

SÜHRNNÝ REFERÁT

K-Ar radiačný systém v geologických podmienkach

JAN BURCHART*, JÁN KRÁL**

* Institut Nauk Geologicznych PAN, Zwirki i Wigury 93, 02—089 Warszawa, Poľsko

** Geologický ústav CGV SAV, Dúbravská 9, 814 73 Bratislava

Doručené 6. 11. 1986

Калиевоаргоновая радиационная система в геологических условиях

В статье дан анализ функциональной калиевоаргоновой радиационной системы в плутонических условиях полиметаморфных районах и при эрозии минералов. Развитие отношения Ar-K в минералах и породах часто сложнее нежели, как это утверждает, возрастное уравнение. Отдельные калиево-аргоновые датировки не дают никакой возможности проверить функциональность радиационной системы. Калиево-аргоновый изохронный возраст позволяет открыть возможные осложнения в развитии радиационной K-Ar системы и в некоторых несложных случаях и возможность проверки возраста минералов.

The K-Ar radiation system under geological conditions

The paper discusses functional behaviour of the K-Ar radiation system under plutonic conditions, in polymetamorphic areas and during mineral weathering. The development of the Ar/K ratio in minerals and rocks is frequently more complicated than it is expressed by the age equation. Single K-Ar datations do not yield any possibility to test the functional behaviour of the radiation system whereas K-Ar isochrone allows to decipher the possible complications during the development of the respective radiation system and, in some cases, even yield the possibility to verify K-Ar mineral ages.

Stále sa ešte stretávame s názormi považujúcimi výsledky K-Ar datovaní za údaje, ktoré informujú o veku magmatickej kryštalizácie alebo posledného metamorfizmu. Aj keď vo výnimočných prípadoch (o čom budeme hovoriť nižšie) možno toto zjednodušenie akceptovať, vo všeobecnosti je nesprávne. Prameňom tohto názoru môže byť sugestivnosť názvu „určenie absolútneho veku“, ktorý bol už dáv-

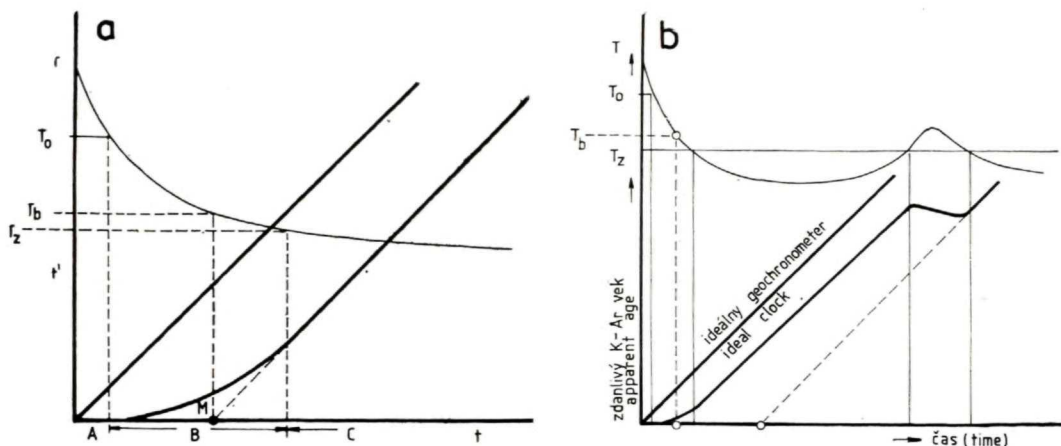
no vylúčený z pojmov izotopovej geochronológie (Holmes, 1962). Každé slovo v uvedenej fráze je nesprávne: 1. neurčuje sa vek, ale izotopový pomer, ktorý sa prepočítava na hodnotu majúcu časový rozmer podľa typu výpočtu, výsledok určenia závisí na prijatom modeli; 2. tento „vek“ nie je vekom analyzovanej vzorky, ale odráža iba určitý bod (nemusi to byť vznik) v jej evolúcii, 3. pomer medzi určitými hodno-

tami, teda tzv. „vek“, nie je vôbec absolútny, keďže nezávisí len od času, ale i od celého radu iných činiteľov, ktoré ovplyvňujú zmenu chemického zloženia minerálov.

Pokúsme sa analyzovať K-Ar systém v rozdielnych geologických situáciách. Je potrebné si uvedomiť, že draslík v datovaných mineráloch zaujíma definované pozície v štruktúre minerálu, kde je viazaný iónovými väzbami, naproti tomu produktom jeho rozpadu je vzácny plyn, cudzí v kryštálovej štruktúre minerálu, kde vznikol na mieste rozpadu atómov draslíka. Tento rádiogénny argón sa začína hromadiť v draselných mineráloch z rozpadu ^{40}K , a preto sa na hranici minerálu s jeho okolím vytvára rozdiel tlaku argónu, gradient, v priebehu času čoraz väčší. Vznikne nerovnovážna situácia (tým viac drastickejšia, že sa vzťahuje na plyn), preto je tendencia k úniku argónu z minerálu až do vyrovnania tlaku v prostredí. Atómy argónu, ktoré sa nachádzajú blízko hranice zrna, unikajú ľahko, tie, ktoré sú hlbšie, musia difundovať cez štruktúru minerálu. Týmto spôsobom sa vytvárajú v horninách tlakové gradienty nielen na hranici zŕn, ale i vnútri draselných minerálov. Veľkosť gradientu závisí od rozdielov v koncentrácii draslíka, od času, ale i od veľkosti zrna. Gradienty sa môžu vyrovnáť difúziou, ktorej koeficient je závislý od druhu minerálu, pričom sa pre každý minerál zásadne mení s teplotou. Každý minerál má určitú hraničnú teplotu, nad ktorou je koeficient difúzie taký vysoký, že únik argónu z minerálu je taký istý ako jeho produkcia z rozpadu ^{40}K . Preto pri teplote nad touto hranicou bude mať minerál bez ohľadu na čas konštantnú koncentráciu argónu kontrolovanú tlakom v okolí (ide hlavne o parciálny tlak argónu, a nie o celkový tlak). Minerál vznikol, existuje, ale „ručičky K-Ar geochronometra stoja na mieste“. Postupným chlad-

nutím sa koeficient difúzie znižuje a tempo úniku argónu sa spomaľuje, až sa stáva menším ako jeho prírastok. V minerále sa začína hromadiť rádiogénny argón, ale pretože jeho časť ešte stále uniká, akumulácia je menšia ako rýchlosť produkcie: „geochronometer ide, ale mešká“. Nakoniec, keď teplota dôjde do bodu, v ktorom koeficient difúzie dosiahne hodnotu, pri ktorej difúzia prestáva, argón v mineráli sa nachádza v situácii celkového uzatvorenia izotopického systému. Až od tohto momentu „K-Ar geochronometer začína správne merať čas“.

Výsledkom datovania z vekovej rovnice je tzv. modelový vek. Ak sa jedná o príklad pomalého chladnutia, v momente, keď minerál dosahuje teplotu celkového uzatvorenia izotopického systému, obsahuje určité množstvo argónu nahromadeného počas čiastočného úniku. Teda modelový vek je hodnotou medzi momentom celkového uzatvorenia izotopického systému a momentom končiacim celkové otvorenie izotopického systému minerálu (s ohľadom na únik argónu). Situáciu znázorňuje obr. 1a, b. V prípade situácie na obr. 1a bude rozdiel skutočného a vypočítaného veku vzorky závislý na tempe chladnutia (čo v plutonických horninách môže predstavovať značný rozdiel), v prípade situácie na obr. 1b následná, neúplná strata rádiogénneho argónu v dôsledku zohriatia vzorky spôsobí „reliktný“ vek, ktorý nie je v žiadnom vzťahu ani ku kryštalizácii systému, ani k veku termickej udalosti. K-Ar údaje z takýchto systémov nie sú interpretovateľné a nemajú žiaden význam. Veková rovnica vyjadruje lineárnu závislosť modelového veku od uplynutého času, modelovým vekom minerálu na grafe je bod M. Efektívnou teplotou uzatvorenia izotopického systému (blocking temperature) sa podľa návrhu Dodsona (1973) rozumie teplota, ktorú dosiahol systém v momente určenom modelovým vekom.



Obr. 1. Vývoj K-Ar geochronometra v systéme s pomalým chladnutím (a) a s následnou termickou epizódou (b). T_b — teplota uzatvorenia izotopického systému, M — vek vzorky vypočítaný z vekovej rovnice, T_z — teplota systému v čase zodpovedajúcom zdanlivému veku

Fig. 1. Development of the K-Ar geochronometer in slowly cooling system (a) and in system which underwent a subsequent thermal episode (b). T_b — closing temperature of the system, M — sample age calculated from the age equation, T_z — temperature of the system during the age corresponding to the apparent age

Pritom je charakteristické, že pokiaľ T_0 a T_z sú určené pre minerálny druh, T_b je spojená s rýchlosťou chladnutia a čím je chladnutie rýchlejšie, tým je kratší úsek b a T_b sa blíži k T_0 . Tento model je zjednodušený a platí iba pre monotónne chladnutie.

Z bohatého analytického materiálu vyplýva, že zdanlivý vek minerálov v horninách s pomalou rýchlosťou chladnutia vytvára určitý systém (v smere šípky vek klesá): amfibol → muskovit → biotit → K živce. Na tomto základe i na základe geologických informácií sa hodnotili teploty uzatvorenia izotopického systému minerálov. Neskôr sa táto situácia modelovala matematicky, čoho výsledkom boli vzorce závislosti teploty uzatvorenia izotopického systému od koeficienta difúzie. Takto možno na základe známeho koeficienta difúzie v podstate pre každý minerál vypočítať, od ktorého bodu na krivke chladnutia „K-Ar geochronometer meria čas“.

Tieto koeficienty nie je jednoduché používať, pretože difúzne koeficienty merané v laboratóriu sa líšia od skutočných. Situáciu komplikuje fakt, že koeficienty difúzie zistené pri laboratórnom zohrievaní sú buď vyššie (ak vyhrievame separovaný minerál) alebo nižšie, ak ten istý minerál vyhrievame v neporušenej hornine (Hanson, 1971). Preto takéto hodnoty sú dosť nepresné. V súčasnosti prijímané hodnoty uzatvorenia teploty izotopického systému uvádza tab. 1.

Vo vulkanických horninách teplota uzatvorenia izotopického systému minerálov je tesne po utuhnutí lávy, preto rozdiel v modelovom veku minerálov je veľmi malý a zistené veku môžu zodpovedať veku kryštalizácie horniny. Na druhej strane v plutonických alebo metamorfovaných horninách obyčajne každý minerál vykazuje iný zdanlivý vek a spravidla ani jeden z nich nie je vekom kryštalizácie horniny.

TAB. 1

Teploty uzatvorenia izotopického radiačného systému K-Ar v horninotvorných mineráloch

Closing temperatures of the K-Ar radiation system in rock-forming minerals

Minerál	K-Ar metóda	F-T metóda
amfibol	> 500 °C (Gerling et al., 1965) > 480 °C (Dallmeyer, 1978) 530 ± 40 °C (Harrison et al., 1979)	—
muskovit	380 °C (Purdy — Jäger in Jäger, 1973)	—
biotit	300—345 °C (Dallmeyer, 1978) 300 ± 50 °C (Wagner et al., 1977) 260 °C (Harrison et al., 1979)	—
plagioklas	~ 260 °C (Harrison et al., 1979)	—
K živec	150 ± 30 °C (Harrison — Dougall, 1980) 160 °C (Harrison et al., 1979)	—
titanit	—	200—280 °C (Harrison et al., 1979)
epidot	—	200—280 °C (Naeser — Faul, 1969) (Harrison et al., 1979)
zirkón	—	200 ± 50 °C (Gleadow — Brooks, 1979) 175 °C (Harrison et al., 1979)
apatit	—	75—120 °C (Naeser — Faul, 1969)

Pre porovnanie sú uvedené teploty uzatvorenia izotopického systému pre F-T metódu

Oblasť kryštalinika Álp poskytuje dobrý príklad komplikovaného vzťahu medzi vekom metamorfnej rekryštalizácie a datovaním rôznych minerálov hornín terciérnej metamorfózy Álp. Petrografické pozorovania svedčia, že fengit v študovaných horninách je výrazne mladší ako biotit, predsa výsledky datovania svetlej sludy boli vždy vyššie než „veky“ biotitov, a to o určitý konštantný rozdiel — 9 mil. rokov. Situácia sa dá ľahko pochopiť, ak porovnáme teplotu, pri ktorej prebehla metamorfna kryštalizácia biotitu (cca 500 °C),

s teplotami uzatvorenia izotopického systému (tab. 1). Takto v priebehu dosť dlhého času, po hlavnej fáze metamorfizmu, keď horniny chladli pomaly, biotit už existoval, ale jeho „geochronometer ešte nefungoval“, pretože teplota hornín bola vyššia ako teplota uzatvorenia izotopického systému K-Ar v biotite. Tak to bolo i neskôr, keď sa začala kryštalizácia fengitu. Muskovit „začal registrovať čas“, až keď teplota poklesla na 350—300 °C, biotit ešte neskôr, až keď horniny dosiahli teplotu ~ 270 °C. Rozdiel v zdánlivých vekoch

(9 mil. rokov) informuje o čase, ktorý uplynul medzi týmito dvoma teplotnými úrovňami (časový interval udáva rýchlosť chladnutia). Charakteristické je, že nielen hodnoty „veku“ minerálov nezodpovedajú veku kryštalizácie, ale aj relácia starší — mladší je opačná.

Z uvedeného vyplýva na pohľad paradoxný poznatok, že K-Ar metódu datovania veku procesov metamorfózy možno použiť len pri mineráloch nízko metamorfovaných hornín, lebo len keď je teplota uzatvorenia izotopického systému vyššia ako teplota kryštalizácie, minerál môže byť uzatvoreným izotopickým systémom už v momente vzniku, a také situácie možno očakávať len v produktoch nízko-teplotného metamorfizmu (Hunziker, 1979), a teda vo vyšších štruktúrnych jednotkách. Ale tento materiál odstraňuje denuďacia (Harper, 1967).

Princíp tejto koncepcie uviedol Neuvoenen (1961). Hurley et al. (1962) interpretoval rozdiely hodnôt zdanlivého veku po dvoch stranách zlomu ako dôkaz vertikálnych pohybov bez spojitosti s akýmkoľvek petrografickými procesmi. Komplikácie v prejavoch K-Ar geochronometra opísal Giletti et al. (1961). Armstrong (1966) dokázal, že ani čas prvotnej sedimentácie, ani čas vrásnenia, ani čas metamorfizmu nemožno určiť K-Ar metódou. Chronológiu metamorfných procesov na základe K-Ar datovaní možno zachytiť pri horninách nízko metamorfovaných facií zachovaných v osiach väčších synklinál, v čelách príkrovov alebo v šupinách odsunutých z oblasti maximálneho tektonického výzdvihu (Harper, 1967). K-Ar veku plutonických hornín i metamorfných jadrových častí orogénu informujú výlučne o čase výzdvihu a chladnutia, a nie o kryštalizácii. Tieto formulácie možno nájsť vo všetkých slovníkoch či prehľadoch týkajúcich sa izotopovej geochronológie (Giletti et al., 1961; Faure, 1977; Hunziker, 1979;

Polanski, 1979). Argónové veky najčastejšie patria ku skupine vekov chladnutia (cooling ages), tie možno ďalej interpretovať buď samotným chladnutím (napr. v okolí intrúzií), buď prechodom horniny cez geoizotermu počas vertikálneho pohybu blokov. Za týchto okolností možno K-Ar datovanie výhodne použiť pri tektonických rekonštrukciách (vo väčšej miere).

K-Ar datovanie sa interpretuje v dvoch krokoch:

— ako rekonštrukcia termickej histórie, ktorá vyžaduje vedomosti o teplote uzatvorenia izotopického systému minerálov. Z toho teda vychodí, že „vek“ určený z datovania celohorninových vzoriek plutonitov a metamorfítov sa nedá interpretovať (v najlepšom prípade je to iba výsledok zodpovedajúci váženému priemeru veku chladnutia rozličných minerálov, z ktorých každý má rozdielnu teplotu uzatvorenia izotopického systému);

— na základe rekonštruovanej termickej histórie sa možno následne pokúsiť o tektonickú interpretáciu.

Vyššie sme opísali iba model postupného chladnutia hornín. Ak hornina po postupnom chladnutí i po období jej zotrvania v nízkych teplotách podlieha následnému zohriatiu, môžu sa niektoré minerálne K-Ar systémy stať úplne alebo čiastočne otvorené. V orogenetických pásmach to nie je zriedkavý prípad. Ak sa na erodovanom povrchu granitu nachádza sediment hrúbky 6 km, potom z hodnoty geotermického gradienta (30 °C/km) vyplýva pozvoľný prírastok teploty až do 180 °C. Môže sa stať, že len niektoré minerály s vysokou teplotou uzatvorenia izotopického systému Ar zostanú nenarušené a ďalej „merajú čas“. Tie, v ktorých bola bariéra T_0 prekročená, zostávajú „odplynené“, následná akumulácia Ar sa začína od nuly, a teda registrujú vek chladnutia (ale už druhého) po teplotnom impulze. Keď

sa minerál nachádza na hraniciach čiastočnej retencie Ar, jeho pomer Ar/K prestáva rásť, resp. sa môže znížiť. Výsledkom je modelový vek, ktorý je vekom zdanlivým, ktorý nezodpovedá ani momentu prechodu cez teplotu uzatvorenia izotopického systému pri prvom ochladení, ani pri zohrievaní, ani pri druhom ochladení. Nezodpovedá žiadnej charakteristickej termickej udalosti a môže datovať moment, v ktorom sa nič nedialo (obr. 1b). Biotit sa v takejto situácii nachádza pri zohriatí do 300 °C, K živec už pri 150 °C.

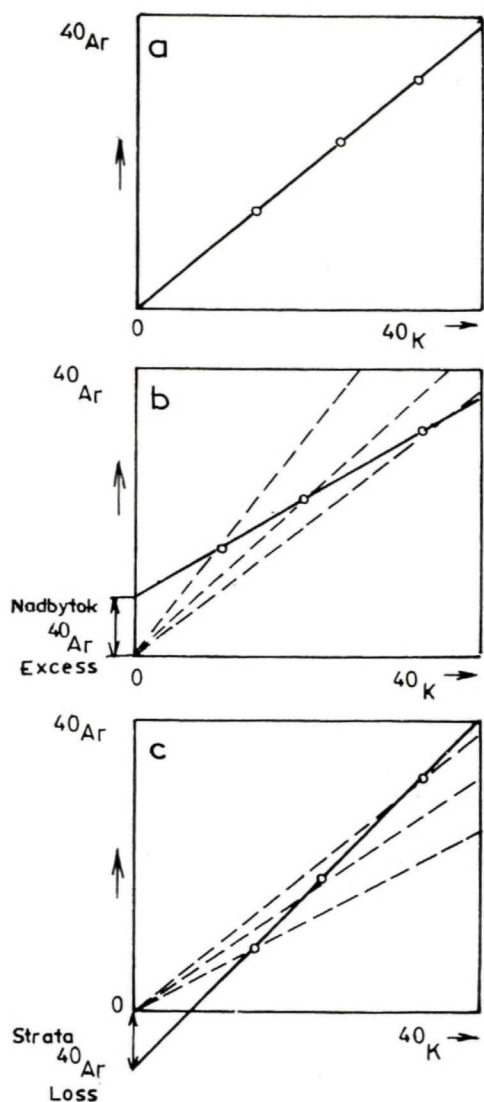
Vyššie uvedené úvahy sa opierajú o zistenie, že koeficient difúzie argónu rýchle rastie s teplotou. Jeho logaritmus je nepriamo úmerný prevrátenej hodnote teploty (Harrison — McDougall, 1980). Na priebeh difúzie má zásadný vplyv najmä pomer tlaku argónu v minerále a tlaku argónu v okolí. Keď sme vyššie spomenuli „možnosť odplynenia minerálu“ (Hart, 1964) a vrátenia jeho veku na nulu, stanovili sme predpoklad, že okolie minerálu je bez argónu a difúzia dôjde do konca. Pre plutonické horniny však takéto zjednodušenie nemožno akceptovať. Je známe, že priepustnosť hornín je natoľko ohraničená, že v plutonickom prostredí sa nachádzajú plyny pod značným tlakom. Rádioaktívny proces je procesom jadrovým, ktorý nie je závislý na vonkajšom prostredí, a nuklidy ^{40}K vytvárajú ^{40}Ar bez ohľadu na to, či vchádzajú do zloženia minerálov, alebo sa nachádzajú v tavenine. Ak sa v podmienkach vysokého parciálneho tlaku argónu začína kryštalizácia minerálu, možno očakávať, že už v tomto momente môže minerál zachytávať určité množstvo ^{40}Ar , a teda už v momente vzniku môže mať určitý zdanlivý vek vyplývajúci iba z prítomnosti prebytku argónu.

O smere difúzie rozhoduje rozdiel tlaku argónu, jeho gradient i distribučný koeficient. Ak je parciálny tlak argónu v okolí vyšší ako v mineráli, je tlakový gradient

opačne usmernený a vyvoláva difúziu do minerálu (ak je teplota dostatočná na iniciáciu procesu; vyššie teploty uzatvorenia izotopického systému, na čo upozornil Gilletti et al., 1961). Bližšia analýza tejto situácie dokazuje, že v tom istom čase, vplyvom toho istého procesu (difúzneho vyrovnania gradientov) jeden minerál môže argón strácať, druhý získavať. Vo vysoko-draselnom mineráli rozpad ^{40}K in situ rýchlo vytvorí tlak ^{40}Ar , ktorý prevyšuje tlak v okolí, čo vyvoláva jeho únik. Nizko-draselné minerály nielenže nebudú argón strácať, ale ho môžu aj získať. Navrhnutý model vysvetľuje prejavy prebytku argónu (hlavne v mineráloch s nízkym obsahom K) ako dôsledok pomeru medzi obsahom K v mineráli a v celej hornine. Prebytok argónu vyvoláva anomálne vysoký modelový vek hlavne v mineráloch s veľmi nízkym obsahom K, kde množstvo zachyteného argónu môže byť podstatnou zložkou jeho celkového množstva. V čase, keď tento fenomén nebol známy, sa stávalo, že sa hornine pripísal vek, ktorý niekedy prevýšil vek Zeme (napr. Kirsten, 1968).

Známe sú príklady datovania veľmi mladéj bazaltovej lávy, ktorá extrudovala na oceánske dno vo veľkých hĺbkach. Rýchly vznik sklenej kôry vytváral nepriepustnú vrstvu znemožňujúcu únik plynu. Ohromný hydrostatický tlak, vyvolaný niekoľkokilometrovým stĺpcom vody, zároveň spôsobil, že rozpustnosť plynu v láve bola vysoká. To spôsobilo, že tuhnúci bazalt obsahoval veľké množstvo rozpusteného argónu a prisudzoval sa mu absurdne vysoký vek.

Vek vypočítaný z vekovej rovnice platí iba za podmienok, že zmeny koncentrácie ^{40}K , ^{40}Ar v priebehu celej existencie analyzovaného minerálu či horniny sú spôsobené iba rádioaktívnou premenou a ak vzorka v čase svojho vzniku neobsahovala ^{40}Ar . Analýzy rôznych minerálov z rozlič-



Obr. 2. Vztah modelového K-Ar veku a izochrónového K-Ar datovania (podľa Harpera, 1970)

Fig. 2. Relation between K-Ar ages and K-Ar isochrone datation (according to Harper, 1970)

ných typov hornín v rozdielnych geologických situáciách dokázali, že tieto podmienky sú splnené zriedka. Existujú však metódy, ako kvantitatívne možno zistiť zmeny v K-Ar radiačnom systéme. Plat-

nosť údajov získaných z vekovej rovnice (teda zhodu získaných výsledkov s teoretickým modelom) možno overiť prostredníctvom izochrónových grafov.

V K-Ar datovaní možno použiť tri druhy izochrón (Shafiqullah — Damon, 1974): 1. $^{40}\text{Ar} - ^{40}\text{K}$; 2. $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} - ^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$; 3. $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$. V tejto práci používame iba prvý typ izochróny. Na obr. 2 sú tri základné možnosti, patrične zjednodušené (Harper, 1970). V priebehu určitého času z prítomného množstva ^{40}K vznikne rádioaktívnou premenou určité množstvo ^{40}Ar . Pre kogenetické vzorky s rozdielnym obsahom ^{40}K bude pomer $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$ konštantný. Ak tieto minerály neobsahujú v čase svojho vzniku rádio-génny argón, potom všetky vzorky na grafe $^{40}\text{Ar} - ^{40}\text{K}$ ležia na jednej čiare — izochróne, ktorá vychádza z nulového bodu a ktorej sklon je proporcionálny k veku skúmaných vzoriek. V tomto prípade bude modelový vek vzoriek zhodný s izochrónovým vekom (obr. 2a).

Obr. 2b znázorňuje situáciu, keď sa do analyzovaných minerálov v čase ich vzniku včlenilo rovnaké množstvo ^{40}Ar . Medzi modelovými vekmi vzoriek (prerušované čiary) vznikol rozptyl napriek tomu, že ich skutočný vek je rovnaký. Ani jeden z modelových vekov sa nerovná skutočnému veku (izochrónovému), ale všetky sú vyššie. Medzi modelovými vekmi vzoriek a ich obsahom ^{40}K možno zistiť negatívnu koreláciu: čím menší obsah ^{40}K , tým vyšší modelový vek.

Na obrázku 2c je znázornená situácia, keď zo skupiny komagmatických vzoriek uniklo rovnaké množstvo argónu. Medzi modelovými vekmi vzniká rozptyl, každý z nich je nižší ako skutočný (izochrónový) vek. Medzi obsahom ^{40}K a modelovými vekmi je pozitívna závislosť: čím vyšší obsah ^{40}K , tým je modelový vek vzorky vyšší. Ak K-Ar izochróna neprechádza cez začiatok grafu, modelové veky sú v oboch

případoch klamné a údaje neoznačujú vek žiadnej geologickej udalosti. Skutočný pomer $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$, ako i množstvo iniciálneho argónu, resp. jeho stratu možno v oboch prípadoch zistiť regresnou analýzou. To je dôvod, prečo nemožno datovať menej ako tri vzorky. Minerály majú rozdielnú schopnosť udržať rádiogénny argón, preto musí byť K-Ar izochróna konštruovaná z jedného druhu minerálu s rovnakou termickou históriou. Použitie týchto izochrón vedie k správny výsledkom len v prípade, keď sú realizované podmienky modelu: rovnaké množstvá uniknutého, resp. inkorporovaného Ar, bez vzťahu ku koncentrácii K. Ak sa táto podmienka nedodrží, analytické údaje sú rozptýlené tak, že izochrónu nie je možné definovať (Harper, 1970). Pripomíname, že konštantný excés argónu je v prírodných podmienkach reálnejší než jeho rovnaký úbytok.

Doteraz diskutovaný typ izochrón rieši všetky problémy spojené s K-Ar datovaním. V analyzovaných vzorkách sa totiž okrem ^{40}Ar nachádza i nerádiogénny izotop ^{36}Ar . Ten môže byť kontaminovaný zo vzduchu počas expozície vzorky v zóne zvetrávania, ale môže byť aj prítomný v mineráli od doby vzniku. Práve pre tieto dva rozdielne zdroje ^{36}Ar nemožno používať paušálne korekciu na atmosférický argón (Hayatsu — Carmichael, 1970). Tieto problémy nenastanú pri izochróne typu $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} - ^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$. Možnosť interpretácie týchto izochrónových vekov je limitovaná zachovaním konštantných pomerov týchto izotopov v skupine kogenetických vzoriek počas úniku, resp. vo všetkých procesoch, kde môže nastať izotopová frakcionácia. Z citovaných údajov v oblasti Západných Karpát nemožno konštruovať tento typ izochrón, pretože nie sú k dispozícii potrebné analytické údaje.

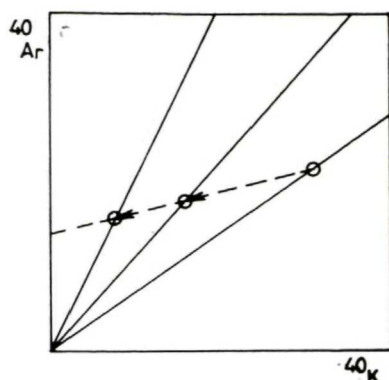
Pri konštrukcii tretieho typu K-Ar izochrón sa využíva premena ^{39}K na ^{39}Ar ožarováním rýchlymi neutrónmi v jadrovom

reaktore. Po ožiarení sa pomer $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ meria v následných objemoch plynu, ktorý uniká zo vzorky v priebehu zahrievania pri zvyšovaní teploty (Turner, 1968). Metóda vlastne využíva rozdiel v mobilnosti izotopov argónu v priebehu ich uvoľňovania z minerálu počas zahrievania. V minulosti sa často používala pri datovaní mesačných hornín.

Celkový únik argónu z analyzovaných minerálov je rovnocenný s návratom systému znovu na začiatok. Ak neskoršia akumulácia argónu prebieha bez komplikácií, získame znovu izochrónu, ktorá vychádza z nulového bodu a ktorej sklon zodpovedá času, ktorý uplynul od uzatvorenia izotopického systému. Isochróna s počiatkom v nulovom bode môže vzniknúť aj vtedy, keď únik argónu počas termickej epizódy bude nekompletný, ale proporcionálny k jeho koncentrácii v minerále. Možno sa domnievať, že takáto situácia sa môže vyskytnúť vtedy, keď sa minerál nachádza v teplote, ktorá tesne prevyšuje teplotu plného uzatvorenia izotopického systému minerálu. O veľkosti zmenšenia hodnoty „veku“ získaného z takej izochróny bude rozhodovať čas vplyvu zvýšenej teploty. Teda fakt, že izochróna vychádza z nulového bodu, nemôže byť dostačujúcim argumentom, že minerály sa počas svojej existencie neodplynili, a to buď čiastočne alebo úplne. Záporný intercept* sa objaví vtedy, keď z minerálov uniklo konštantné množstvo argónu, nezávislé od koncentrácie draslíka (model Harpera, 1970, v tomto článku obrázok 2c).

Iné komplikácie vytvárajú procesy sekundárnych zmien niektorých minerálov, hlavne tých, v ktorých sa nachádza draslík. Ak napríklad biotit podlieha stupňo-

* Termín intercept používame na označenie tzv. lokujúcej konštanty (Bakytová et al., 1975), t. j. príslušnej hodnoty Y v ortogonálnej súradnicovej sieti, ak X = 0.

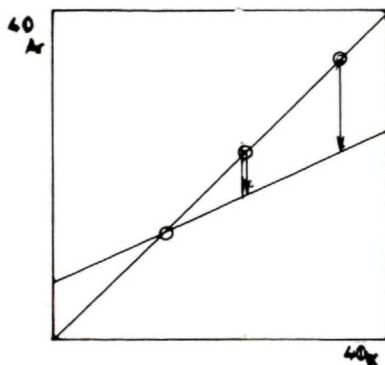


Obr. 3. Hypotetický vývoj ^{40}Ar — ^{40}K radiačného systému v biotite pri jeho chloritizácii
Fig. 3. Hypothetical development of the ^{40}Ar — ^{40}K radiation system in biotite during chloritization

vanej chloritizácii, čo v princípe znamená stratu ako argónu, tak aj draslíka, niet dôvodu predpokladať, že tieto dva rozdielne prvky, nachádzajúce sa v rozdielnej kryštalochemickej a energetickej situácii, migrovali presne tou istou rýchlosťou — iba vtedy totiž ostáva zachovaný ich vzájomný pôvodný pomer, ktorý je mierou veku. Vonkajší tlak argónu v prostredí a pravdepodobne i iné faktory, ako napr. schopnosť udržania argónu v štruktúrnych defektoch, spôsobujú, že stupeň úniku K môže značne prevyšovať stupeň úniku Ar (Kirsten, 1968). V takom prípade sa bude bod vytvorený chloritizovaným biotitom presúvať na izochrónovom grafe doľava a dole pozdĺž čiarkovanej línie na obr. 3. Výsledkom bude, že séria analýz z biotitov, dokonca s pôvodným identickým obsahom K a Ar, ale s rôznym stupňom chloritizácie môže vytvoriť pseudoizochrónu s kladným interceptom, zdanlivo indikujúci prebytok argónu. Jej sklon nemá žiaden vekový význam a závisí od pomeru rýchlosti úniku oboch prvkov. Týmto môže únik argónu v určitých prípadoch spôsobiť kladný intercept izochróny, ktorý podľa jednoduchého pôvodného modelu Harpera

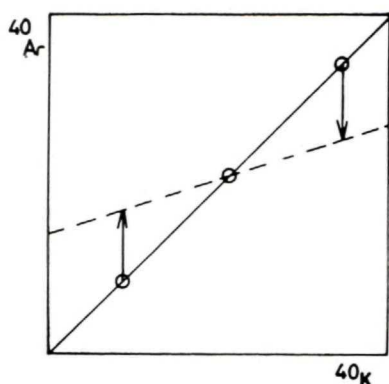
(1970) mal byť dôkazom o existencii prebytku argónu. Treba zdôrazniť, že ani izochróny, ani modelové veky čiastočne chloritizovaných biotitov nemajú reálny význam. Podľa situácie z obr. 3 bude modelový vek tým väčší, čím bude chloritizácia intenzívnejšia. Podobný efekt možno očakávať pri albitizácii draselných živcov. Z toho vyplýva, že minerály, v ktorých došlo k výmene alkálií alebo úniku draslíka, sú nevhodné na datovanie. Je to jeden z dôvodov, pre ktoré môžu celohorninové vzorky granitov alebo rúl vykazovať falošný vek, dokonca ich modelový vek môže byť vyšší ako skutočný vek kryštalizácie.

Kladný intercept, reprezentujúci izochróny celkových hornín, a teda zdanlivý prebytok argónu, sa môže objaviť nielen pri zmenách v obsahu K, ale tiež pri úniku Ar, ak tento únik je čiastočný a proporcionálny k jeho obsahu K (obr. 4). Takú situáciu možno očakávať, keď horninový komplex je obklopený nepriepustným okolím, ktoré znemožňuje, resp. sťažuje únik argónu z pôvodného prostredia.



Obr. 4. Vznik kladného interceptu ^{40}Ar — ^{40}K izochróny, ak únik argónu je proporcionálny obsahu K vo vzorkách

Fig. 4. Origin of a positive ^{40}Ar — ^{40}K intercept in the case when the argon escape is proportional to the K content of the samples



Obr. 5. Zachytenie argónu vo vzorkách chudobných na draslík spôsobuje vznik kladného interceptu u $^{40}\text{Ar} - ^{40}\text{K}$ izochróny
 Fig. 5. Fixing of argon in samples with low K content leads to positive $^{40}\text{Ar} - ^{40}\text{K}$ isochrone intercept

Ak minerály predstavujú potenciálne otvorený izotopický systém (vzhľadom na teplotu, v ktorej sa nachádzajú) a pritom sú horniny celkovo alebo čiastočne uzatvorenými izotopickými systémami, vtedy argón môže migrovať len z tých minerálov (bohatých na draslík), v ktorých jeho parciálny tlak je vyšší než tlak v okolí. Dôsledkom toho bude v týchto horninách únik Ar z hornín proporcionálny k obsahu K. Je to evidentné, ak prijmem predstavu, že na skutočnú rýchlosť difúzie poukazuje nielen jej koeficient, ale závisí aj od gradientu parciálneho tlaku argónu.

Opísaný efekt môže byť silnejší, ak vonkajší tlak prevyšuje tlak argónu v mineráloch, ktoré sú na K najchudobnejšie (obr. 5). Ak minerály budú otvorenými izotopickými systémami (vzhľadom na zvýšenú teplotu) a tlakový gradient bude rozhodovať nielen o rýchlosti difúzie, ale i o jej smere, a to naraz v tej istej hornine, môže jeden minerál argón strácať, iný získavať. Možnosť takýchto komplikácií je známa v literatúre dávno (Brewer, 1969).

Komplikácie možno očakávať v K-Ar

evolúcii v celohorninových vzorkách granitového charakteru obsahujúcich veľa minerálov s rozdielnym obsahom K, ale aj rozdielnou teplotou uzatvorenia izotopického systému (v plutonických podmienkach kryštalizácie je aj dlhé obdobie chladnutia, napr. v intervale teplôt 200–150°, keď biotit je už uzatvoreným izotopickým systémom a mikroklin otvoreným izotopickým systémom). Ak je napr. súbor hornín zložený iba z biotitu a mikroklinu, ale s ich rozličným zastúpením, bude tento súbor hornín (body) na izochronovom diagrame $^{40}\text{Ar} - ^{40}\text{K}$ predstavovať líniu spájajúcu body pre tieto dva minerály. Pseudoizochrona v momente dosiahnutia teploty 150 °C v čase pomalého chladnutia môže znázorniť nereálne vysoký prebytok argónu, ako i nereálne nízky vek, dokonca nižší, ako bude modelový vek K živca. V celom časovom intervale, v ktorom prebieha čiastočný únik argónu z mikroklinu, pozvoľne rastú hodnoty modelového veku celohorninových vzoriek, ale tým pomalšie, čím je viac K živca v hornine. Rastie „izochronový vek“ aj kladný intercept. Je preto zrejmé, že regresné línie, určené pre celohorninové vzorky, nedajú žiadnu vierohodnú informáciu. Keďže sú aj výsledkom potenciálneho vplyvu mnohých faktorov (napr. možnosť migrácie draslíka), znemožňujú dokonca identifikovať ich prítomnosť.

Ako vychodí z predchádzajúcich úvah, reálne Ar/K pomery v mineráloch a horninách často prechádzajú omnoho zložitejšou evolúciou, než to predpokladá modelová veková rovnica. Preto treba výsledky K-Ar datovania plutonických a metamorfovaných hornín interpretovať veľmi opatrne, pretože skutočný vekový význam im možno pripísať iba vtedy, keď sú splnené modelové podmienky. Zdôrazňujeme, že jednotlivé, konvencionálne K-Ar datovanie nedáva žiadnu možnosť overenia správnosti modelu. Základnou úlohou

K-Ar izochrónových grafov je zistiť komplikácie a v niektorých jednoduchých prípadoch i overiť datovanie a určenie veku minerálov. Napriek tomu sa metóda izochrón nedá na získanie pravdivých vekových informácií z analýz narušených izotopových systémov použiť všeobecne. Pretože situácie opísané modelmi Harpera (1970) sa v prírode pravdepodobne vyskytujú menej často ako situácie opísané modelmi Rb-Sr izochrón, sú K-Ar izochróny na rozdiel od Rb-Sr izochrón skôr metódou kontroly výsledkov než metódou datovania.

Blížšie poznatky o citlivosti rôznych K-Ar izochrón na rôzne typy narušenia K-Ar systému poskytuje článok Shafiqulaha — Damona (1974). Upozorňuje, že komplikácie vo vývoji K-Ar systému nemožno vždy odhaliť použitím iba jedného typu izochrón, hlavne pri použití izochrón ^{40}Ar — ^{40}K , a poukazujú na možnosť konštrukcie pseudoizochrón v tomto systéme. Autori odporúčajú v komplikovaných prípadoch výsledky kontrolovať použitím najmenej dvoch typov izochrón.

Celohorninové vzorky granitového a rulového charakteru sa vymykajú izochrónovej kontrole (na rozdiel od Rb-Sr systému). Regresné línie, simulujúce izochróny, sú dôsledkom funkcie času, minerálneho zloženia a jeho variabilnosti, rýchlosti chladnutia, sekundárnych minerálnych zmien a iných vplyvov. Preto na označenie výsledkov K-Ar datovania takýchto vzoriek nemožno používať slovo „vek“.

(Izochrónová reinterpretácia K-Ar údajov z kryštalinika Západných Karpát bola uverejnená v článku J. Burcharta et al. v Geologickom zborníku č. 2/1987.)

Literatúra

- Armstrong, R. L. 1966: K-Ar dating of plutonic and volcanic rocks in orogenic belts. In: *Potassium Argon Dating* Springer. Eds. O. R. Schaefner — J. Zahringer. Berlin, 234 s.
- Bakytová, H. — Urgon, M. — Kontšeková, O. 1975: Základy štatistiky. Bratislava, Alfa, 390 s.
- Brewer, M. S. 1969: Excess radiogenic argon in metamorphic micas from the Eastern Alps, Austria. *Earth planet. Sci. Lett. (Amsterdam)*, 6, 321—331.
- Dallmeyer, R. D. 1978: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ incremental-release ages of hornblende and biotite across the Georgia inner Piedmont: their bearing on late Paleozoic-early Mesozoic tectonothermal history. *Am. J. Sci. (New Haven)*, 278, 124—149.
- Dodson, M. H. 1973: Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contrib. Mineral. Petrol. (Berlin)*, 40, 259—274.
- Faure, G. 1977: Principles of Isotope Geology. New York, John Wiley and Sons, 464 s.
- Gerling, E. K. — Koltsova, T. V. — Petrov, B. V. — Zulfikarova, Z. K. 1965: On the suitability of amphiboles for age determinations by the K-Ar method. *Geochemistry International (Amsterdam)*, 2, 148—154.
- Giletti, B. J. — Moorbath, S. — Lambert, R. S. J. 1961: A geochronological study of the metamorphic complexes of the Scottish Highlands. *Quart. J. Geol. Soc. London*, 117, 233 s.
- Gleadow, A. J. W. — Brooks, C. K. 1979: Fission track dating, thermal histories and tectonics of igneous intrusions in East Greenland. *Contr. Mineral. Petrology (Berlin)*, 71, 45—60.
- Hanson, G. N. 1971: Radiogenetic argon loss from biotites in whole rock heating experiments. *Geochim. cosmochim. Acta (London)*, 35, 101—107.
- Harper, C. T. 1967: On the interpretation of potassium-argon ages from precambrian shields and phanerozoic orogens. *Earth planet. Sci. Lett. (Amsterdam)*, 3, 128—132.
- Harper, C. T. 1970: Graphical solutions to the problem of radiogenic Argon-40 loss from metamorphic minerals. *Eclogae geol. Helv. (Basel)*, 63, 1, 119—140.
- Harrison, T. M. — Armstrong, R. L. — Neaser, C. W. — Harakal, J. E. 1979: Geochronology and thermal history of the Coast Plutonic Complex, near Prince Rupert, British Columbia. *Can. J. Earth Sci. (Ottawa)*, 16, 3, 400—410.
- Harrison, T. M. — McDougall, I. 1980: Investigations of an intrusive contact, northwest Nelson, New Zealand — II. Diffusion of radiogenetic and excess ^{40}Ar in hornblende revealed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectrum analysis. *Geochim. cosmochim. Acta (London)*, 44, 2005—2020.
- Hart, S. R. 1964: The petrology and isotopic-mineral age relations of a contact zone in

- the Front Range, Colorado. *J. Geol. (Chicago)*, 72, 493—525.
- Hayatsu, A. — Carmichael, C. M. 1970: K-Ar isochron method and initial argon ratios. *Earth planet. Sci. Lett. (Amsterdam)*, 8, 71—76.
- Holmes, A. 1962: Absolute age — a meaningless term. *Nature (London)*, 196, 1238—1239.
- Hunziker, J. C. 1979: Potassium Argon Dating. In: *Lectures in Isotope Geology*. Eds. E. Jäger — J. C. Hunziker. Berlin, Springer, 329.
- Hurley, P. M. — Hughes, H. — Pinson, Jr. W. H. — Fairbairn, H. W. 1962: Radiogenic argon and strontium diffusion parameters in biotite at low temperatures obtained from Alpine fault uplift in New Zealand. *Geochim. cosmochim. Acta (London)*, 26, 67.
- Jäger, E. 1973: Die alpine Orogenese im Zichte der radiometrischen Altersbestimmung. *Eclogae geol. Helv. (Basel)*, 66/1, 11—21.
- Kirsten, T. 1968: Incorporation of rare gases in solidifying enstatite melts. *J. geophys. Res. (Richmond, Va.)*, 73, 2807—2810.
- Naeser, C. W. — Faul, H. 1969: Fission track annealing in apatite and sphene. *J. Geol. Res. (Washington)*, 74, 705—710.
- Neuvonen, K. J. 1961: The apparent age pattern of the crust. *Bull. Comm. géol. Finl.*, 196, 445—454.
- Polański, A. 1979: Izotopy w geologii. Warszawa, Wydawnictwa geologiczne, 337 s.
- Shafiqullah, M. — Damon, P. E. 1974: Evaluation of K-Ar isochron methods. *Geochim. cosmochim. Acta*, 38, 1341—1358.
- Turner, G. 1968: The distribution of potassium and argon in chondrites. In: *Origin and Distribution of the Elements*. Ed. L. H. Ahrens. Pergamon Press (London), 387—398.
- Wagner, G. A. — Reimer, G. M. — Jäger, E. 1977: Cooling ages derived by apatite fission-track, mica Rb-Sr and K-Ar dating: the uplift and cooling history of the central Alps. *Padova, Società Cooperativa Tipografica*, 27 s.

Článok bol napísaný v rámci bilaterálnej spolupráce medzi GŮ CGV SAV Bratislava (ČSSR) a ING PAN Varšava (PLR) na téme 5.1: Geodynamika a geofyzika oblasti Poľska a Československa.