiatr, obecność mikroorganizmów, zasolenie wody oraz para wodna (Klimaszewski, 1994). Duże znaczenie w tworzeniu form mają strukturalne zmiany przepuszczalności skał oraz długość okresu suszenia między zwilżeniami. Istotny jest również rodzaj i struktura skały oraz zasolenie wody morskiej (Hacker, 2003).



Fot. 1. Tafoni zlokalizowane na bazaltowym klifie morskim Holmsberg (Islandia)

Tafoni developed at the edge of the basaltic Holmsberg sea cliff (Iceland)

(Fot./Photo: K. Zwalińska)

Tafoni

Tafoni są to nisze, powstałe wskutek selektywnego wietrzenia pionowych i silnie nachylonych powierzchni skalnych oraz pojedynczych bloków skalnych, często o rozmiarach zwiększających się w głąb skały. Mają kulisty lub eliptyczny kształt, łukowate wejście oraz wklęsłe wewnętrzne ściany. Osłonięte są charakterystycznym dla tego typu form zwisem utwardzonym mineralnie. Pojedyncze nisze często oddzielone są od siebie również ściankami o zróżnicowanej grubości (fot. 2). Zagłębienia mogą występować pojedynczo lub gromadnie (McBride i Picard, 2004; Goudie, 2004c; Migoń, 2006).



Fot. 2. Formy tafoni w obrębie bazaltowych bloków skalnych na półwyspie Holmsberg (Islandia). Widoczne narzędzie ma długość 25 cm.

Tafoni forms at the rock surface on the Holmsberg peninsula (Iceland).
Depicted tool is 25 cm long.
(Fot./Photo: K. Zwalińska).

Formy tafoni występują najczęściej wzdłuż wybrzeża, gdzie działalność wody morskiej powoduje osadzanie soli na powierzchniach skalnych (Hacker, 2003 za: Martini, 1978). Tworzą się zarówno w okresowo wilgotnych, silnie przewiewanych obszarach przybrzeżnych, gdzie następuje na przemian zwilżanie oraz wysuszenie powierzchni skalnych, jak i na obszarach z długotrwałymi suszami,

gdzie w wysokich temperaturach zachodzi znaczne parowanie. Największe rozmiary (do kilku metrów) osiągają w strefie półsuchej i suchej, a szybki wzrost może doprowadzić do łączenia nisz i powstawania dużych form złożonych, a nawet dużych „jaskiń” tafoni. Złożone formacje tafoni przybierają interesujące, rozbudowane formy o nieregularnych brzegach oraz szerokim, płaskim dnem (fot. 3). Bardzo szeroko opisywane w literaturze są tafoni na stromych stokach (*sidewall tafoni*) oraz miniaturowe formy (*iconic tafoni*) (Tschang, 1974).



Fot. 3. Duże i złożone formy tafoni (Hiszpania, Alicante)

Large and complex tafoni cavern (Spain, Alicante)

(Fot./Photo: K. Zwalińska)

Tafoni powstają w wyniku wietrzenia skał magmowych, takich jak granit czy bazalt oraz drobnozłazistych skał osadowych. Choć występują w wielu typach skał, najbardziej rozpowszechnione są na powierzchni granitów, piaskowców (Mellor i inni, 1997; Mustoe, 1982) oraz skał szczególnie podatnych na wykruszanie i rozpad ziarnisty (Blackwelder, 1929; Dragovich, 1967; Pye i Mottershead, 1995). Tam także osiągają największe rozmiary. Procesy odpowiedzialne za powstawanie tafoni są zróżnicowane w zależności od strefy klimatycznej, jednak te związane ze strefą śródziemnomorską są najczęściej prezentowane przez naukowców (m.in. Sunamura, 1996).

Proces fizyczny powstawania formy rozpoczyna się, gdy woda transportuje do powierzchni skał rozpuszczone związki mineralne. Po wyparowaniu wody na powierzchni dochodzi do krystalizacji minerałów. Powoduje to kruszenie drobnych cząstek skały, co doprowadza do rozpadu ziarnistego. „Przerwanie zewnętrznej ściany skalnej jest związane z jej wzmocnieniem przez wytrącające się z roztworu związki mineralne, głównie żelaza” (Migoń, 2006). Naukowcy definiują rozwój tafoni jako konsekwencję chemicznych i fizycznych oraz biologicznych procesów wietrzeniowych. Procesy inicjowane przez stałą działalność wody i wiatru mogą działać równolegle lub niezależnie od siebie (Dragovich, 1969; Martini, 1978; French, 1996; Rodriguez-Navarro i inni, 1999; McBride i Picard, 2004, Goudie, 2004a, 2004b, Hall i André, 2006).

Wietrzenie fizyczne

W hipotezach wietrzeniowych zakłada się, że tafoni powstają podczas procesu fizycznego, zapoczątkowanego przez wodny transport rozpuszczonych związków mineralnych do powierzchni skał. Po wyparowaniu wody na powierzchni następuje krystalizacja minerałów. Powoduje to kruszenie drobnych cząstek skały, a potem rozpad ziarnisty (Turkington i Phillips, 2004). Na tylnych ściankach tafoni zaobserwowano działanie wietrzenia fizycznego, którego rezultatem jest rozpad skały na okruchy i coraz drobniejsze cząstki, aż po pył. Duże rozdrobienie materiału zwietrzelinowego oraz ostrokrawędzistość ziaren świadczy o silnym działaniu procesów wietrzeniowych. Strefa wietrzenia sięga tak głęboko, jak głęboko docierają wpływy czynników atmosferycznych. Ważną rolę w procesie wietrzenia odgrywa wielokrotne na przemian nagrzewanie i ochładzanie skały oraz zmiany wilgotności i wietrzenie solne. Wielkość nisz zwiększa się wprost proporcjonalnie do prędkości i siły wiatru, który transportuje cząsteczki wody. Powoduje to znaczny wzrost stężenia soli na powierzchniach skalnych oraz znacznie szybsze wywiewanie zwietrzałego osadu z tylnych ścian nisz (Zwalińska i Dąbski, 2012).

Zdaniem I.P. Martini (1978) powstawanie tafoni związane jest ze zmiennością warunków atmosferycznych. Czynniki stymulujące wietrzenie w obrębie klifu, to między innymi silny wiatr, promieniowanie słoneczne, decydujące o stosunkach termicznych w skale, zasolenie wody oraz para wodna (Klimaszewski, 1994; Turkington i Phillips, 2004). D. Mottershead oraz K. Pye (1994) proponują model, według którego czynniki warunkujące rozwój tafoni to przede wszystkim: wysokość nad poziomem morza, odległość od wody morskiej, orientacja otworów w skale oraz dominujący kierunek wiatru.

C. Sancho i G. Benito (1990) przeprowadzili badania czynników wpływających na wzrost tafoni na powierzchni piaskowców w środkowej Hiszpanii. Doszli do wniosku, że istnieje związek między litologią skały a częstością występowania nisz. Udowodnili, że nachylenie skały, przewodność elektryczna oraz

udział procentowy skaleni i minerałów ilastych są skorelowane z liczbą tafoni na powierzchni skalnej. Im większa zawartość skaleni i minerałów ilastych w litej skale, tym szybciej zachodzą procesy wietrzeniowe powodujące powstawanie tafoni.

A. Mellor i inni (1997), tłumacząc mechanizmy powstawania tafoni, przewidują bezpośredni wpływ wody morskiej, która rozpuszcza tylne ściany nisz. Ostatnia faza degradacji następuje, gdy forma rośnie i jest już zbyt duża, aby zaokrąglone brzegi ścian mogły się utrzymać. Degradacja tafoni sprawia, że wnętrze staje się całkowicie odsłonięte, a tym samym nieustannie narażone na działanie deszczu i wiatru oraz soli morskich.

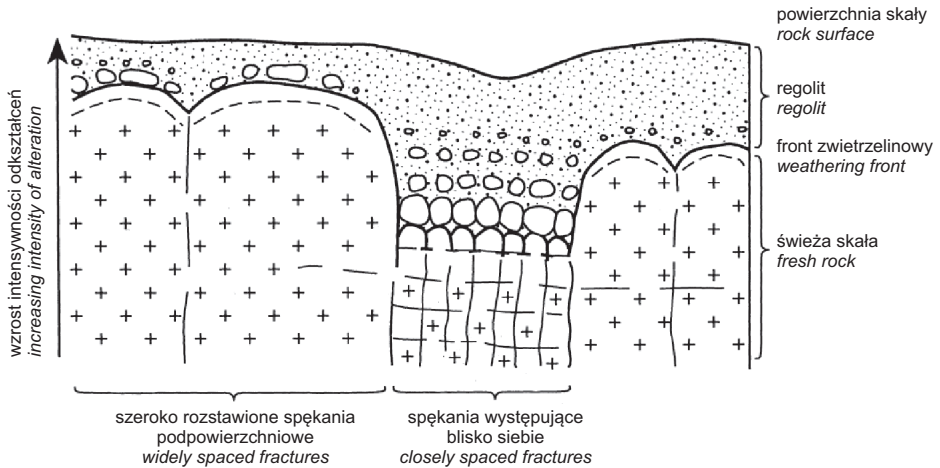
Silny wiatr potęguje działalność erozyjną. Otwory stają się coraz większe i występują dużo gęściej. Wiatr usuwa pozostałości okruchów zwietrzelinowych i wzmaga kolejne procesy wietrzenia (Zwalińska i Dąbski, 2012). Wpływ wiatru na powstawanie tafoni szeroko opisali A. Strini i inni (2008). Sugerują, że nie istnieje jeden decydujący czynnik, który napędza rozwój tafoni. Dane, które zaprezentowali potwierdzają również, że czynniki termiczne, takie jak cykle zamrażania i rozmrażania, nie mają znaczącego wpływu na rozwój otworów. Autorzy twierdzą, że wiatr transportuje sole morskie do powierzchni skalnej, co doprowadza do stopniowej krystalizacji soli w pęcherzykach i kolejno rozpadu ziarnistego na tylnych ścianach nisz.

Wietrzenie podpowierzchniowe

C. Twidale (1982), badający skały granitowe, wskazuje na przesłanki za podpowierzchniową genezą tafoni. Model prezentowany przez Twidale'a opiera się na trzech etapach formowania otworów: inicjacji, kształtowania otworu oraz jego dalszego rozwoju. Autor twierdzi, że proces powstawania tafoni inicjowany jest przez wpływ podpowierzchniowej wilgotności w skale. Według tego modelu tafoni występują w skałach pokrytych przepuszczalną warstwą regolitu, który styka się bezpośrednio z nieprzepuszczalną warstwą dolnych formacji skalnych. Zdaniem Twidale'a zagłębienia występują wzdłuż spękań i porów, są stopniowo powiększane, tworząc duże jaskinie. Powstawanie otworów inicjowane jest w dużej mierze przez czynniki atmosferyczne oraz wody migrujące w porach skalnych (ryc. 1). Przestrzenie porów w grubych detrytycznych skałach funkcjonują jako drogi migracji płynów i transportu substancji rozpuszczonych. Tafoni mogą powstać przez rozwój i łączenie niewielkich kawern wietrzeniowych (Twidale, 1982; Vidal Romani i inni, 2010).

W warstwie zwietrzliny (regolitu) występują liczne załamania. W ich obrębie zachodzą procesy infiltracji, a woda morska spływając do wnętrza skały wypełnia wgłębienia i pęcherzyki skalne (Twidale i Campbell, 1995). Zdaniem C. Twidale'a oraz J.A. Bourne'a (2008), kolejnym etapem powstawania tafoni jest wzrost kryształów soli w pęknięciach i załamaniach. Skały nagrzewają się,

a sole, rozszerzając się stopniowo, wywierają nacisk na otaczającą skałę, doprowadzając do jej rozpadu. Również K. Pye i D.N. Mottershead (1995) podkreślają znaczenie podpowierzchniowych otworów, które ułatwiają wsiąkanie wody i zatrzymywanie soli w porach.



Ryc. 1. Schemat spękań według hipotezy wietrzenia podpowierzchniowego
Fractures scheme in accordance with the subsurface weathering hypothesis

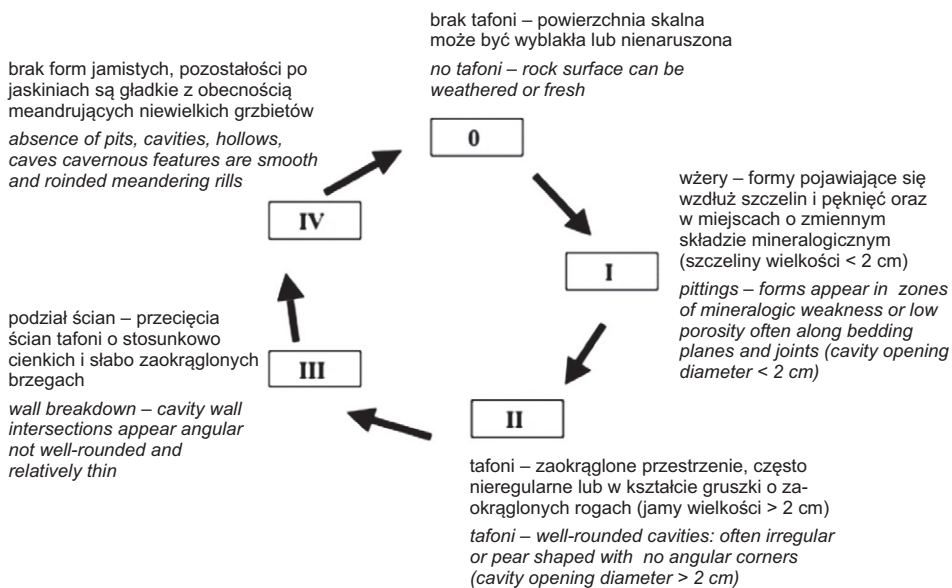
Źródło / Source: Twidale (1982).

C. Andreasson (2008) przytacza czterofazowy model rozwoju tafoni według A. Mellora i innych (1997). Pierwsza faza dotyczy początkowego wietrzenia, które może wykorzystywać drobne nierówności w skałe, takie jak szczeliny czy pory. Kolejne fazy przedstawiają proces formowania niszy.

I.P. Martini (1978) i H. Siedel (2010) stwierdzili, że proces warunkujący rozwój niszy inicjowany jest w obrębie zmian ciągłości powierzchni skalnej – w szczelinach, drobnych pęknięciach oraz porach podpowierzchniowych. Tafoni często rozwijają się w skałach zróżnicowanych pod względem mineralogicznym oraz wzdłuż kontaktu warstw skalnych o różnej przepuszczalności (Calkin i Cailleux, 1962; Dragovich, 1969; Martini, 1978; Mustoe, 1982, 1983; Sancho i Benito, 1990; Mellor i inni, 1997, Rodriguez-Navarro i inni, 1999, McBride i Picard, 2000).

Model zakładający znaczenie podpowierzchniowych szczelin w rozwoju tafoni wypracował również J.Z. Boxerman (2005). Według niego proces tworzenia nisz jest złożony z pięciu etapów, które określone zostały na podstawie cech metrycznych poszczególnych nisz (ryc. 2). Bloki skalne z każdej strony pokryte są licznymi drobnymi otworami. Tafoni w późniejszych etapach rozwoju stają

się szersze i głębsze poprzez połączenie jednego otworu z innym. Są one bardzo dobrze wykształcone, wyraźne, oddzielone stromymi grzbiecikami (fot. 2). Zwykle występują gromadnie w postaci kilku przyległych do siebie form, a ich charakterystyczną cechą jest wzajemny związek szczelin skalnych. W kolejnych etapach silne procesy wietrzeniowe oraz odpowiednie warunki wilgotnościowe powodują powstawanie szerokich stref występowania tafoni złożonych, które w dalszym ciągu poddawane są działalności wietrzenia aż do całkowitego „zeszlifowania” powierzchni skalnej. Dojrzałe, niekiedy o przewieszonych ściankach, otwarte, położone na krawędzi bloków nisze tylko częściowo uwidoczniają się w całkowicie zerodowanej skale (Zwalińska i Dąbski, 2012).



Ryc. 2. Etapy rozwoju tafoni

Schematic representation of tafoni development

Źródło / Source: Baxerman (2005).

Na założeniu znaczącej roli podpowierzchniowych szczelin i porów w procesie tworzenia tafoni jest oparty również model K. Zwalińskiej i M. Dąbskiego (2012). Według nich porowata struktura oraz kontakt z wodą morską na wybrzeżu spowodowały widoczne ślady wietrzenia wokół podpowierzchniowych porów oraz na zewnętrznej powierzchni skalnej. Bezpośredni wpływ na procesy wietrzenia mają związki żelaza glinu i magnezu, które są przyczyną charakterystycznej rdzawej barwy skał budujących tafoni.

Endogeniczne pochodzenie tafoni

Nowy model koncepcyjny inicjacji i wzrostu tafoni w warunkach podziemnych proponują C.G. Roque i inni (2011, 2013). Zaprezentowali hipotezę endogenicznego pochodzenia tafoni. Twierdzą, że przepływ wód podziemnych przez lekko wydłużone, pionowe załamania w strukturze skały prowadzi do powstawania kulistych, zwietrzałych jaskiń w granitach. Według tego modelu stopniowo postępujące procesy eksfoliacji prowadzą do odsłonięcia podziemnych tafoni.

C. G. Roque i inni (2013) powołują się na hipotezy, które prezentuje J.R. Vidal Romani (2008; i inni, 2010). Przedstawia on model endogenicznego powstawania otworów w obrębie spękań grawitacyjnych lub tektonicznych w litej skale. Jego zdaniem naprężenia na styku bloków skalnych powodują powstawanie licznych odkształceń między poszczególnymi fragmentami skały. J.R. Vidal Romani twierdzi, że geneza tafoni związana jest również z działaniem wody kapilarnej, powierzchniowej oraz wód podziemnych. Małe przestrzenie w skałach wpływają na powolny obieg wody, przez co zwiększają czas reakcji między skałą a wodą w porach. Otwory stopniowo powiększają się, tworząc duże przestrzenie między blokami skalnymi. Przestrzenie mają kształt hemisferyczny, przypominający tafoni.

Wietrzenie biologiczne

Wpływ czynników biologicznych na tworzenie tafoni stał się przedmiotem badań między innymi G.E. Mustoe'a (1971) oraz Matsurkury i innych (1989). Hipotezy te zakładają aktywne, destrukcyjne działanie na skałę mikroorganizmów, m.in.: skalotoczowatych. Skalotocze (*Pholadidae*) należą do rodziny morskich małży z rzędu Myoida, obejmującej gatunki drążące w skałach. A.E. Erginal i inni (2007) zwracają uwagę na obecność w obrębie tafoni mikroorganizmów z grupy glonów – *Calotrix confervicola* i *Chorooccus minor* oraz okrzemek z rodziny łozikowatych – *Navicula*.

Model z założeniem wpływu czynników biologicznych na rozwój tafoni wypracował G.E. Mustoe (1982). Przytacza on interesującą hipotezę na temat istnienia rozproszonych kolonii mikroorganizmów, które warunkują rozwój otworów. Tłumacząc genezę tafoni przewiduje wpływ organizmów żyjących w bezpośrednim kontakcie z powierzchnią skalną: bakterii, grzybów, porostów i glonów. Wietrzenie biologiczne niewątpliwie związane jest z wykorzystaniem przez organizmy szczelin i pustek w strukturze skały. Zdaniem G.E. Mustoe (1971), stanowią one naturalną ochronę zewnętrznych krawędzi przed działaniem czynników erozyjnych.

J.C. Canaveras i inni (2001) twierdzili, że w procesie wietrzenia granitu ważną rolę odgrywa aktywność mikrobiologiczna, ponieważ przyspiesza jego rozpad. Ruch jonów poszczególnych minerałów pochodzących z litej skały jest uzależnio-

ny od wysokości pH wodnego roztworu, a jednocześnie ściśle związane z zawartością substancji organicznej oraz aktywnością mikrobiologiczną (Barker i inni, 1997; Vidal Romani i inni, 2010).

Wietrzenie chemiczne – krystalizacja soli

Krystalizacja soli w porach skalnych została uznana za główny proces warunkujący rozwój tafoni. I.P. Martini (1978), W.C. Bradley i inni (1978), R.U. Cooke (1993), T. Sunamura (1996), H.M. French i M. Guglielmin (2000); A. Hacker (2003), N.A. Doe (2004), H.P. Huinink (2004), A.V. Turkington i J.D. Phillips (2004) i E. Hejl (2005), a także inni, potwierdzają tę tezę wynikami badań laboratoryjnych, które wykazały dużą koncentrację chlorku sodu w miejscach największych ubytków masy skalnej w obszarach rozwoju tafoni.

W tych hipotezach zakłada się, że struktury tafoni występują najczęściej wzdłuż wybrzeża, gdzie działalność wody morskiej powoduje osadzanie soli na powierzchniach skalnych (Evans, 1970; Winkler i Singer, 1972; Martini, 1978; Williams i Robinson, 1998; Hacker, 2003). Według tego założenia formy tworzą się przez stałe uwilgotnienie, podczas którego dochodzi do wymiany jonów między związkami mineralnymi a skałą macierzystą (Bradley i inni, 1978; Pye i Mottershead, 1995; Rodriguez-Navarro i inni, 1999; Siedel, 2010). Jony soli, wokół których skrapla się mgła, przenoszone są wraz z wiatrem i osadzone na skałach budujących klify, inicjując ciąg reakcji chemicznych warunkujących powstawanie tafoni (Andrews i inni, 2004). Badania prowadzone na Antarktydzie przez M.M. Prebble (1967) potwierdzają, że tafoni występują bardzo licznie na obszarach, które narażone są na ciągłe działanie wietrzenia chemicznego, związanego z krystalizacją soli morskich w porach skalnych. Obszary te charakteryzuje również mała wilgotność powietrza. Struktury stopniowo zanikają w miarę wzrostu wysokości nad poziomem morza, gdzie napływ soli morskich jest ograniczony.

K. Zwalińska i M. Dąbski (2012) udowodnili, że obecność kationów sodowych oraz anionów chlorkowych w obrębie frontu zwietrzelinowego ma znaczący wpływ na mechanizmy powstawania tafoni w skałach bazaltowych. Ich zdaniem sole uwalniane z minerałów skały macierzystej w wyniku wietrzenia, to głównie kationy sodu, potasu, wapnia i magnezu. Na podstawie licznych analiz autorzy udowadniają, że silne zmiany wietrzeniowe wokół oliwinów i piroksenów oraz mniejsza zawartość krzemionki w warstwie wietrzeniowej świadczą o tym, że mikropustki tworzą się w miejscach po zwietrzałych krzemianach. Silny wiatr transportuje sole morskie do powierzchni skalnej, co doprowadza do stopniowej krystalizacji soli w pęcherzykach i następnie rozpadu ziarnistego na tylnych ścianach nisz. Pozwoliło to po raz kolejny postawić hipotezę o dostawie soli pochodzenia morskiego do powierzchni skalnych oraz o tym, że sole chemicznie rozkładają ziarna krzemionki, doprowadzając tym samym do powstawania

tafoni. Można też twierdzić, że sole przedostające się między ziarna mineralne mogą wywierać nacisk i łatwo powodować dezintegrację fragmentów skały. Silny wiatr usuwa również pozostałości okruchów zwietrzelinowych i wzmacnia kolejne procesy wietrzenia skał na wybrzeżu (Zwalińska i Dąbski, 2012).

Wietrzenie konkrecji węglanowych

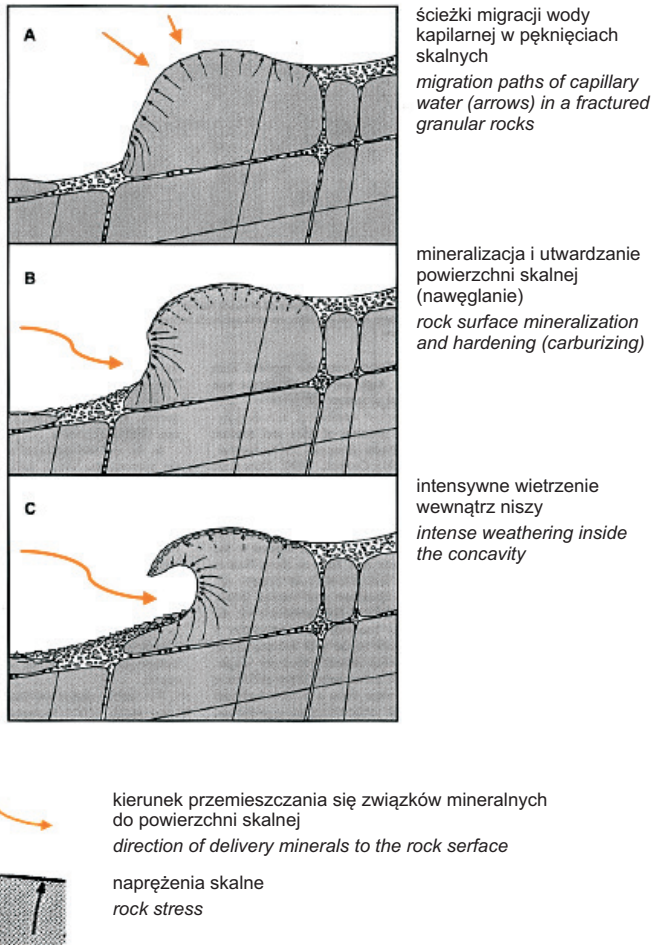
Hipotezy te zakładają obecność związków mineralnych, które mają wpływ na utwardzanie powierzchni skalnej chroniącej zewnętrzne ścianki tafoni przed erozją oraz wietrzenie konkrecji węglanowych.

Jako pierwszy hipotezy te opisał O. Beyer (1912). Zwrócił uwagę na proces mineralizacji (utwardzania) powierzchni skał oraz znaczący wpływ krystalizacji soli morskich w porach skalnych. B.J. Smith (1978) zauważył cienką warstwę ochronną na powierzchni tafoni wykształconych w wapieniach na obszarze Afryki zachodniej, nie był jednak pewien jej wpływu na proces tworzenia tafoni. Teoria ta nie zyskała poparcia wśród badaczy skał magmowych i metamorficznych (Mottershead i Pye, 1994).

Podobną hipotezę rozwoju tafoni przedstawia E. Hejl (2005). Opracował schemat trzech etapów tworzenia nisz, spowodowanych działaniem związków mineralnych (ryc. 3). Jednym z etapów jest mineralizacja (nawęglanie) powierzchni skalnej, powodująca jednocześnie jej utwardzanie. Zmineralizowana powłoka prowadzi do twardnienia ścianek między otworami i tym samym intensywnego wietrzenia wewnątrz niszy. Jest to jedna z teorii, która dokumentuje rozwój tafoni.

J. Adamović (2011) przedstawia teorię dotyczącą znaczenia wietrzenia konkrecji węglanowych. Podkreśla duży udział soli pochodzenia morskiego w powstawaniu tafoni. Twierdzi, że cały proces inicjowany jest przez reakcje powierzchni skalnej z wodą morską, co doprowadza do zmian w zewnętrznej warstwie skalnej. J. Adamović buduje model, według którego najważniejszym etapem rozwoju tafoni jest selektywne wietrzenie konkrecji węglanowych w słabo utwardzonych mineralnie fragmentach powierzchni skalnej.

Podobne zdanie mieli J. L. Conca i G.R. Rossman (1982), którzy sugerowali, że związki cementujące warstwę powierzchniową skały – to głównie związki węglanowe oraz kaolinit pochodzące z samego wnętrza skały macierzystej. Twierdzą, że procesy selektywnego wietrzenia przerywają ciągłość warstwy mineralizowanej, doprowadzając tym samym do powstawania coraz głębszych tafoni. A. Kejonen i inni (1988) wskazują, że utwardzenie mineralne skały wzdłuż płaszczyzn spękania może chronić mniej odporne warstwy skał i wpływać na rozwój tafoni.



Ryc. 3. Schemat powstawania tafoni według Hejla (2005)

Tafoni development scheme according to Hejl (2005)

Podsumowanie

Selektywne oddziaływanie procesów wietrzeniowych prowadzi do powstania różnorodnych form ukształtowania powierzchni skalnych. Tafoni to wklęsłe, koliste formy osiągające różne – niekiedy nawet znaczne, wielometrowe – rozmiary. Tworzą się na pionowych ścianach klifów w niewielkich spękaniach skalnych. Zauważa się, że formy mają podobną genezę. Ponadto, proces powodujący powstawanie pojedynczych form może z czasem uruchamiać inne procesy, powodujące przekształcanie otworów.

Literatura przedmiotu zawiera dużą liczbę aktualnych koncepcji rozwoju tafoni. Można je podzielić na kilka grup hipotez lub potwierdzonych badaniami teorii, w których zakłada się:

- 1) wietrzenie fizyczne – rozpad ziarnisty (Turkington i Phillips, 2004; Motterhead, 1994);
- 2) wietrzenie podpowierzchniowe (Twidale, 1982, 1995, 2008; Boxerman, 2005; Andersson, 2008; Zwalińska i Dąbski, 2012);
- 3) endogeniczne pochodzenie tafoni (Roque, 2011, 2013);
- 4) wpływ czynników biologicznych – udział mikroorganizmów (Mustoe, 1971; Maturkura i inni, 1989);
- 5) wietrzenie chemiczne – krystalizację soli (Martini, 1978; Bradley i inni, 1978; Cooke, 1993; Sunamura, 1996; Hacker, 2003; Doe, 2004; Huinink, 2004; Turkington i Phillips, 2004; Hejl, 2005; Zwalińska i Dąbski, 2012);
- 6) wietrzenie konkrecji węglanowych (Beyer, 1912; Smith, 1978; Hejl, 2005; Conca i Rossman, 1982; Adamović, 2011).

W wymienionych hipotezach podkreśla się wpływ czynników klimatycznych na rozwój tafoni. Główną rolę w kształtowaniu otworów odgrywa prędkość wiatru, która wpływa na przemieszczanie i akumulację na spękanych powierzchniach skalnych soli atmosferycznych morskiego pochodzenia, a następnie szybkie wysuszenie skały (odparowanie wody). Mimo szerokiego rozpowszechnienia tafoni, ich geneza nie jest jasna i nadal jest przedmiotem dyskusji, również dlatego, że formy te występują w różnych warunkach klimatycznych i na różnych rodzajach podłoża. Wszystkie zebrane hipotezy służą dokładniejszemu wyjaśnieniu genezy i dynamiki rozwoju formacji tafoni. Należy jednak nadal prowadzić badania i monitoring procesów kształtujących tafoni, w celu weryfikacji i udoskonalenia wypracowanych koncepcji.

Piśmiennictwo / References

- Adamović J., Mikulaš R., Schweigstillova J., Bohmova V., 2011, *Porosity changes induced by salt weathering of sandstones, Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic*, Acta Geodynamica Geomaterialia, 8, 1, s. 29-45.
- Andreasson C., 2008, *Vittringskavitetter i charnockit i Varberg*, Department of Earth Sciences, Physical Geography, Göteborg.
- Andrews J.E., Brimblecombe P., Jickells T.D., Liss P.S., Reid B.J., 2004, *An Introduction to Environmental Chemistry*, Blackwell Science, Oxford, UK.
- Barker W.W., Welch S.A., Banfield J.F., 1997, *Biogeochemical weathering of silicate minerals*, [w:] *Geomicrobiology: Interactions Between Microbes and Minerals*, Mineralogical Society of America, Washington, s. 391-428.
- Beyer O., 1912, *Alaun und Gips als Mineralneubildungen und als Ursachen der chemischen Verwitterung in den Quadersandstein des sächsischen Kreidegebiets*, Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 63 (1911), s. 429-467.

- Blackwelder E., 1929, *Cavernous rock surfaces of the desert*, American Journal of Science, 17, s. 393-399.
- Boxerman J.Z., 2005, *The evolutionary cycle of the tafone weathering pattern on sandstone at Bean Hollow Beach, Northern California*, Geological Society of America Sectional Meeting. Abstract, 37, 4, s. 79.
- Boxerman J.Z., 2006, *The Evolution of Tafoni on Coastal Sandstones in Northern California*, Unpublished Master's Thesis, Department of Geoscience, San Francisco State University.
- Bradley W.C., Hutton J.T., Twidale C.R., 1978, *Role of salts in development of granitic tafoni, South Australia*, Journal of Geology, 86, 5, s. 647-654.
- Calkin P., Cailleux A., 1962, *A quantitative study of cavernous weathering (Taffonis) and its application to glacial chronology in Victoria Valley, Antarctica*, Zeitschrift für Geomorphologie, 6, 2, s. 317-324.
- Canaveras J.C., Sanchez-Moral S., Soler V., Saiz-Jimenez C., 2001, *Microorganisms and microbially induced fabrics in cave walls*, Geomicrobiology Journal, 18, s. 223-240.
- Conca J.L., Rossman G.R., 1982, *Case hardening of sandstone*, Geology, 10, s. 520-523.
- Cooke R.U., Warren A., Goudie A.S., 1993, *Chapter 5: Weathering forms and processes*, [w:] *Desert Geomorphology*, Taylor & Francis Books Ltd, London, s. 23-44.
- Doe N.A., 2004, *The geometry of honeycomb weathering of sandstone*, Shale, 9.
- Dragovich D., 1969, *The origin of cavernous surfaces (Tafoni) in granitic rocks of Southern South Australia*, Zeitschrift für Geomorphologie, 13, 1, s. 163-181.
- Evans I.S., 1970, *Salt crystallization and rock weathering: A review*, Revue de Géomorphologie Dynamique, 19, s. 153-177.
- Erginal A.E., Gonuz A., Bozcu M., Ates A.S., Cetiner Z.S., 2007, *The first findings on the origin of alveolar disintegration at the western shores of Gelibolu peninsula*, Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 134, s. 27-34.
- French H.M., 1996, *The Periglacial Environment*, Longman, Harlow.
- French H.M., Guglielmin M., 2000, *Cryogenic weathering of granite, Northern Victoria Land, Antarctica*, Permafrost and Periglacial Processes, 11, s. 305-314.
- Goudie A.S., 2004a, *Honeycomb weathering*, [w:] *Encyclopedia of Geomorphology*, red. A.S. Goudie, Routledge, London-New York, s. 20.
- Goudie A.S., 2004b, *Weathering pit*, [w:] *Encyclopedia of Geomorphology*, red. A.S. Goudie, Routledge, London-New York, s. 1115-1116.
- Goudie A.S., 2004c, *Tafoni*, [w:] *Encyclopedia of Geomorphology*, red. A.S. Goudie, Routledge, London-New York, s. 1034-1035.
- Hacker A., 2003, *Controls of tafoni development in Castle Rocks, Idaho* keck.wooster.edu/archives/symposium/03/idahopdfs/HackernewAbs.pdf (1.01.2008).
- Hall K., André M.F., 2006, *Temperature observations in Antarctic tafoni: implications for weathering, biological colonization, and tafoni formation*, Antarctic Science, 18, 3, s. 377-384.
- Hejl E., 2005, *A pictorial study of Tafoni development from the 2nd Millennium BC*, Geomorphology, 64, 1-2, s. 87-95.
- Huinink H. P., Pel L., Kopinga K., 2004, *Simulating the growth of Tafoni*, Earth Surfaces Process and Landforms, 29, s. 1225-1233.
- Jennings J.N., 1968, *Tafoni*, [w:] *Encyclopedia of Geomorphology*, red. R.W. Fairbridge, Reinhold, New York, s. 1103-1104.
- Klimaszewski M., 1994, *Geomorfologia*, PWN, Warszawa.
- Kejonen A., Kielosto S., Lahti S.I., 1988, *Cavernous weathering forms in Finland*, Geografiska Annaler, 70A, 4, s. 315-322.

- Martini I. P., 1978, *Tafoni weathering, with examples from Tuscany, Italy*, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 22, 1, s. 44-67.
- Matsurkura Y., Matsuoka N., Yano N., 1989, *A preliminary study on tafoni and honeycombs in Nojima-Zaki, Boso Peninsula, Japan*, Annual Report, Institute of Geoscience, University of Tsukuba, 25, s. 29-32.
- McBride E.F., Dane Picard M., 2000, *Origin and development of tafoni in tunnel spring tuff, Crystal Peak, Utah, USA*, *Earth Surfaces Processes and Landforms*, 25, s. 869-879.
- McBride E.F., Dane Picard M., 2004, *Origin of honeycombs and related weathering Forms in Oligocene Macigno sandstone, Tuscan coast near Livorno, Italy*, *Earth Surfaces Processes and Landforms*, 29, s. 713-735.
- Mellor A., Short J., Kirkby S.J., 1997, *Tafoni in the El Chorro Area, Andalusia, Southern Spain*, *Earth Surfaces Processes and Landforms*, 22, s. 817-833.
- Migoń P., 2006, *Granite Landscapes of the World*, United States by Oxford University Press, New York.
- Mottershead D.N., Pye K., 1994, *Tafoni on Coastal Slopes, South Devon, UK*, *Earth Surfaces Processes and Landforms*, 19, s. 543-563.
- Mustoe G.E., 1971, *Biochemical Origin of Coastal Weathering Features in the Chuckanut Formation of Northwest Washington*, Western Washington State College, Washington.
- Mustoe G.E., 1982, *Origin of honeycomb weathering*, *GSA Bulletin*, 93, 2, s. 108-115.
- Mustoe G.E., 1983, *Cavernous weathering in the Capitol Reef Desert, Utah*, *Earth Surfaces Processes and Landforms*, 8, s. 517-526.
- Pestrong R., 1990, *Tafoni*, *Pacific Discovery*, 43, s. 14-20.
- Prebble M.M., 1967, *Cavernous weathering in the Taylor Dry Valley, Victoria Land, Antarctica*, *Nature*, 216, s. 1194-1195.
- Pye K., Mottershead D.N., 1995, *Honeycomb weathering of carboniferous sandstone in a sea wall at Weston-super-Mare, UK*, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 28, 4, s. 333-347.
- Rodriguez-Navarro C., Doehne E., 1999, *Salt weathering: Influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern*, *Earth Surfaces Process and Landforms*, 24, s. 191-209.
- Rodriguez-Navarro C., Doehne E., Sebastian E., 1999, *Origins of honeycomb weathering: The role of salts and wind*, *Geological Society of America Bulletin*, 111, 8, s. 1250-1255.
- Roqué C., Linares R., Rodríguez R., Zarroca M., 2011, *Granite caves in the north-east of the Iberian Peninsula. Artificial hypogea versus tafoni*, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 55, 3, s. 341-364.
- Roqué C., Zarroca M., Linares R., 2013, *Subsurface initiation of Tafoni in granite terrains - geophysical evidence from NE Spain: Geomorphological implications*, *Geomorphology*, 196, s. 94-105.
- Sancho C., Benito G., 1990, *Factors controlling Tafoni weathering in the Ebro Basin (NE Spain)*, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 34, 2, s. 165-177.
- Siedel H., 2010, *Alveolar weathering of Cretaceous building sandstones on monuments in Saxony, Germany*, Geological Society, London, Special Publications, 333, s. 11-23.
- Smith B.J., 1978, *The origin and geomorphic implications of cliff foot recesses and Tafoni on limestone Hamadas in the Northwest Sahara*, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 22, 1, s. 21-43.
- Strini A., Guglielmin M., Hal K., 2008, *Tafoni development in a cryotic environment: an example from Northern Victoria Land, Antarctica*, *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, s. 1502-1519.

- Sunamura T., 1996, *A physical model for the rate of coastal tafoni development*, The Journal of Geology, 104, s. 741-748.
- Tschang H.-L., 1974, *Geomorphological observations on the Tafoni forms of Hong Kong*, The Chung Chi Journal, 13, 1, s. 32-51.
- Turkington A.V., 1998, *Cavernous weathering in sandstone: lessons to be learned from natural exposure*, Quarterly Journal of Engineering Geology, 31, 4, s. 375-383.
- Turkington A.V., Phillips J.D., 2004, *Cavernous weathering, dynamical instability and self-organization*, Earth Surface Processes and Landforms, 29, s. 665-675.
- Twidale C.R., 1982, *Granite Landforms*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam.
- Twidale C.R., Campbell E.M., 1995, *The various origins of minor granite landforms*, Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe Coruña, 20, s. 281-306.
- Twidale C.R., Bourne J.A., 2008, *Caves in granitic rocks: types, terminology and origins*, Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe Coruña, 33, s. 35-57.
- Twidale C.R., Romani V., 2010, *Structural or climatic control in granite landforms? The development of sheet structure, foliation, boudinage, and related features*, Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe Coruña, 35, s. 189-208.
- Vidal Romani J.R., 2008, *Forms and structural fabric in granite rocks*, Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe Coruña, 33, s. 175-198.
- Vidal Romani J.R., Sanjurjo Sanchez J., Vaqueiro M., Fernandez Mosquera D., 2010, *Spaleotherms of granite caves*, Comunicações Geológicas, 97, s. 71-80.
- Williams R.G.B., Robinson D.A., 1998, *Weathering of sandstone by alunogen and alum salts*, Quarternary Journal of Engineering Geology, 31, 4, s. 369-373.
- Winkler E.M., Singer P.C., 1972, *Crystallization pressure of salts in stone and concrete*, Geological Society of America Bulletin, 83, 11, s. 3509-3514.
- Young A.R.M., 1987, *Salt as an agent in the development of cavernous weathering*, Geology, 15, s. 962-966.
- Zwalińska K., Dąbski M., 2012, *Cavernous weathering forms in SW Iceland: a case study on weathering of basalts in a cold temperate maritime climate*, Miscellanea Geographica, 16, 1, Warszawa, s. 1-6.

[Wpłynęło: listopad 2013; poprawiono: styczeń 2014 r.]

KATARZYNA ZWALIŃSKA

ORIGINS OF 'TAFONI' WEATHERING FORMS – A LITERATURE REVIEW

Tafoni may be defined as cavernous weathering hollows with characteristic circular or elliptical openings and relatively deep, concave, hemispherical or ellipsoidal interiors. Cavernous weathering forms (alveoli, honeycomb, tafoni) can develop in a variety of climates. However, some universal environmental factors are necessary for their development.

All theories concerning the formation of tafoni can be assigned to one or more of 6 causes, i.e.

- 1) physical weathering – granular disintegration (Turkington and Phillips, 2004; Mottershead, 1994);
- 2) subsurface weathering (Twidale, 1982; 1995, 2008; Boxerman, 2005; Andersson, 2008, Zwalińska and Dąbski, 2012);

- 3) endogenous origins (Roque, 2011, 2013);
- 4) biological weathering – the impact of micro-organisms (Mustoe, 1971; Mastanoka and Yano, 1989);
- 5) chemical weathering – reactions taking place within rock surface in the presence of seawater (Martini, 1978; Bradley *et al.*, 1978; Cooke 1993, Sunamura 1996; Hacker, 2003; Doe, 2004; Huinink, 2004; Turkington and Phillips, 2004; Hejl, 2005; Zwalińska and Dąbski, 2012);
- 6) weathering of carbonate concretions (Beyer, 1912; Smith, 1978; Hejl, 2005; Conca and Rossman, 1982; Adamović, 2011).

It seems likely that the development of the cavern size depends on climatic factors like the periodicity of wetting, length of the desiccation period, and temperature and humidity profiles inside the cavity, as well as lithological factors such as rock porosity and permeability. The frequency of wettings with saline solutions and length of periods of drying between wettings also seem to play a significant role in tafoni formation. Selective rock weathering leading to the development of peculiar phenomena like tafoni has been examined extensively in a variety of climates and rock types (Benito and Sancho, 1990; Doe, 2004; Hacker, 2003; Hall and André, 2006; Hejl, 2005; Jennings, 1968; Martini, 1978). Goudie (2004a, 2004b) provides useful summaries.

The work of Boxerman (2005) and Hejl (2005) is based on a sequential model of tafoni evolution (Figs. 1, 2). Pits in rock enlarge and deepen, gradually growing into wider cavities. Eventually, the ‘tafones’ join when the spaces between them erode, and disappear, transitioning the tafoni from a stage of enlargement to a stage of coalescence. This sequential provides for a better understanding of tafoni formation. Cavernous weathering forms frequently develop under maritime climatic conditions, where they are influenced by the delivery of salt and water to rock faces by sea aerosol and snow (André and Hall, 2005; French, 1996; French and Guglielmin, 2000).

The hypotheses presented provide a better explanation of the origins and dynamics of the formation of tafoni. However, because of the differences in climatic conditions and the variety of rock types where it occurs, its origin is unclear and still under discussion.

