

Jan SZEWCZYK

Geneza aureoli radowych wokół stref triasowej mineralizacji uranowej w syneklizie perybałtyckiej

W drugiej połowie lat 70-tych w Instytucie Geologicznym podjęto poszukiwania złóż rud uranu w syneklizie perybałtyckiej. Na podstawie analizy wyników badań geofizycznych i laboratoryjnych stwierdzono m.in. obecność aureoli radowych (Ra-226) wokół dotychczas wykrytych uranowych ciał rudnych. Wyjaśniono mechanizm powstawania tych aureoli, a także przedstawiono propozycję metodyczną wykorzystania ich w prospekcji złóż uranu na badanym obszarze.

WSTĘP

Aureole radonowe (Rn-222) lub radowo-radonowe (Rn-226–Rn-222) wokół ciał uranowych znajdujących się w strefie areacji bądź w strefie intensywnej wymiany wód są wykorzystywane powszechnie od lat w radiometrycznych metodach prospekcji złóż uranu (L.W. Gorbuszina i in., 1972). Mechanizm powstawania tych aureoli, mimo licznych prób wyjaśnienia, nie wydaje się jednak dotychczas wystarczająco jasny (A.Y. Smith i in., 1976; I.E. Gingrich, J.C. Fisher, 1976; N.M. Soonawala, W.M. Telford, 1980). Przyjmowany przez większość badaczy dyfuzyjny model transportu radonu nie tłumaczył pochodzenia wielu anomalii obserwowanych niejednokrotnie nad ciałami uranowymi znajdującymi się na znacznych głębokościach, sięgających 100, a nawet 200 m (I.E. Gingrich, J.C. Fisher, 1976). Dopiero opublikowane niedawno prace K. Kristianssona i L. Malmqvista (1982, 1984), w których zaproponowano przyjęcie niedyfuzyjnego mechanizmu transportu radonu, wydają się wyjaśniać w sposób przekonujący przemieszczanie się radonu w środowisku geologicznym. Dotychczasowy brak zadowalającego teoretycznego wytłumaczenia mechanizmu transportu radonu nie przeszkadzał, co warto podkreślić, w efektywnym na ogół stosowaniu powierzchniowych metod radiometrycznych śledzących obecność radonu (metoda emacyjna, *track-etch*) bądź produktów jego rozpadu (spektrometria gamma, pomiar całkowitego promieniowania gamma).

Tabela 1

**Izotopy rodzin promieniotwórczych U-238 wraz z typem
oraz półokresem rozpadów (P.G. Killeen i in., 1976)**

Izotopy	$T_{1/2}$
U-238	$(4,51 \times 10^9 \text{ l})$
↓ α	
Th-234	$(24,10 \text{ d})$
↓ β	
Pa-234	$(1,14 \text{ m})$
↓ β	
U-234	$(2,48 \times 10^5 \text{ l})$
↓ α	
Th-230	$(8,0 \times 10^4 \text{ l})$
↓ α	
Ra-226	$(1,622 \times 10^3 \text{ l})$
↓ α	
Rn-222	$(3,825 \text{ d})$
↓ α	
Po-218	$(3,05 \text{ m})$
↓ α	
Pb-214	$(26,8 \text{ m})$
↓ β	
Bi-214	$(19,7 \text{ m})$
↓ β	
Po-214	$(1,50 \times 10^{-4} \text{ s})$
↓ α	
Pb-210	(22 l)
↓ β	
Bi-210	$(5,02 \text{ d})$
↓ β	
Po-210	(138 d)
↓ α	
Pb-206	stabilny

l – lata, d – doby, m – minuty, s – sekundy, $T_{1/2}$ –
półokres rozpadu, α – rozpad typu alfa, β – rozpad
typu beta

W miarę wyczerpywania się złóż płytko zalegających, wzrastające zainteresowanie zakrytymi złożami uranu występującymi na większych głębokościach i związane z tym brak jakichkolwiek sygnałów powierzchniowych o ich obecności skłania do znalezienia skutecznych metod prospekcji takich złóż. Stosowane dotychczas wyłącznie metody penetracji wiertniczej, przede wszystkim ze względu na bardzo niewielkie rozmiary poszukiwanych ciał rudnych, okazują się bardzo żmudne i kosztowne. Nieliczne dostępne publikacje, jakie ukazały się na ten temat (B. Smith i in., 1976; J.H. Scott, J.J. Daniels, 1976; J.J. Daniels i in., 1977; B.T. Brady, R.S. Rice, 1977; W. Dyck, 1979; J.K. Applegate i in., 1982), nie zawierają, jak dotychczas, konkretnych propozycji metod efektywnych poszukiwań takich złóż.

W drugiej połowie lat 70-tych w Instytucie Geologicznym podjęto poszukiwania piaskowcowych złóż uranu w utworach triasu w syneklizie perybałtyckiej (E. Bareja i in., 1980). Możliwość istnienia takich złóż sygnalizowały wyniki wcześniejszych badań geologicznych – uzyskane głównie z otworów wiertniczych Pasiek IG 1 i Krynica Morska 2 (J. Kanasiewicz i in., 1965; M. Sałdan, R. Strzelecki, 1975).

Na podstawie szczegółowej analizy badań geofizycznych i laboratoryjnych autor (J. Szewczyk, 1979) stwierdził jednoznacznie obecność m.in. aureoli radowych wokół ciał rudnych wykrytych za pośrednictwem otworów wiertniczych. Wyjaśnienie mechanizmu powstawania tych aureoli może, zdaniem autora, okazać się istotne dla określenia metody poszukiwań uranowych ciał rudnych w syneklizie perybałtyckiej.

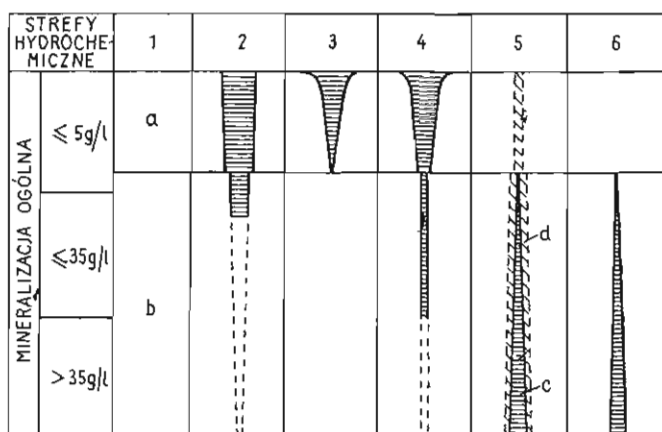


Fig. 1. Hydrochemiczna strefowość w utworach pozbawionych materii organicznej (W. Dyck, 1979)
Hydrochemical zonality in rocks devoid of organic matter (W. Dyck, 1979)

1 – strefy gazowe i geochemiczne: a – strefa wód zawierających O_2 , pochodzenia atmosferycznego, N_2 i CO_2 , pochodzenia atmosferycznego oraz częściowo glebowego, b – zawartość N_2 pochodzenia atmosferycznego oraz częściowo glebowego; 2 – Eh wód złożowych dla wód o pH w przedziale 6,7–8,5; 3 – zawartość O_2 w roztworze; 4 – stopień przeobrażenia złóż uranu; 5 – zawartość radu w wodach złożowych: c – na obszarach pozbawionych złóż uranu, d – na obszarach złożowych; 6 – zawartość Fe^{2+} w wodach złożowych

1 – gas and geochemical zones: a – zone of waters yielding atmospheric O_2 , and atmospheric and, partly, soil N_2 and CO_2 , b – zone of waters yielding atmospheric and, partly, soil N_2 ; 2 – Eh of deposit waters with values pH varying from 6.7 to 8.5; 3 – O_2 content in solution; 4 – rate of weathering of uranium deposits; 5 – Ra content in deposit waters: c – in areas without uranium deposits, d – in uranium deposit areas; 6 – Fe^{2+} content in deposit waters

U-238 ORAZ PRODUKTY JEGO ROZPADU W OŚRODKACH ZAWODNIONYCH

Izotop U-238, będący jednym z trzech naturalnych izotopów uranu (U-234, U-235 oraz U-238), ma podstawowe znaczenie przy prowadzeniu prac prospekcyjnych ze względu na dominujący udział wagowy (99,2739%). Emisja promieniowania gamma towarzysząca rozpadom promieniotwórczych izotopów szeregu U-238, a szczególnie Bi-214 i Pb-214 (tab. 1), jest od lat wykorzystywana w poszukiwaniu i rozpoznawaniu złóż uranu (L.W.Gorbuszina i in., 1972). W przypadku osadowych epigenetycznych złóż uranu przyjmuje się, że udział promie-

niowania gamma izotopów szeregu Th-232 oraz izotopu K-40 może być pomiarany (*Borehole logging for uranium exploration*, 1982). W tej sytuacji bezpośrednio obserwowana intensywność naturalnego promieniowania gamma uwarunkowana jest praktycznie koncentracją izotopu Bi-214.

W przypadku braku migracji wszystkich produktów rozpadu U-238, tzn. przy zachowaniu warunku równowagi promieniotwórczej w całym szeregu, intensywność promieniowania gamma może być źródłem informacji o koncentracji tego izotopu, a tym samym o koncentracji uranu w badanych skałach (J.S. Adams, P. Gasparini, 1970). Czas potrzebny do ustalenia się stanu równowagi w całym szeregu, liczony od momentu zdeponowania uranu do chwili wykonania pomiaru promieniowania gamma, wynosi ok. 1 mln lat (R.H. Morse, 1976).

Różnice własności fizykochemicznych poszczególnych izotopów tworzących rodzinę promieniotwórczą U-238 wpływają na ich odmienne zachowanie się w różnych środowiskach geologicznych. Dla stanu równowagi promieniotwórczej w ośrodkach zawodnionych najistotniejsze są różnice w mobilności U-238 i Ra-226. W przeciwieństwie do warunków w strefie areacji, mobilność Ra-222 nie odgrywa praktycznie żadnej roli w procesie ustalania się stanu równowagi promieniotwórczej. W strefie utleniania mobilność U jest generalnie znacznie większa niż mobilność produktów jego rozpadu (W. Dyck, 1979), stąd też jego większa ilość w wodach powierzchniowych i przypowierzchniowych. Odmierna sytuacja występuje w przypadku utworów zawodnionych nieutlenionymi wodami złożowymi o wysokiej mineralizacji. Na fig. 1 przedstawiono zaczerpnięty z pracy W. Dycka (1979) schemat rozkładu U i Ra na tle stref hydrochemicznych charakteryzowanych m.in. mineralizacją wód złożowych. Mobilność Ra w przeciwieństwie do mobilności U wyraźnie rośnie wraz z maleniem stopnia wymiany wód złożowych, a także ze wzrostem ich mineralizacji. Szczególnie dużą mobilność wykazuje Ra w przypadku wód typu chlorkowo-wapniowego (L.W. Gorbuszina i in., 1972; W. Dyck, 1979). Taka właśnie sytuacja, zdaniem autora, ma miejsce w utworach triasu syneklizy perybałtyckiej. Wyniki badań geofizyki wiertniczej i opróbowań wskazują na występowanie w tych utworach wód złożowych o mineralizacji sięgającej 40 g/l. Według L. Bojarskiego (1978) są to wody chlorkowo-wapniowe.

Biorąc pod uwagę wiek utworów, w których występuje mineralizacja uranowa, a także miąższość i charakter nadkładu, można przyjąć z dużym prawdopodobieństwem, że od momentu ostatecznego ustania migracji uranu ($U^{6+} \rightarrow U^{4+}$), spowodowanego na przykład redukcyjnym charakterem środowiska, upłynęło nie mniej niż 1 mln lat. W tej sytuacji o stanie równowagi promieniotwórczej w szeregu U-238 będzie decydować zachowanie się radu (Ra-226). Rad i jego związki mogą migrować w wyniku przemieszczenia się wód złożowych bądź też w wyniku dyfuzji molekularnej (W.P. Zwierew, 1982).

W pierwszym przypadku następuje przemieszczenie atomów radu zgodnie z kierunkiem filtracji, natomiast w drugim przemieszczenie ma generalnie charakter izotropowy, chociaż i tu lokalnie mogą istnieć kierunki uprzywilejowane, związane z niejednorodnością ośrodka.

Ze względu na charakter rozpatrywanego zagadnienia interesujące będzie określenie wpływu każdego z wymienionych czynników na przemieszczanie się atomów radu.

WPLYW RUCHU WÓD ZŁOŻOWYCH NA ZASIĘG I KSZTAŁT AUREOLI RADOWEJ

Transport radu w ujęciu chronologicznym związany jest z:

1. Powstaniem atomów Ra-226 w wyniku kolejnych rozpadów promieniotwórczych zachodzących w obrębie ciała uranowego; liczba atomów Ra-226 tworzących się w jednostce czasu dla rozpatrywanego przypadku jest praktycznie stała ($m_{Ra} \cdot \lambda_{Ra} = m_U \cdot \lambda_U = \text{const}$, gdzie m_i – liczba atomów izotopu „i”, λ_i – stałe rozpadu).

2. Ruchem wód złożowych filtrujących przez ciało uranowe, w wyniku czego unoszone są atomy Ra.

3. Rozpadem promieniotwórczym atomów Ra-226 (tab. 1) przebiegającym niezależnie od ich położenia w przestrzeni ani też od charakteru związków chemicznych, w których one występują. Równoległe do rozpadu Ra-226 zachodzi rozpad Rn-222. Liczbę atomów Rn-222 w jednostce objętości dowolnego punktu przestrzeni, jak nietrudno udowodnić, określa zależność:

$$m_{Rn} \simeq \frac{\lambda_{Ra} \cdot m_{Ra}}{\lambda_{Rn}} (1 - e^{-\lambda_{Rn} \cdot t}) \text{ dla } t \rightarrow \infty \frac{\lambda_{Ra} \cdot m_{Ra}}{\lambda_{Rn}} \quad [1]$$

Dla interesującego nas czasu obserwacji $t \gg T_{1/2 Rn} = 3,825$ d, między Ra-226 i Rn-222 istnieje praktycznie stan równowagi promieniotwórczej. Z oczywistych względów stan ten ma miejsce również w omawianym przypadku między Rn-222 a krótkotrwałymi produktami jego rozpadu – w tym również głównym emitentem promieniowania gamma – Bi-214. Tym samym obserwowana intensywność promieniowania gamma jest proporcjonalna do koncentracji Ra-226 w każdym punkcie przestrzeni położonym zarówno w obrębie ciała uranowego, jak i w jego aureoli radowej.

WYNIKI MODELOWANIA TEORETYCZNEGO

Rozważmy element przestrzeni o objętości dV , który jest „unoszony” przez przepływającą z prędkością V_0 wodę złożową. Załóżmy, że w objętości dV w wyniku rozpadu Th-230 (tab. 1) pojawia się w jednostce czasu M_{eU} atomów Ra-226 (eU)¹ generowanych przez ciało uranowe ($M_{eU} = m_{eU} \cdot \lambda_{eU}$) oraz że układ jest stacjonarny w czasie, tzn. liczba M_{eU} atomów Ra-226 „porywanych” wraz z elementem dV wody jest stała w czasie:

$$M_{eU_M} = \frac{k \cdot M_{eU}}{V_0} \cdot dV = k \cdot M_{eU} \cdot dS \cdot \Delta t \quad [2]$$

gdzie: k – współczynnik określający jaka część powstających atomów Ra-226 może być uniesiona przez wodę ($0 \leq k \leq 1$).

Przemieszczający się w przestrzeni wzdłuż osi x (fig. 2) element objętości dV „traci” w wyniku rozpadu atomy Ra-226:

$$M_{eU_M}(t) = M_{eU_M} \cdot \exp(-\lambda_{Ra} \cdot t) \quad [3]$$

gdzie: t – czas, jaki upłynął od „uniesienia” elementu dV z ciała uranowego ($t = \frac{x}{V_0}$).

¹ eU oznacza ckwivalentną do intensywności promieniowania gamma koncentrację uranu, pozostającego w stanie równowagi promieniotwórczej z produktami swego rozpadu.

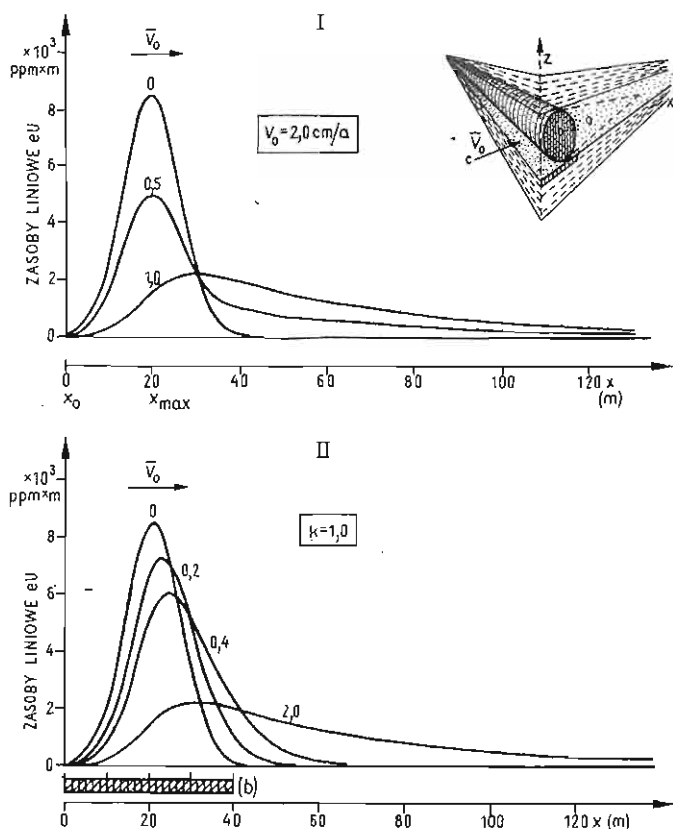


Fig. 2. Wyniki teoretycznego modelowania aureoli radowych; rozkład zasobów liniowych eU w zależności od stopnia mobilności Ra (I) oraz prędkości przepływu wód złożowych (II)

Results of theoretical modelling of radium aureoles; distribution of eU total grade-thickness versus mobility of radium (I) and velocity of flow of deposit waters (II)

a – aureola radowa; b – ciało uranowe; c – kierunek przepływu wód złożowych

a – radium aureole; b – uranium ore body; c – direction of flow of deposit waters

Możemy teraz prześledzić przestrzenny rozkład atomów eU dla ciał uranowych o dowolnym kształcie, gdyż można je zawsze przedstawić jako sumę objętości elementarnych dV . Zagadnienie będziemy rozpatrywać w odniesieniu do zasobów liniowych² ciała uranowego. Dla uproszczenia obliczeń przyjmujemy, że zagadnienie ma charakter dwuwymiarowy $x-z$ (co odpowiada sytuacji np. gdy ciało uranowe znajduje się w warstwie wodonośnej, której strop i spąg tworzą płaszczyzny równoległe). Założmy, że ciało to ma kształt zbliżony do leżącego nieskończonego walca, którego oś jest prostopadła do kierunku przepływu wód złożowych (fig. 2), a ponadto, że rozkład koncentracji U ma charakter walcowy o radialnie malejącej wartości. Biorąc pod uwagę charakter rozkładu koncentracji uranu obserwowany w ciałach rudnych syneklizy perybałtyckiej (E. Ba-

² Zasoby liniowe określone jako wyrażenie $\sum_{i=0}^n q_i \Delta h_i$, gdzie q_i jest wagową zawartością badanego pierwiastka w warstwie o miąższości Δh_i .

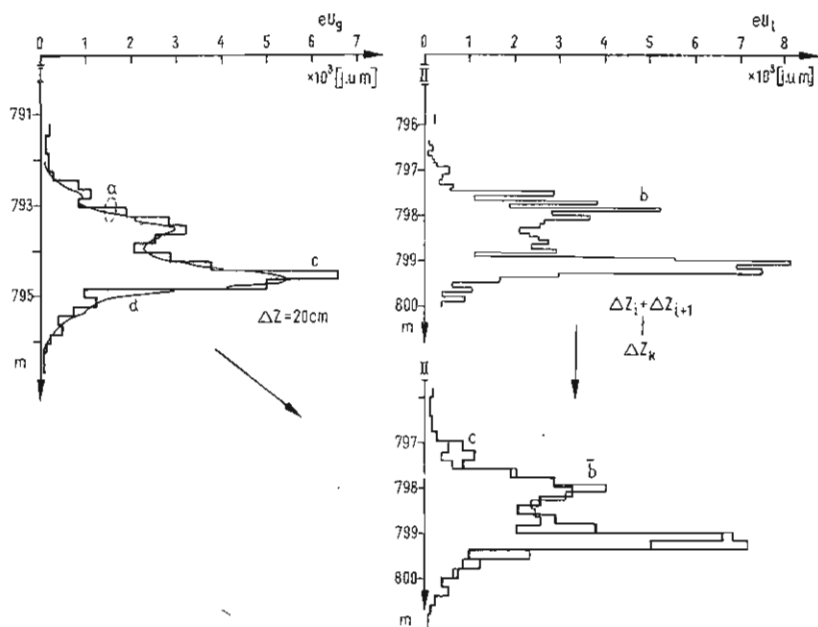


Fig. 3. Porównanie wyników geofizycznych oznaczeń koncentracji eU_g z wynikami badań laboratoryjnych eU_1 dla rdzeni wiertniczych z głównego poziomu uranonośnego w otworze P-1

Comparison of geophysical estimations of content of eU_g and laboratory measurements of eU_1 content in core material from the main uranium-bearing horizon in the borehole P-1

a – wyniki badań geofizycznych; b – wyniki badań laboratoryjnych; \bar{b} – uśrednione wyniki badań laboratoryjnych; c – anomalia fizyczna naturalnego promieniowania gamma (koncentracja eU); d – anomalia dynamiczna profilowania gamma; l – głębokość geofizyczna; II – głębokość na podstawie długości przewodu wiertniczego; j. um. – jednostki umowne

a – results of geophysical measurements; b – results of laboratory measurements; \bar{b} – averaged laboratory data; c – physical anomaly of natural gamma radiation (concentration of eU); d – dynamic anomaly of gamma-ray log; l – depths according to well-logs; II – depths according to borehole data; j. um. – conventional units

reja i in., 1980), można przyjąć, że w modelowym ciele uranowym opisywany jest on funkcją Gaussa:

$$f(x) = \frac{M_{eU_{max}}}{\sigma} \cdot \exp \left[-\frac{(x-x_{max})^2}{2\sigma^2} \right] \quad [4]$$

gdzie: $f(x)$ oznaczamy jako $M_{eU_M}(x)$; $M_{eU_{max}}$ – zasoby liniowe uranu w centrum ciała (x_{max}).

Przyjęto, że omawiana warstwa ma jednostkową miąższość. Ponadto założono arbitralnie, że w zależności [4] $\sigma = 0,2$.

Zagadnienie będzie rozwiązywane numerycznie. W tym celu funkcję $f(x)$, określającą rozkład zasobów liniowych uranu wzdłuż osi x , przybliżymy „warstwami” o stałej wartości $f(x_i)$ oraz miąższości $\Delta x = x_{i+1} - x_i$ (fig. 2). Sumując efekty pochodzące od poszczególnych „warstw” x_i , $i = 0, 1, 2, \dots, n$, i uwzględniając zależność [2], [3] i [4] można określić sumaryczne zasoby liniowe $M_{\Sigma eU}(x)$ dla dowolnego punktu na osi x :

$$M_{\Sigma eU}(x) = k \cdot A \left\{ \sum_{i=0}^n p \cdot f(x_i) \exp \left[-\frac{\lambda_{Ra}(x-x_i)}{V_0} \right] \right\} + (1-k) \cdot f(x) \cdot A \quad [5]$$

gdzie: $p = 0$ dla $x_i \geq x$; $p = 1$ dla $x_i < x$; A – współczynnik normujący, wynikający z warunku globalnego zachowania stanu równowagi promieniotwórczej ($\Sigma eU = \Sigma U$) niezależnie od wartości V i k .

Wyrażenie to jest prawdziwe dla $t \geq 0$, tzn. dla $x \geq x_0$.

Na podstawie powyższej formuły obliczono rozkład zasobów liniowych eU wzdłuż osi x , odpowiednio dla prędkości wody równej 0,2, 0,4 i 2,0 cm/a. Ponadto przyjęto, że wartość k (patrz wzór [2]), tzn. względna ilość „unoszonego” radu, wynosi 0, 0,5 i 1,0 (dla $V = 2,0$ cm/a) oraz szerokość ciała uranowego jest równa ok. 40 m.

Należy jednoznacznie podkreślić, że zastosowana metoda obliczeń ma charakter ogólny, a założenia dotyczące kształtów i rozmiarów ciała uranowego odpowiadają jedynie konkretnemu przykładowi ilustrującemu wyniki jej zastosowania.

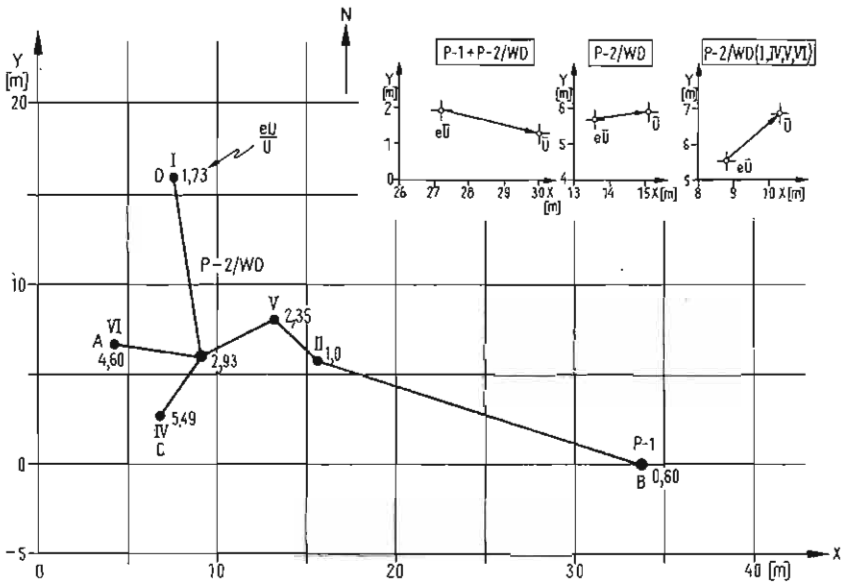


Fig. 4. Rozkład stanu równowagi promieniotwórczej dla rejonu otworów wiertniczych P-1 i P-2/WD (otwór wielodenny) wraz z wynikami analizy kierunku zalegania ciała uranowego dla różnych konfiguracji punktów obserwacji

Distribution of equilibrium state for area of boreholes P-1 and P-2/WD (deviated borehole) and results of analysis of orientation of uranium ore body for different arrangement of observation points

$e\bar{U}$, \bar{U} – położenie środków „mas” ciała radowego bądź uranowego; wartości $e\bar{U}$ uwzględniane w analizie określono na podstawie danych geofizycznych, natomiast wartości \bar{U} – na podstawie laboratoryjnych badań chemicznych rdzeni wiertniczych; A – B, C – D – przekroje

$e\bar{U}$, \bar{U} – position of centers of „mass” of radium or uranium bodies; values $e\bar{U}$ – as established on the basis of geophysical measurements, values \bar{U} – laboratory chemical analyses of core material; A – B, C – D – cross-sections

Na fig. 2 zostały przedstawione rozkłady zasobów liniowych eU w obrębie ciała uranowego i poza jego granicami, obliczone na podstawie powyższej metody. Jak widać z wykresów, zbliżone wartości zasobów eU w obszarze aureoli radowej mogą być wynikiem zarówno różnej prędkości wód, jak też różnego stopnia mobilności radu określanego współczynnikiem k . Na podstawie tych wykresów można określić, że przy prędkości wody 2 cm/a dla ciała uranowego o maksymalnych zasobach liniowych równych 8000 ppm \times m, przy pełnej mobilności

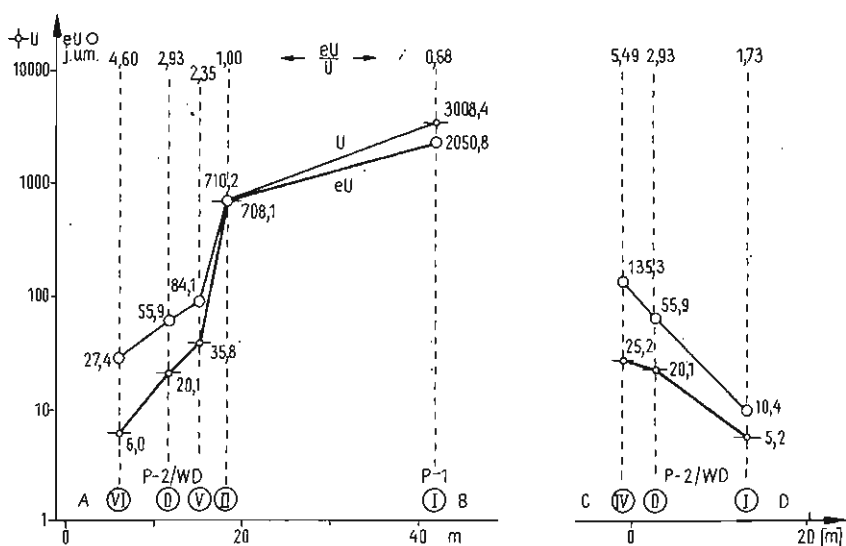


Fig. 5. Rozkład koncentracji eU , U oraz stanu równowagi promieniotwórczej wzdłuż linii przekroju A-B oraz C-D wskazanych na fig. 4

Distribution of eU and U contents and radiation equilibrium state along the cross-sections A-B and C-D (see Fig. 4 for location of the cross-sections)

Ra ($k = 1,0$), w odległości ok. 100 m od centrum rozważanego ciała zasoby liniowe eU będą wynosiły ok. 380 ppm \times m, natomiast dla $k = 0,5$ podobna wartość będzie obserwowana w odległości ok. 60 m.

WPLYW DYFUZJI NA ROZKŁAD PRZESTRZENNY RADU

Maksymalna odległość, na jaką mogłaby zajść dyfuzja atomów rozpuszczonej substancji przy braku ruchu wód złożowych, czyli tzw. miąższość strefy dyfuzji, określana jest zależnością (W.P. Zwierew, 1982):

$$L = (2 \cdot D \cdot t)^{1/2} \quad [6]$$

gdzie: D – współczynnik dyfuzji dla danego związku chemicznego zależny m.in. od porowatości i litologii ośrodka; dla większości substancji mieści się w przedziale $10^{-5} - 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$; t – czas, jaki upłynął od momentu przejścia substancji do roztworu; dla $Ra-226$ maksymalny czas ze względu na proces rozpadu promieniotwórczego jest w sposób naturalny ograniczony do 5–7 tys. lat.

Jak łatwo obliczyć na podstawie zależności [6], maksymalna miąższość strefy dyfuzji może sięgać kilku metrów. Opierając się na kryterium podanym przez W.P. Zwierew (1982), określającym stosunek strumienia substancji przemieszczanej w wyniku konwekcji (ruchu wód) do strumienia wywołanego dyfuzją, można pokazać, że przy prędkości filtracji większej niż 10^{-8} cm/s ($\sim 0,3 \text{ cm/a}$) podstawową rolę w przemieszczaniu się substancji będzie miała składowa konwekcyjna związana z ruchem wód złożowych. Brak jakichkolwiek informacji na temat rzeczywistych prędkości filtracji wód złożowych w uranonośnych utwo-

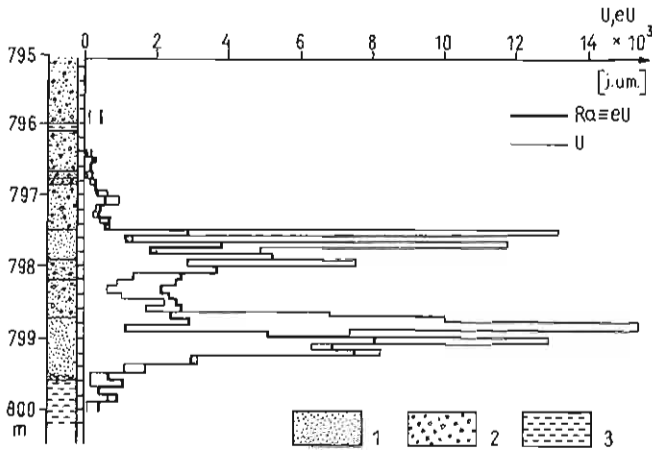


Fig. 6. Głębokościowe zestawienie chemicznych oznaczeń laboratoryjnych koncentracji U z geofizycznymi oznaczeniami koncentracji eU dla głównego poziomu uranonośnego w otworze P-1

Comparison of results of geophysical measurements of eU content and laboratory chemical analyses of U content for the main uranium-bearing horizon in the borehole P-1

1 - piaskowiec; 2 - zlepieniec; 3 - ilowiec

1 - sandstone; 2 - conglomerate; 3 - claystone

rach triasu syneklizy perybałtyckiej nie pozwala na jednoznaczne teoretyczne wyjaśnienie, który z wymienionych czynników wpływa w większym stopniu na rozkład przestrzenny radu. Rozstrzygające w tym względzie mogą być wyniki badań eksperymentalnych.

WYNIKI BADAŃ Z OBSZARU SYNEKLIZY PERYBAŁTYCKIEJ

We wszystkich otworach wiertniczych, zrealizowanych w ramach poszukiwań złóż uranu w syneklizie perybałtyckiej, wykonywane były m.in. profilowania naturalnego promieniowania gamma (PG). Na podstawie szczegółowej interpretacji tych profilowań określono przestrzenny rozkład koncentracji R_a (eU) dla najbardziej interesujących poziomów uranonośnych (E. Bareja i in., 1983). Zastosowana metodyka interpretacji została szczegółowo omówiona w wymienionej pracy. Na fig. 3 przedstawiono przykład porównania wyników geofizycznych oznaczeń koncentracji eU z wynikami badań laboratoryjnych, świadczących o poprawności przyjętej metodyki. Równocześnie na podstawie analizy wyników badań laboratoryjnych określono przestrzenny rozkład koncentracji uranu. Stwierdzono, że w obrębie ciał uranowych występuje wyraźny niedobór radu (eU) w stosunku do ilości uranu (U), natomiast poza nimi, lecz w niezbyt dużej odległości, jego wyraźny nadmiar. Sytuacja ta przedstawiona jest dla jednego z badanych ciał uranowych na fig. 4 i 5.

Niezależnym potwierdzeniem powyższych obserwacji, niestety bardzo fragmentarycznym ze względu na niewielką liczbę wykonanych oznaczeń, są wyniki badań laboratoryjnych stanu równowagi promieniotwórczej. Zrealizowano je dla rdzeni z trzech otworów wiertniczych (P-1, P-Z/WD, P-3).

Na fig. 6 przedstawiono przykład głębokościowego zestawienia wyników

laboratoryjnych oznaczeń U z oznaczeniami eU dla jednego z najlepiej zbadanych otworów wiertniczych (P-1). Obserwowany jest tu wyraźnie niedobór U w stosunku do eU . Na fig. 7 przedstawiono natomiast wzajemną zależność wymienionych wielkości dla analizowanych rdzeni wiertniczych ze wszystkich trzech wspomnianych otworów. Jak łatwo zauważyć, w obszarze niskich koncentracji uranu obserwowane jest wyraźne przesunięcie stanu równowagi promieniotwórczej w kierunku radu (eU), tzn. notuje się jego nadmiar w stosunku do ilości uranu, natomiast w obszarze wysokich koncentracji uranu stan równowagi przesunięty jest w kierunku przeciwnym. Sytuacja ta jest po prostu odzwierciedleniem faktu, że jedynym źródłem „mineralizacji” eU może być pierwiastek U

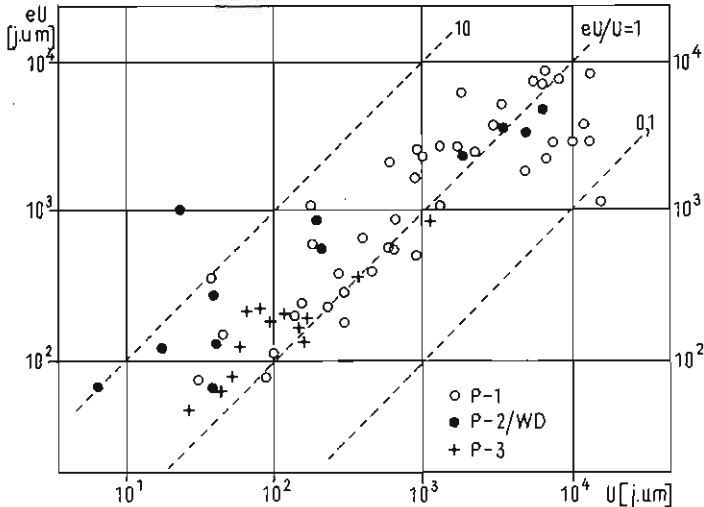


Fig. 7. Zależność między koncentracjami eU oraz U określonymi laboratoryjnie dla rdzeni wiertniczych z badanych otworów

Relationship between the recorded eU contents and results of laboratory measurements of U content in core material from the studied borehole columns

i w związku z tym dla rozpatrywanego obszaru musi być zachowany globalny stan równowagi promieniotwórczej ($\Sigma U = \Sigma eU$). Z badań laboratoryjnych wynika równocześnie brak widocznego wpływu dyfuzji na przemieszczanie się radu względem generującego go uranu w kierunku pionowym – fig. 6 (ruch wód złożowych w tym kierunku w analizowanym przypadku jest praktycznie niemożliwy).

Podsumowując powyższe obserwacje można stwierdzić, że zarówno badania geofizyczne, jak i laboratoryjne wskazują w sposób jednoznaczny na istnienie wokół badanych ciał uranowych aureoli radowych. Wykonane dotychczas otwory wiertnicze pozwoliły jedynie na zasygnalizowanie ich obecności. Kształt oraz rozmiary aureoli i generujących je ciał uranowych nie zostały dotychczas rozpoznane.

Z przytoczonych danych wynika, że głównym czynnikiem powstawania aureoli radowych jest przepływ wód złożowych. Rozważania teoretyczne wskazują, że zasięg aureoli zależy przede wszystkim od prędkości wód, natomiast kształt i rozmiary ciała generującego aureole mają znacznie mniejsze znaczenie. Czynniki

ten, jak to łatwo zauważyć, będzie decydował o pojawieniu się anomalii radowych w zakresie prędkości przepływu wód od 10^{-8} do 10^{-6} cm/s ($\sim 0,3 - 30$ cm/a). Anomalie radowe powstające przy prędkościach wód poza tym przedziałem nie będą miały, z poszukiwawczego punktu widzenia, praktycznego znaczenia.

MOŻLIWOŚĆ PROGNOZOWANIA OBECNOŚCI CIAŁ URANOWYCH

Obecność aureoli radowej wokół ciała uranowego powiększa prawdopodobieństwo określenia położenia ciał rudnych za pośrednictwem otworów wiertniczych. Nadmiar radu w stosunku do uranu jest jednoznacznym sygnałem istnienia strefy o zwiększonej mineralizacji uranowej. Interesująca jest odpowiedź na pytanie – w jaki sposób można wykorzystać informacje o przestrzennym rozkładzie uranu i radu dla określenia najbardziej prawdopodobnego kierunku położenia ciała uranowego. Informacja ta ma istotne znaczenie ze względu na znaczną głębokość stref mineralizacji uranowej i związane z tym wysokie koszty prac wiertniczych. W związku z tym autor proponuje zastosowanie metody polegającej na obserwacji wzajemnego przesunięcia środków „masy” ciała radowego względem uranowego, spowodowanego ruchem wód złożowych. Średnie koncentracje (lub zasoby liniowe) w poszczególnych otworach wiertniczych są traktowane jako punkty materialne przybliżające rzeczywisty rozkład masy ciała radowego lub uranowego. Wspomniane przesunięcie środków „mas” wyznacza przybliżony kierunek przepływu wód złożowych. Ze względu na ograniczony (równy liczbie otworów wiertniczych) zbiór informacji, kierunek ten z oczywistych względów jest przybliżony i uzależniony m.in. od konfiguracji punktów obserwacji. Dla przypadku przedstawionego na fig. 4, w sytuacji, gdy brane są pod uwagę wyniki wszystkich otworów wiertniczych (P-1 oraz P-2/WD), kierunek przepływu wód jest zbliżony do zachodniego, a ich prędkość zawiera się w przedziale $0,2 - 0,6$ cm/a. Wyniki z otworu wielodennego P-2/WD wskazują na zbliżony kierunek. Gdyby więc istniał jako jedyny otwór P-2/WD, to ciało uranowe generujące obserwowaną anomalię radową powinno znajdować się na wschód od tego otworu (otwór P-1 to „potwierdza”).

*

Zbyt mały zakres wykonywanych dotychczas prac poszukiwawczych w syneklizie perybałtyckiej nie pozwala na dokonanie pełnej, praktycznej oceny efektywności zaproponowanej metody ustalania kierunku położenia ciał uranowych. Duża waga tego problemu w ewentualnej dalszej prospekcji głęboko zalegających ciał uranowych wskazuje na potrzebę kontynuowania studiów nad tym zagadnieniem.

Celowe wydaje się również prowadzenie dalszych badań nad genezą aureoli radowych występujących wokół ciał uranowych. Przedstawiony model powstawania takich aureoli uwzględnia z konieczności głównie zjawiska fizyczne towarzyszące temu procesowi i w związku z tym może być traktowany jako pierwsze przybliżenie rozpatrywanego zagadnienia. Dalszych prac studialnych wymaga przede wszystkim wyjaśnienie geochemicznych aspektów mobilności radu i jego związków w badanych utworach triasu.

PIŚMIENNICTWO

- ADAMS J.S., GASPARINI P. (1970) – Gamma-ray spectrometry of rocks. Elsevier.
- APPLEGATE J.K., EMILIA D.A., NEITZEL E.B., DONALDSON P.R. (1982) – High-resolution seismic study in the Gas Hills uranium district, Wyoming. *Geophysics*, **47**, p. 1355–1401, nr 10.
- BAREJA E., SAŁDAN M., STRZELECKI R., SZEWCZYK J. (1980) – Wstępne wyniki badań geologiczno-poszukiwawczych złóż rud uranu w utworach triasu syneklizy perybaltyckiej. *Arch. Inst. Geol. Warszawa*.
- BAREJA E., SAŁDAN M., STRZELECKI R., SZEWCZYK J. (1983) – Wyniki badań geologiczno-poszukiwawczych złóż rud uranu w utworach triasu syneklizy perybaltyckiej, cz. I. Wyniki badań geofizycznych złóż rud uranu w utworach triasu syneklizy perybaltyckiej, cz. II. *Arch. Inst. Geol. Warszawa*.
- BOJARSKI L. (1978) – Solanki paleozoiku i mezozoiku w syneklizie perybaltyckiej. *Pr. Inst. Geol.*, **88**.
- BOREHOLE LOGGING FOR URANIUM EXPLORATION (1982) – IAEA, Techn. Rep. Ser., **212**. Vienna.
- BRADY B.T., RICE R.S. (1977) – Helium determinations as an exploration technique at the Ambrosia Lake uranium district, Mc Kinley County. New Mexico USGS Open-file Report 77–669.
- DANIELS J.J., SCOTT J.N., BLACKMON P.D., STARKEY H.S. (1977) – Borehole geophysical investigations in the south Texas uranium district. *Jour. Research. U.S. Geol. Surv.*, **5**, p. 343–357, nr 3.
- DYCK W. (1979) – Application of hydrogeochemistry to the search for uranium. W: *Geophysics and geochemistry in the search for metallic ores. Geol. Surv. Canada. Ser.: Econ. Geol. Rep.*, **31**, p. 489–510.
- GINGRICH I.E., FISHER J.C. (1976) – Uranium exploration using the track-etch method. W: *Exploration for uranium deposits. IAEA*, p. 213–225. Vienna.
- KANASIEWICZ J., SAŁDAN M., UBERNA J. (1965) – Uranonośność pstręgo piaskowca okolic Pasłęka. *Biul. Inst. Geol.*, **193**, p. 171–205.
- KILLEEN P.G., CARMICHAEL C.M., OSTRIHANSKY L. (1976) – Radioactive disequilibrium determinations. *Geol. Surv. Canada, Paper 75–38*, p. 1–48.
- KRISTIANSSON K., MALMQVIST L. (1982) – Evidence for nondiffusive transport of Rn-222 in the ground and a new physical model for the transport. *Geophysics*, **47**, p. 1444–1452, nr 10.
- KRISTIANSSON K., MALMQVIST L. (1984) – The depth-dependence of the concentration of Rn-222 in soil gas near the surface and its implication for exploration. *Geoexploration*, **22**, p. 17–41, nr 1.
- MORSE R.H. (1976) – Radon counters in uranium exploration. W: *Exploration for uranium ore deposits. IAEA*, p. 229–239. Vienna.
- SAŁDAN M., STRZELECKI R. (1975) – Projekt robót geologiczno-poszukiwawczych złóż rud uranu w piaskowcu pstrym w rejonie Pasłęka–Braniewa–Krynicy Morskiej. *Arch. Inst. Geol. Warszawa*.
- SCOTT J.H., DANIELS J.J. (1976) – Non-radiometric borehole geophysical detection of geochemical haloes surrounding sedimentary uranium deposits. W: *Exploration for uranium deposits. IAEA*, p. 379–390. Vienna.
- SMITH A.Y., BARETTO P.M.C., PAURNIS S. (1976) – Radon methods in uranium exploration. W: *Exploration for uranium deposits IAEA*, p. 185–211. Vienna.
- SMITH B., CADY J.W., CAMPBELL D.L., DANIELS J.J., FLANIGAN V.J. (1976) – A case for "other" geophysical methods in exploration for uranium deposits. W: *Exploration for uranium deposits. IAEA*, p. 337–352. Vienna.
- SOONAWALA N.M., TELFORD W.M. (1980) – Movement of radon in overburden. *Geophysics*, **45**, p. 1297–1315, nr 8.

- SZEWczyk J. (1979) — Wyniki geofizycznych badań mineralizacji uranowej w utworach triasu dolnego w rejonie Krynica Morska — Pasłęk. Arch. Inst. Geol. Warszawa.
- ГОРБУЩИНА Л.В., ЗИМИН Д.Ф., СЕРДЮКОВА А.С. (1972) — Радиометрические и ядерно-геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых. Атомиздат. Москва.
- ЗВЕРЕВ В.П. (1982) — Роль подземных вод в миграции химических элементов. Изд. Недра. Москва.

Ян ШЕВЧИК

ПРОИСХОЖДЕНИЕ РАДИЕВЫХ ОРЕОЛОВ ВОКРУГ ЗОН ТРИАСОВОЙ УРАНОВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ В БАЛТИЙСКОЙ СИНЕКЛИЗЕ

Резюме

По мере истощения мелкозалегающих залежей урана все большее внимание обращают на себя закрытые глубже залегающие месторождения. Эффективные поиски и разведка таких месторождений осложняется отсутствием каких-либо внешних сигналов, свидетельствующих о миграции U-238 или продуктов его распада, и указывающих на присутствие залежи (Д. Даниэльс и др., 1977). Исключительно буровые методы поисков, применявшиеся до сих пор, оказались весьма кропотливым и дорогостоящим способом решения проблемы ввиду небольшой, обычно, протяженности рудных тел.

Во второй половине 70-х годов Геологический институт начал в Балтийской синеклизе поиски песчаных залежей урана в триасе. В результате детального изучения лабораторных и геофизических материалов было установлено, что вокруг ранее открытых бурением урановых рудных тел существует радиевый ореол (Ra-226).

В статье дается объяснение процесса образования таких ореолов и представлены предложения по методике их использования для поисков урановых залежей. На основе теоретического моделирования установили, что главным фактором, содействующим образованию ореолов, является движение подземных вод, фильтрующих через урановое рудное тело. Форма и размеры рудных тел, образующих ореолы, не оказывает большого влияния на их величину. Образование ореолов, важных для поисков, возможно в тех случаях, когда скорость фильтрации вод составляет 10^{-8} — 10^{-6} см/сек.

Jan SZEWCZYK

ON ORIGIN OF RADIUM AUREOLES AROUND TRIASSIC URANIUM MINERALIZATION ZONES IN THE PERIBALTIC SYNECLIZE

Summary

The interest in search for deep-seated, obscure uranium deposits should increase along with depletion of shallow-seated ones. The search and identification of such deposits appears difficult because of the lack of any surface signatures, especially those related to migration of U-238 and products of its decay, which could indicate their presence (J.J. Daniels and others, 1977). Drillings were hitherto used as the only method of search for the deep-seated deposits but they appear very arduous and expensive way to solve this question, mainly because of generally small linear dimensions ore bodies.

In the second half of the seventies, the Geological Institute began search for sandstone uranium deposits in the Triassic of the Peribaltic Syncline. Detailed analysis of both laboratory and geophysical data showed presence of radium (Ra-226) aureoles around uranium ore bodies hitherto found by drillings.

The mechanism of origin of the aureoles is explained in this paper and methodological proposal of their use in further search for uranium deposits is given. Theoretical modelling showed that origin of the aureoles is mainly related to movement of deposit waters percolating through uranium ore body. The influence of shape and dimensions of radium aureole-generating ore bodies on extent of the aureoles appears subordinate. Aureoles interesting from the point of view of prospecting may originate when velocity of percolating waters falls within the range from 10^{-8} to 10^{-6} cm/s.