

O genezie zgorzeli bazaltowej

Paweł P. Zagożdżon*

W artykule usystematyzowano podstawowe informacje na temat zgorzeli bazaltowej, przedstawiono rozwój poglądów na genezę zgorzeli oraz zaprezentowano najnowsze poglądy dotyczące tego problemu. Jak się wydaje zjawiska zgorzelowe są wywoływane przez nierównomierne rozmieszczenie drobnych kryształków analcymu tworzących się z resztkowego stopu w końcowej fazie krystalizacji. Związane z tym naprężenia powodują powstanie submikroskopowych spękań i szczelin, a następnie również dysjunkcji widocznych makroskopowo, powodujących zniszczenie spójności skały. Wypełnianie ich przez minerały wtórne wzmacnia tempo dezintegracji skały. Na te zjawiska nakładają się dodatkowo procesy wietrzeniowe, a w niektórych przypadkach destrukcyjne oddziaływanie flory.

Słowa kluczowe: zgorzel bazaltowa, zgorzel słoneczna, mineralogia

Paweł P. Zagożdżon — **On the origin of basaltic sunburn.** Prz. Geol., 49: 328–334.

Summary. The article systematizes basic knowledge on basaltic sunburn, summarizes history of concepts on the origin of this phenomenon, and presents synthesis of the most recent achievements in this field. The sunburn phenomenon seems to have been resulted from uneven distribution of fine analcime crystals formed from a residual alloy in a final phase of crystallization. The related stresses led to subsequent formation of submicroscopic cracks and fissures followed by macroscopic disjunctions, which brought about destruction of rock coherence. The disjunction fills, composed of secondary minerals, intensify a rate of rock disintegration. These phenomena are additionally accompanied by weathering processes, and in some cases also by a destructive influence of flora.

Key words: basaltic sunburn, basaltic Sonnenbrand, mineralogy

Zgorzel bazaltowa, synonimicznie określana mianem zgorzeli słonecznej, to nietypowy rodzaj dezintegracji bazaltoidów szczegółowo opisywany m.in. przez Lepplę (1901), Hibscha (1920), Pukalla (1939, 1940), Śliwę (1975), Zagożdżona (1998). Na zachodzie Europy zjawisko to było i jest badane na szeroką skalę, w literaturze zaś polskiej problem ten pojawia się sporadycznie (por. Zagożdżon, 1998). W nielicznych wzmiankach dotyczących genezy zgorzeli pokutują poglądy zaczerpnięte prawdopodobnie z przedwojennych publikacji niemieckojęzycznych.

Pierwszym etapem rozpadu zgorzelowego jest powstanie w obrębie skały jaśniejszych, izometrycznych odbarwień zwanych potocznie „plamkami” (por. Zagożdżon, 1998). Zazwyczaj mają one barwę szarą, rzadziej rudą (Voigt, 1794 oraz Leonhard, 1823 [W:] Pukall 1939; Klemm, 1902; Krzyśków, 1986; Majkowska, 1991; Zagożdżon, 1998). Spotykane w niektórych dokumentacjach geologicznych (m.in. Krzyśków, 1986; Majkowska, 1991) informacje o „zgorzelach” barwy żółtej czy niebieskiej odnoszą się raczej do nalotów mineralnych występujących na powierzchniach skał. „Plamki” (ryc. 1, 2) osiągają rozmiary od ułamków milimetra do około 20 mm (Leppla, 1901; Hibscha, 1920; Śliwa, 1975; Zagożdżon, 1998). Ilość substancji zgorzelowej w skale może ulegać znacznym wahaniom. Z reguły w dominującej masie zdrowej skały obserwuje się zmienną liczbą plamek zgorzelowych, w rzadszych przypadkach substancja zgorzelowa przeważa i staje się tłem dla reliktyw skały zdrowej (Leonhard, 1832 oraz Senf, 1882 [W:] Pukall, 1939; Hibscha, 1920; Ernst & Drescher-Kaden, 1940; Zagożdżon, 1998). W późniejszym etapie rozwoju tego procesu w skale pojawiają się drobne pęknięcia i szczeliny przebiegające pomiędzy poszczególnymi „plamkami”. W literaturze spękania te określa się

mianem rys (szczelin) włosowatych (Leppla, 1901; Hibscha, 1920; Śliwa, 1975). Ich powstanie prowadzi ostatecznie do rozpadu skały na drobny gruz zwany bazaltem kokolitowym (Hibscha, 1920; Ryka & Maliszewska, 1991). Tempo tworzenia się „plamek” oraz rozpadu skały należy uznać za bardzo szybkie. Jak podają Leppla (1901) i Hibscha (1920) w blokach skały pierwotnie bezzgorzelowej już po kilku tygodniach występują charakterystyczne odbarwienia, a po kilku miesiącach pojawić się mogą rysy włosowate, co jest jednoznaczne z utratą spójności przez skałę. Kühnel i in. (1994) oraz Kühnel i Tshibangu Katshi (1997) podają, że objawy rozpadu skał zgorzelowych są zauważalne po niewielu miesiącach, w innych przypadkach dopiero po kilku latach — zależnie od wytrzymałości skał.

Należy podkreślić, że zgorzel słoneczna to zjawisko nader często występujące w trzeciorzędowych bazaltoidach Europy środkowej. Jako pierwszy zwrócił na to uwagę Voigt (1802 [W:] Pukall, 1939). Ten stan rzeczy potwierdzają obserwacje autora artykułu oraz uwaga Schreibera i in. (1999), o ile stwierdzone przez nich powszechnie w wulkanitach Westerwaldu tzw. tekstury globoidowe można utożsamić ze zjawiskami zgorzelowymi. Przeprowadzone przez autora prace terenowe wykazały obecność zmian zgorzelowych w ok. 60%, spośród 86 spenetrowanych wystąpień bazaltoidów Śląska, przy czym ilość skał dotkniętych tym procesem w poszczególnych stanowiskach waha się bardzo znacznie. Zgorzel bazaltowa występuje również w skałach nie należących do środkowoeuropejskiej prowincji bazaltowej. Ostatnio autor uzyskał informacje o obecności przejawów tego procesu w niektórych skałach wulkanicznych z terenu Azji południowo-wschodniej (informacja uzyskana od R. Kühnela) oraz w lawach Tenerify (informacja uzyskana od U. Schreibera).

Interesujący i złożony jest też sposób występowania zgorzeli bazaltowej. O ile bowiem w niektórych kamieniołomach nie dostrzega się związku granic stref zgorzelowych ze strukturami dysjunktywnymi w bazaltoidach (Zagożdżon, 1998), to w innych są one ściśle powiązane z formą słupów bazaltowych. Niekiedy obserwujemy wąską

*Instytut Górnictwa, Politechnika Wroclawska, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław; Pawel.Zagozdzon@ig.pwr.wroc.pl

korę bezzgorzelową (ryc. 3) oraz wewnątrz wypełnione zgorzelą całkowicie lub w dużym stopniu (ryc. 4) (Lord, 1894 [W:] Pukall, 1939; Hoppe, 1936; Śliwa, 1975). Kiedy indziej „zdrowe” jądro otoczone jest zgorzelową skałą. Takie zróżnicowanie było opisywane przez Pukalla (1940). Stwierdzono je również w kamieniołomie Krzeniów, w rumoszu zalegającym u podnóża ścian eksploatacyjnych (ryc. 5).

Położenie stref zgorzelowych w obrębie poszczególnych wystąpień bazaltoidów badał Śliwa (1975). Doszedł on do wniosku, że w wystąpieniach płytowych ilość skał dotkniętych zmianami tego rodzaju przeważnie maleje wraz z oddalaniem się od miejsca erupcji. W kominach wulkanicznych, zdaniem cytowanego autora, strefy zgorzelowe są rozmieszczone w sposób bardziej skomplikowany, choć koncentrują się w częściach peryferycznych oraz w przylegających do tych kominów pokrywach lawowych. Wyniki badań autora artykułu wskazują, że schemat ten jest znacznie uproszczony, gdyż już w trzech kamieniołomach odsłaniających strefy kominowe natrafiono na zupełnie różne wykształcenie stref zgorzelowych. W kamieniołomie Krzeniów k. Złotoryi miały one formę rozszerzających się ku górze kominów o średnicach 20–30 m (E. Szurlej — infor. ustna), w Lutyni k. Łącka Zdroju skały zgorzelowe tworzą zapewne horyzontalną strefę o nieznaanej miąższości, natomiast w kamieniołomie Winna Góra k. Jawora stwierdzono (Zagożdżon, 1998) obecność nieregularnych stref zgorzelowych.

Termin „zgorzel słoneczna” (*Sonnenbrand*) został wprowadzony przez Vogelsanga (1875 [W:] Pukall, 1939), chociaż do końca XIX w., w celu opisu skał podlegających takiemu rozpadowi, używano też określeń: *grau gefleckte Basalte*, *eckig-körnige Basalte* czy *Graupenbasalte* (Pukall, 1939). Należy zaznaczyć, że termin „zgorzel słoneczna” (niem. *Sonnenbrand*) był stosowany również w odniesieniu do innych skał. Według Pukalla (1939) w kamieniołomach używano go dla określenia różnych skał, które, jak uważano traciły swoją przydatność techniczną po utracie wody kapilarnej w wyniku nasłonecznienia (*Steine, die nach dem Verlust ihrer Bergfeuchte ihre Bearbeitbarkeit einbüßen*). Poza bazaltoidami za „zgorzelowe” uznawano niektóre granity, a nawet łupki dachówkowe. Tannhäuser (1916) informował o możliwości sztucznego wytwarzania zgorzelopodobnych struktur również w melafirach. Tak szerokie rozumienie terminu „zgorzel słoneczna” zostało stopniowo ograniczone. Obecnie jest on stosowany tylko w odniesieniu do opisanych wyżej zmian zachodzących w bazaltoidach związanych z alpejskimi ruchami górotwórczymi. Na terenie Polski używa się synonimicznie terminu „zgorzel bazaltowa”. W literaturze anglosaskiej jest stosowane określenie *basaltic sunburn* albo, zapożyczone z niemieckiego *Sonnenbrand*. W nielicznych pracach czeskich można natknąć się na określenie *kuličkovitý rozpad*, w języku zaś holenderskim jest używany termin *zonnebrand*.

W starszej literaturze pojawia się dodatkowo określenie *echte Sonnebrand* (wprowadzone przez Steuera, prawdopodobnie w 1925 r., por. Pukall, 1939) odnoszące się do skał, które ulegają ostatecznie rozpadowi na bazalt kokolityowy. Ich przeciwieństwem są bazalty, które pomimo obecności w nich typowych „plamek” zachowują zwięzłość. Chelius (1905 [W:] Pukall, 1939) zaproponował dla nich nazwę „zgorzeli uśpionej” (*zum Stillstand gekommener Sonnenbrand*).

Rozwój poglądów na genezę zgorzeli bazaltowej

Pierwsze publikacje nadmieniające o zgorzeli bazaltowej lub jej poświęcone pojawiają się pod koniec XVIII w. W 1783 r. Voigt ([W:] Pukall, 1939) informował o jej istnieniu w skałach okolic Fuldy, a trzy lata później Faujas de St. Fond (1786 [W:] Pukall, 1939) podał pierwszy szczegółowy opis tego zjawiska wraz z próbą określenia jego natury. Od początku badania przysparzały licznych problemów, czego dowodem może być powstanie wielu różnych, często wzajemnie sprzecznych poglądów odnośnie genezy zgorzeli bazaltowej.

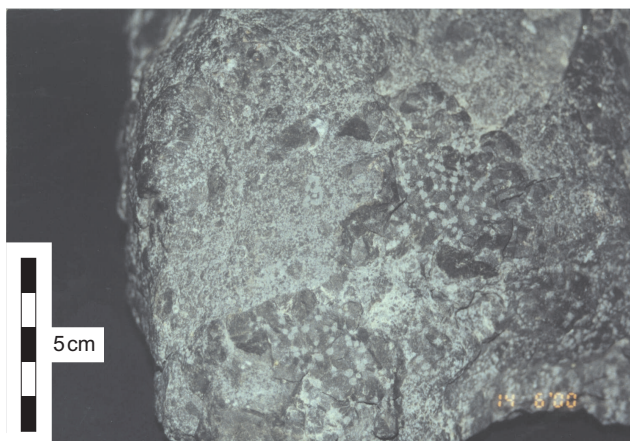
Faujas de St. Fond (1786 [W:] Pukall, 1939), choć początkowo sądził, że odkrył nową odmianę bazaltu (którą określił jako bazalt plamisty lub żwirowy — *gravelaux*), to ostatecznie skłonił się ku przypuszczeniu, że zgorzel jest raczej rodzajem rozpadu. Za jego przyczynę uznał kontrakcyjne kurczenie się skały, a następnie oddziaływanie wody. Mimo, że to wyjaśnienie nie zyskało potwierdzenia, to podkreślić należy fakt, że już pierwszy badacz, wnikliwie zajmujący się problemem zgorzeli bazaltowej, zakładał jej złożoną genezę. Również inni autorzy opowiadali się za genezą kontrakcyjną. Proces ten początkowo miał powodować powstawanie słupowej oddzielności bazaltów a następnie, w wyniku utworzenia się rys włosowatych, ich rozpad na drobne, nieregularne ziarna (Stift, 1831 [W:] Pukall, 1939).

Von Leonhard (1832 [W:] Pukall, 1939) zasugerował, że tworzenie się zgorzeli może być wynikiem odmieszania się pewnych składników magmy. Pogląd ten był później podtrzymywany przez wielu innych badaczy, choć spotkał się również z krytyką (m.in. Vogelsang [W:] Pukall, 1939), według której struktury powstałe przez odmieszanie powinny być łatwe do zidentyfikowania pod mikroskopem. Tymczasem „plamki” zgorzelowe w obrazie mikroskopowym w większości przypadków nie odróżniają się od części zdrowych, co stwierdzają m.in. Vogelsang (1875 [W:] Pukall, 1939), Leppla (1901), Nadybski (1956), Śliwa (1967), Skurzewski (1973), Zagożdżon (1998).

Inna interpretacja zakładała dominację lub wyłączność zjawisk wietrzeniowych jako powodu zmian zgorzelowych. Jej rzecznikiem był m.in. Keferstein (1820 [W:] Pukall, 1939). I ten punkt widzenia szybko spotkał się z krytyką m.in. von Leonharda (1832 [W:] Pukall, 1939), gdyż nie tłumaczył dlaczego pewne partie skały („plamki”) łatwiej ulegają rozpadowi pod wpływem oddziaływania tych samych czynników atmosferycznych.

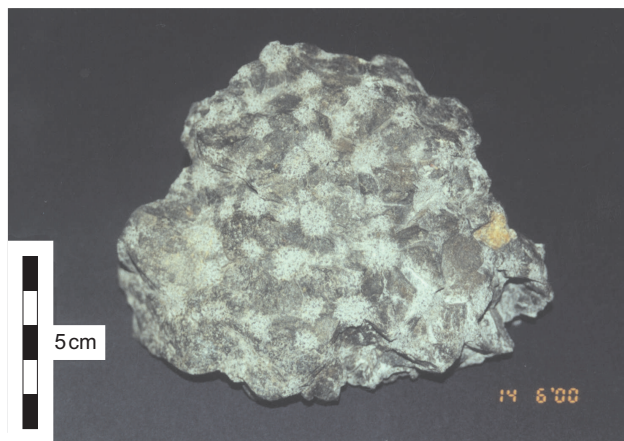
Pod koniec XIX stulecia pojawiły się opinie, iż przyczyną powstania zgorzeli są występujące w skale niewielkie ilości szkliwa, które przekształcając się w zeolity powoduje jej rozpad. Tak twierdził m.in. Möhl (1874 [W:] Pukall, 1939). Pogląd ten, choć szeroko rozwijany w latach późniejszych ma również poważne mankamenty. Szkliwo było wprawdzie często znajdowane w bazaltoidach dotkniętych zgorzelą, lecz jego obecność stwierdzano również w skałach, które nie uległy temu procesowi. Ponadto nie została określona geneza zgorzeli. Nie wyjaśniono bowiem dlaczego szkliwo gromadzić się miało tylko w niektórych częściach skały.

Z początkiem XX w. temat natury zgorzeli bazaltowej został podjęty przez wielu badaczy i zespoły badawcze dysponujące nowocześniejszą aparaturą. Nadal toczyły się jednak spory dotyczące jej genezy. W wielokrotnie już cytowanej pracy, Pukall (1939) zestawiał pojawiające się podówczas hipotezy dzieląc je na trzy grupy: zakładające



Ryc. 1. Bazalt drobnozgorzelowy („plamki” wielkości 0,2–0,5 mm) zawierający owaloidalne ciała z „plamkami” o rozmiarach 2–3 mm; kamieniołom Winna Góra k. Jawora

Fig. 1. Basalt with fine sunburn (0.2–0.5 mm “spots”) comprising ovaloid bodies with 2–3 mm “spots”; quarry Winna Góra near Jawor



Ryc. 3. Przekrój słupa bazaltowego; widoczne zgorzelowe wnętrze i bezgorzelowa „kora”; kamieniołom na G. Trupień k. Wilkowa Złotoryjskiego

Fig. 3. A cross-section of a basaltic column with discernible sunburn in the centre and sunburn-free “bark”; quarry on Trupień Mt. near Wilków Złotoryjski



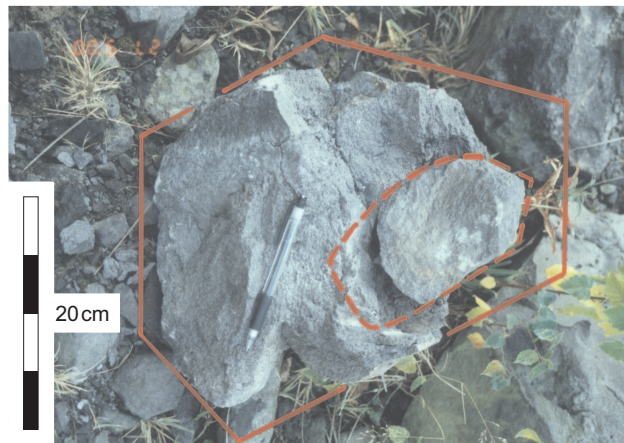
Ryc. 2. Bazalt zgorzelowy; „plamki” o rozmiarach rzędu 1 cm; kamieniołom Winna Góra k. Jawora

Fig. 2. Basalt with sunburn; “spots” averaging 1 cm; quarry Winna Góra near Jawor

dominację czynnika fizycznego (*die physikalischen Theorien*), zakładające współwystępowanie czynników fizycznych i chemicznych (*physikalisch-chemische Theorien*) oraz uznające procesy chemiczne za powód przemian zgorzelowych (*die chemischen Theorien*).

Do pierwszej grupy zaliczył on hipotezę kontrakcyjną rozwijaną w tamtym okresie m.in. przez Tannhäusera (1910 [W:] Pukall, 1939) oraz hipotezę zakładającą wręcz przeciwny kierunek działania naprężeń — rozsadzanie skały w wyniku powstania plamek zgorzelowych. Widać tu wyraźnie zasadnicze rozbieżności w pojmowaniu natury procesu zgorzelowego. O ile bowiem pierwsza z tych hipotez przyjmowała, że jako pierwsze powstają obserwowane makroskopowo drobne rysy i szczelinki, a dopiero później plamki, to rzecznicy drugiej hipotezy jednoznacznie stwierdzali, iż pierwszym etapem rozwoju zgorzeli słonecznej jest utworzenie się jasnych plamek, co jest zgodne z obserwacjami wielu autorów.

Według hipotez fizykochemicznych powstanie zgorzeli jest wynikiem przede wszystkim dyferencjacji albo odmieszania ciemnych i jasnych składników skały (Pukall,

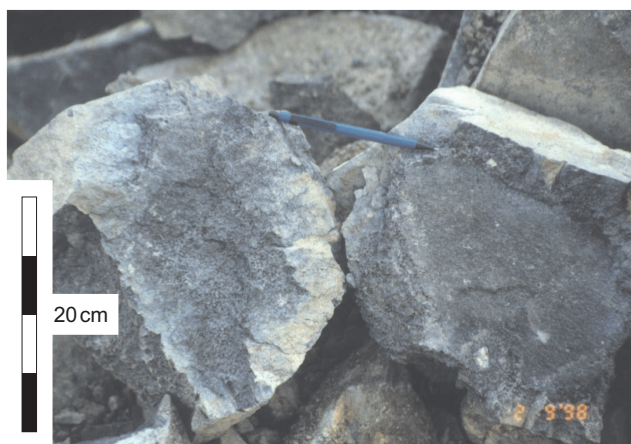


Ryc. 4. Fragment zgorzelowego słupa bazaltowego z bezgorzelowym jądrem; kamieniołom Gronowskie Wzgórze k. Zgorzelca; linią ciągłą zaznaczono pierwotne granice słupa bazaltowego, linia przerywana ukazuje zasięg strefy bezgorzelowej

Fig. 4. A piece of basaltic column with sunburn in the outer part and sunburn-free core; quarry Gronowskie Wzgórze near Zgorzelec; a continuous line marks the original boundary of basaltic column, a broken line depicts an extent of sunburn-free zone

1939). Hibschi (1920) uważał, iż przyczyną rozpadu zgorzelowego jest szlirowata budowa skały (*schlierigen Aufbau des Gesteins*) tworząca się na krótko przed zastygnięciem stopu. Powodem jej powstawania miało być oddzielne gromadzenie się składników sialicznych takich jak: skalenie, zeolity, nefelin, a także szkliwo oraz femicznych — augitu i magnetytu. Również na etapie wietrzenia skały współdziałać miały zdaniem Hibscha procesy fizyczne (zmiany temperatury, nasłonecznienia, wilgotności) i chemiczne (oddziaływanie tlenu, pary wodnej i dwutlenku węgla).

Hipotezy uznające czynniki chemiczne za powód powstawania zgorzeli cieszyły się na początku XX w. największym zainteresowaniem naukowców. Pukall (1939) wyróżnił wśród nich trzy podgrupy. Do pierwszej zaliczył te hipotezy, które powstawanie zgorzeli łączyły z utratą



Ryc. 5. Słupy bazaltowe o odmiennym położeniu stref zgorzelowych; lewy posiada wąską korę bezzgorzelową i zgorzelowe wewnątrz, prawy bezzgorzelowe wewnątrz i zgorzelowe peryferie; kamieniołom Krzeniów k. Złotoryi

Fig. 5. Basaltic columns with different positions of sunburn zones; the left one possesses a thin sunburn-free bark and sunburn centre, the right one has a sunburn-free centre and sunburn peripheries; quarry Krzeniów near Złotoryja

wody. Już Chelius (1905) zasugerował, że przyczyną rozpadu zgorzelowego może być utrata przez skałę jej naturalnej wilgoci i następujący w wyniku tego rozpad szkliwa. Hipotezy zaliczone do drugiej podgrupy jako przyczynę powstawania zgorzeli podawały przemiany mineralne wywołane przyjmowaniem wody. Według Leppli (1901) resztkowe szkliwo nefelinowe w obecności wody przechodzić mogło w zeolity. Zachodzący przy tym wzrost objętości powodował rozsądzenie skały. Inni autorzy zakładali obecność tzw. nefelinoidu lub szkliwa ulegających analogicznym przemianom (Hoppe, 1936). Również zdaniem Hoppego i Kellermanna (1928) przyczyny należało szukać w uwodnieniu szkliwa. Steuer i in. (1929) wskazali na możliwość związku powstawania zgorzeli słonecznej z obecnością szklistej lub skrajnie drobnokrystalicznej masy zeolitowej. Jej dewitryfikacja i związane z tym zmiany objętości miały prowadzić do tworzenia szarych „plamek” i spękań. Krytyka tego punktu widzenia sprowadzała się przede wszystkim do stwierdzenia, że w większości skał zgorzelowych nie notuje się obecności zeolitów. W związku z tym powstała trzecia podgrupa hipotez zakładająca, że zgorzel słoneczna jest po prostu specyficznym rodzajem szybkiego wietrzenia chemicznego skał (Pukall, 1939).

W 1940 r. wyniki swoich badań oraz pogląd na genezę zgorzeli słonecznej przedstawił Pukall. Jego zdaniem przyczyną tych zmian było nierównomierne gromadzenie się gazów (w tym pary wodnej) w magmie spowodowane niemożnością ich uwalniania się. Drobne ilości gazów mogły się koncentrować w sferoidalnych obszarach a przy ochładzaniu się skały ich obecność powodowała powstanie naprężeń, które w dalszym etapie niszczyły spójność skały. „Plamki” zgorzelowe pojawiać się miały po utracie przez skałę naturalnej wilgotności. Rozumieć więc należy, że zdaniem Pukalla pierwszym przejawem zgorzeli było utworzenie się drobnych spękań, podczas gdy „plamki” powstawały dopiero po odsłonięciu skały. Jak wspomniano, jest to twierdzenie niezgodne z bogatym materiałem obserwacyjnym zebrany przez wielu badaczy, co dobitnie podkreślił już Leppla (1901).



Ryc. 6. Szliropodobna strefa drobnozgorzelowa w obrębie bazaltu zgorzelowego o „plamkach” dużych; kamieniołom Winna Góra k. Jawora

Fig. 6. A streak-like fine-sunburn zone within sunburn with large "spots"; quarry Winna Góra near Jawor

W tym samym czasie pojawiła się praca Ernsta i Drescher-Kadena (1940) prezentująca wyniki szczegółowych badań terenowych i laboratoryjnych (głównie analiz rentgenostrukturalnych) zgorzeli bazaltowej. Uzyskane dane stały się podstawą dla sformułowania rozbudowanej hipotezy dotyczącej powstawania tego zjawiska. Powtórnie, z niewielkimi tylko zmianami, została ona przedstawiona w pracy Ernsta (1960). Autorzy informują o zróżnicowaniu składu mineralnego skał zgorzelowych. We wszystkich zbadanych próbkach skał (zarówno przed, jak i po rozpadzie zgorzelowym) w obrębie „plamek” stwierdzono obecność analcymu. Natomiast w zdrowych ich fragmentach wykryto obecność nefelinu. Zdaniem cytowanych autorów kluczowe znaczenie ma tu występowanie analcymu, a zwłaszcza specyficzny sposób rozmieszczenia jego drobnych kryształków. Pod koniec krystalizacji bazaltoidów pozostawać miał stop resztkowy o składzie odpowiadającym krzemianowi Na-Al. Jego krystalizacja zachodziła w pobliżu punktu równowagi analcym \leftrightarrow albit + nefelin, w temperaturze rzędu 550°C (Ernst, 1960). Zdaniem Ernsta i Drescher-Kadena (1940) krystalizacja analcymu i nefelinu przebiegała synchronicznie, a o tym który z wymienionych minerałów tworzył się w danym miejscu decydowały stosunkowe niewielkie wahania ciśnienia i temperatury związane z nierównomierną dystrybucją gazów w obrębie skały. Pierwsze kryształy analcymu były rozmieszczone w stopie chaotycznie i stały się one zarodkami krystalizacji dla kolejnych kryształów — tworzących się w sąsiedztwie, najczęściej w odrębnie sferoidalnych przestrzeni (później obszary te przekształciły się w „plamki” zgorzelowe). Współwystępowanie wymienionych minerałów, według Ernsta i Drescher-Kadena (1940), spowodowało również powstanie struktur dysjunktywnych związanych z procesem zgorzelowym. Punktem wyjścia dla dalszych rozważań była przytoczona przez nich opinia van Hissego o niemal 1,5% zwiększaniu objętości przy przejściu nefelinu w analcym. W wyższej temperaturze i przy wyższym ciśnieniu powstawał nefelin, natomiast obniżanie temperatury stopu, wraz z jednoczesnym spadkiem ciśnienia, sprzyjały tworzeniu się analcymu. Szybkie i nierównomierne (związane np. z nierównomierną dystrybucją wody w stopie) ochładzanie powodowało mogło nierównomierny przebieg transformacji minerałów. W końcowym etapie

krystalizacji doprowadziło to do powstania wewnątrz skały naprężeń, następnie szczelin włosowatych i rozpadu skały. Ernst i Drescher-Kaden (1940) oraz Ernst (1960) podkreślają, że te drobne dysjunkcje nie mogą być skutkiem oddziaływania zewnętrznych sił na niejednorodną, pod względem mechanicznym, skałę. W przeciwnym razie podobne zjawiska powinny występować we wszystkich lawach o teksturach porowatych czy migdałowcowych.

Poglądy współczesne

Problem zgorzeli słonecznej był wielokrotnie sygnalizowany w powojennej literaturze krajowej. Trzeba jednak zauważyć, że na terenie Polski bardzo rzadko prowadzono badania tego zjawiska (por. Zagożdżon, 1998), a opinie o jego genezie, jak się wydaje, były czerpane w przeważnie z niektórych niemieckojęzycznych prac przedwojennych. Część autorów wiązała powstawanie zgorzeli z naprężeniami występującymi w skałach. Podawano jednak różne przyczyny tworzenia się tych napięć. O ile Maślankiewicz (1961), przypisując tworzenie zgorzeli napięciom wywoływanym obecnością gazów, a przede wszystkim pary wodnej, nawiązuje prawdopodobnie do hipotezy Pukalla (1940) to Bolewski i Parachoniak (1982) oraz Ryka i Maliszewska (1991) odnoszą się raczej do hipotezy kontrakcyjnej (*vide* Pukall, 1939). Inni geolodzy skłaniają się ku uznaniu za czynnik dominujący wietrzenia (Białowolska, 1980; August i in., 1995) — ich poglądy można więc paralelizować z niektórymi przedwojennymi hipotezami chemicznymi *sensu* Pukalla (1939). Stypulkowski i Majerowicz (1994), na podstawie dokonanego przeglądu literatury przedstawili przedwojenny pogląd, iż zgorzel słoneczna jest wynikiem szybkiego wietrzenia niektórych jasnych składników skał. Wyniki ich badań sugerowały natomiast, że rozpad zgorzelowy może być wynikiem istnienia widocznych pod mikroskopem żyłek niezidentyfikowanego minerału. Autorzy dwóch dokumentacji geologicznych (Skurzewski, 1973; Nadybski, 1956) jako przyczynę zgorzeli podali różnice teksturalne lub odmieszanie zachodzące tuż przed zastygnięciem magmy, co jak się wydaje, jest odniesieniem do poglądów Hibschla (1920) a może też Leonharda (1832 [W:] Pukall, 1939). Natomiast w pracach publikowanych genezy zgorzeli nie wiązano ze zjawiskami zachodzącymi na etapie magmowym. Dopiero w ostatnich latach zasugerowano (Zagożdżon, 1998) syngenetyczność tworzenia się zgorzeli z płynięciem lawy lub przemieszczaniem się magmy.

Wydaje się, że badania zgorzeli w krajach zachodnich uległy po II wojnie światowej zahamowaniu. Pojawia się co prawda praca Ernsta (1960), ale wnosi ona niewiele nowego w stosunku do publikacji Ernsta i Drescher-Kadena (1940). Nasilenie prac badawczych nastąpiło prawdopodobnie dopiero w ostatnich 15 latach.

W najnowszych publikacjach potwierdzono istotną rolę analcymu w tworzeniu się zgorzeli słonecznej (Schreiber, 1991; Kühnel & Tshibangu Katshi, 1997), niemniej prezentowane są jednocześnie zarówno opinie rozwijające hipotezę Ernsta i Drescher-Kadena (1940), jak i poglądy wskazujące na alternatywne mechanizmy powstawania omawianego zjawiska.

Zdaniem Kühnela i in. (1994) zgorzel wywołwana jest współdziałaniem dwóch zjawisk: szybkiego chłodzenia skały i wywołanego nim kurczenia powodującego

powstanie wewnętrznych naprężeń. Tworzą się mikrospekkania umożliwiające penetrację skały przez różnorodne roztwory. Ich obecność sprzyja transformacjom mniej stabilnych składników mineralnych, z czym jest związany wzrost objętości generujący kolejne mikrospekkania. Proces ten mają powodować wszystkie minerały wtórne o wysokich wartościach objętości molekularnych. Główną rolę przypisano jednak minerałom ilastym z grupy smektytów (Kühnel i in., 1994; Kühnel i Tshibangu Katshi, 1997), choć Kühnel (informacje uzyskane drogą korespondencyjną) nie umniejsza tu roli analcymu. Niektóre z tych minerałów wtórnych są wrażliwe na oddziaływanie wody. Cykliczne zawilgacanie i wysychanie skały wywołuje więc wytworzenie w niej dodatkowych naprężeń i przyspieszenie zniszczenia jej spójności, a jednocześnie ułatwia migrację coraz większych ilości roztworów (Kühnel & Tshibangu Katshi, 1997). Jasne „plamki” powstawać mają w obszarach wyzwolenia wewnętrznych naprężeń w skałe. W strefach tych ułatwione staje się działanie roztworów, które łatwiej i szybciej rozkładają mniej stabilne minerały.

Informacje o odmiennych przyczynach tworzenia się zgorzeli bazaltowej znajdujemy w pracach Schreibera. Jedną z nich jest, zdaniem cytowanego autora, asymilacja ziaren kwarcu przez stop bazaltowy z normatywnym nefelinem (Schreiber, 1991). W wyniku reakcji magmy z okruciami kwarcu, w obecności wody, dochodzi do powstania obszarów wzbogaconych w pirokseny, analcym i szkliwo. Na skutek późniejszego zwietrzenia przekształcają się one w „plamki” zgorzelowe. W trakcie zastygania ziarna kwarcu stają się ponadto ośrodkami naprężeń tensyjnych prowadzących do utworzenia spekna skały. Wyniki nowszych badań ukazują również inną, prawdopodobnie bardziej powszechną, drogę powstawania tego zjawiska. Tworzenie się zgorzeli może być wynikiem specyficznego sposobu mieszania się magm, które stwierdzono w trzeciorzędowych wulkanitach Westerwaldu (Schreiber i in., 1999). Zauważono, że latorywa dajka przecinająca większe trachitowe ciało magmowe uległa, w swej przykontaktowej części, fragmentacji i rozproszeniu w postaci szlirów i drobnych (1–10 mm) kulistych ciał. Na skutek dyfuzji jonowej latorywe globuidy uległy dodatkowemu wzbogaceniu w alkalia, przy jednoczesnym zubożeniu w pierwiastki ziem alkalicznych, żelazo i tytan. W związku z różnym składem i różnymi temperaturami krystalizacji stopów tworzących globuidy oraz zasadniczą część skały w różnym czasie rozpoczyna się ich krystalizacja (gdy otaczający stop uległ już solidyfikacji globuidy pozostawały w fazie ciekłej). Zastyganie stopu tworzącego te ciała prowadzi do znacznego zmniejszenia ich objętości i powstania napięć w zastygającej skałe. Dodatkowe siły dezintegrujące skałę generowane są przez krystalizację analcymu i rekrytalizację szkliwa (www..., 2000). Sferoidalne ciała, wietrzejąc w obecności wody meteorycznej, mają stawać się „plamkami” zgorzelowymi (informacja uzyskana od J. Koppena).

Dyskusja

Fakt, że nawet najnowsze, przeprowadzone z użyciem nowoczesnych metod analitycznych, badania nad genezą zgorzeli słonecznej prowadzą do rozbieżnych wniosków implikuje krytyczne spojrzenie na ich wyniki.

Wydaje się, że powstawanie zgorzeli na drodze asymilacji ziaren kwarcu (Schreiber, 1991) ma znaczenie marginalne, co potwierdza sam autor (Schreiber, 2000). Wynika to z faktu, iż bazalty rzadko kontaktują z piaskami lub piaszkowcami kwarcowymi.

Kolejna hipoteza, według której zgorzel słoneczna jest wynikiem specyficznego mieszania magm (www..., 2000), również ma poważne mankamenty. Nie jest bowiem pewne, czy globuidy są istotnie ciałami, z których w trakcie późniejszych procesów powstają „plamki” zgorzelowe. Przeczą temu znaczne różnice strukturalne i teksturalne pomiędzy skałami zawierającymi globuidy a bazaltami zgorzelowymi. Globuidy wykazują struktury porfirowe do szklistych i tekstury bezładne lub słabo kierunkowe, podczas gdy otaczający je stop ma wyraźną strukturę trachitową (Schreiber i in., 1999). Natomiast w skałach zgorzelowych z reguły nie zauważa się żadnych różnic pomiędzy „plamkami”, a strefami skały zdrowej (m.in. Vogelsang, 1875 [W:] Pukall, 1939; Leppla, 1901; Nadybski, 1956; Śliwa, 1967; Skurzewski, 1973; Zagożdżon, 1998). Oczywiście hipotezy tej nie można całkowicie wykluczyć, gdyż „plamki” mogą ewentualnie powstawać z ekstremalnie zasymilowanych globuidów (dających się odróżnić od otaczającego stopu jedynie na podstawie wyższej koncentracji mikrolitów tlenków Fe i Ti — por. Schreiber i in., 1999). Niemniej wydaje się, że sugestie łączące powstawanie „plamek” z globuidami (www..., 2000) rozdziły się w dużej mierze w oparciu o podobieństwo ich rozmiarów i kształtów, a nie na podstawie obserwacji rozwoju zjawisk zgorzelowych w skałach o teksturze globuidowej. Dodatkowo hipoteza ta jest trudna do pogodzenia z opisanym wcześniej przemiennym występowaniem skały zgorzelowej i zdrowej w obrębie słupów bazaltowych. Zgodnie z jej założeniami strefy zgorzelowe uznać trzeba za porcje magmy zawierającej globuidy przemieszczone w obrębie stropu nie zawierającego takich form. W związku z tym granice tych stref powinny być prostopadłe do kierunku ciosu słupowego (zgodnie z kierunkiem przemieszczania się stropu) i niezależne od granic słupów bazaltowych. Ponadto przemieszczanie globuidów w środowisku magmowym powinno zaznaczyć się zmianą formy tych ciał z kulistych na owoidalne. Tymczasem obserwowane w bazaltoidach Dolnego Śląska i Opolszczyzny „plamki” mają kształty izometryczne, niezależnie od tego czy ich granice są obłe, czy bardziej nieregularne (por. Zagożdżon, 1998).

Decydującej roli w tworzeniu zgorzeli nie można też przypisywać minerałom ilastym, tak jak to robią Kühnel i in. (1994) oraz Kühnel i Tshibangu Katshi (1997). Powstają one jako minerały późniejszych etapów ewolucji skały (nie przedziej niż we wczesnym okresie postwulkanicznym — Kühnel i in., 1994). Minerały te (zdaniem cytowanych autorów) lokują się w drobnych szczelinach powstających w skale na drodze kontrakcyjnego kurczenia, tak więc przyczyna rozpadu zgorzelowego ma mieć miejsce na etapie pomagmowym. Tymczasem zarówno kształt „plamek”, jak i formy stref zgorzelowych (ryc. 6) wydają się być wynikiem procesów zachodzących jeszcze w czasie, gdy stop pozostawał przynajmniej w części płynny lub plastyczny. Łączenie zmian zgorzelowych z minerałami ilastymi napotyka też problemy innej natury. Powszechnie są spotykane bazaltoidy zawierające znaczną liczbę minerałów ilastych, a nie wykazujące zmian zgorzelowych, jak też skały zgorzelowe nie zawierające śladów tych minerałów. Minerały ilaste mogą obniżać zwięzłość

skały i ułatwiać rozpad zgorzelowy, jednak jego przyczyna pozostaje odmienna.

Najszerze potwierdzenie w wynikach badań bazaltoidów Śląska znajduje hipoteza Ernsta i Drescher-Kadena (1940). Przeprowadzone analizy rentgenowskie skał zgorzelowych z kamieniołomów Winna Góra, Męcinka, Krzeniów i Targowica (Zagożdżon, 2001) jednoznacznie wykazały obecność analcytu jedynie w „plamkach” zgorzelowych oraz wyższą zawartość nefelinu w zdrowych fragmentach skał, co potwierdza obserwacje cytowanych autorów. Atutem ich hipotezy jest wyjaśnianie przynajmniej niektórych specyficznych sposobów występowania tego zjawiska, takich jak wspomniane już naprzemienne strefy zgorzelowe i zdrowe w słupach bazaltowych. Zdaniem Ernsta (1960) zewnętrzne partie słupów bazaltowych są łatwo odgazowywane i ze względu na niedobór wody, brak tam analcytu. Tym samym nie może w nich dochodzić do powstawania zgorzeli. Krystalizacja postępująca w głąb słupa bazaltowego powoduje stworzenie izolowanej przestrzeni, w której rośnie ciśnienie parcjale pary wodnej. Prowadzi to do krystalizacji wspomnianego minerału, a w sprzyjających warunkach do jego koncentracji w niewielkich, izometrycznych obszarach. Dalszy wzrost ciśnienia w środkowych partiach słupów bazaltowych wywołuje lawinową krystalizację analcytu, którego kryształki są rozmieszczone jednorodnie. Z tego powodu obszary te, mimo zawartości analcytu, nie ulegają zgorzeli.

W podobny sposób wyjaśnić można istnienie szliropodobnych stref drobnozgorzelowych występujących w obrębie skały zawierającej duże „plamki” zgorzelowe (ryc. 1 i 6). Struktury tego typu byłyby wynikiem nierównomiernego odgazowywania skały i wynikających stąd różnic temperatury i ciśnienia w trakcie krystalizacji, a także fluktuacji tempa spadku wartości tych parametrów. W strefach wolniejszego obniżania temperatury lepkość stopu była mniejsza, a jego ruchliwość duża. Migracja stopu reszkowego ku pierwotnym zarodkom analcytu zachodzić mogła spokojniej, czego wynikiem było powstanie dużych, rzadko rozmieszczonych „plamek”. Szybszy spadek temperatury powodować mógł nagle tworzenie się wielu ośrodków krystalizacji i powstawanie zgorzeli drobnej. Z pomocą tej hipotezy trudno niestety wyjaśnić dlaczego, w niektórych sytuacjach, granice stref zgorzelowych są skośne lub prostopadłe do osi słupów bazaltowych.

Wnioski

Wyniki dotychczasowych prac nie pozwalają na jednoznaczne zaakceptowanie którejkolwiek z prezentowanych w okresie powojennym hipotez dotyczących powstawania zgorzeli bazaltowej. Nadal nie jest też możliwe przedstawienie spójnej teorii pochodzenia i rozwoju tego zjawiska. Co więcej wydaje się, że specyficzny materiał, jakim jest bazalt może ulegać podobnej dezintegracji w wyniku różnych procesów.

Prawdopodobnie w większości skał powstanie zgorzeli jest wynikiem nałożenia się procesów magmowych, pomagmowych i wietrzeniowych. Przede wszystkim zmiany tego typu wiążą się z obecnością analcytu. Mineral ten jest uznawany za przyczynę zgorzeli przez Ernsta i Drescher-Kadena (1940) oraz Ernsta (1960), którzy wyraźnie stwierdzili, że występuje on w „plamkach” zgorzelowych wszystkich przebadanych przez nich skał. Dużą jego rolę potwierdza również Kühnel (informacja uzyskana drogą korespondencyjną). Analcyt był ponadto stwierdzany w

„plamkach” zgorzelowych powstałych w wyniku asymilacji ziaren kwarcu, a także w obrębie globul (*sensu* Schreiber i in., 1999) zarówno o składzie bazaltowym, jak i fonolitowym (www..., 2000 oraz według informacji uzyskanych od U. Schreibera). O występowaniu izometrycznych skupień analcytu i nefelinu w skałach zgorzelowych informowali również Wojciechowska i Śliwa (1970).

Tak więc przyczynę powstania zgorzeli bazaltowej wiązać można z końcem etapu magmowego, choć krystalizacja analcytu ze stopu resztkowego zachodzić może w nieco większym zakresie temperatur, niż podawany przez Ernsta (1960). W nowszych pracach (np. Gottardi & Galli, 1985) pole stabilności tego minerału mieści się bowiem w przedziale 400–600°C. Grupowanie się analcytu w sferoidalnych obszarach oraz transformacje analcytu i nefelinu prowadzą do powstania w skale naprężeń, te zaś powodują utworzenie się submikroskopowych spękań. Przyjmując powyższą interpretację tworzenia się skał zgorzelowych jasną barwę „plamek” znać należy za rezultat koncentracji takich mikrospeków, o czym informują m.in. Wojciechowska i Śliwa (1970), Kühnel i in. (1994) oraz Koppen (informacje uzyskane drogą korespondencyjną). Dalszym skutkiem oddziaływania w skale wewnętrznych naprężeń jest powstanie szczelin włosowatych. Wpływ procesów hydrotermalnych może się zaznaczać rozkładem mniej stabilnych składników skały i zastępowaniem ich przez inne minerały. Wśród nich decydujące znaczenie mają minerały ilaste oraz zeolity, których powstawanie powoduje wzrost ciśnienia porowego i generuje w skale silne naprężenia wewnętrzne. Ich dodatkowe oddziaływanie mechaniczne związane jest z wahaniami objętości wywołanymi przyjmowaniem i oddawaniem wody (Kühnel i in., 1994; Kühnel i Tshibangu Katshi, 1997). Ostateczne zniszczenie spójności skały powodują prawdopodobnie dużo późniejsze, działające do dziś złożone procesy wietrzeniowe, w tym również obecność flory mchów, porostów i traw, a nawet drzew. Być może rozwój spękań włosowatych jest czasem wspomagany oddziaływaniami zewnętrznymi, takimi jak naciski tektoniczne, odciążaniem skały w miarę erodowania nadkładu, czy odprężeniem następującym już po urobieniu kopaliny. Nawiązując do przedwojennych hipotez uznających zgorzel słoneczną za wynik wietrzenia oraz uwag zawartych w niektórych publikacjach polskich (Białowska, 1980; August i in., 1995), należy stwierdzić, że proces ten, a właściwie jego późniejsze etapy, może być uznany jedynie za wietrzenie fizyczne, nie zaś chemiczne.

Część badań wykonano w ramach grantu KBN nr 9T12A 030 14.

Literatura

- AUGUST CZ., AWDANKIEWICZ M. & WOJEWODA J. 1995 — Trzeciorzędowe bazaltoidy, wulkanoklastyki i serie osadowe wschodniej części bloku przedsudeckiego. [In:] *Geologia i ochrona środowiska bloku przedsudeckiego*. Przew. 66 Zj. Pol. Tow. Geol. Wrocław: 241–251.
- BIAŁOWOLSKA A. 1980 — Geochemiczna charakterystyka niektórych bazaltoidów Dolnego Śląska i ich ultramafitowych enklaw. *Arch. Miner.*, 36: 107–163.
- BOLEWSKI A. & PARACHONIAK W. 1982 — Petrografia. Wyd. Geol.
- ERNST Th. 1960 — Probleme des „Sonnenbrandes” basaltischer Gesteine. *Zeitschr. Deutsch. Geol. Ges.*, 112: 178–182.
- ERNST Th. & DRESCHER-KADEN F.K. 1940 — Über den „Sonnenbrand” der Basalte. *Zeitschr. Angew. Min.*, 3: 73–141.
- GOTTARDI G. & GALLI E. 1985 — *Natural Zeolites*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- HIBSCH J. E. 1920 — Über den Sonnenbrand der Gesteine. *Zeitschr. Prakt. Geol. Jahrg.*, 28: 69–78.
- HOPPE W. 1936 — Wesen und Erscheinung des Sonnenbrandes an Basalten. *Steinind. und Strassenbau*, 31: 140–143.
- HOPPE W. & KELLERMANN H. 1928 — Zur Kenntnis und künstlichen Erzeugung des Sonnenbrandes an Basalten. *Zeitschr. Prakt. Geol. Jahrg.*, 36: 28–32.
- KLEMM G. 1902 — Die beim Bau der Bahnlinie Laubach-Mücke in Oberhessen entstandenen Aufschlüsse. *Notizbl. des Vereins für Erdkunde. Darmstadt. 4. Folge*, 23 [In:] *Neues Jahrb. Miner., Geol. Paläont.*, Jahrg. 1904: 51.
- KRZYŚKÓW M. 1986 — Dokumentacja geologiczna złoża bazaltu „Krzewiów” w kat. C1+C2. *Arch. Przeds. Geol. we Wrocławiu*.
- KÜHNEL R.A. & TSHIBANGU KATSHI J.-P. 1997 — Causes of basalt degrading: methods of prediction of basalt durability. *Proceedings of the Sixth Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*. Reykjavik: 81–90.
- KÜHNEL R.A., VAN DER GAAST S.J., BRYCH J., LAAN G.J. & KULNIG H. 1994 — The role of clay minerals in durability of rocks: observations on basaltic rocks. *Applied Clay Science*, 9: 225–237.
- LEPPLA A. 1901 — Über den sogenannten Sonnenbrand der Basalte. *Zeitschr. Prakt. Geol. Jahrg.*, 9: 170–176.
- MAJKOWSKA U. 1991 — Dokumentacja geologiczna złoża bazaltu „Winna Góra” w kat. C1. *Arch. Przeds. Geol. we Wrocławiu*.
- MAŚLANKIEWICZ K. 1961 — *Wulkany*. PWN.
- NADYBSKI J. 1956 — Dokumentacja geologiczna złoża bazaltu w Rębiszowie. *Przeds. Rob. Geol.-Poszuk. i Odkrywk. Kamien. Drog. Kraków*.
- PUKALL K. 1939 — Beiträge zur Frage des Sonnenbrandes des Basalte. I. *Zeitschr. Angew. Min.*, 1: 195–222.
- PUKALL K. 1939 — Beiträge zur Frage des Sonnenbrandes des Basalte. II. *Zeitschr. Angew. Min.*, 2: 277–303.
- RYKA W. & MALISZEWSKA A. 1991 — *Słownik petrograficzny*. Wyd. Geol.
- SCHREIBER U. 1991 — Basaltic „Sonnenbrand”, the result of magmatic assimilation of incorporated surface sands, and magma mixing phenomena: the alkaline volcanic association of Westerwald region, Western Germany. *Symposium on Central European Alkaline Volcanic Rocks. Abstracts*. Praha.
- SCHREIBER U., ANDERS D. & KOPPEN J. 1999 — Mixing and chemical interdiffusion of trachytic and latitic magma in a subvolcanic complex of the Tertiary Westerwald (Germany). *Lithos*, 46: 695–714.
- SKURZEWSKI A. 1973 — Dokumentacja geologiczna złoża bazaltu „Gracze” w kat. A, B, C1. *Arch. Przeds. Geol. we Wrocławiu*.
- STEUER A., HOLLER K. & DRESCHER F.K. 1929 — Über die Ursache des Sonnenbrandes. *Die Steinstraße 2. H. 1*, [In:] *Neues Jahrbuch für Miner., Geol. und Paläont.*, Jahrg., 1929: 559–560.
- STYPUŁKOWSKI B. & MAJEROWICZ A. 1994 — Analiza wpływu zgorzeli słonecznej na cechy techniczne kruszyw bazaltowych. *Drogownictwo*, 11: 261–265.
- ŚLIWA W. 1967 — Rębiszów — występowanie bazaltu na Lysej Górze. *Przew. 40 Zj. Pol. Tow. Geol. Geologia i surowce mineralne Sudetów Zachodnich*. Wyd. Geol.: 74–75.
- ŚLIWA Z. 1975 — Typy genetyczne drobnej szczelinowości w bazaltach i jej wpływ na jakość produkowanych kruszyw. *Acta Univ. Wratisl.*, 247. *Pr. Geol.-Min.*, 4: 211–233.
- TANNHÄUSER F. 1916 — Über „Sonnenbrand” bei Melaphyren. *Der Steinbruch 41–42*, [In:] *Neues Jahrbuch für Miner., Geol. und Paläont.*, Jahrg. 1920: 298.
- WOJCIECHOWSKA I. & ŚLIWA Z. 1970 — Sprawozdanie z badań bazaltu zgorzelowego ze złoża „Gronowskie Wzgórze”. *Wojewódzki Zarząd Dróg Publicznych w Zielonej Górze*.
- WWW.uni-essen.de/geologie, 2000 — strony internetowe Instytutu Geologicznego Uniwersytetu w Essen.
- ZAGOŹDZON P. 1998 — Charakterystyka bazaltów zgorzelowych występujących w kamieniołomie Winna Góra koło Jawora. *Prz. Geol.*, 46: 1171–1178.
- ZAGOŹDZON P.P. 2001 — Uwagi o przyczynach zgorzeli bazaltowej. *Pr. Nauk. Inst. Górn. Politech. Wr.*, 92, Ser.: *Konf.*, 29: 135–140.