

UKD 546.212:542.921.9:550.422:546.79]001.8:55

Zygmunt WALEŃCZAK

Radioliza wody – niedoceniony czynnik geologiczny

Radiolityczny rozkład wody jest głównym źródłem wolnego tlenu w skorupie ziemskiej. Produkty radiolitycznie zainicjowanych reakcji chemicznych odgrywają zasadniczą rolę w stopniu utleniania składników chemicznych w skałach i substancji rozpuszczonych w wodach. Są one aktywne w uwodornianiu substancji organicznej i tworzeniu się prekursorów ropy naftowej. Przyczyniają się też do „spalania się” rozproszonej w skałach substancji humusowej. W skałach można też dostrzec specyficzne zdefektowanie liniowe wywołane promieniowaniem jonizującym.

Zjawisko radiolizy wody, czyli jej rozkład pod wpływem promieniowania jonizującego, odkryto niemal równocześnie z promieniotwórczością naturalną. Zaczęto się nim intensywnie interesować wraz z rozwojem atomistyki. Woda jest wykorzystywana zarówno w charakterze moderatora i nośnika ciepła w reaktorach, jak też w technologicznej przeróbce paliwa jądrowego. Stała się modelowym układem w badaniach skutków radiolizy (I.G. Draganic, Z.D. Draganic, 1971).

W wyjaśnianiu zjawisk wywołanych oddziaływaniem promieniowania jonizującego na wodę posługujemy się modelem dyfuzyjno-rodnikowym (W.H. Hamill, 1969). W pierwszym stadium (czas trwania 10^{-16} s) cząstka jonizująca (lub w przypadku promieniowania elektromagnetycznego wtórny elektron) tworzy wzdłuż swej drogi setki lub tysiące cząstek wzbudzonych i par jonowych. Liniowy ślad przebiegu cząstki wypełniony jest nierównomiernie, tzn. w pewnych odstępach, skupiskami cząsteczek wzbudzonych i zjonizowanych. W drugim stadium (od 10^{-14} s) dochodzi do dysocjacji wzbudzonych cząsteczek wody na wolne rodniki H i OH, a w trzecim (chemicznym), zaczynającym się od 10^{-13} s, następuje szereg zwykłych reakcji chemicznych między powstałymi składnikami oraz resztą wody. W wyniku tego powstają molekularne produkty radiolizy wody H_2 i H_2O_2 . Równoległe bieżą też reakcje rekombinacji nowopowstałych cząstek i rodników w kierunku ponownego tworzenia się cząsteczek wody, a więc obniżające wydajność produktów radiolizy.

Obecność w wodzie składników rozpuszczonych umożliwia tworzenie się dodatkowych łańcuchów reakcji z udziałem cząsteczek tych substancji. Jeszcze większe komplikacje w przebiegu reakcji inicjowanych promieniowaniem jonizującym następują w układach heterogenicznych, zwłaszcza w przestrzeniach międzyfazowych (cienkich warstewkach na granicy faz, porach, szczelinach, mikroinkluzach, pęcherzykach itp.). Wówczas przejściowe produkty radiolizy reagują również z fazami stałymi. W warunkach naturalnych pojawiają się bardzo zróżnicowane pod względem chemicznym i fizycznym produkty finalne. Nierzadko utworzenie się ich w warunkach panujących w określonym środowisku geologicznym bez aktywizacji radiolitycznej byłoby bardzo mało prawdopodobne. Energia promieniowania jonizującego umożliwia wydajną realizację reakcji chemicznych, które w danych warunkach w sensie termodynamicznym są „wzbronione”.

Reakcje radiolizy różnią się między sobą wyraźnie wydajnością. Chemiczną efektywność działania promieni jonizujących określa się za pomocą tzw. wydajności radiacyjnych $G(X)$. Jest ona wyrażona liczbą rodników, atomów, cząsteczek itp. produktów (X) powstałych (względnie rozłożonych) w jednostce objętości, w wyniku absorpcji 100 eV energii promieniowania jonizującego. Na przykład w przypadku radiolizy wody pod wpływem α cząstek wydajność radiacyjna cząsteczkowego wodoru $G(H_2)$ wynosi ok. 2 cząsteczki H_2 na 100 eV zaadsorbowanej energii. Wzdłuż toru jednej tylko cząsteczki α o energii 4200 KeV może powstać ponad 40 tys. cząsteczek H_2 . Jonizujące promieniowanie w sposób niezwykle efektywny wprowadza energię w układ chemiczny. Wykorzystuje się to już praktycznie w skali technicznej do otrzymywania na drodze radiolitycznej różnych związków nieorganicznych i organicznych.

Pod wpływem absorpcji promieniowania jonizującego przez wodę w zamkniętym naczyniu ustala się równowaga między reakcjami rozkładu i syntezy wody. Po przejściu 1–5% wody w stan rozłożony reakcje praktycznie zatrzymują się. Inny rezultat oddziaływania tego promieniowania występuje w warunkach naturalnych (woda obecna w skałach i osadach). Złożoność układu fazowego i chemicznego wpływa tam na istotne przesunięcia równowag reakcji inicjowanych radiolitycznym rozkładem wody. Układy te pod względem termodynamicznym należy uznać za otwarte. Reakcje chemiczne przebiegają w obszarze międzyfazowych granic, gdzie duży wpływ na ich ostateczny rezultat ma również wymiana jonowa, zjawiska adsorpcji i kataliza. W skałach w miejscach tworzenia się produktów radiolizy wody (rodników OH i H_2O_2) koncentracje substancji będących ich akceptorami (są nimi jony chloru, substancje organiczne, jony żelaza dwuwartościowego i in.) są zwykle o kilka rzędów wyższe od stężeń powstających równolegle atomów wodoru. Dlatego realizowane są tam przede wszystkim reakcje utleniania. W ich rezultacie wśród produktów końcowych pojawiają się związki żelaza trójwartościowego, dwutlenek węgla, siarczany, azot molekularny i in. Następuje też przemieszczanie się tych składników, które są rozpuszczalne w wodzie lub występują w postaci gazowej.

Drugi produkt radiolitycznego rozkładu wody – atomowy wodór – łatwo łączy się w cząsteczki H_2 . Jako lotny składnik przemieszcza się wraz z innymi gazami wypełniając pory i przestrzenie znajdujące się w skałach. W odniesieniu do substancji bitumicznych pełni rolę reduktora. Wstępuje on np. w reakcje z węglowodorami niewysyczonymi, przeprowadzając je w węglowodory szeregu parafinowego. Ma to duże znaczenie w tworzeniu się prekursorów ropy naftowej. W gazach naturalnych występuje w bardzo zmiennych proporcjach wraz z helem. Niekiedy w gazach ziemnych jego zawartość dochodzi do kilku procent objętościowych. To dotychczas dość zagadkowe zjawisko występuje także w północno-zachodniej Polsce w skałach czerwonego spągowca.

Głównym źródłem promieniowania jonizującego w przyrodzie są rozproszone w skałach izotopy promieniotwórcze uranu, toru, a częściowo także potasu. Dlatego też w pobliżu miejsc występowania przejawów mineralizacji uranonośnych bardzo często obserwuje się symptomy intensywnego utleniania metali ze zmienną wartością. Wśród nich dość niezwykle w swym stopniu utleniania (jak na warunki hipergeniczne) są minerały należące do grupy wanadanów, a częściowo także arsenianów metali ciężkich. Spotyka się je dość często na całym świecie w pobliżu mineralizacji uranonośnych. Wyraźne przejawy mineralizacji wanadanowej stwierdzono również w Polsce, w Kletnie k. Stronia Śląskiego (J. Kinle, 1983). Występujący tam mottramit ($\text{Cu, Zn}[\text{Pb VO}_4(\text{OH})]$) tworzy jaskrawe żółtooliwkowe naloty w szczelinach i spękaniach skał węglanowych w pobliżu stref okwarcowania, w których obecny jest też ametyst i fioletowy fluoryt. W dostatecznie dużych powiększeniach (tabl. I, fig. 1) widoczna jest jego krystaliczna postać. Wanad był tam uruchomiany z występujących w najbliższym sąsiedztwie łupków grafitowych, natomiast metale ciężkie dostarczane były z obecnych na miejscu siarczków pochodzenia hydrotermalnego. Przeprowadzenie wanadu z postaci niżejwartościowej, w jakiej występuje w łupkach, w postać pięciowartościową wymaga bardzo wysokiej aktywności tlenu. Hipergeniczne wietrzenie łupków grafitowych nie stwarza tych możliwości.

Pod wpływem promieniowania jonizującego powstają w minerałach różnorodne zdefektowania. Zajmuje się nimi mineralogia radiacyjna (I.L. Komow, 1982). Mogą być one cennym źródłem informacji o przeszłości geologicznej minerałów i skał. Specyficzne rodzaje zdefektowania radiacyjnego wykazują dużą trwałość. W minerałach tworzą się w ten sposób różnorodne efekty pamięciowe pozwalające uściślić warunki ich powstawania i przeobrażenia (*l.c.*). W geologicznej skali czasu procesy samonapromieniowania prowadzą do różnorodnych deformacji mechanicznych (tworzą się szczelinki, pory i kanaliki). Obserwuje się je w wielu minerałach akcesorycznych (np. metamiktyczny stan cyrkonów czy monacytów zawierających domieszkę toru i uranu). Deformacje mechaniczne powstałe skutkiem napromieniowania cząstkami ułatwiają dyfuzję i wymianę składników sieci krystalicznych. Umożliwiają też przenikanie roztworów aktywnych pod względem chemicznym. W miarę upływu czasu pod wpływem promieniowania jonizującego w minerałach i skałach narastają naprężenia wewnętrzne, wywołane nie tylko anizotropową koncentracją defektów. Wzmagane są one również przez zwiększające się ciśnienie wewnątrz mikroinkluzyj zawierających w swym wnętrzu także produkty gazowe, powstałe w wyniku radiolitycznego rozkładu wody. Skutkiem tego minerały i skały stają się podatniejsze na oddziaływanie czynników mechanicznych i chemicznych.

W bezpośrednich obserwacjach pochodzenia radiacyjnego we wnętrzu minerałów można wykorzystać niektóre techniki mikroskopii optycznej (Z. Waleńczak, 1981a). Umożliwiają one obserwację specyficznych defektów liniowych orientacji przestrzennej, powszechnie obecnych w minerałach skałotwórczych starszych skał krystalicznych. Są one w rzeczywistości kanalikami o długości mierzonej nawet w milimetrach, o średnicy < 1 mikrona. Interesująca jest zawartość tych kanalików. Często są one wypełnione paciorkowo ułożonymi pęcherzykami zawierającymi fazę ciekłą i gazową. Dostrzeżenie tego w mikroskopie optycznym jest możliwe przez obserwację w ciemnym polu specyficznych figur ugięć (podobnie jak to ma miejsce w warunkach oświetlenia w ultramikroskopie optycznym). Współwystępujące fazy ciekła i gazowa, przemieszczające się pod wpływem ruchów molekularnych we wnętrzu tych małych pęcherzyków, powodują zmianę konfiguracji efektów ugięciowych. Faza ciekła silniej absorbuje światło na nią padające i w obrazie mikroskopowym jawi się jako ciemny punkcik (tabl. I, fig. 2) otoczony jaśniejszą plamką silniej odbijającą wiązkę światła fazy gazowej.

Zdefektowanie płytki cienkiej granitoidu prekambryjskiego pochodzenia radio-genicznego z otworu wiertniczego Prabuty IG 1 (głęb. 3929,0 m) widoczne jest na tabl. 1, fig. 2. Dostrzegalne jest też na niej charakterystyczne rozmieszczenie poszczególnych pęcherzyków wzdłuż toru cząstki jonizującej (prawdopodobnie α cząstki). Część tych liniowych defektów, znajdujących się w tym przypadku w ziarnie kwarcu, wypełniła się igiełkami rutylu. Igiełki te tworzyły się prawdopodobnie przez łączenie poszczególnych pęcherzyków w krótkie odcinki, a w końcu wypełniły cały kanalik. Występowanie igiełek rutylu w kwarcach i innych minerałach było opisywane wielokrotnie. Nie udało się natomiast dotychczas wyjaśnić ich niezwyklego pokroju. Na drodze ultramikroskopowych obserwacji można było poznać bliżej ich mechanizm tworzenia się oraz zauważyć bezpośredni związek w ich przestrzennym rozmieszczeniu z charakterystycznym zdefektowaniem struktury kryształu przez cząstki jonizujące. Nie było to dotychczas osiągalne za pomocą technik mikroskopii elektronowej ze względu na trudności w skonstruowaniu współwystępującej we wnętrzu kanalików fazy gazowej i ciekłej.

Zwiększony udział rozpuszczonych pierwiastków promieniotwórczych w skale podwyższa dawkę promieniowania jonizującego zaabsorbowaną w jednostce czasu geologicznego. Taka skała staje się też podatniejsza na oddziaływanie czynników tektonicznych i hipergenicnych. Uruchomieniu uranu rozproszonego w minerałach skałotwórczych (także z minerałów akcesorycznych) sprzyja wewnętrzne źródło utleniaczy. Największą bowiem ruchliwość wykazuje najbardziej utleniona jego postać – jon uranilowy (UO_2)²⁺. Jest on dobrze rozpuszczalny w wodach alkalicznych i – w odróżnieniu od toru – może wraz z nimi być przenoszony w trwałych kompleksowych połączeniach. Z granitoidów poddanych działaniu promieniowania jonizującego można wyługować roztworem sody prawie 30% rozpuszczonego w nich uranu.

Ze skał krystalicznych, szczególnie granitoidów, były uwalniane pod wpływem paroksyzmów górotwórczych w pewnych okresach znaczniejsze ilości uranu. W strefach tektonicznych zwłaszcza z objawami mylonityzacji mogły się one przemieszczać wraz z wodami wgłębny. Po drodze na barierach redukcyjnych następowało ich selektywne wytrącanie i tworzenie mineralizacji uranonośnych.

Wody wgłębne wzbogacane były okresowo w krótko żyjące izotopy potomne po rozkładzie głównych izotopów uranu i toru. W procesach pomagmowych i powulkanicznych może dochodzić do wyraźnego zróżnicowania składu izotopowego uranu (W.W. Czerdyncew, 1973). Chodzi tu o stosunkowo krótkotrwały izotop ²³⁴U, który powstaje w akcie rozpadu ²³⁸U – głównego izotopu uranu w przyrodzie. Atom uranu, wbudowany początkowo w sieć kryształu, po przemianie w ²³⁴U w rezultacie „odrzutu” przy wypromieniowaniu cząstki ulega przemieszczeniu i tworzy niezależny od więzby kryształu punkt defektowy. Pod względem energetycznym jest on w stanie „luźniejszym” niż atomy wbudowane w sieć kryształu. Roztwory wodne, przegrzane pary przenikające skały unoszą uran wyraźnie wzbogacony w izotop ²³⁴U. Jest on ok. 18 000 razy mniej trwały niż ²³⁸U i w krótkim czasie dostarcza następną dawkę promieniowania jonizującego wraz z dalszymi produktami jego rozpadu. Inwazje roztworów zawierających izotopy krótkotrwałe intensyfikują powstawanie produktów radiolizy wody. Przyczyniają się one między innymi do wzmoczonego oddziaływania wewnętrznych utleniaczy i reduktorów w osadach i skałach. Ze zjawiskiem tym łączą się wzmoczone objawy hematytyzacji w poszczególnych stadiach procesów pomagmowych, subwulkanicznych czy postwulkanicznych. Spotyka się je w wielu uranonośnych masywach granitoidowych. W Polsce takie wieloetapowe objawy intensywnej hematytyzacji widoczne są w utworach pomagmowych w granitoidach karkonoskich.

W wielu formacjach skał osadowych obecne są rozległe objawy wydzielania się barwnych związków trójwartościowego żelaza, które utworzyły się w warunkach wgłębnych. Przyczyniły się one także do wyniszczenia resztek substancji organicznych (głównie humusowych) obecnych w tych skałach przed inwazją utleniaczą. Nierzadko tłumaczono to wpływem procesów hipergenicznych, podczas gdy dobrze zachowane formy organicznego pochodzenia w osadzie wskazywały na inną przyczynę silnej degradacji substancji organicznej.

W skałach, które uległy takim procesom intensywnej hematytyzacji, nie zatarty się w pełni ślady po istniejących wcześniej formach pochodzenia organicznego. Można się o tym przekonać wykorzystując do ich obserwacji odpowiednie techniki mikroskopii optycznej. Na tabl. II fig. 3 widoczny jest fragment powierzchni preparatu ciemnobrunatnego piaskowca z otworu wiertniczego Zabartowo 1 (głęb. 3709,6 m) z czerwonego spągowca. Wytrącające się wodorotlenki żelaza w miejscach występowania substancji humusowej utworzyły pseudomorfozy po nitkowatych formach szczątków roślinnych. Substancje bitumiczne skupione w drobnych pęcherzykach w tle skały okazały się natomiast odporniejsze na działanie utleniające – zachowały się w mikroinkluzjach. Proces „wypalania” substancji organicznej jest wyraźnie zróżnicowany w odniesieniu do różnych typów pogrzebanej substancji organicznej. Może on też zachodzić pod wpływem czynników hipergenicznych. Jednakże w położonych głębiej warstwach głównym czynnikiem utleniającym są produkty radiolizy wody. Wyniki oznaczeń chemicznych pierwiastków promieniotwórczych w skałach nie zawsze korelują z rzeczywistymi fluktuacjami w emisji promieniowania jonizującego, któremu te skały (i obecna w nich woda) były poddawane. Wynika to z właściwości migracyjnych rozpuszczonych związków, w postaci których wraz z wodami przemieszczają się izotopy promieniotwórcze.

W ustaleniu ilościowej roli produktów radiolizy wody w przyrodzie przełomowe znaczenie miały prace eksperymentalne nad oddziaływaniem promieniowania jonizującego na układ osad morski – woda. Wyniki doświadczeń modelowych opisał I.F. Wowk (1982). Posłużono się w nich różnymi typami osadów dennych Morza Czarnego. Dały one przekonujące argumenty w ilościowej ocenie roli produktów radiolizy wody w geologicznej skali czasu. Zawiesina osadu morskiego w wodzie, zamknięta w ampułach w wyniku wchłonięcia dawki promieniowania jonizującego w ilości równoważnej (w przeliczeniu na objętość) oddziaływaniu naturalnego promieniowania jonizującego w ciągu 50 mln lat ulegała daleko idącym przeobrażeniom chemicznym i fizycznym. Pod wpływem dużego ciśnienia tworzącego się gazu, ampule te niejednokrotnie pękały, mimo że zawierały ok. 100 cm³ powietrza amortyzującego wpływ zwiększonego ciśnienia. Wydzielający się gaz odznaczał się niezwykle intensywnym, a zarazem odrażającym zapachem, wywołanym przez nowopowstałe lotne składniki organiczne. W końcowym efekcie utworzył się gazowy wodór oraz gazowy CO₂. Ten ostatni był rezultatem stałego usuwania głównego produktu rozkładu wody – rodnika OH. Jako niezwykle silny utleniacz atakował on przede wszystkim substancję organiczną obecną w osadzie. Stwierdzono też przekształcanie krzemianów w minerały ilaste, reakcje ze związkami siarki, z azotem, wywodornianie substancji bitumicznej i in. Ważnym rezultatem było tworzenie się wysokich ciśnień gazów w wyniku zjawiska radiolizy, co postawiło w nowym świetle mechanizm powstawania dużych ciśnień w niektórych miejscach skupień gazów i ciekłych bituminów.

Innym istotnym rezultatem było potwierdzenie znacznego zmniejszania się ilości wody skutkiem jej radiolizy. Towarzyszył temu wzrost ogólnej mineralizacji roztworów porowych. W stałej części (osadzie) potwierdzono nie tylko duży ubytek substancji organicznych, ale także i siarki siarczkowej. Równoległe w wodzie mor-

skiej podwyższyła się zawartość węglanów i siarczanów o 150–400%. Napromienianie próbek doprowadziło też do wzrostu w przestrzeni porowej w stopniu bardzo znacznym (kilkadziesiąt razy) uwodnionej krzemionki, a także jodu, żelaza i składników śladowych (uranu i wielu metali ciężkich) oraz jonów wapnia (o 200%) i innych kationów. Wyniki te skłaniają do przeprowadzenia rewizji w poglądach na kształtowanie się chemizmu wód wglębnych, któremu to zagadnieniu I.F. Wowk (1982) poświęcił wiele uwagi. W próbie ilościowej oceny zjawiska radiolizy wody oparł się on na zmianie koncentracji chloru w wodzie. Analizy te potwierdziły znaczną wydajność radiolitycznego rozkładu wody w układzie heterogenicznym. Jest to zresztą zgodne z wynikami innych badaczy, którzy mierzyli wydajność radiacyjną w wodzie zeolitycznej, a także tlenkowych układach heterogenicznych. Kierując się ostrożnością w modelowych rozważaniach nad oceną geochemicznej roli radiolizy w przyrodzie, I.F. Wowk (*l.c.*) proponuje przyjęcie jego zdaniem заниżonej wydajności naturalnych procesów radiolizy wody – ok. 5 cząsteczek $H_2O/100$ eV. Z przedstawionych przez niego obliczeń wynika ok. 22% radiolityczny ubytek wody rozłożonej w ciągu całej historii geologicznej Ziemi (licząc w stosunku do całkowitej ilości wody, która znalazła się w hydrosferze). W odniesieniu zaś do wody porowej w skałach osadowych ubytek ten był jeszcze znaczniejszy. W ciągu ostatnich 1,6 mld lat ubyło w tych skałach skutkiem radiolizy 27% obecnej w nich początkowo wody. Biorąc pod uwagę teraz już powszechnie przyjmowany pogląd o sedymentacyjnej akumulacji pramateriału wchodzącego w skład granitoidów fundamentu krystalicznego cokołów lądowych, skutki rozkładu radiolitycznego obecnej w nich wody szacuje I.F. Wowk (*l.c.*) na ponad 50% całkowitej ilości wody wydzielonej w procesach metamorficznych.

Doświadczenia nad radiolizą wody morskiej w układach heterogenicznych (z osadem) utwierdzają nas o bardzo znaczącym udziale naturalnych procesów radiolizy wody w produkcji tlenu (i wodoru) w przyrodzie. Procesy te przebiegają w zależności od warunków fizyczno-chemicznych z bardzo różną wydajnością. Przyjęta przez I.F. Wowka (*l.c.*) wydajność wydaje się być optymalna dla niskotemperaturowego przebiegu w warunkach występowania wód porowych. Tymczasem w wyższych temperaturach wydajność procesów radiolizy wody maleje. Istotne znaczenie ma tu też rodzaj promieniowania jonizującego. W doświadczeniach najczęściej stosuje się promieniowanie γ lub β , podczas gdy w przyrodzie największy udział ma promieniowanie α . Oprócz tego w przyrodzie woda może występować w różnych formach związania ze składnikami mineralnymi. Na wydajność reakcji inicjowanych radiolitycznie ma duży wpływ obecność akceptorów rodników i uwodnionego elektronu. Wszystkie te czynniki zmieniają się, różny też może być udział pierwiastków promieniotwórczych w skałach i wodach. Dlatego w ilościowej ocenie globalnych skutków radiolitycznego procesu produkcji tlenu lepiej się opierać na obliczeniach pośrednich. Można się tu posłużyć np. obliczeniem całkowitej ilości energii promieniowania jonizującego, wydzielonej w procesach rozkładu promieniotwórczego izotopów uranu, toru i potasu od początku istnienia Ziemi. Zakładając w takim modelu obliczeniowym, że ilość rozłożonej wody na drodze radiolitycznej była równorzędna masie współczesnej hydrosfery, w wyniku otrzymuje się wydajność radiacyjną ponad 100 razy mniejszą niż to przyjął w swych rozważaniach I.F. Wowk (1982). Z kolei posługując się w obliczeniach jeszcze innym modelem, w którym traserem jest ilość nagromadzonego w atmosferze izotopu ^{40}Ar , powstałego w wyniku promieniotwórczego rozkładu izotopu potasu ^{40}K , otrzymuje się wyniki wskazujące na 10-krotnie niższe wydajności radiacyjnego rozkładu wody w skorupie ziemskiej. Po uwzględnieniu jednak pozostałej ilości argonu obecnej w minerałach i skałach, wynik jest zbliżony do poprzedniego.

W początkowym stadium ewolucji składu chemicznego skorupy ziemskiej procesy chemicznego rozkładu wody (głównie za sprawą jej radiolizy) przebiegały intensywniej. W miarę stopniowego zmniejszania się ilości atomów pierwiastków promieniotwórczych, zwłaszcza izotopów krótkotrwałych, produkcja utleniaczy stabilizowała się. Sprzyjało to tworzeniu się dynamicznej równowagi w cyklicznym obiegu dwutlenku węgla w przyrodzie. Od czasu pojawienia się (co najmniej przed 3,5 mld lat) w powierzchniowych warstwach hydrosfery fitoplanktonu zaczął działać nowy istotny czynnik regulujący równowagę ilości CO_2 w biosferze. Kolejnym źródłem wolnego tlenu, wpływającym na jego udział w hydrosferze i atmosferze, stała się obok radiolizy i fotodysocjacji również fotosynteza.

Ilościowy udział procesów fotosyntezy w produkcji netto tlenu w przyrodzie był przez wielu badaczy stanowczo przeceniany. Wokół tego zagadnienia nagromadziło się wiele nieporozumień i błędnych wniosków. Wynikały one najczęściej z niedocenyenia ilościowych proporcji tlenu, zużytego do utleniania składników nieorganicznych obecnych w litosferze, do tlenu dostarczanego przez roślinność. Z kolei o decydującej pod tym względem roli radiolizy wody przekonano się dopiero niedawno.

Ilość tlenu we współczesnej atmosferze jest równoważna ilości rozłożonej wody, stanowiącej zaledwie 0,08% wody obecnej hydrosfery. Bez względu na to czy stało się to na drodze radiolizy, czy fotodysocjacji, czy też fotosyntezy, jest to ilość zupełnie podrzędna w stosunku do masy tlenu zużytego do utleniania składników nieorganicznych pierwotnej materii, która potem weszła w skład skorupy ziemskiej i hydrosfery. Zasadnicza część tlenu wyprodukowanego od początku istnienia naszej planety została związana w CO_2 ($0,336 \times 10^{24} \text{g O}_2$). W pierwotnej materii planetarnej węgiel występował głównie w postaci pierwiastkowej, węglików i węglowodorów. Znaczna część tlenu została zużyta do utlenienia związków żelaza dwuwartościowego do trójwartościowego, do utworzenia się siarczanów (częściowo także fosforanów) oraz związków o wyższych wartościowościach Mn, V, Co i innych pierwiastków (w sumie ponad $0,1 \times 10^{24} \text{g O}_2$). Ilość wolnego tlenu potrzebną do utlenienia związków nieorganicznych obecnych tylko we współczesnej litosferze i hydrosferze wyniosła zatem ok. $0,44 \times 10^{24} \text{g O}_2$, co w przeliczeniu na wodę stanowi ok. 35% masy współczesnej hydrosfery.

Obecnie dysponujemy uściślonymi obliczeniami (A.B. Ronow, A.A. Jaroszewski, 1978) opartymi na dziesiątkach tysięcy oznaczeń węgla organicznego w różnych typach skał skorupy ziemskiej. Stanowią one podstawę do wyliczenia (z pewnym przybliżeniem) ekwiwalentnej ilości tlenu netto, dostarczonego w procesach fotosyntezy przez organizmy roślinne. Nie przekracza ona $0,052 \times 10^{24} \text{g O}_2$, co w stosunku do ilości tlenu obecnego w atmosferze ($0,0012 \times 10^{24} \text{g O}_2$) wydaje się dużo, ale stanowi tylko ok. 12% ilości tlenu zużytego do utlenienia składników nieorganicznych. Do wyprodukowania tej ilości tlenu potrzeba było roślinom zaledwie 4,2% ogólnej masy wody obecnej we współczesnej hydrosferze, a więc 8,3 razy mniej niż do produkcji tlenu niezbędnego do utlenienia substancji nieorganicznych wchodzących w skład litosfery.

Produkcja tlenu przez rośliny jest ograniczona ponownym jego zużyciem w procesach utleniania obumarłej substancji organicznej. Najintensywniej jest on rozchodowany w początkowym stadium jej degradacji. Tylko znikoma jej część zostaje pogrzebana w osadach. I tam również postępuje proces dalszego powolnego jej wyniszczenia przez setki, a nawet miliardy lat.

Produkcja substancji organicznej w zbiornikach wodnych trwa co najmniej 3,5 mld lat. Na obszarach, gdzie mogły zachodzić procesy fotosyntezy, była ona ograniczana tylko ilością składników nieorganicznych niezbędnych dla normalnego

rozwoju fitoplanktonu. Również w warunkach współczesnych obowiązuje ta sama prawidłowość, a fitoplankton – mimo opanowania przez rośliny powierzchni łądów – jest nadal zaliczany do głównych producentów substancji organicznej. Można więc zadać pytanie: co się stało z tak olbrzymią ilością substancji organicznej wyprodukowanej od początku istnienia życia na Ziemi? Niewątpliwie znaczna jej część została pogrzebana w osadach prekambryjskich. Ogromny materiał analityczny dokumentuje natomiast nieproporcjonalnie duży wzrost zawartości węglanów i węgla organicznego w skałach, które powstały w ciągu ostatnich 600 mln lat. Nastąpił on poprzez dostarczanie CO_2 z głębszych warstw Ziemi. Towarzyszył temu rozkład obecnych tam węglanów oraz proces „wypalania” się pogrzebanej substancji organicznej. Pewna część CO_2 dostarczana jest też z jeszcze głębszych stref w procesie odgazowania płaszczka Ziemi.

Oprócz stosunkowo niewielkich skupień substancji węglistych czy bitumicznych pochodzenia organicznego w skałach metamorficznych pozostały po szczątkach organicznych także postacie drobnodispersyjne. W minerałach i skałach tworzą one charakterystyczne zdefektowanie. Te właśnie „niewypalone” do końca relikty substancji węglistych i bitumicznych wykazują specyficzne właściwości pamięciowe. Można je wykorzystywać do śledzenia form pochodzenia organicznego w skałach, w których uległy one daleko idącemu zatarciu (Z. Waleńczak, 1981b).

Substancje organiczne w osadach sorbowały uran zwiększając jego koncentrację. O obecności pierwiastków promieniotwórczych w skałach prekambryjskich pochodzenia metamorficznego świadczy obfitość śladów radiacyjnego zdefektowania. Ślady po torach cząstek jonizujących występują nie tylko w granitoidach (tabl. I, fig. 2), ale również w skałach zasadowych (paragabrach, paraanortozytach czy paranorytach). Przykładem może tu być ziarno skalenia w anortozycie z otworu wiertniczego Sejny IG 1 (głęb. 1150,5 m) widoczne na tabl. II, fig. 4, z wyraźnym zdefektowaniem pochodzenia radiacyjnego. W tej samej próbce skały czytelne są różne formy odziedziczone po szczątkach mikroflory (organizmów saprofitycznych) obecnej w osadzie pierwotnym (W. Ryka, Z. Waleńczak, praca w druku). Miejsca wzbogacone w relikty substancji organicznej stawały się niekiedy ośrodkami krystalizacji minerałów nieprzezroczystych; utworzyły się pseudomorfozy odwzorowujące poszczególne komórki (fig. 5). W tym przypadku nawet bardzo daleko idąca przebudowa składu skały pierwotnej (prawdopodobnie osadu marglistego) nie zatarała śladów świadczących o obfitości w osadzie szczątków organicznych.

Innym przekonującym dowodem nagromadzenia się w osadach prekambryjskich bardzo znacznych ilości substancji organicznej w postaci bituminów są wystopienia tzw. szungitów w Karelii (górny jatulium). Są to resztki dawnego złoża, giganta, bituminów, które ostały się w dawnych skałach zbiornikowych (W.A. Sokołow, J.K. Kalinin, red., 1978). Złoże to początkowo zawierało kilkaset miliardów metrów sześciennych ciekłej substancji bitumicznej (a więc porównywalną ilość ze współczesnymi najbogatszymi złożami, gigantami, ropy naftowej). W procesach metamorficznych przeobraziła się ona w szklistą odmianę węgla pierwiastkowego, nazwaną szungitem.

Jednym z najszybciej wyczerpujących się składników warunkujących podtrzymanie rozwoju życia w biosferze jest CO_2 . Jego dyspozycyjny zapas jest nieduży. Biorąc pod uwagę jego przeciętne zużycie w fanerozoiku, pełne wyczerpanie nastąpiłoby już w czasie krótszym od 500 mln lat; zapobiega temu jednak dynamiczna równowaga w obiegu tego składnika. Zasadnicza część CO_2 odkłada się zawsze w osadach w postaci węglanów, a tylko nieznaczna w węglu związanym organicznie.

CO₂ jest dostarczany do biosfery poprzez działalność wulkaniczną oraz procesy metamorficzne. Mają one w skali ostatnich 600 mln lat (takimi danymi obecnie dysponujemy) charakter pulsujący, związany z okresowym natężeniem się działalności wulkanicznej i tworzeniem geosynklin (A.B. Ronow, 1978). W biosferze wykształcił się swoisty fenomen samoregulacji zawartości CO₂, decydujący o podtrzymaniu życia na Ziemi. Nie dopuszczał on w tym okresie do znaczniejszych wahań jego zawartości. Przemawia za tym fakt podtrzymywania intensywności globalnej produkcji substancji organicznej na Ziemi. Podobny mechanizm istniał również w prekambrze. Wraz z przekroczeniem biostratygraficznie wyznaczonej granicy prekambr-kambr, w warunkach rozwoju fitoplanktonu nie nastąpiła bowiem w skali globalnej gwałtowna zmiana. Pojawiły się tylko nowe organizmy, których szczątki dały podstawę do przyjęcia biostratygraficznej skali wieku dla młodszych skał osadowych. Dopiero pod koniec syluru, wraz z wyjściem na ląd roślin naczyniowych, pojawił się inny, bardzo istotny czynnik w produkcji substancji organicznej – roślinność obszarów lądowych. Dostarczana przez nią substancja humusowa nabrała istotnego znaczenia w ilościowych stosunkach substancji organicznej gromadzącej się w strefie przybrzeżnej w środowisku błotnym. Powstały dogodne warunki tworzenia się materiału wyjściowego dla węgla humusowych.

Proces wyniszczania substancji organicznej zaznacza się nie tylko w skałach metamorficznych. Jego skutki można dostrzec w wielu młodszych skałach osadowych. W niektórych jest on tak daleko posunięty, iż genezę tych skał łączono wyłącznie ze zjawiskiem chemicznego wytrącania się osadów. Wiele wapieni, dolomitów czy osadów formacji solonośnych kryje w sobie nie odczytane dotychczas formy pochodzenia organicznego, w których zatarciu znaczący udział miały produkty radiolizy wody. W złożach soli potasowych często są objawy utleniania domieszki związków żelaza (hematytyzacja) i jednocześnie stwierdza się obecność gazowych domieszek będących reduktorami (metan i wodór); pojawiają się też ciekłe węglowodory parafinowe. Można je obserwować również w kopalni soli w Kłodawie, gdzie także występuje sól niebieska zdefektowana pod wpływem promieniowania jonizującego. Początkowo w tych skałach znajdowało się dużo szczątków po mikroorganizmach oraz plantonie roślinnym. Zostały one zdegradowane i są czytelne tylko z zastosowaniem odpowiednich technik mikroskopowych.

Wodór gazowy uwolniony w procesach radiolitycznych odgrywa niezwykle istotną rolę w uwodornianiu substancji organicznej. Pogrzebana substancja organiczna wykazuje bardzo wyraźny deficyt wodoru w porównaniu z węglowodorami ropy naftowej i metanem. Tworzenie się z niej w sposób naturalny substancji uważanych za prekursory ropy naftowej bez dostarczania dodatkowej ilości wodoru byłoby procesem niewydajnym. Zwracano na to uwagę niejednokrotnie w krytycznym podejściu do założeń migracyjnej teorii tworzenia się ropy. Zwiększony udział uranu w substancji organicznej stymulował dostarczanie wodoru w procesach radiolizy wody. Usuwanie rodników OH następowało głównie kosztem utlenienia związków humusowych, a także siarczków i siarkowodoru. Tworzył się przy tym dwutlenek węgla, siarczany i azot gazowy, przy czym ten ostatni kosztem azotu organicznie związanego w substancji humusowej. Sprzyjało to tworzeniu się wysokich ciśnień warstwowych, co z kolei stymulowało proces uwodorniania części substancji organicznej zbliżonej składem do bituminów.

W takiej sytuacji były spełnione warunki fizykochemiczne konieczne do tego, ażeby produkty utleniania były obojętne pod względem chemicznym w stosunku do powstającego produktu redukcji, tj. gazowego wodoru i węglowodorów. Tworzyły się zatem naturalne warunki syntezy węglowodorów zbieżne z modelowymi reakcjami wykorzystywanymi w rozwiązaniach technologicznych z zastosowaniem

radiolizy w syntezie związków organicznych (P. Neta, 1976). Radioliza wody odgrywa doniosłą rolę w procesach generacji substancji ropopodobnych z pogrzebanych w skałach osadowych resztek organizmów, lecz także bardzo aktywnie oddziałuje na przebudowę minerałów ilastych oraz stymuluje uruchamianie krzemionki i uszczelniania skał. Są to zjawiska, którymi interesujemy się szczególnie w poszukiwaniach ropy i gazu. Zrozumiały staje się także udział podwyższonych koncentracji helu w wielu naturalnych gazach ziemnych. Innej interpretacji wymaga wyjaśnienie udziału gazowego azotu i wodoru.

Radiolityczny rozkład wody prowadzi do zmian koncentracji soli w wodach podziemnych. Powoduje też określone przesunięcia w jej składzie izotopowym (I.F. Wowk, 1982). Znany jest wzrost udziału deuteru w wodzie oceanicznej. Uciekający bowiem w przestrzeń międzyplanetarną wodór jest wzbogacony w lżejszy izotop. Ze skutkami radiolizy wody trzeba się też liczyć w badaniach termobarometrycznych. W substancjach zamkniętych w inkluzjach gazowo-ciekłych znajdujemy wiele składników czy też anomalie wysokich ich stężeń, które mogą być wyjaśnione przy uwzględnieniu zjawisk radiolitycznego ubytku w nich wody.

Geologiczne znaczenie radiolizy wody zostało dostrzeżone niedawno. Niewątpliwie wpływało ono z różną intensywnością na kształtowanie się poszczególnych środowisk geologicznych. Jej skutkom będziemy zmuszeni poświęcić coraz większą uwagę w geologicznej praktyce poszukiwawczej. Dotyczy to w szczególności złóż surowców energetycznych, zwłaszcza węglowodorów. W powstawaniu tych ostatnich w skałach osadowych zawierających szczątki pochodzenia organicznego znaczącą rolę pod względem ilościowym miały „wzbronione” reakcje uwodorniania inicjowane przez produkty radiolizy wody, która z kolei zależy od obecności w wodach i skałach pierwiastków promieniotwórczych. Zjawisko radiolizy pozwala też głębiej wnikać i wyjaśnić mechanizm dynamicznej równowagi w obiegu dwutlenku węgla i tlenu w przyrodzie, warunkującego podtrzymanie życia na Ziemi.

Instytut Geochemii,
Mineralogii i Petrografii
Uniwersytetu Warszawskiego
Warszawa, al. Żwirki i Wigury 93
Nadesłano dnia 18 kwietnia 1984 r.

PIŚMIENICTWO

- DRAGANIC I.G., DRAGANIC Z.D. (1971) – The radiation chemistry of water N.Y., L. Acad. Press, p. 244.
- HAMILL W.H. (1969) – A model for the radiolysis of water. *Jour. Phys. Chem.*, 73, p. 1341–1347, nr 5.
- NETA P. (1976) – Application of radiation techniques to the study of organic radicals. *Adv. Phys. Org. Chem.*, 12, p. 223–297.
- KINLE J. (1983) – Substancje węgliste w metamorfiku Stronia Śl. *Arch. Wydz. Geol. UW. Warszawa*.
- RYKA W., WALEŃCZAK Z. (praca w druku) – Ślady życia organicznego w archaicznej strukturze Sejn.
- WALEŃCZAK Z. (1981a) – Metody ciemnego pola i kontrastu fazowego w mikroskopowych badaniach skał. *Arch. Miner.* 37, p. 5–25, z. 2.
- WALEŃCZAK Z. (1981b) – Właściwości pamięciowe drobnodispersyjnych domieszek w minerałach i możliwości ich wykorzystania. *Biul. Inst. Geol.*, 334, p. 5–46.

- ВОВК И.Ф. (1982) — Рассолы кристаллического фундамента щитов. АН СССР, Наукова Думка, стр. 3—163.
- КОМОВ И.Л. (1982) — Радиационная минералогия. Энергоиздат, стр. 3—173. Москва.
- РОНОВ А.Б. (1978) — Принципы сохранения жизни в ходе геологической эволюции Земли. Природа, 4, стр. 30—41.
- РОНОВ А.Б., ЯРОШЕВСКИЙ А.А. (1978) — Химический состав земной коры и её оболочек. В: Тектоносфера Земли, стр. 379—401. Изд. Наука. Москва.
- СОКОЛОВ В.А., КАЛИНИН Ю.К., ред. (1978) — Шунгиты Карелии и пути их комплексного использования. Карелия Петрозаводск, стр. 3—239.
- ЧЕРДЫНЦЕВ В.В. (1973) — Ядерная вулканология. АН СССР, Изд. Наука, стр. 7—186.

Зыгмунт ВЕЛЕНЬЧАК

РАДИОЛИЗ ВОДЫ — НЕДООЦЕНИВАЕМЫЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКТОР

Резюме

Ионизирующее излучение, главным источником которого в природе являются изотопы урана, тория и в меньшей мере калий ^{40}K , доставляет не только тепловую энергию, но и необычайно эффективно вводит энергию в химические структуры. Именно этот аспект до сих пор почти не принимался во внимание при геологических исследованиях. Между тем в эволюции химического состава земной материи составляющей в настоящее время самую внешнюю ее сферу (атмосфера, гидросфера и литосфера), химические процессы, возбуждаемые распадом воды под действием ионизирующего излучения, имели первоочередное значение. Продукты такого распада воды являются сильнейшими окислителями (радикалы OH и H_2O_2) или сильными восстановителями (атомный водород, гидратированный электрон, молекулярный водород). В естественных условиях в водах и породах они только отчасти соединяются снова в молекулы воды. Повсеместное присутствие в этих средах акцепторов окислителей приводит к сдвигу химического равновесия. В процессе радиолиза образовались продукты окисления и восстановления, имеющие существенное значение в балансе вод в гидросфере. В породах наблюдаются многочисленные проявления непосредственного и химического воздействия ионизирующего излучения. Предварительная количественная оценка этого явления, подтверждаемая результатами экспериментальных исследований и моделированных расчетов, убеждает в значительной (в некоторых геологических средах даже 50%) убыли воды. Освобождаемый кислород, в первую очередь расходовался на окисление неорганических соединений с одновременным образованием двуокиси углерода, соединений трехвалентного железа, сульфатов и др. соединений высшей степени окисления. Большая часть газообразного водорода исчезла в межпланетном пространстве. Баланс образовавшегося кислорода является однозначным свидетельством доминирующей роли воды в производстве кислорода на протяжении всей истории Земли.

Участие процессов фотосинтеза в производстве кислорода количественно переоценено. Он составляет всего 12% количества кислорода, израсходованного на окисление неорганических веществ. Продукты радиолиза способствовали „сожжению” вещества органического происхождения, присутствующего в породах и включению содержащегося в нем углерода во вторичную циркуляцию в виде CO_2 . Этот процесс имел место не только в докембрийских отложениях, но и во многих более молодых осадочных породах (известняках, доломитах, осадках соленосных свит). Газообразный водород, высвобождавшийся в процессе распада воды под действием иони-

зирующего излучения, играл весьма важную роль в гидрировании погребенного органического вещества и образовании предшественников нефти. Продукты радиолиза активно воздействуют на минеральные соединения, содержащиеся в породах. Они участвуют в перестройке глинистых минералов, способствуют появлению кремнезема, изолированности пород, а также изменению концентрации солей в поровых водах. Появляющиеся газы: H_2 , CO_2 , N_2 существенным образом способствуют повышению пластового давления.

Процессы радиолиза наиболее активно участвовали в производстве кислорода в самом начале существования Земли, когда еще не остыли кратко существующие изотопы и в ионизирующем излучении большое участие принимали уран и калий. Поддержание жизни на Земле с начала распространения фитопланктона в поверхностных водах (примерно 3,5 млрд. лет назад) было возможно благодаря выработавшемуся динамическому равновесию в притоке двуокиси углерода, пополнявшей небольшой ее запас в биосфере. В результате длительного процесса преобладающая часть карбонатов и органического вещества скопилась в фанерозойских породах. Концентрация двуокиси углерода в атмосфере могла меняться лишь незначительно. Фактором, регулирующим уровень концентрации CO_2 в атмосфере, было выпадение карбонатов и органического углерода, восполняющих приток двуокиси углерода из глубин, где он рождался в процессе метаморфических преобразований (при распаде карбонатов и „сжигании” органического углерода), а также возникал в процессе дегазации покрова.

Zygmunt WALEŃCZAK

RADIOLYSIS OF WATER – AN UNDERESTIMATED GEOLOGICAL FACTOR

Summary

In the nature, ionizing radiation is mainly due to isotopes of uranium, thorium and, on smaller scale, potassium ^{40}K . It produces thermal energy, being at the same time highly effective source of energy introduced into chemical systems. The latter aspect was hitherto almost completely neglected in geological studies. However, it should be noted that chemical processes initiated by radiolytic decomposition of water have been of primary importance in evolution of chemical composition of the matter forming at present the most external zones of the Earth (atmosphere, hydrosphere and lithosphere). Products of radiolytic decomposition of water represent either very strong oxidants (radicals OH and H_2O_2) or strong reducers (atomic hydrogen, hydrated electron, molecular hydrogen). Only a part of them form again water particles in natural environments of waters and rocks. Omnipresence of oxidant acceptors in these environments results in marked shift of chemical equilibrium. Radiolysis has been responsible for origin of products of oxidation and reduction, in amounts significant for water ballance in hydrosphere. Rocks display numerous traces of direct effects of physical and chemical action of ionizing radiation. Preliminary quantitative estimations of that phenomenon, supported by results of experimental studies and model calculations, indicate significant loss of water (equal even 50% in some geological environments). Freed oxygen has been mainly used in oxidation of inorganic compounds and, at the same time, for formation of carbon dioxide, trivalent iron compounds, sulfates, and other compounds representing high level of oxidation. In turn, the overwhelming part of hydrogen escaped into interplanetary space. The ballance of oxygen produced in the above mentioned way unequivocally shows predominating role of water radiolysis in its production throughout the whole history of the Earth.

Quantitative share of processes of photosynthesis in production of oxygen was overestimated. The processes appear responsible for production of merely 12% of oxygen used in oxidation of inorganic

components. Products of radiolysis contribute to "burning out" organic matter buried in rocks as well as reintroduction of its carbon in subsequent cycle in the form of CO_2 . This phenomenon is traceable in Precambrian rocks and several younger series (limestones, dolomites, saliferous formation rocks). Gaseous hydrogen freed by processes of radiolytic decomposition has been playing highly significant role in hydrogenisation of buried organic matter and formation of precursors of oil. Radiolysis products also bear active influence on mineral matter present in rocks. They take part in alteration of clay minerals, facilitate remobilization of silica, contribute to changes in concentration of salts in pore waters and stimulate sealing of rocks. The resulting gaseous products – H_2 , CO_2 and N_2 – markedly contribute to increase of layer pressure.

The share of radiolysis processes in production of oxygen has been the greatest at early stages of the Earth history, i.e. in times of activity of short-living isotopes and high activity of uranium and potassium in producing the ionizing radiation. The survival of life on the Earth from the beginning of dispersal of phytoplankton in surface waters (at least since 3.5 milliard years) has been only possible thanks to establishment of a dynamic ballance in supply of carbon dioxide, increasing limited resources of the latter in biosphere. In result of prolonged action of that mechanism, the overwhelming part of carbonates and organic matter became concentrated in Phanerozoic rocks. In turn, the changes in concentration of carbon dioxide in atmosphere appear highly limited. The level of content of carbon dioxide in atmosphere has been controlled by precipitation of carbonates and sedimentation of organically-bound carbon, compensating supply of carbon dioxide from deep-seated layers in connection with both metamorphic processes (leading to decomposition of carbonates and "burning out" organic carbon) and those of degasification of the Mantle.

TABLICA I

Fig. 1. Agregaty krystalicznego mottramitu z żółto-oliwkowych nalotów na wapieniu. Kletno k. Stronia Śl. (Dolny Śląsk); pow. 1200 ×

Crystalline mottramite aggregates from yellow-olive coatings on limestone. Kletno near Stronia Śląskie (Lower Silesia); × 1200

Fig. 2. Kanaliki radiolitycznego pochodzenia zawierające paciorkowato ułożone mikropęcherzyki gazowo-ciekłe. Ziarno kwarcu w granitoidzie z otworu wiertniczego Prabuty IG 1, głęb. 3929,0 m; pow. 400 ×

Channels formed in result of radiolysis, with string-like arranged gaseous-fluid microvesicles. Quartz grain from a granitoid, borehole Prabuty IG 1, depth 3929.0 m; × 400



Fig. 1



Fig. 2

Zygmunt WALEŃCZAK – Radioliza wody – niedoceniony czynnik geologiczny

TABLICA II

Fig. 3. Powierzchnia brunatnej skały okruchowej z pseudomorfozami nitkowatych form organicznego pochodzenia. W tle skały mikropęcherzyki zawierające substancje bitumiczne. Otwór wiertniczy Zabartowo 1, głęb. 3709,6 m; pow. 410 ×

Surface of brownish detrital rocks displaying pseudomorphoses of thread-like forms of organic origin. Microvesicles yielding bituminous matter visible in the cement. Borehole Zabartowo 1, depth 3709.6 m; ×410

Fig. 4. Ślady torów cząstek jonizujących w ziarnie skalenia w anortozycie. Otwór wiertniczy Sejny IG 1, głęb. 1150,5 m; pow. 110 ×

Traces of trails of ionizing particles in feldspar grain from anorthosite. Borehole Sejny IG 1, depth 1150.5 m; ×110

Fig. 5. Tworzenie się pseudomorfozy nieprzezroczystego minerału po resztkach mikroorganizmu po-
grzebanego w pierwotnym osadzie. Anortozyt – ziarno skalenia. Otwór wiertniczy Sejny IG 1, głęb.
1150.5 m; pow. 130 ×

Formation of pseudomorphosis of opaque mineral after remains of microorganism buried in original sediment. Anorthosite – feldspar grain. Borehole Sejny IG 1, depth 1150.5 m; ×130

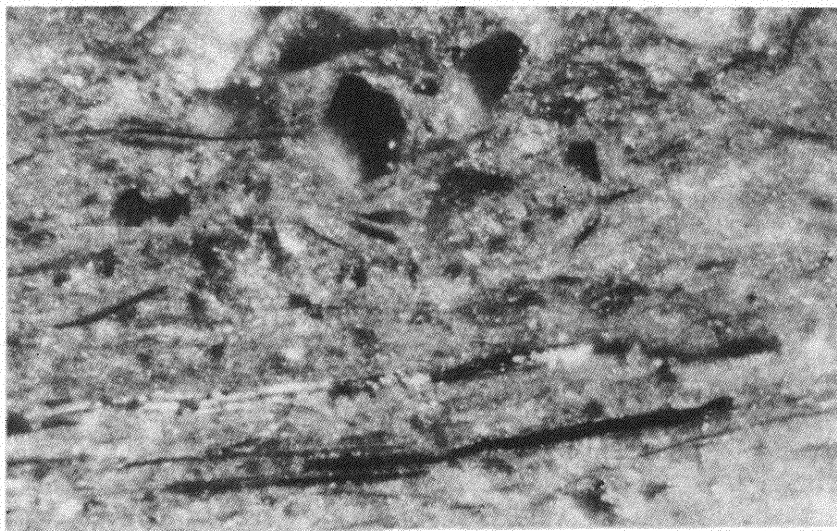


Fig. 3



Fig. 4

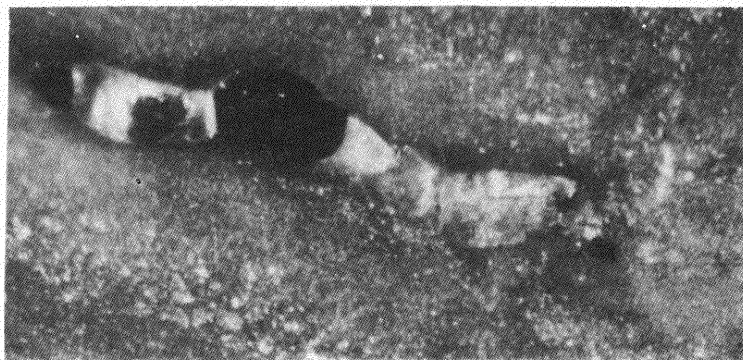


Fig. 5

Zygmunt WALEŃCZAK – Radioliza wody – niedoceniony czynnik geologiczny