

Życie na skałach i jego konsekwencje

MAGDALENA OWCZAREK-KOŚCIELNIAK

OWCZAREK-KOŚCIELNIAK, M. 2017. Life on rocks and its consequences. *Fragmenta Floristica et Geobotanica Polonica* 24(1): 3–16. Kraków. e-ISSN 2449-8890, ISSN 1640-629X.

ABSTRACT: Over the centuries stone has been one of the most popular raw materials, used for construction as well as for art. For years it was believed that the factors responsible for weakening and degradation of stone are mainly abiotic ones such as UV radiation, winter conditions and water. With increased interest in organisms inhabiting extreme habitats, more and more data have been gathered on a number of organisms capable of colonizing stone. Detailed research has yielded information on the true role that these rock-inhabiting organisms play in the transformation of stone material. The article reviews the development and functioning of bacteria, cyanobacteria, algae, lichenized and non-lichenized fungi, mosses and higher plants on rock, with special attention to building and decorative stone, together with detailed information on the deteriorative action that these organisms exert on the inhabited substrate.

KEY WORDS: biodeterioration, bioleaching, biotransformation, lithobionts, stone

M. Owczarek-Kościelniak, Instytut Botaniki im. W. Szafera Polskiej Akademii Nauk, ul. Lubicz 46, 31-512 Kraków, Polska; e-mail: m.owczarek@botany.pl

WSTĘP

Skały nie należą do gościnnych dla życia środowisk, niemniej jednak stanowią one siedlisko dla przedstawicieli zróżnicowanych taksonomicznie i biologicznie grup organizmów. Skały poddawane są silnemu promieniowaniu UV, dynamicznie zmieniającym się temperaturom, cechuje je wysokie stężenie elektrolitów, niska względna wilgotność, dostępna zresztą sporadycznie oraz niewielka dostępność substancji odżywczych, dlatego postrzegane są jako środowiska ekstremalne.

Skały – zarówno występujące naturalnie, jak i te wykorzystywane przez człowieka w budownictwie i sztuce, są kolonizowane przez organizmy cechujące się podwyższoną tolerancją na stres, potrafiące tworzyć wielogatunkowe ekosystemy, dzięki którym ich funkcjonowanie ulega poprawie (RUIBAL i in. 2008). Skład gatunkowy takich ekosystemów może znacząco się różnić w zależności od warunków środowiskowych oraz właściwości skały. Rozwój życia na skałach rodzi szereg konsekwencji dla podłoża, z czego większość prowadzi do obniżenia jego wartości i jakości.

Celem pracy jest przegląd wiadomości o kolonizacji skał, w szczególności wykorzystywanych przez człowieka w sztuce i budownictwie (np. rzeźby, kamienne elementy

dekoracyjne, nagrobki, budownictwo infrastrukturalne i mieszkalne) przez bakterie, cyjanobakterie, glony, grzyby nie- i lichenizujące, mszaki i rośliny wyższe oraz usystematyzowanie wiadomości na temat ich oddziaływania na zasiedlane podłoże.

ŻYCIE NA SKAŁACH

Organizmy żyjące w środowisku skalnym nazywane są litobiontami. Te, które są w stanie aktywnie penetrować wnętrza skał nazywane są euendolitami, żyjące w pęknięciach i przestrzeniach skał – chazmoendolitami, otaczające się skorupą mineralną – kryptoendolitami, a te żyjące wyłącznie na powierzchni skał – epilitami. Podejrzewa się, że penetracja do wnętrza skał przez różne organizmy jest odpowiedzią na dostępność składników odżywczych, zagęszczenie innych organizmów (ucieczka przed konkurencją) lub jest sposobem na zabezpieczenie się przed wysuszeniem, ekstremalnymi temperaturami, promieniowaniem UV, zanieczyszczeniami oraz odrywaniem przez płynącą wodę (MITCHELL & GU 2000; COCKELL & HERRERA 2008).

Organizmy środowisk skalnych można pogrupować ze względu na sposób odżywiania. Glony, cyjanobakterie, wątrobowce, mszaki i rośliny wyższe środowisk skalnych zalicza się do organizmów fotolitoautotroficznych, grzyby do chemoorganotroficznych, a bakterie do chemolitoautotroficznych lub chemoorganotroficznych (WARSCHIED & BRAAMS 2000).

Współcześnie uważa się, że sukcesja mikrobiologiczna na skałach jest zazwyczaj inicjowana przez samowystarczalne mikroorganizmy fototroficzne, które są w stanie wytworzyć biofilm (WARSCHIED & BRAAMS 2000). Ich funkcjonowanie jest zależne od dostępności światła i wilgoci, ale może być dodatkowo promowane na przykład dzięki dostępności azotu obecnego w powietrzu i pochodzącego między innymi z nawozów mineralnych powszechnie stosowanych na terenach wiejskich (ORTEGA-CALVO i in. 1995). Organizmy te zamieszkują przede wszystkim powierzchnie skał, jakkolwiek mogą częściowo wstąpić do systemu porów wewnątrz nich (WARSCHIED & BRAAMS 2000). Głównym widocznym efektem bytowania litobiontów na materiale skalnym jest zmiana jego wyglądu, związana z produkcją pigmentów oraz z formacją biofilmu.

W skład biofilmu wchodzi zarówno organizmy auto-, jak i heterotroficzne. Jest to mieszanina komórek różnych mikroorganizmów, głównie bakteryjnych, zawieszonych w matriks – warstwie zewnątrzkomórkowych substancji polimerowych (ang. *extracellular polymeric substances* – EPS), takich jak polisacharydy, białka, glikoproteiny, tłuszcze, kwasy tłuszczowe i enzymy. Na powierzchni tej struktury osadzają się różne substancje organiczne pochodzące z otaczającego środowiska, transportowane przez deszcz lub wiatr. Spaliny samochodowe, dym przemysłowy, a nawet dym z palenisk domowych są ważnym źródłem substancji organicznych w formie aerozoli. Z powietrza mogą zostać pozyskane węglowodory aromatyczne, krótkołańcuchowe kwasy karboksylowe, długołańcuchowe kwasy tłuszczowe, a nawet alkohole (SAIZ-JIMENEZ 1993).

Substancje obecne w biofilmie odgrywają znaczącą rolę w ochronie i podtrzymaniu życia wchodzących w jego skład mikroorganizmów, stanowiąc ochronę przed wpływem szybko zmieniającej się temperatury, substancji toksycznych oraz przed wysuszeniem. Ze względu

na swoje właściwości adhezyjne nie tylko mocują one komórki do podłoża, ale również umożliwiają wyłapywanie substancji odżywczych bezpośrednio z powietrza (COSTERTON & LAPPIN-SCOTT 1995). Dla organizmów heterotroficznych biofilm stanowić może źródło pokarmowe, tym samym wspierając powstanie na skałach złożonych ekosystemów.

Rozwój organizmów litobiontycznych jest procesem długotrwałym. Kolonizacja świeżo odsłoniętej skały zachodzi zazwyczaj w pierwszych dwóch latach jej ekspozycji, natomiast formacja w pełni wykształconych organizmów, na przykład plechy porostów, trwa nawet kilkanaście lat (HOPPERT i in. 2004). Bakterie, cyjanobakterie, glony, grzyby nielichenizujące oraz zlichenizowane, mszaki, a nawet rośliny wyższe są zdolne do kolonizacji podłoża skalnego.

Bakterie

Bakterie chemoorganotroficzne w środowisku skalnym są reprezentowane głównie przez Gram-dodatnie maczugowce i promieniowce (URZI & REALINI 1998). Ich występowanie w środowisku jest zależne od dostępności związków, które są w stanie wykorzystywać.

Wiele gatunków bakterii występuje w obrębie plechy porostów, a nie bezpośrednio na podłożu skalnym. Zdecydowanie utrudnia to rozróżnienie, czy obserwowane mikroby faktycznie są litobiontami, czy też tylko zasiedlają litobiontyczne organizmy. Dotychczas na materiale skalnym stwierdzono występowanie przedstawicieli rodzajów *Acetobacter*, *Agrobacterium*, *Bacillus*, *Brevibacillus*, *Geodermatophilus*, *Kocuria*, *Microbacterium*, *Micrococcus*, *Micromonospora*, *Ochrobacter*, *Pseudomonas*, *Rhodobacter*, *Staphylococcus*, *Streptomyces*, *Thiobacillus* i bakterii siarkowych (FLORES i in. 1997; URZI & REALINI 1998; CAPPITELLI i in. 2007; DIEP & HIEU 2013). W otoczeniu porostów stwierdzono między innymi przedstawicieli typów *Acidobacteria*, *Actinobacteria*, *Proteobacteria* (klasy *Alpha-*, *Beta-*, *Gammaproteobacteria*), *Bacteroidetes*, *Chloroflexi*, *Deinococcus-Thermus* (rodzaj *Deinococcus*), *Firmicutes*, *Planctomycetes* oraz *Tenericute* (BIJELLAND i in. 2011).

Cyjanobakterie i glony

Związek glonów ze skałami naturalnymi jest najczęściej dostrzegany w okolicach źródeł wody (np. strumienie, potoki, jeziora, itp.), natomiast liczba gatunków znalezionych na wykonanych z kamienia budowlach jest znacząco niższa (FLORES i in. 1997; ORTEGA-MORALES i in. 2000; SAIZ-JIMENEZ 2012). Do rozwoju na skałach organizmy te potrzebują wilgoci, dlatego też preferują porowate substraty zapewniające wyższą retencję wody.

Cyjanobakterie są jedną z najliczniejszych grup organizmów fototroficznych znajdujących na utworach skalnych (ORTEGA-MORALES i in. 2000; TOMASELLI i in. 2000; DUANE 2001). Choć zaliczane są do bakterii, zwyczajowo analizowane są równoległe z glonami.

Glony i cyjanobakterie określane są mianem pierwotnych producentów. W środowisku skalnym ich niskie wymagania odżywcze wraz z autotrofizmem umożliwiają kolonizację niesprzyjającego podłoża niezależnie od występowania innych organizmów.

Ze środowiskiem skał związani są przedstawiciele glonów eukariotycznych i cyjanobakterii z rodzajów *Apatococcus*, *Aphanocapsa*, *Asterococcus*, *Borzia*, *Bracteacoccus*,

Calothrix, Chlorella, Chlorococcum, Chlorogloopsis, Chlorokybus, Chlorosarcinopsis, Chlorosphaeropsis, Choricystis, Chroococcidiopsis, Chroococcus, Chrysocapsa, Cocomyxa, Cosmarium, Ctenocladus, Cyanidium, Cyanosarcina, Dermocarpa, Desmodesmus, Dimorphococcus, Elliptochloris, Gloeocapsa, Gloeotheca, Haematococcus, Hantzchia, Heterococcus, Klebsormidium, Leptongbya, Microcoleus, Muriella, Myxosarcina, Nodularia, Nostoc, Oscillatoria, Phormidium, Planktosphaeria, Plectonema, Pleurastrum, Pleurocapsa, Protococcus, Protoderma, Pseudendoconium, Pseudocapsa, Scytonema, Stichococcus, Stigeoclonium, Stigonemata, Synechococcus, Synechocystis, Tolypothrix, Trentepohlia, Xenococcus spp. oraz nieliczne okrzemki (ARIÑO & SAIZ-JIMENEZ 1996; FLORES i in. 1997; URZI & REALINI 1998; ORTEGA-MORALES i in. 2000; TOMASELLI i in. 2000; CRISPIM i in. 2003; GAYLARDE & GAYLARDE 2005; PERAZA-ZURITA i in. 2005; PRIETO & SILVA 2005; UHER 2008; AZUA-BUSTOS i in. 2009; SAIZ-JIMENEZ 2012; COUTIHNO i in. 2013; GOLUBIĆ i in. 2015; OWCZAREK-KOŚCIELNIAK i in. 2016).

Grzyby zlichenizowane (porosty)

Kolonizacja materiału skalnego przez porosty jest zależna od warunków klimatycznych i środowiskowych, między innymi ekspozycji, wilgotności, nasłonecznienia, oddziaływań antropogenicznych, a nawet od występowania ptasich ekskrementów (LISCI i in. 2003). W zależności od typu plechy intensywność ich oddziaływania na podłoże jest zróżnicowana.

Najczęściej odnotowywane są porosty o plesze skorupiastej, mniej liczne są porosty o plesze listkowatej i krzaczkowatej. Lista gatunków związanych z tego rodzaju substratem jest długa, na skałach licznie występują przedstawiciele rodzajów *Amandinea, Aspicilia, Bacidia, Bagliettoa, Caloplaca, Candelariella, Catapyrenium, Chrysothrix, Clauzadea, Collema, Diploschistes, Dirina, Fuscidea, Haematomma, Hydropunctaria, Lecania, Lecanora, Lecidea, Lecidella, Lepraria, Micarea, Ochrolechia, Opegrapha, Ophioparma, Pertusaria, Phaeophyscia, Physcia, Placinitium, Porina, Porpidia, Rhizocarpon, Roccella, Sarcogyne, Staurothele, Tephromela, Trapelia, Trapeliopsis, Toninia, Verrucaria, Xanthoria* i innych (ARIÑO & SAIZ-JIMENEZ 1996; ARIÑO i in. 1997; MATTHES i in. 2000; MOTTERSHEAD & LUCAS 2000; APTROOT & JAMES 2002; BJELLAND & THORSETH 2002; LISCI i in. 2003; CARTER & VILES 2004; BJELLAND & EKMAN 2005; NASCIBENE & SALVADORI 2008; DE LOS RÍOS i in. 2009; NASCIBENE i in. 2009; BJELLAND i in. 2011; SPITALE & NASCIBENE 2012; OWCZAREK-KOŚCIELNIAK i in. 2016). Czynnikiem istotnie wpływającym na skład lichenobioty na podłożu skalnym jest jego charakter chemiczny.

Grzyby Nielichenizujące

Spośród chemoorganotrofów grzyby są prawdopodobnie najlepiej przystosowanymi do życia na i w skale. Wzrost strzępkowy bądź mikrokolonialny, dodatkowo wzmocniony przez oddziaływanie korozyjne, umożliwia im penetrację wewnętrznych przestrzeni skał (DE LA TORRE i in. 1991, 1993a, b; LYALIKOVA & PETRUSHKOVA 1991; DE LA TORRE & GOMEZ-ALARCON 1994).

Na skałach i budowlach kamiennych znajdowano m.in. przedstawicieli grzybów, które ze względu na swoje szerokie spektrum środowiskowe nie są postrzegane jako litobionty

sensu stricto, np. z rodzajów: *Acremonium*, *Alternaria*, *Aspergillus*, *Aureobasidium*, *Bipolaris*, *Chaetomium*, *Cladosporium*, *Cordyceps*, *Didymella*, *Embellisia*, *Entrophospora*, *Epicoccum*, *Exophiala*, *Fusarium*, *Mortierella*, *Mucor*, *Nectria*, *Pestalotiopsis*, *Penicillium*, *Phaeococcomyces*, *Phaeosphaeria*, *Phialophora*, *Phoma*, *Pseudeurotium*, *Rhizopus*, *Trichoderma*, *Ulocladium* czy *Zasmidium* (URZI & REALINI 1998; WILCZYŃSKA-MICHALIK 2004; DE LOS RÍOS i in. 2009; CHLEBICKI & MAJEWSKA 2010; MAJEWSKA 2011; MILLER i in. 2012; OGÓREK i in. 2013; OWCZAREK-KOŚCIELNIAK 2014; PUSZ i in. 2014) oraz przedstawicieli rodzajów *Arthrocatena*, *Bradomyces*, *Capnobotryella*, *Catenulomyces*, *Coniosporium*, *Constantinomyces*, *Cryomyces*, *Devriesia*, *Elasticomyces*, *Friedmanniomyces*, *Hyphoconis*, *Incertomyces*, *Knufia*, *Lapidomyces*, *Lithophila*, *Meristemomyces*, *Monticola*, *Oleoguttula*, *Perusta*, *Petrophila*, *Rachicladospodium*, *Ramimonilia*, *Recurvomyces*, *Sarcinomyces*, *Saxomyces*, *Saxophila* i *Vermiconia*, które są związane głównie lub wyłącznie z tym substratem i określa się je mianem grzybów skalnych (ang. rock-inhabiting fungi, RIF) (STERFLINGER i in. 1997; ONOFRI i in. 1999; SERT i in. 2007 a, b; SELBMANN i in. 2008, 2013; EGIDI i in. 2014; HUBKA i in. 2014; ISOLA i in. 2016).

Mszaki i rośliny wyższe

Mszaki mogą żyć na materiale skalnym, jednak wyraźnie wybierają zacienione i wilgotne powierzchnie poziome. Zazwyczaj kolonizują skały przed roślinami wyższymi. Na podłożu skalnym odnotowano m.in. przedstawicieli rodzajów *Andreaea*, *Brachythecium*, *Chrysocladium*, *Didymodon*, *Eurohypnum*, *Grimmia*, *Haplocladium*, *Hedwigium*, *Mnium*, *Orthotrichum*, *Plagiomnium*, *Rhodobryum*, *Schistidium*, *Syntrichia* i *Rhodobryum* (LISCI i in. 2003; SPITALE & NASCIBENE 2012; NASCIBENE i in. 2008, 2009).

LISCI i in. (2003) opisali dwa modele sukcesji roślin na przykładzie kolonizacji budynków. Pierwszy z nich zakłada wcześniejszą kolonizację przez bakterie, grzyby i porosty w odpowiedzi na sprzyjające warunki abiotyczne. Rozwój tych organizmów niejako tworzy podłoże do kiełkowania nasion roślin pionierskich. Drugi z modeli opisuje kolonizację powierzchni poziomych, gdzie rolę pierwotnego kolonizatora pełnią mszaki. Kolonizacja surowca skalnego przez rośliny jest powolna, na przykład pokrycie pionowej ściany budynku może zajmować około 10 lat (LISCI i in. 2003). Kolonizacja skał naturalnych przebiega analogicznie.

SKUTKI ODDZIAŁYWANIA ORGANIZMÓW LITOBIONTYCZNYCH NA SKAŁY

Procesy życiowe organizmów zasiedlających skały – występujące naturalnie oraz wykorzystywane przez człowieka, nie pozostają bez wpływu na podłoże. W odniesieniu do kamienia budowlanego i dekoracyjnego, zmiany powodowane przez te organizmy postrzegane są jako niekorzystny i szkodliwy proces nazywany biodeterioracją. Oddziaływania biologiczne na skały mogą przejawiać się pośrednio, gdy rozwój organizmów żywych powoduje zmiany warunków panujących na kolonizowanym podłożu (zmiany estetyczne – pierwotne i wtórne, pre-kondycjonowanie podłoża, oddziaływanie mechaniczne) oraz bezpośrednio, gdy egzystencja organizmów żywych wpływa na zmiany fizykochemiczne podłoża (oddziaływanie mechaniczne oraz chemiczne – pierwotne i wtórne).

Pierwotne pośrednie oddziaływanie mikroorganizmów przejawia się powstawaniem przebarwień, które prowadzą do poważnych zmian w wyglądzie zewnętrznym, a także mogą skutkować zmianami właściwości hydrotermicznych skał (GARTY 1991; DORNIEDEN i in. 2000; WARSCHEID 2000). Wśród przebarwień biogenicznych wyróżnia się: (a) skaży czarne (melaniny, melanoidyny, produkty rozkładu chlorofilu oraz minerałów manganowych i żelazowych), (b) skaży zielone (barwniki fotosyntetyczne pochodzące z glonów i sinic), (c) skaży żółto-pomarańczowo-brązowe (karoteny i karotenoidy, produkty degradacji chlorofilu, takie jak fikobiliproteiny), (d) skaży jaskrawo pomarańczowe, różowe i czerwone (pigmenty bakterii halofilnych, produkty degradacji sinic i glonów wzbogacone żelazem) (WARSCHEID & BRAAMS 2000).

Wtórne pośrednie oddziaływania fizyczne mikroorganizmów polegają na tworzeniu skorup na powierzchni materiału skalnego poprzez wspieranie naturalnych procesów zachodzących w przyrodzie, takich jak wpływ gazów atmosferycznych o charakterze kwasowym, odkładanie cząstek stałych z powietrza, zmiana bilansu wodnego w warstwach przypowierzchniowych skały, itp. oraz przez formowanie biofilmów (WARSCHEID i in. 1991; WARSCHEID & BRAAMS 2000). Pre-kondycjonowanie podłoża obejmuje wszystkie działania organizmów prowadzące do stworzenia lepszych warunków do życia dla innych organizmów żywych. Bakterie są w stanie wykorzystywać i rozkładać różne związki, które w niezmienionej formie byłyby niedostępne dla innych organizmów. Organizmy te mają zdolność do pozyskiwania substancji odżywczych m.in. z zanieczyszczeń powietrza. Do wyłapywania różnych substancji z atmosfery przyczynia się także wytwarzanie przez litobionty EPS, do którego mogą one przylgnąć (PERAZA-ZURITA i in. 2005; VILES i in. 2002; VILES & GORBUSHINA 2003).

Mechaniczne oddziaływania pośrednie obejmują „pracę” matriks zewnątrzkomórkowego, zmianę bilansu wodnego oraz miejscowe zmiany w pochłanianiu energii słonecznej. Matriks, w którym zawieszony są komórki mikroorganizmów występujących na skałach, w zależności od warunków wodnych pęcznieje i obkurcza się, co powoduje rozluźnienie, a w konsekwencji niszczenie struktury mineralnej skały (KINNIMENT & WIMPENNY 1990; BEECH & GAYLARDE 1991; ORTEGA-CALVO i in. 1991; DE LA TORRE i in. 1993a; PRIETO i in. 1994; DORNIEDEN i in. 2000; DONLAN 2002). Rozszerzanie się matriks na skutek pochłaniania wilgoci ogranicza wnikanie wilgoci do jej wnętrza, lecz jednocześnie może przyczynić się do uwięzienia wody pomiędzy ziarnami czy kryształami mineralnymi (HALL & OTTE 1990; CUTLER i in. 2013). W sezonie zimowym, szczególnie w obszarach klimatu umiarkowanego, tego typu wahania poziomu retencji wodnej w szczelinach czy pęknięciach skał doprowadza do uszkodzeń wywoływanych przez tworzący się pod powierzchnią skały lód (tzw. zamróz). Konsekwencją tego zjawiska są odpryski i łuszczenie skały (BOLIVAR & SANCHES-CASTILO 1997). Strzępki porostów penetrujące szczeliny w podłożu również rozszerzają się i obkurczają w zależności od wilgotności i, podobnie jak biofilm, powodują niszczenie struktury skały (GAYLARDE & MORTON 2002; DE LOS RÍOS i in. 2004).

Rozwój ciemno pigmentowanych organizmów w obrębie skał skutkuje zwiększeniem pochłaniania promieniowania słonecznego, wpływając na przyśpieszenie wietrzenia. Pochłonięta energia może być przekazywana siecią komórek do wnętrza skały, powodując powolne rozluźnianie jej struktury (URZI & REALINI 1998; MILLER i in. 2012). Ciemno

zabarwione plechy porostów powodują wzrost gradientu termicznego skały, który może prowadzić do szybszego jej rozpadu (CARTER & VILES 2004).

Do mechanicznych oddziaływań bezpośrednich organizmów litobiontycznych należą: penetracja skały i tworzenie biogennych zagłębień oraz wypełnianie już istniejących pęknięć i szczelin wydzielinami zewnątrzkomórkowymi, co powoduje miejscowy wzrost ciśnienia mechanicznego działającego na skałę. Bakterie chemolitotroficzne i nitkowate, cyjanobakterie, niektóre glony oraz grzyby mogą wytwarzać podłużne lub miseczkowate zagłębienia, których większa liczba może skutkować tworzeniem biogennych tuneli w substracie kamiennym (DANIN & CANEVA 1990; GERDES i in. 1994; ASCASO i in. 2002; ORTEGA-MORALES i in. 2005; GORBUSHINA 2007; HORATH & BACHOFEN 2009; CUZMAN i in. 2010; STÜCK i in. 2011; RAGON i in. 2012; HALLMANN i in. 2013; GOLUBIĆ i in. 2015). Umiejętność przebudowy podłoża mineralnego może zwiększać odporność tych organizmów na biocydy, m.in. poprzez ukrywanie się pod powłoką mineralną (BOLIVAR & SANCHES-CASTILO 1997), co znacząco utrudnia np. przeprowadzenie skutecznych zabiegów konserwatorskich.

Działania prowadzone przez bakterie chemolitotroficzne, takie jak bakterie siarkowe, nityfikujące i zdolne do utleniania żelaza bądź manganu, obejmują reakcje kwasowo-zasadowe oraz kompleksowania, procesy enzymatyczne, utlenianie, redukcję kompleksów siarkowych, jak też degradację kompleksów i chelatów metaloorganicznych. Stanowią one najważniejszą grupę reakcji chemicznych wpływających na podłoże, poprzez pierwotne bezpośrednie oddziaływania chemiczne (WARSCHIED & BRAAMS 2000). Przeprowadzane reakcje przyczyniają się do przekształceń chemicznych związków mineralnych, w tym takich, które czynią nowotworzone związki bardziej podatne na deteriorację bądź przyczyniają się do tworzenia patyny. Kolonizowane substraty stają się bardziej porowate oraz dochodzi do złuszczenia powierzchni (URZI & KRUMBEIN 1994; WARSCHIED & BRAAMS 2000).

Wtórne bezpośrednio oddziaływania chemiczne dotyczą oddziaływań substancji wytwarzanych przez organizmy kolonizujące skały, które mogą wpływać negatywnie w zależności od rodzaju podłoża i okoliczności towarzyszących (np. opady deszczu). Spektrum tych oddziaływań obejmuje wydzielanie metabolitów, np. kwasów organicznych, tzw. kwasów porostowych, CO₂, itp. (SILVERMAN & MUNOZ 1970; DE LA TORRE i in. 1991, 1993b; LEŻNICKA i in. 1991; GORBUSHINA i in. 1993; WOLLENZIEN i in. 1995; DORNIEDEN i in. 2000; KOESTLER 2000; MATTHES i in. 2000; TIANO i in. 2000; BJELLAND i THORSETH 2002; LISCI i in. 2003; CARTER & VILES 2004). Spośród różnych substancji wydzielanych przez grzyby wykazano znaczące oddziaływanie kwasu szczawowego na podłoże wapienne, prowadzące do przebudowy poddanych jego działaniu minerałów (ADAMO & VIOLANTE 2000; GAYARDE & MORTON 2002; BURFORD i in. 2003). Reakcje w jakie wchodzi z minerałami wydzielane kwasy organiczne i nieorganiczne powodują tzw. biokorozję, inaczej korozję biologiczną – proces, który najskuteczniej oddziałuje na substraty nieorganiczne. W przypadku skał proces ten powoduje m.in. rozpuszczanie spoiwa mineralnego. Prowadzi to do osłabienia struktury wewnętrznej, dezintegracji, łuszczenia oraz wytwarzania wgłębień w skale (SCHALSCHA i in. 1967; SILVERMAN & MUNOZ 1970; ECKHARDT 1978; BERTHELEIN 1983; DE LA TORRE i in. 1991, 1993b; SAND & BOCK 1991). Biogenne kwasy organiczne są bardziej niszczące niż kwasy nieorganiczne i postrzegane są, jako główny czynnik aktywny w procesie rozkładu skał (WARSCHIED & BRAAMS 2000). Procesy oksydacyjne chemoorganotroficznych

bakterii i grzybów mogą być przyczyną usuwania kationów żelaza i manganu z substratu mineralnego (BEVERIDGE & MURRAY 1976; DE LA TORRE & GOMEZ-ALARCON 1994). Zjawisko to, nazywane bioługowaniem, jest dodatkowo wspierane przez wytwarzające tlen algi i cyjanobakterie (ARRIETA & GREZ 1971; WARSCHIED & BRAAMS 2000). Rezultatem końcowym bioługowania jest odkładanie tlenków na powierzchni komórek (BERTHELEIN 1983).

UWAGI KOŃCOWE

Współcześnie znaczenie mikroorganizmów w wietrzeniu biogenicznym jest coraz lepiej poznawane, jednak nadal rzadko przedstawiane podczas kursów geologii. Spektrum oddziaływania organizmów litobiontycznych na zasiedlane podłoże jest szerokie i rodzi poważne konsekwencje. W terminologii geologicznej funkcjonuje pojęcie wietrzenia biogenicznego – lub biowietrzenia, oznaczające proces rozkładu i rozpadu skał i substancji mineralnych przez organizmy żywe poprzez oddziaływania mechaniczne i chemiczne (GADD 2007). W ostatnich latach uwaga wielu badaczy została skierowana na to nietypowe siedlisko i skutkuje coraz lepszym poznaniem bioty oraz konsekwencji jej rozwoju. Zagadnienie jest istotne między innymi z powodu szerokiego zastosowania kamienia jako materiału budowlanego i artystycznego, przez co znajduje ono praktyczne zastosowanie na przykład w ochronie i konserwacji zabytków.

Podziękowania. Artykuł został przygotowany w ramach działalności statutowej Instytutu Botaniki im. W. Szafera Polskiej Akademii Nauk w Krakowie.

LITERATURA

- ADAMO P. & VIOLANTE P. 2000. Weathering of rocks and neogenesis of minerals associated with lichen activity. – *Applied Clay Science* **16**: 229–256.
- APTROOT A. & JAMES P. W. 2002. Monitoring Lichens on Monuments. – W: P. R. NIMIS, C. SCHEIDEGGER & P. A. WOLSELEY (red.), *Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens*. s. 239–253. NATO Science Series 7.
- ARIÑO X. & SAIZ-JIMENEZ C. 1996. Factors affecting the colonization and distribution of cyanobacteria, algae and lichens in ancient mortars. – W: J. RIEDERER (red.), *Proceedings of the Eighth International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Vol. **2**, s. 725–731. Rathgen-Forschungslabor, Berlin.
- ARIÑO X., GOMEZ-BOLEA A. & SAIZ-JIMENEZ C. 1997. Lichens on ancient mortars. – *International Biodeterioration and Biodegradation* **40**: 217–224.
- ARRIETA L. & GREZ R. 1971. Solubilization of iron-containing minerals by soil microorganisms. – *Applied Microbiology* **22**: 487–490.
- ASCASO C., WIERZCHOS J., SOUZA-EGIPSY V., DE LOS RÍOS A. & RODRIGUES J. D. 2002. In situ evaluation of the biodeteriorating action of microorganisms and the effects of biocides on carbonate rock of the Jeronimos Monastery (Lisbon). – *International Biodeterioration and Biodegradation* **49**(1): 1–12.
- AZUA-BUSTOS A., GONZÁLEZ-SILVA C., MANCILLA R. A., SALAS L., PALMA R. E., WYNNE J. J., MCKAY C. P. & VICUÑA R. 2009. Ancient photosynthetic eukaryote biofilms in an Atacama Desert coastal cave. – *Microbial Ecology* **58**: 485–496.

- BEECH I. B. & GAYLARDE C. C. 1991. Microbial polysaccharides and corrosion. – *International Biodeterioration* **27**(2): 95–107.
- BERTHELEIN J. 1983. Microbial weathering processes. – W: W. E. KRUMBEIN (red.), *Microbial geochemistry*, s. 223–262. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- BEVERIDGE T. J. & MURRAY R. G. 1976. Uptake and retention of metals by cell walls of *Bacillus subtilis*. – *Journal of Bacteriology* **127**(3): 1502–1518.
- BJELLAND T. & ECKMAN S. 2005. Fungal diversity in rock beneath a crustose lichen as revealed by molecular markers. – *Microbial Ecology* **49**: 598–603.
- BJELLAND T. & THORSETH I. H. 2002. Comparative studies of the lichen–rock interface of four lichens in Vingen, western Norway. – *Chemical Geology* **192**: 81–98.
- BJELLAND T., GRUBE M., HOEM S., JORGENSEN S. L., DAAE F. L., THORSETH I. H. & ØVREÅS L. 2011. Microbial metacommunities in the lichen–rock habitat. – *Environmental Microbiology Reports* **3**(4): 434–442.
- BOLIVAR F. C. & SANCHES-CASTILO P. M. 1997. Biomineralization processes in the fountains of the Alhambra, Granada, Spain. – *International Biodeterioration and Biodegradation* **40**: 205–215.
- BURFORD E. P., FOMINA M. & GADD G. M. 2003. Fungal involvement in bioweathering and biotransformation of rocks and minerals. – *Mineralogical Magazine* **67**: 1127–1155.
- CAPPITELLI F., PRINCIPI P., PEDRAZZANI R., TONIOLO L. & SORLINI C. 2007. Bacterial and fungal deterioration of the Milan Cathedral marble treated with protective synthetic resins. – *Science of the Total Environment* **385**: 172–181.
- CARTER N. E. A. & VILES H. A. 2004. Lichen hotspots: raised rock temperatures beneath *Verrucaria nigrescens* on limestone. – *Geomorphology* **62**: 1–16.
- CHLEBICKI A. & MAJEWSKA M. 2010. *Zasmidium cellare* in Poland. – *Acta Mycologica* **45**(1): 139–142.
- COCKELL C. S. & HERRERA A. 2008. Why are some microorganisms boring? – *Trends in Microbiology* **16**(3): 101–106.
- COSTERTON J. W. & LAPPIN-SCOTT H. 1995. Introduction to microbial biofilms. – W: H. LAPPIN-SCOTT & J. W. COSTERTON (red.), *Plant and microbial biotechnology research series 5. Microbial Biofilms*, s. 1–11. Cambridge University Press, Cambridge.
- COUTINHO M. L., MILLER A. Z., GUTIERREZ-PATRICIO S., HERNANDEZ-MARINE M., GOMEZ-BOLEA A., ROGERIO-CANDELERIA M. A., PHILIPS A. J. L., JURADO V., SAIZ-JIMENEZ C. & MACEDO M. F. 2013. Microbial communities on deteriorated artistic tiles from Pena National Palace (Sintra, Portugal). – *International Biodeterioration and Biodegradation* **84**: 322–332.
- CRISPIN C. A., GAYLARDE P. M. & GAYLARDE C. C. 2003. Algal and cyanobacterial biofilms on calcareous historic buildings. – *Current Microbiology* **46**: 79–82.
- CUTLER N. A., VILES H. A., AHMAD S., MCCABE S. & SMITH B. J. 2013. Algal ‘greening’ and the conservation of stone heritage structures. – *Science of the Total Environment* **442**: 152–164.
- CUZMAN O. A., VENTURA S., SILI C., MASCALCHI C., TURCHETTI T., D’ACQUI L.P. & TIANO P. 2010. Biodiversity of phototrophic biofilms dwelling on monumental fountains. – *Microbial Ecology* **60**: 81–95.
- DANIN A. & CANEVA G. 1990. Deterioration of limestone walls in Jerusalem and marble monuments in Rome caused by cyanobacteria and cyanophilous lichens. – *International Biodeterioration* **26**: 397–417.
- DE LA TORRE M. A. & GOMEZ-ALARCON G. 1994. Manganese and iron oxidation by fungi isolated from building stone. – *Microbial Ecology* **27**: 177–188.
- DE LA TORRE M. A., GOMEZ-ALARCON G. & PALACIOS J. M. 1993a. “In vitro” biofilm formation by *Penicillium frequentans* strains on sandstone, granite and limestone. – *Applied Microbial Biotechnology* **40**: 408–415.

- DE LA TORRE M. A., GOMEZ-ALARCON G., MELGAREJO P. & SAIZ-JIMENEZ C. 1991. Fungi in weathered sandstone from Salamanca cathedral (Spain). – *Science of the Total Environment* **107**: 159–168.
- DE LA TORRE M. A., GOMEZ-ALARCON G., VIZCAINO C. & GARCIA T. 1993b. Biochemical mechanisms of stone alteration carried out by filamentous fungi living in monuments. – *Biogeochemistry* **19**: 129–147.
- DE LOS RÍOS A., GALVAN V. & ASCASO C. 2004. In situ microscopical diagnosis of biodeterioration processes at the convent of Santa Cruz la Real, Segovia, Spain. – *International Biodeterioration and Biodegradation* **51**: 113–120.
- DE LOS RÍOS A., CÁMARA B., GARCÍA DEL CURA M. Á., RICO V. J., GALVÁN V. & ASCASO C. 2009. Deteriorating effects of lichen and microbial colonization of carbonate building rocks in the Romanesque churches of Segovia (Spain). – *Science of the Total Environment* **407**: 1123–1134.
- DIEP C. N. & HIEU T. N. 2013. Phosphate and potassium solubilizing bacteria from weathered materials of denatured rock mountain, Ha Tien, Kiên Giang province, Vietnam. *American – Journal of Life Sciences* **1**(3): 88–92.
- DONLAN R. M. 2002. Biofilms: microbial life on surfaces. – *Emerging Infectious Diseases* **8**(9): 881–890.
- DORNIEDEN T., GORBUSHINA A. A. & KRUMBEIN W. E. 2000. Patina – physical and chemical interactions of sub-aerial biofilms with objects of Art. – W: O. CIFFERRI, P. TIANO & G. MASTROMEI (red.), *Of microbes and art: the role of microbial communities in the degradation and protection of cultural heritage*, s. 105–119. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- DUANE M. J. 2001. Biomineralisation and phytokarst development on cavernous quaternary carbonate terraces, Mohammedia, northwest Morocco. – *Carbonates and Evaporites* **16**(2): 107–116.
- ECKHARDT F. E. W. 1978. Microorganisms and weathering of a sandstone monument. – W: W. E. KRUMBEIN (red.), *Environmental Biogeochemistry and Geomicrobiology. The Terrestrial Environment*, s. 675–686. Ann Arbor Science Publishers, Michigan.
- EGIDI E., DE HOOG G. S., ISOLA D., ONOFRI S., QUAEDVLIEG W., DE VRIES M., VERKLEY G. J. M., STIELOW B., ZUCCONI L. & SELBMANN L. 2014. Phylogeny and taxonomy of meristematic rock-inhabiting black fungi in the *Dothideomycetes* based on multi-locus phylogenies. – *Fungal Diversity* **65**: 127–165.
- FLORES M., LORENZO J. & GÓMEZ-ALARCÓN G. 1997. Algae and bacteria on historic monuments at Alcalá de Henares, Spain. – *International Biodeterioration and Biodegradation* **40**(2–4): 241–246.
- GADD G. M. 2007. Geomycology: biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation. – *Mycological Research* **111**(1): 3–49.
- GARTY J. 1991. Influence of epilithic microorganisms on the surface temperature of building walls. – *Canadian Journal of Botany* **68**: 1349–1353.
- GAYLARDE C. & MORTON G. 2002. Biodeterioration of mineral materials. – W: G. BRITTON (red.), *Environmental Microbiology*. Vol. **1**, s. 516–528. Wiley, New York.
- GAYLARDE C. C. & GAYLARDE P. M. 2005. A comparative study of the major microbial biomass of biofilms on exteriors of buildings in Europe and Latin America. – *International Biodeterioration and Biodegradation* **55**: 131–139.
- GERDES G., DENAJTSCHIK-PIEWAK K., RIEGE H., TAHER A. G., KRUMBEIN W. E. & REINECK H. E. 1994. Structural diversity of biogenic carbonate particles in microbial mats. – *Sedimentology* **41**: 1273–1294.
- GOLUBIĆ S., PIETRINI A. M. & RICCI S. 2015. Euendolithic activity of the cyanobacterium *Chroococcus lithophilus* Erc. in biodeterioration of the Pyramid of Caius Cestius, Rome, Italy. – *International Biodeterioration and Biodegradation* **100**: 7–17.
- GORBUSHINA A. A., KRUMBEIN W. E., HAMMAN C. H., PANINA L., SOUKHARJEVSKI S. & WOLLENZIEN U. 1993. Role of black fungi in color change and biodeterioration of antique marbles. – *Geomicrobiology Journal* **11**: 205–221.
- GORBUSHINA A. A. 2007. Life on the rocks. – *Environmental Microbiology* **9**: 1613–1631.

- HALL K. & OTTE W. 1990. Observations regarding biological weathering on nunataks of the Juneau Icefield, Alaska. – *Permafrost and Periglacial Processes* **1**: 189–196.
- HALLMANN C, STANNEK L., FRITZLAR D., HAUSE-REITNER D., FRIEDL T. & HOPPERT M. 2013. Molecular diversity of phototrophic biofilms on building stone. – *FEMS Microbiology Ecology* **84**(2): 355–372.
- HOPPERT M., FLIES C., POHL W., GÜNZL B. & SCHNEIDER J. 2004. Colonization strategies of lithobiontic microorganisms on carbonate rocks. – *Environmental Geology* **46**(3–4): 421–428.
- HORATH T. & BACHOFEN R. 2009. Molecular characterization of an endolithic microbial community in dolomite rock in the central Alps (Switzerland). – *Microbial Ecology* **58**: 290–306.
- HUBKA V., RÉBLOVÁ M., ŘEHULKA J., SELBMANN L., ISOLA D., DE HOOG S. G. & KOLAŘÍK M. 2014. *Bradomyces* gen. nov. (*Chaetothyriales, Trichomeriaceae*), a new ascomycete genus accommodating poorly differentiated melanized fungi, *B. oncorhynchi* sp. nov. and *B. alpinus* sp. nov. – *Antonie van Leeuwenhoek* **106**(5): 979–992.
- ISOLA D., ZUCCONI L., ONOFRI S., CANEVA G., DE HOOG G. S. & SELBMANN L. 2016. Extremotolerant rock inhabiting black fungi from Italian monumental sites. – *Fungal Diversity* **76**: 75–96.
- KINNIMENT S. & WIMPENNY J. W. T. 1990. Biofilms and biocides (special issue: biocides). – *International Biodeterioration* **26**: 181–194.
- KOESTLER R. J. 2000. Polymers and resins as food for microbes. – W: O. CIFFERRI, P. TIANO & G. MASTROMEI (red.), *Of microbes and art: the role of microbial communities in the degradation and protection of cultural heritage*, s. 153–168. Kluwer Academic Plenum Publishers, New York.
- LEŽNICKÁ S., KUROCZKIN J., KRUMBEIN W. E., STRZELCZYK A. B. & PETERSEN K. 1991. Studies on the growth of selected fungal stains on limestones impregnated with silicone resins (Steinfestiger H and Elastosil E-41). – *International Biodeterioration* **28**: 91–111.
- LISCI M., MONTE M. & PACINI E. 2003. Lichens and higher plants on stone: a review. – *International Biodegradation and Biodeterioration* **51**(1): 1–17.
- LYALIKOVA N. N. & PETRUSHKOVA Y. P. 1991. Role of microorganisms in the weathering of minerals in building stone of historical buildings. – *Geomicrobiological Journal* **9**: 91–101.
- MAJEWSKA M. 2011. Biodiversity of Cracow-Czestochowa Upland limestone-inhabiting fungi – summary of preliminary studies. – W: K. STERFLINGER & G. PINAR (red.), *15th International Biodeterioration & Biodeterioration Symposium*, 19–24 September 2011, Vienna, s. 230.
- MATTHES U., RYAN B. D. & LARSON D. W. 2000. Community structure of epilithic lichens on the cliffs of the Niagara Escarpment, Ontario, Canada. – *Plant Ecology* **148**: 233–244.
- MILLER A. Z., SANMARTIN P., PEREIRA-PARDO L., DIONISIO A., SAIZ-JIMENEZ C., MACEDO M. F. & PRIETO B. 2012. Bioreceptivity of building stones: a review. – *The Science of the Total Environment* **426**: 1–12.
- MITCHELL R. & GU J. D. 2000. Changes in the biofilm microflora of limestone caused by atmospheric pollutants. – *International Biodegradation and Biodeterioration* **46**: 299–303.
- MOTTERSHEAD D. & LUCAS G. 2000. The role of lichens in inhibiting erosion of a soluble rock. – *Lichenologist* **32**(6): 601–609.
- NASCIMBENE J. & SALVADORI O. 2008. Lichen recolonization on restored calcareous statues of three Venetian villas. – *International Biodeterioration and Biodegradation* **62**: 313–318.
- NASCIMBENE J., SALVADORI O. & NIMIS P. L. 2009. Monitoring lichen recolonization on a restored calcareous statue. – *Science of the Total Environment* **407**: 2420–2426.
- OGÓREK R., LEJMAN A. & MATKOWSKI K. 2013. Fungi isolated from Niedźwiedzia Cave in Kletno (Lower Silesia, Poland). – *International Journal of Speleology* **42**(2): 161–166.
- ONOFRI S., PAGANO S., ZUCCONI L. & TOSI S. 1999. *Friedmanniomyces endolithicus* (Fungi, Hyphomycetes), anam. – gen. and sp. nov. from continental Antarctica. – *Nova Hedwigia* **68**: 175–181.

- ORTEGA-CALVO J. J., ARIÑO X., HERNANDEZ-MARINE M. & SAIZ-JIMENEZ C. 1995. Factors affecting the weathering and colonization of monuments by phototrophic microorganisms. – *Science of the Total Environment* **167**: 329–341.
- ORTEGA-CALVO J. J., HERNANDEZ-MARINE M. & SAIZ-JIMENEZ C. 1991. Biodeterioration of building materials by *Cyanobacteria* and *Algae*. – *International Biodeterioration* **28**: 165–186.
- ORTEGA-MORALES B. O., GAYLARDE C. C., ENGLERT G. E. & GAYLARDE P. M. 2005. Analysis of salt-containing biofilms on limestone buildings of the Mayan culture at Edzna, Mexico. – *Geomicrobiology Journal* **22**: 261–268.
- ORTEGA-MORALES O., GUEZENNEC J., HERNÁNDEZ-DUQUE G., GAYLARDE C. C. & GAYLARDE P. M. 2000. Phototrophic biofilms on ancient Mayan buildings in Yucatan, Mexico. – *Current Microbiology* **40**: 81–85.
- OWCZAREK-KOŚCIELNIAK, M. 2014. Black yeasts of limestone formations in the Krakow-Czestochowa Upland (Poland). Mskr. pracy doktorskiej, Instytut Botaniki im. W. Szafera Polskiej Akademii Nauk, Kraków.
- OWCZAREK-KOŚCIELNIAK M., PIĄTEK J., WILK K. & KOŁODZIEJCZYK Ł. 2016. Assessment of colonising organisms of tombstones in an urban environment – a case study of the Rakowicki Cemetery (Cracow, Poland). – W: ECBSM2016. European Conference on Biodeterioration of Stone Monuments – second edition, s. 16, Cergy-Pointoise, France.
- PERAZA-ZURITA Y., CULTRONE G., SÁNCHEZ-CASTILLO P., SEBASTIÁN E. & BOLÍVAR F. C. 2005. Microalgae associated with deteriorated stonework of the fountain of Bibatauín in Granada, Spain. – *International Biodeterioration and Biodegradation* **55**: 55–61.
- PRIETO B. & SILVA B. 2005. Estimation of the potential bioreceptivity of granitic rocks from their intrinsic properties. – *International Biodeterioration and Biodegradation* **56**: 206–215.
- PRIETO B., RIVAS T., SILVA B., CARBALLA R. & LOPEZ DE SILANES E. 1994. Colonization by lichens of granite dolmens in Galicia (NW Spain). – *International Biodeterioration and Biodegradation* **34**: 47–60.
- PUSZ W., OGÓREK R., UKLAŃSKA-PUSZ C. & ZAGOŹDŻON P. 2014. Speleomycological research in underground Osówka complex in Sowie Mountains (Lower Silesia, Poland). – *International Journal of Speleology* **43**(1): 27–34.
- RAGON M., FONTAINE M.C., MOREIRA D. & LÓPEZ-GARCÍA P. 2012. Different biogeographic patterns of prokaryotes and microbial eukaryotes in epilithic biofilms. – *Molecular Ecology* **21**: 3852–3868.
- RUIBAL C., PLATAS G. & BILLS G. F. 2008. High diversity and morphological convergence among melanised fungi from rock formations in the Central Mountain System of Spain. – *Persoonia* **21**: 93–110.
- SAIZ-JIMENEZ C. 1993. Deposition of airborne organic pollutants on historic buildings. – *Atmosphere Environment* **27**: 77–85.
- SAIZ-JIMENEZ C. 2012. Microbiological and environmental issues in show caves. – *World Journal of Microbiology and Biotechnology* **28**: 2453–2464.
- SAND W. & BOCK E. 1991. Biodeterioration of mineral materials by microorganisms – biogenic sulfuric and nitric acid corrosion of concrete and natural stone. – *Geomicrobiological Journal* **9**(2–3): 129–138.
- SCHALSCHA E. B., APPELT H. & SCHATZ A. 1967. Chelation as weathering mechanisms - I. Effect of complexing agents on the solubilization of iron from minerals and granodiorite. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* **31**: 587–596.
- SELBMANN L., ISOLA D., EGIDI E., ZUCCONI, L., GUEIDAN C., DE HOOG G. S. & ONOFRI S. 2013. Mountain tips as reservoirs for new rock-fungal entities: *Saxomyces* gen. nov. and four new species from the Alps. – *Fungal Diversity* **65**(1): 167–182.
- SELBMANN L., DE HOOG G. S., ZUCCONI L., ISOLA D., RUISI S., GERRITS VAN DEN ENDE A. H. G., RUIBAL C., DE LEO F., URZÌ C. & ONOFRI S. 2008. Drought meets acid: three new genera in a dothidealean clade of extremotolerant fungi. – *Studies in Mycology* **61**: 1–20.

- SERT H. B., SÜMBÜL H. & STERFLINGER K. 2007a. A new species of *Capnobotryella* from monument surfaces. – *Mycological Research* **111**(10): 1235–1241.
- SERT H. B., SÜMBÜL H. & STERFLINGER K. 2007b. *Sarcinomyces sideticae*, a new black yeast from historical marble monuments in Side (Antalya, Turkey). – *Botanical Journal of the Linnean Society* **154**(3): 373–380.
- SILVERMAN M. P. & MUNOZ E. F. 1970. Fungal attack on rock: solubilization and altered infrared spectra. – *Science* **169**: 985–987.
- SPITALE D. & NASCIBENE J. 2012. Spatial structure, rock type, and local environmental conditions drive moss and lichen distribution on calcareous boulders. – *Ecological Research* **27**: 633–638.
- STERFLINGER K., DE BAERE R., DE HOOG G. S., DE WACHTER R., KRUMBEIN W. E. & HAASE G. 1997. *Coniosporium perforans* and *C. apollinis*, two new rock-inhabiting fungi isolated from marble in the Sanctuary of Delos (Cyclades, Greece). – *Antonie van Leeuwenhoek* **72**(4): 349–363.
- STÜCK H., SIEGSMUND S. & RÜDRICH J. 2011. Weathering behaviour and construction suitability of dimension stones from the Drei Gleichen area (Thuringia, Germany). – *Environmental Earth Sciences* **63**: 1763–1786.
- TIANO P., BIAGIOTTI L. & BRACCI S. 2000. Biodegradability of products used in monuments' conservation. – W: O. CIFFERRI, P. TIANO & G. MASTROMEI (red.), *Of microbes and art: the role of microbial communities in the degradation and protection of cultural heritage*, s. 169–182. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- TOMASELLI L., LAMENTI G., BOSCO M. & TIANO P. 2000. Biodiversity of photosynthetic microorganisms dwelling on stone monuments. – *International Biodegradation and Biodeterioration* **46**: 251–258.
- UHER B. 2008. Spatial distribution of cyanobacteria and algae from the tombstone in a historic cemetery in Bratislava, Slovakia. – *Fottea* **9**: 81–92.
- URZI C. & KRUMBEIN W. E. 1994. Microbiological impacts on the cultural heritage. – W: W. E. KRUMBEIN, P. BRIMBLECOMBE, D. E. COSGROVE & S. STANIFORTH (red.), *Durability and change: the science, responsibility, and cost of sustaining cultural heritage*, s. 107–135. Wiley, J. & Sons, New York.
- URZI C. & REALINI M. 1998. Colour changes of Noto's calcareous sandstone as related to its colonisation by microorganisms. – *International Biodeterioration and Biodegradation* **42**: 45–54.
- VILES H. A. & GORBUSHINA A. A. 2003. Soiling and microbial colonisation on urban roadside limestone: a three year study in Oxford, England. – *Building and Environment* **38**: 1217–1224.
- VILES H. A., TAYLOR M. P., YATES T. J. S. & MASSEY S. W. 2002. Soiling and decay of N.M.E.P. limestone tablets. – *Science of the Total Environment* **292**: 215–229.
- WARSCHEID T. 2000. Integrated concepts for the protection of cultural artifacts against biodeterioration. – W: O. CIFFERRI, P. TIANO & G. MASTROMEI (red.), *Of microbes and art: the role of microbial communities in the degradation and protection of cultural heritage*, s. 185–202. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- WARSCHEID T. & BRAAMS J. 2000. Biodeterioration of stone: a review. – *International Biodeterioration and Biodegradation* **46**: 343–368.
- WARSCHEID T., OELTING M. & KRUMBEIN W. E. 1991. Physico-chemical aspects of biodeterioration processes on rocks with special regard to organic pollution. – *International Biodeterioration* **28**: 37–48.
- WILCZYŃSKA-MICHALIK W. 2004. Influence of atmospheric pollution on the weathering of stones in Cracow monuments and rock outcrops in Cracow, Cracow-Czestochowa Upland and the Carpathians. s. 114–164. Wydawnictwo Naukowe Akademii Pedagogicznej, Kraków.
- WOLLENZIEN U., DE HOOG G. S., KRUMBEIN W. E. & URZI C. 1995. On the isolation of microcolonial fungi occurring on and in marble and other calcareous rocks. – *Science of the Total Environment* **167**: 287–294.

SUMMARY

Stone is the oldest of the durable building materials known to humankind. Like natural stone outcrops, decorative and building elements made of stone are rather inhospitable habitats, but a whole range of organisms can survive, grow and even develop very complex communities on and in rock substrates. Stone surfaces exposed to external conditions should be considered extreme environments, as they are subjected to high solar radiation, elevated temperature, low nutrient availability, high electrolyte concentrations and low relative humidity, where moisture may be only sporadically available. Rock surfaces are colonized by stress-tolerant organisms, often establishing mixed ecosystems supporting their survival (RUIBAL *et al.* 2008). The composition of those ecosystems may vary significantly, depending on environmental conditions and the properties of the rock. Microorganisms that can also actively bore into the structure of rock are called euendoliths, those that grow into cracks and fissures are called chasmoendoliths, and those that grow in rock interstices and structural cavities inside rocks are called cryptoendoliths. Among the organisms inhabiting solid rock material are photolithoautotrophs (algae, cyanobacteria, mosses, higher plants), chemolithoautotrophs (bacteria) and chemoorganotrophs (bacteria, lichitized and nonlichitized fungi) (WARSCHIED & BRAAMS, 2000). Together as a community, those organisms may exert a biodeteriorative action on stone.

The development of life on stone strongly affects the colonized substrate. On decorative or building stone such organisms are considered harmful or destructive. Biological impacts on stone can be manifested indirectly when the development of living organisms changes the substrate by causing discoloration, forming a patina, swelling and shrinking the matrix, changing the water balance and/or locally altering the absorption of solar energy. The direct impacts of living organisms includes penetration of cracks and fissures, mechanical pressure, bioleaching and chemical corrosion, which cause physicochemical changes in the stone.

Research in recent years has resulted in a better understanding of this biota and the consequences of its development on stone substrate. Further study of the development of life on stone is needed so that, for example, the stone-carved cultural heritage can be better protected and preserved.

Wpłynęło: 20.01.2017 r.; przyjęto do druku: 12.06.2017 r.