

*Robert Mokrik, Aurelija Bičkauskienė, Vilniaus universitetas,
Jonas Mažeika, Vilniaus universitetas, Geologijos ir geografijos institutas*

VIDURIO LIETUVOS ŽEMUMOS TEKTONINIŲ LŪŽIŲ ZONOS NUSTATYMAS IZOTOPINIAIS METODAIS DEVONO VANDENINGAJAME KOMPLEKSE

Anotacija

Mokrik R., Bičkauskienė A., Mažeika J. Vidurio Lietuvos žemumos tektoninių lūžių zonos nustatymas izotopiniais metodais devono vandeningajame komplekse // Geologijos akiračiai. ISSN 1392–0006. Vilnius, 2008, Nr. 3–4, 51–59 p.

Straipsnyje, panaudojus Vidurio Lietuvos devono vandeningojo komplekso požeminio vandens hidrocheminius bei izotopinius tyrimų duomenis, nagrinėjamos hidrogeologiškai aktyvių tektoninių lūžių kiekybinio-kokybinio įvertinimo bei požeminio vandens radioaktyviosios anglies amžiaus korekcijos problemos. Radioaktyviosios anglies duomenų interpretacija, vertinant požeminio vandens buvimo laiką hidrogeologinėje sistemoje, ir izotopų bei hidrogeocheminiai tyrimai rodo, kad gauti rezultatai retai gali būti traktuojami kaip tikrasis požeminio vandens amžius. Radioaktyviosios anglies aktyvumo mažėjimą laikui bėgant lemia ne tik pats radioaktyvusis skilimas, bet ir požeminio vandens karbonatinėje sistemoje vykstantys geocheminiai procesai, papildomai reguliuojantys požeminiame vandenyje išsirusios neorganinės anglies sudėties kilmę ir koncentraciją. Šiems procesams įvertinti ir radioaktyviosios anglies amžiaus korekcijoms buvo naudoti keli geocheminiai modeliai, kurių skaičiavimai pagrįsti ir stabiliojo anglies-13 izotopo duomenimis. Taip pat šiai analizei pagrįsti buvo naudoti tričio duomenys.

Abstract

Mokrik R., Bičkauskienė A., Mažeika J. Identification of the Middle Lithuanian zone of tectonic lineaments using isotopic methods in the Devonian aquifer system // Geologijos akiračiai. ISSN 1392–0006. Vilnius, 2008, No. 3–4, pp. 51–59.

The decrease of radiocarbon activities during time is conditioned not only by radioactive decay but also by geochemical processes in groundwater carbonate system, which regulate the carbon-14 activity of dissolved inorganic carbon in groundwater. Geochemical models, which include carbon-13 data in their calculations, were used for the evaluation of these processes and for corrections of groundwater radiocarbon dating. Tritium data were also used for the motivation of this analysis.

Keywords: leakage, tectonic fracture, groundwater, radiocarbon age, dilution factor
Received 21 July 2008, accepted 22 September 2008. Department of Hydrogeology and Engineering Geology, Faculty of Natural Sciences, Vilnius University, M.K.Čiurlionio 21/27, LT–03101, Vilnius.
Tel. +370 5 2398278; e-mail: robert.mokrik@gf.vu.lt; aurelija.baublyte@gf.vu.lt;
Institute of Geology and Geography, T. Ševčenkos 13, LT–03223, Vilnius.
Tel. +370 5 2104703; e-mail: mazeika@geo.lt

Įvadas

Devono vandeningasis kompleksas Vidurio Lietuvos žemumoje užima daugiau nei 5 tūkst. km² plotą. Šį kompleksą sudarantys Šventosios–Upninkų, Suosos–Kupiškio, Įstro–Tatulos ir Stipinų vandeningieji sluoksniai – vienas svarbiausių gėlo ir mineralinio vandens šaltinių Lietuvoje. Rytinėje žemumos dalyje išplitęs tik Šventosios–Upninkų vandeningasis sluoksnis, kuris slūgso 20–40 m gylyje. Čia jį dengia kvartero nuogulos. Nagrinėjamas kompleksas gelmėja vakarų link. Einant šia kryptimi, jį dengia vis jaunesnių uolienų viršutinio

devono sluoksniai. Kintant vandeningųjų sluoksnių gyliui, keičiasi ir požeminio vandens filtracijos greičiai, vandens cheminė sudėtis, mineralizacija bei amžius. Didėjanti geriamojo vandens reikšmė šalyje reikalauja išsamaus potencialiai produktyvių vandeningųjų sluoksnių požeminio vandens dinamikos tyrimo, hidrocheminių savybių ir amžiaus analizės. Amžiaus analizė svarbi tuo, kad požeminio vandens amžius arba požeminio vandens buvimo hidrogeologinėje apytakoje laikas leidžia nustatyti požeminio vandens migracijos ypatumus, infiltracinės mitybos masą, vietą ir yra svarbus sprendžiant požeminio vandens apsaugos

problemas. Požeminio vandens amžių taip pat lemia tektoniniai hidrogeologiškai aktyvūs lūžiai. Egzistuojant palankioms vandens pertekėjimo iš vieno sluoksnio į kitą sąlygoms, gautas požeminio vandens amžius dažnai būna „padidintas“. Tektoninių lūžių zonų hidrogeologinio aktyvumo nustatymo metodika yra glaudžiai susijusi su hidrogeocheminiais ir izotopiniais požeminio vandens tyrimų metodais.

Gėlo požeminio vandens amžiaus tyrimuose geriausiai išvystyti tričio (^3H) ir radioaktyviosios anglies (^{14}C) analizės metodai. Tritis – vandens molekulės dalis, todėl tinka tiesioginiam datavimui. Tuo tarpu ^{14}C metodas yra netiesioginis ir, atsižvelgiant į vandens ir uolienos sąveiką, remiasi ^{14}C aktyvumu bei ^{13}C koncentracija vandenyje ištirpusioje neorganinėje anglyje (INA), kuri požeminiame vandenyje dažniausiai būna hidrokarbonato jonų pavidalu. Daugiausia tričio analizės duomenys naudojami nustatant dabartinio požeminio vandens amžių. Radioaktyviosios anglies požeminiame vandenyje tyrimus Lietuvoje atliko J. Banys, V. Juodkazis, R. Mokrik, J. Mažeika, R. Petrošius ir kt.

Radioaktyviosios anglies metodo taikymo principas remiasi tuo, kad kai atmosferos vanduo patenka į požeminę hidrosferą, radioaktyviosios anglies aktyvumas (koncentracija) laikui bėgant eksponentiškai mažėja pagal radioaktyviojo skilimo dėsnį. Tačiau radioaktyviosios anglies duomenų interpretacija, vertinant požeminio vandens buvimo laiką hidrogeologinėje sistemoje, gana sudėtinga. Izotopų geocheminiai tyrimai rodo, kad gauti duomenys retai gali būti traktuojami kaip tikrasis požeminio vandens amžius. Radioaktyviosios anglies aktyvumo mažėjimą laikui bėgant lemia ne tik radioaktyvusis skilimas, bet ir požeminio vandens karbonatinėje sistemoje vykstantys geocheminiai procesai, papildomai reguliuojantys požeminiame vandenyje ištirpusios neorganinės anglies koncentraciją. Šiems procesams įvertinti ir radioaktyviosios anglies metodui pakoreguoti buvo naudoti keli geocheminiai modeliai, kurių skaičiavimai paremti stabiliojo anglies izotopo ^{13}C duomenimis.

Tiriant lūžių zonas, efektyviausias yra helio metodas. Požeminiame vandenyje ištirpęs helis migruoja su vandens srautu nuo kristalino pamato Žemės paviršiaus link. Helio koncentracija vandeningajame sluoksnyje priklauso nuo pamato kristalinių uolienų radioaktyvumo, nuosėdinės dangos bei lūžių zonos

filtracinio laidumo parametru ir požeminio vandens maišymosi su egzogeninio meteorinio vandens srautais sąlygų. Požeminiame vandenyje ištirpusio helio anomalijų susidaro vandeniui laidžių tektoninių lūžių zonose, požeminiame vandeniui kylant vertikaliai iš apačios, – tokiose vietose jo koncentracija šuoliškai padidėja. Be to, tokios požeminio vandens anomalijos turi įtakos jų radioaktyviosios anglies amžiaus vertėms.

Lūžių identifikavimas taikant helio metodą

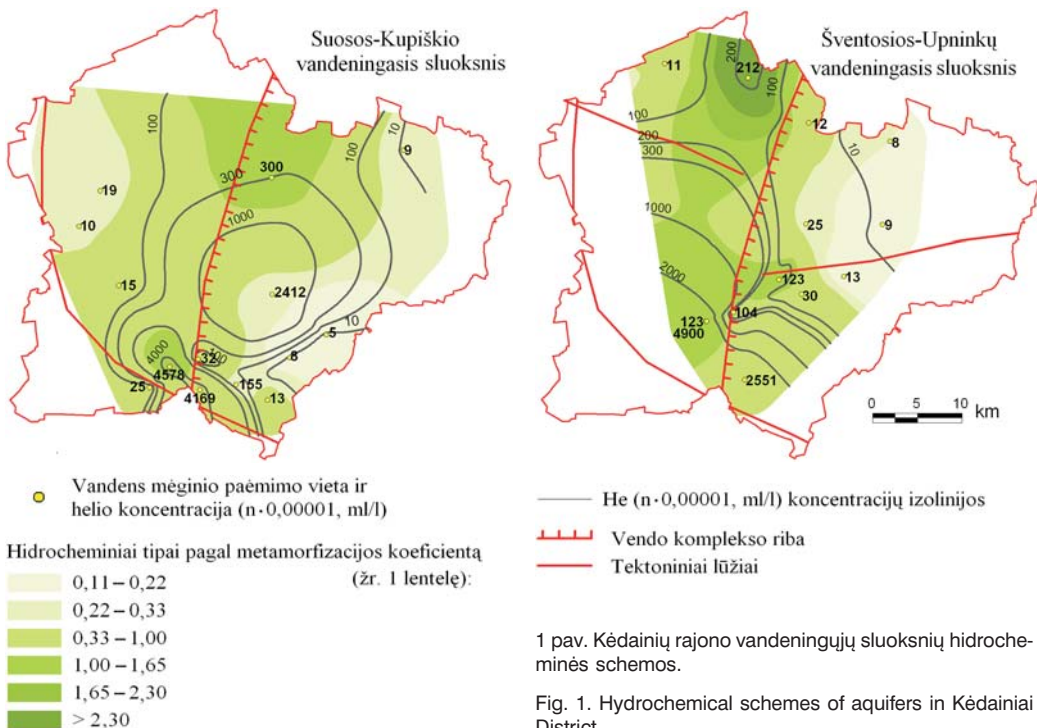
Dėl kylančio požeminio vandens srauto ties hidrogeologiškai aktyvių lūžių zonomis, didėjant helio koncentracijai, kinta ir požeminio vandens cheminis tipas bei potipiai, kurie gali būti nustatomi pagal kiekybinį rodiklį $\text{Na}^+ + \text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$, kuris dar vadinamas metamorfizacijos koeficientu (Jurgaitis, Mokrik, 1990) (1 lentelė). Šio rodiklio palyginamoji analizė su helio koncentracija buvo atlikta Latvijoje Dobelės rajone bei vakarinėje ir rytinėje Lietuvoje. Buvo nustatytos gana aukštos koreliacijos koeficientų vertės – nuo 0,8 iki 0,91 (Mokrik, 1990; Juodkazis, Mažeika, Petrošius, 1995). Požeminiame vandenyje ištirpusio helio koncentracija taip pat gerai koreliuoja su chloridų bei sulfatų koncentracijomis (Klimas, Plankis, 2007). Tačiau koreliuojant su sulfatais būtina atsižvelgti į sulfatinių uolienų išplitimo pjūvyje specifika, nes padidėjusi sulfatų koncentracija vandeninuosiuose sluoksniuose ne visada reiškia giluminio srauto per lūžius ar vandensparas srūvą. Taigi hidrogeologiškai aktyvių tektoninių lūžių zonų heliometrinio kartografavimo metu būtina preliminariai atlikti anksčiau gautos požeminio vandens hidrocheminės informacijos patikrinimą bei apskaičiuoti vandens kokybinį rodiklį $\text{Na}^+ + \text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$. Pagal šio rodiklio vertes gali būti atliktas vandeninųjų sluoksnių hidrocheminis tipavimas, kurio pagrindu anomaliose minėto kiekybinio koeficiento plotuose iš gręžinių būtų imami vandens mėginiai helio analizei. Atlikus mėginių helingumo analizę ir žemėlapyje palyginus helio koncentracijų izolinijas su tektoninių lūžių tinklo išsidėstymu, kokybiškai įvertinamas lūžių zonų hidrogeologinis aktyvumas (1 pav.).

Kėdainių rajone atliktas lūžių zonų įvertinimas patvirtina, jog hidrocheminių potipių pasiskirstymas ištirtame plote iš esmės sutampa su helio anomalijomis. Šis sutapatinimas atskleidžia naują hidrogeologiškai aktyvių lūžių

1 lentelė. Baltijos baseino požeminio vandens hidrocheminės klasifikacijos fragmentas

Klasė	Tipas ir indeksas	Potipis	Metamorfizacijos laipsnis	Koncentracija, %-ekv.		Mineralizacija nuo-iki ir vidutinė, g/l	Vidutinis slūgsojimo gylis, m	Vandens apykaitos zona
			$\frac{rNa^+ + rCl^-}{rHCO_3^-}$	$rNa^+ + rCl^-$	$rHCO_3^-$			
Karbonatinė	Kalcio hidrokarbonatinis, C ₁	a	<0,11					
		b	0,11-0,22	35	>70	<0,7	140	Aktyvios
		c	0,22-0,33					
	Magnio kalcio hidrokarbonatinis	a	0,33-1,0	25-130	>44	0,36	140	
		b	1,0-1,65					
		c	1,65-2,3					
Sulfatinė	Natrio hidrokarbonatinis, C ₂	a	0,33-1,0	25-130	>44	0,36	140	
		b	1,0-1,65					
		c	1,65-2,3					
		Ketvirtas sulfatinis, S ₄	a	2,3-5,5	100-170	13-55	0,63	290
	S ₃	b	5,5-8,7					
	S ₂	c	8,7-12					
Chloridinė	Hidrokarbonatinis-chloridinis, C-Cl	a	12-56	120-185	1-15	0,8-10	360	
		b	56-100					
	Kalcio natrio chloridinis, Cl ₁	a	12-56	120-185	1-15	0,8-10	360	
		b	56-100					
Magnio natrio chloridinis (jūrinis), Cl ₂	a	12-56	155-175	0,52-1,75	4-40	400		
	b	56-100						

* - sulfatų koncentracija, %-ekv., ** - koeficientas rCa^{2+}/rNa^+



1 pav. Kėdainių rajono vandeningųjų sluoksnių hidrocheminės schemos.

Fig. 1. Hydrochemical schemes of aquifers in Kėdainiai District.

zoną, kuri sutampa su Baikalinio struktūrinio komplekso vėdo sluoksnių išplitimo riba. Deja, anksčiau tektonikos specialistai šios lūžių zonos nėra pastebėję.

Kiekybiškai įvertinti lūžio zonos pralaidumą nėra lengva, nes reikia papildomos informacijos apie gretimus vandeninguosius sluoksnius. Šiam klausimui spręsti iki šiol nėra gerų analitinių sprendinių. Taikant požeminiame vandenyje ištirpusio helio metodą, filtracijos procesų per tektoninių lūžių zonas įvertinimas bet kuriame išskirtame sluoksnių elementariame tūrio vienete („gride“) gali būti grindžiamas dviejų skirtingų koncentracijų vandens srautų maišymosi formule (2 pav.):

$$C_{\text{mix}} = \frac{C_g Q_g + C_s Q_s}{Q_{\text{mix}}}, \quad (1)$$

čia C_{mix} , C_g , C_s – atitinkamai mišinio (paimto mėginio), gėlo vandens su fonine helio koncentracija ir sūraus vandens, pratekančio per lūžio zoną, helio koncentracijos; Q_{mix} , Q_g , Q_s – atitinkamai mišinio, gėlo vandens su fonine helio koncentracija ir sūraus vandens, pratekančio per lūžio zoną, debitai išskirtame sluoksnių elementariame tūrio vienete.

Lygtyje (1) pakeitus $Q_{\text{mix}} = Q_g + Q_s$, o gėlo vandens su fonine helio koncentracija debito ir sūraus vandens, pratekančio per lūžį, debito santykį pažymėjus koeficientu $f = \frac{Q_g}{Q_{\text{mix}}}$, gausime:

$$C_{\text{mix}} = C_g f + C_s (1 - f). \quad (2)$$

Žinant paimto mėginio ir pritekančių srautų helio koncentracijas C_g , ir C_s , iš pastarosios lygties galima apskaičiuoti koeficiento f reikšmę, kuri apibūdina mišinio frakcionavimą – skirtingos genėzės vandenų susimaišymą:

$$f = \frac{C_{\text{mix}} - C_s}{C_g - C_s}. \quad (3)$$

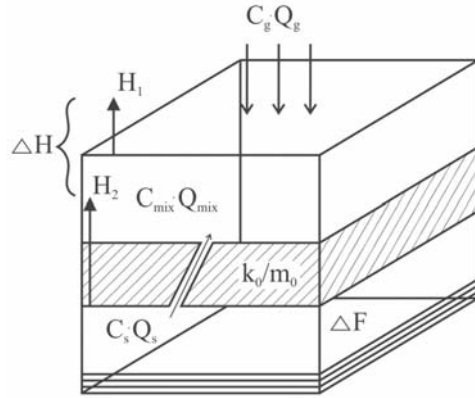
Nustačius gėlo vandens srauto ar srauto su fonine helio koncentracija debitą, galima apskaičiuoti pratekančio per lūžio zoną srauto debitą:

$$Q_s = Q_g \left(\frac{1}{f} - 1 \right). \quad (4)$$

Vandeninguosius sluoksnius skiriančios vandensparos pertekėjimo faktoriaus (k_0/m_0) reikšmę galima nustatyti pagal priklausomybes:

$$\frac{k_0}{m_0} = \frac{Q_s}{\Delta H \Delta F} \quad \text{arba} \quad (5)$$

$$\frac{k_0}{m_0} = \frac{Q_g \left(\frac{1}{f} - 1 \right)}{\Delta H \Delta F}, \quad (6)$$



2 pav. Požeminio vandens srautų su skirtingomis helio koncentracijomis maišymosi schema: (C_{mix} , C_g , C_s – atitinkamai mišinio (paimto mėginio), gėlo vandens su fonine helio koncentracija ir sūraus, pratekančio per lūžio zoną vandens helio koncentracija; Q_{mix} , Q_g , Q_s – atitinkamai mišinio, gėlo vandens su fonine helio koncentracija ir sūraus, pratekančio per lūžio zoną vandens debitai išskirtame sluoksnių elementariame tūrio vienete; k_0/m_0 – vandensparos pertekėjimo faktorius; ΔH – spūdzių skirtumas tarp vandeningųjų sluoksnių; ΔF – sluoksnyje išskirto elementaraus tūrio vieneto plotas).

Fig. 2. The groundwater flow mixing scheme of the different helium concentrations.

čia ΔH – spūdzių skirtumas tarp vandeningųjų sluoksnių, ΔF – sluoksnyje išskirto elementaraus tūrio vieneto plotas.

Filtracijos koeficientas k_0 kartu su hidraulinio gradientu apibūdina srauto judėjimo greitį per vandensparą ar lūžio zoną ir iš esmės nusakoma vandens formavimosi laiką vandeningajame sluoksnyje vykstant skirtingų veiksnių maišymuisi. Taigi pertekėjimo per vandensparą parametru vertės taip pat turi būti suderintos su požeminio vandens radioaktyviosios anglies amžiumi, nes hidrogeologiškai aktyvių zonų vietose vandensparų pertekėjimo faktoriaus (k_0/m_0) vertės ir vandens amžius yra padidinti.

Požeminio vandens radioaktyviosios anglies amžiaus korekcijos pagrindimas

Požeminio vandens amžiaus nustatymas svarbus sprendžiant daugelį hidrogeologinių klausimų, vertinant ilgalaikę vandeningųjų sluoksnių mitybą, per vandensparas iš gretimųjų sluoksnių pratekančio vandens poveikį išteklių kiekiui ir cheminės sudėties formavimuisi. Tradiciškai požeminio vandens migracijos trukmei ar „amžiui“ aktyvios apykaitos zonoje nustatyti taikomas radioaktyviosios anglies

(^{14}C) ir tričio (^3H) metodai. Radioaktyviosios anglies datavimas remiasi ^{14}C aktyvumo (kiekio) tiriamame vandens mėginyje pokyčių įvertinimu, lyginant su jo pradine verte. Jeigu egzistuojant uždara vandens spūdinė sistema, tuomet mėginio buvimo sistemoje laiką būtų galima tiksliai nustatyti pagal ^{14}C koncentraciją vandenyje ištirpusioje neorganinėje anglyje (INA), pritaikius bendrai žinomą radioaktyviosios anglies skilimo formulę, kai jos pusėjimo trukmė – 5730 metų. Tačiau hidrogeologijoje, ypač aktyvios apykaitos zonoje, tokių sąlygų nėra. Požeminėje hidrosferoje INA izotopinę sudėtį lemia daug procesų: izotopų frakcionavimas ir senųjų („mirusių“) karbonatų tirpinimas, geocheminės reakcijos, skirtingo vandens INA maišymasis bei dirvožemio anglies dioksido ypatumai. Šių poveikių suminį efektą galima įvertinti radioaktyviosios anglies datavimo formulę papildžius praskiedimo faktoriumi q (Clark, Fritz, 1997):

$$t = -8267 \cdot \ln \frac{a^{14}\text{C}_{\text{INA}}}{q \cdot a_0^{14}\text{C}} \quad (7)$$

čia t – laikas; q – praskiedimo faktorius; $a_0^{14}\text{C}$ – radioaktyviosios anglies (^{14}C) pradinis aktyvumas vandeningajame sluoksnyje; $a^{14}\text{C}_{\text{INA}}$ – mėginyje išmatuotas ^{14}C aktyvumas.

Apskaičiuoti praskiedimo faktorių nėra paprasta – tam naudojami įvairūs korekcijos modeliai, kuriuose vienaip ar kitaip įvertinami geocheminiai ir $\delta^{13}\text{C}$ izotopų santykio duomenys. Tačiau tokius skaičiavimus galima atlikti ne visada. Paprasčiausia priežastis – pradinių duomenų trūkumas. Tokiais atvejais korekcija atliekama remiantis statistiniais ar empiriniais duomenimis. Dažniausiai tyrinėtojų priimama faktorius q reikšmė yra 0,85. Žinoma, geriau, kai atsižvelgiama į vandeningųjų sluoksnių uolienų specifiką. Pavyzdžiui, karstiniams rajonams q reikšmės – 0,65–0,75, liosams – 0,75–0,9, kristalinėms uolienoms – 0,9–1,0 (Clark, Fritz, 1997). Mažesnės faktorius q reikšmės atspindi požeminiame vandenyje vykstančių karbonatinės sistemos reakcijų ypatumus ir svarbą.

Požeminio vandens radioaktyviosios anglies amžiaus efektyviai korekcijai taikomi įvairūs faktorius q nustatymo modeliai: statistiniai (Vogel 1970); karbonatingumo (Tamers 1969); masių cheminio balanso (Clark, Fritz 1997; Fontes, Garnier 1979); ^{13}C izotopų maišymosi (Pearson 1965; Pearson, Hanshaw 1970; Mook

1972; Wigley 1976); mainų su uolienų matrica (Fontes, Garnier 1979, 1981) ir kt. Baltijos arteziniame baseine požeminio vandens amžiaus korekcijai ankstesniuose tyrimuose buvo naudotas tik statistinis modelis, taikant analogijos su kitais pasaulio artezinais baseiniais principą, kur praskiedimo faktorius vertės sudarė nuo 0,75 iki 0,85. Tačiau statistinis įvertinimas ne visuomet būna pakankamas, nes neatsižvelgiama į konkrečias hidrogeologines sąlygas, sedimentacinių baseinų amžių ir uolienų stabilijų izotopų sudėtį, jų susidarymo specifiką, diagenozę bei vandeninių tirpalų geochemiją. Lietuvos aktyvios apykaitos zonoje nustatytas požeminio vandens radioaktyviosios anglies amžius dažnai būdavo per didelis ir neatitiko tikrovės. Dėl to iškilo būtinybė taikyti kitus, sudėtingesnius radioaktyviosios anglies amžiaus geocheminės korekcijos modelius ir atlikti atskirų vandeningųjų sluoksnių praskiedimo faktorius q pagrindimą. Tai leistų ateityje išplėsti tokio pobūdžio hidrogeologinius tyrimus ir padidintų datavimo rezultatų patikimumą.

Vienas pagrindinių veiksnių, reguliuojančių ištirpusios neorganinės anglies kiekį, o kartu ir pradinį ^{14}C aktyvumą, yra senų karbonatų (jų $a^{14}\text{C}=0$ ‰) tirpinimas. Gėlo vandens zonoje pagrindinis požeminio vandens tipo formavimosi procesas yra susijęs su karbonatinių mineralų ar cemento tirpinimu, nes požeminio vandens cheminė sudėtis priklauso nuo uolienų, per kurias jis cirkuliuoja, tipo. Vidurinio–viršutinio devono kompleksą sudaro karbonatinės ir terigeninės uolienos. Famenio, Stipinų, Suosos–Kupiškio vandeningieji sluoksniai susiję su dolomitu ir klintimi. Šventosios–Upninkų vandeningajame sluoksnyje smiltainio poras užpildo dolomitas su klintimi. Karbonatiniai mineralai požeminiame vandenyje pakankamai tirpūs, todėl turi nemažą įtaką vandens cheminei sudėčiai. Aktyvios apykaitos zonoje stebima didelė atmosferinio vandens įtaka ir intensyvus vandenyje ištirpusio anglies dioksido poveikis uolienoms. Kritulių vanduo, filtruodamasis per dirvožemį, dėl intensyvios organinės medžiagos degradacijos ir kalcito, esančio dirvožemyje, tirpinimo praturtėja anglies dioksido ir tampa agresyvus karbonatinei medžiagai, požemyje formuojasi gėlas kalcio hidrokarbonatinis vanduo.

Kalcio hidrokarbonatinis vanduo intensyviai plauna dolomitinį cementą, – vyksta dedolomitacijos procesas ir formuojasi kalcio magnio

hidrokarbonatinis vanduo. Be to, dedolomitizacijos procesui įtakos turi ir kalcio sulfatinis požeminis vanduo, kuris intensyviai formuojasi gipsinguose sluoksniuose (Istro–Tatulos, Suosos–Kupiškio vandeniniai sluoksniai).

Vykstant aukščiau aprašytiems procesams, požeminio vandens sudėtyje atsiranda senųjų karbonatų, kurie praskiedžia INA esančios radioaktyviosios anglies aktyvumą. Korekcijos modelių, kurie leidžia įvertinti „mirusių“ karbonatų poveikį INA, yra keletas. Vieni jų labai supaprastina geocheminių reakcijų poveikį, pavyzdžiui, kai į skaičiavimus įtraukiamas karbonatų tirpinimas tik dirvožemio zonoje (atviros sistemos sąlygomis) arba kai atsižvelgiama ne į visus geocheminius procesus, lemiančius INA sudėtį. Patikimiausiai požeminio vandens amžiaus korekcija atliekama naudojant $\delta^{13}\text{C}$ maišymosi ir mainų su uolienos matrica (Fontes'o–Garnier'io) modelius. Plačiau apie aprašomus modelius galima pasiskaityti cituojamoje literatūroje.

Tričio koncentracijos matavimai atliekant požeminio vandens radioaktyviosios anglies amžiaus tyrimus leidžia papildomai įvertinti atliktos korekcijos pagrįstumą. Visi požeminio vandens mėginiai, kur tričio koncentracija viršija tričio nustatymo ar detekcijos lygį, rodo dabartinio meteorinio vandens amžių (nuo keliasdešimties iki kelių šimtų metų), nežiūrint, kad radioaktyviosios anglies metodu gautos „senosios“ datos. Lietuvoje atliktų tyrimų rezultatai rodo, kad kvartero ir devono vandeninių sluoksnių radioaktyviosios anglies amžiu nustatyti gali būti naudojami mėginiai, kur tričio koncentracija sudaro mažiau kaip 1,8 tričio vienetų (3 pav.). Kvartero, viršutinio devono karbonatinių ir terigeninių Šventosios–Upninkų vandeninių sluoksnių vandens datavimui geriausiai tinka Fontes'o–Garnier'io mainų

su uolienu matrica modelis, kur skaičiavimuose geriausiai įvertinama geocheminė aplinka. Pagal jį praskiedimo faktoriaus vidutinė vertė – 0,5 (4 pav.). Šį teiginį patvirtina ir tričio koncentracijos matavimai, nes šių sluoksnių tričio koncentracijų pokyčio trendas ties detekcijos linija kerta 50 % pMC (*angl.* „percent modern carbon“) ^{14}C žymą. Taigi tričio korekcija leidžia taip pat teigti, kad praskiedimo faktorius q minėtiems sluoksniams lygus 0,5:

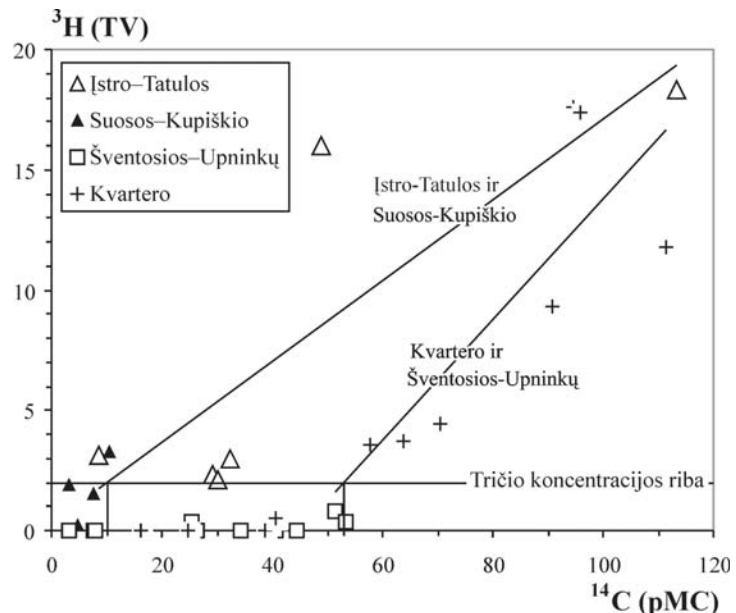
$$q = \frac{a^{14}\text{C}_{\text{INA}}}{a^{14}\text{C}_{\text{atm}}} = \frac{50 \text{ pMC}}{100 \text{ pMC}} = 0,5. \quad (8)$$

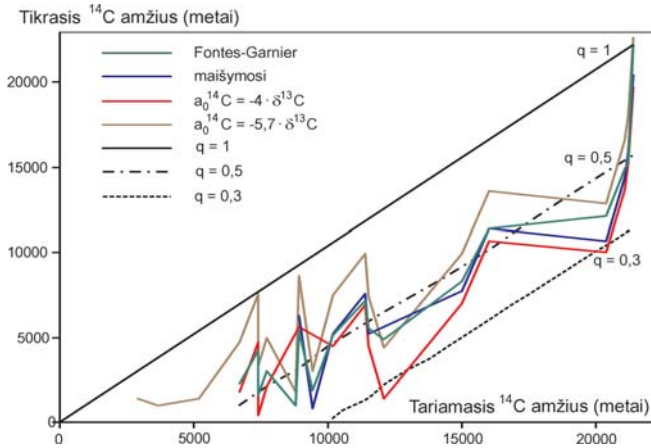
(8) formulėje atmosferos anglies dioksido ^{14}C aktyvumas prilygintas 100 pMC.

Karstiniame masyve praskiedimo faktoriaus q vertės mažesnės. Šiaurės Lietuvoje viršutinio devono Istro–Tatulos ir Suosos–Kupiškio vandeninguose sluoksniuose nedidelio storio kvartero nuogulose dėl evaporitinių uolienu (kinties, dolomito, gipso, halito druskų) tirpinimo vyksta intensyvūs karstiniai procesai. Juos lydi dedolomitizacijos, antrinės kalcitizacijos ir sulfatų redukcijos procesai. Tričio koncentracijos matavimo požeminiame vandenyje duomenys rodo, kad praskiedimo faktoriaus q reikšmės čia kinta nuo 0,1 iki 0,3 (žr. 3 pav. – ^{14}C atitikimą ties 10 ir 30 pMC). Taigi Lietuvoje požeminio vandens amžiaus korekcijai vidurinio devono terigeninių ir karbonatinių uolienu komplekse taikoma praskiedimo

3 pav. Požeminio vandens tričio ir ^{14}C koncentracijų palyginamoji diagrama (TV – tričio vienetai; pMC – *angl.* „percent modern carbon“).

Fig. 3. Tritium versus ^{14}C in groundwater (TV – tritium unit; pMC – percent modern carbon).





4 pav. Radioanglies amžiaus korekci-
jos modelių palyginamoji diagrama.

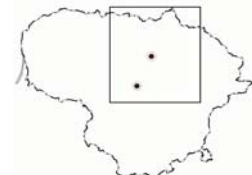
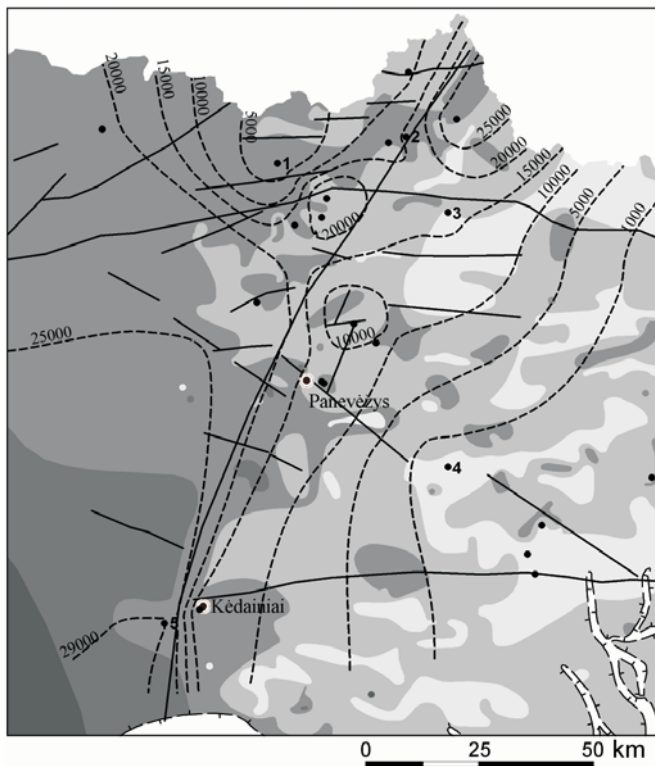
Fig. 4. Comparison of different radio-
carbon age correction models.

faktoriaus q vertė turi būti 0,5 (žr. 3 ir 4 pav.), o karstiniame rajone, kur išplitusios evaporitinės uolienos, atitinkamai nuo 0,1 iki 0,3.

Pritaikius aukščiaią išdėstytą metodiką, buvo atliktas viršutinio–vidurinio devono komplekso požeminio vandens radioaktyviosios anglies amžiaus perskaičiavimas. Kaip pavyzdį paimsimė Šventosios–Upninkų vandeningąjį sluoksnį (5 pav.). Požeminio vandens hidrocheminių tipų kaita šiame sluoksnyje nuo mitybos iki

tracija ir Ca^{2+}/Na^+ rodikliu (Mokrik, 2003) (žr. 1 lentelė).

Gėlas kalcio hidrokarbonatinio (C1a) ir kalcio magnio hidrokarbonatinio (C1b–c) tipo vanduo formuojasi šiuolaikinės meteogeninės infiltracijos mitybos srityje – rytinėje dalyje, kur Šventosios–Upninkų vandeningąjį sluoksnį dengia tik kvartero nuogulos. Čia dėl trumpo uolienose buvimo laiko požeminio vandens radioaktyviosios anglies amžius prilygsta dabartiniam



- Tirta gręžinio vieta ir jo numeris (žr. 2 lentelę)
- Koreguotas požeminio vandens radioanglies amžius metais
- Lūžis
- +— Vandeningojo sluoksnio riba

Hidrocheminiai tipai pagal metamorfizacijos koeficientą (žr. 1 lentelę):

< 0.11
0.11 - 0.33
0.33 - 2.3
2.3 - 12
12 - 100

5 pav. Vidurio Lietuvos Šventosios–Upninkų vandeningojo sluoksnio hidrocheminis žemėlapis.

Fig. 5. Hydrochemical map of the Šventoji–Upninkai aquifer in the Middle Lithuania.

2 lentelė. Požeminio vandens radioaktyviosios anglies amžiaus korekcijos duomenys

Gręžinio pavadinimas	$^{14}\text{C}_{\text{INA}}$ (pMC)	Gylis, m	Tariamasis amžius, metai	$\delta^{13}\text{C}_{\text{INA}}$ (‰ PDB)	$q_{\text{F-G}}$ *	$q_{\text{maiš}}$ *	Amžius pagal pataisus modelius				Amžius, kai $q=0,5$	M.I.***
							F-G**	Maiš.**	$a_0 = -4 \cdot \delta^{13}\text{C}$	$a_0 = -5,7 \cdot \delta^{13}\text{C}$		
Iciūnai-1399	34,2	98–103	8900±130	-16,9	0,65	0,74	5400	6300	5600	8600	3200	0,88
Karajimiškis-1350	7,7	72–83	21200±300	-12,1	0,49	0,53	15300	15900	15200	18100	15500	0,16
Sviliai	7,8	70–75	21100±700	-10,2	0,47	0,44	14900	14400	13700	16600	15400	0,08
Girdžiūnai-58k	56,2	87–97	4800±100	-8,9	0,43	–	dab.	dab.	dab.	dab.	dab.	0,14
Josvainiai	1,49	143–156	34700±700	-12,3	0,52	0,54	29400	29600	28900	31800	29000	1,31

* $q_{\text{F-G}}$, $q_{\text{maiš}}$ – praskiedimo faktoriaus q modeliutos (Fontes'o–Garnier'io ir $\delta^{13}\text{C}$ maišymosi modeliais) reikšmės; ** F–G, Maiš. – atitinkamai Fontes'o–Garnier'io ir $\delta^{13}\text{C}$ maišymosi modeliai; *** M.I. – požeminio vandens metamorfizacijos laipsnis.

arba yra kelių šimtų metų senumo. Natrio hidrokarbonatinio tipo (C2) požeminis vanduo Šventosios–Upninkų vandeningajame sluoksnyje formuojasi 65–270 m gylyje centrinėje ir šiaurės vakarinėje Lietuvos dalyse, kur jį dengia jaunesni devono amžiaus sluoksniai. Tokio tipo požeminio vandens susiformavimo amžius kinta nuo 1681 iki 10 234 metų. Minėti dėsnin-gumai nustatyti ir kituose viršutinio–vidurinio devono komplekso vandeninguose sluoksniuose. Ties tektoninių lūžių vietomis yra amžiaus ir helio anomalijų, – labiausiai metamorfizuotas Šventosios–Upninkų vandeningojo sluoksnio natrio chloridinio tipo požeminis vanduo yra išplitęs ties Kėdainiais. Pavyzdžiui, gręž. Josvainiai 143–156 m gylyje Šventosios–Upninkų vandeningajame sluoksnyje nustatytas ^{14}C aktyvumas sudaro tik 1,49 pMC, o koreguotas radioaktyviosios anglies amžius – net 29 400 metų (2 lentelė). Taigi šiame vandeningajame sluoksnyje požeminio vandens amžiui įtakos turi vanduo, patenkantis iš žemiau slūgsančio Pernu–Tilžės vandeningojo komplekso. Tai patvirtina ir gręž. Josvainiai aptikta anomali helio koncentracija, kuri lygi $4900 \cdot 10^{-5}$ ml/l ir yra unikali Baltijos artezinio baseino gėlo požeminio vandens zonoje.

Taigi remiantis hidrogeocheminių ir izotopinių tyrimų teorinėmis prielaidomis bei pateiktais pavyzdžiais akivaizdu, jog hidrogeologinių tyrimų bei išteklių įvertinimo metu būtina įdėmiau vertinti tektoninių lūžių zonas. Ateityje tektoninių lūžių zonose bus galima patikslinti ne tik vandens amžių bei zoniškumą, bet ir nustatyti vertikalios vandens filtracijos per vandens-paras parametrus.

Baigiamosios pastabos

Požeminio vandens srauto tėkmės kryptimi pradinis radioaktyviosios anglies aktyvumas mažėja ne tik dėl radioaktyvaus ^{14}C izotopo skilimo,

bet ir dėl įvairių geocheminių reakcijų, vykstančių uolienų ir vandens karbonatinėje sistemoje. Senuose, platforminio tipo arteziniuose baseinuose dėl čia vykstančių hidrogeocheminių procesų požeminio vandens INA praskiedžiama senais („mirusiais“) karbonatais. Todėl, neatlikus atitinkamų modeliųjų korekcijų, nustatytas požeminio vandens radioaktyviosios anglies amžius būtų per didelis. Dėl šios priežasties skaičiuojant požeminio vandens radioaktyviosios anglies amžių naudojamas praskiedimo faktorius q , kuris eliminuoja „mirusių“ karbonatų poveikį. Kadangi Baltijos arteziniame baseine anksčiau atlikti gana gausūs radioaktyviosios anglies amžiaus nustatymai neįvertino hidrogeocheminių praskiedimo procesų, būtina atlikti šių skaičiavimų korekciją. Nežiūrint į tai, kad geocheminiai procesai, vykstantys požeminiame vandenyje, yra kur kas sudėtingesni nei skaičiavimuose naudojamos priklausomybės, jos gana pagrįstai leidžia įvertinti požeminio vandens radioaktyviosios anglies amžių. Pritaikius kelis patikimiausius geocheminės korekcijos metodus nustatyta, kad Lietuvos viršutinio–vidurinio devono terigeninių ir grynai karbonatinių vandeningųjų sluoksnių požeminiame vandeniui šio faktoriaus vertė artima 0,5. Devono amžiaus karstinio evaporitinio devono amžiaus masyvo požeminiame vandeniui praskiedimo faktoriaus reikšmė mažesnė – nuo 0,1 iki 0,3. Vidurio Lietuvos žemumoje išplitusio Šventosios–Upninkų vandeningojo sluoksnio požeminio vandens radioaktyviosios anglies amžius kinta nuo dabartinio iki 29 tūkst. metų. Toks didelis amžius susijęs su pertekėjimo per Narvos vandensparą procesais ties hidrogeologiškai aktyvia meridialinės krypties tektoninių lūžių zona. Vidurio Lietuvos žemumoje atlikti tyrimai leido nustatyti helio koncentracijų anomalijas požeminiame vandenyje Kėdainių apylinkėje. Tai taip pat patvirtina čia esant padidėjusį požeminio vandens radioaktyviosios anglies amžių.

Literatūra

- Banys, J., Juodkakis, V., Mokrik, R. Regional regularities of the radiocarbon distribution in the groundwater of the Baltic Basin. *Water Resources* 2. – 1979. – P. 110–116 (Rusų k.).
- Clark, I., Fritz, P. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. – New York, 1997. – P. 328.
- Fontes, J.Ch., Garnier, J.M. Determination of the initial ^{14}C activity of the total dissolved carbon: a review of the existing models and a new approach // *Water Resour.* 15. – 1979. – P. 399–413.
- Juodkakis, V., Mažeika, J., Petrošius, R. Radioisotope methods in environmental hydrogeology // *Geologija*, 18. – 1995. – P. 132.
- Jurgaitis, Arn., Mokrik, R.. Baltijos artezinio baseino permo–famenio vandeningojo komplekso požeminio vandes cheminės sudėties formavimosi ypatumai. // *Geologija*, 11. – 1990. – P. 39–51.
- Mook, W.G. On the reconstruction of the initial ^{14}C content of groundwater from the chemical and isotopic composition // *Proc 8th Int Conf on Radiocarbon Dating*, vol 1. – 1972. – P. 342–352.
- Klimas, A., Plankis, M. Groundwater budget and quality in Vilnius wellfields studied by isotope methods // *Geologija*, 59. – 2007. – P. 65–71.
- Mokrik, R. Pabaltijos pajūrio hidrogeologija / *Habil.dr. dis. santrauka*. – M., 1990. – 54 p. (Rusų k.).
- Mokrik, R. The Paleohydrogeology of the Baltic Basin. Neoproterozoic and Phanerozoic. – Vilnius, 2003. – 334 p.
- Pearson, F., Hanshaw, B.B. Sources of dissolved carbonate species in groundwater and their effect of carbon-14 dating // *Isotope hydrology*. – Vienna, 1970. – P. 271–286.
- Pearson, F.J. Use of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios to correct radiocarbon ages of materials initially diluted by limestone // *Radiocarbon and tritium dating*. – 1965. – P. 357–366.
- Tamers, M.A. Validity of radiocarbon dates on groundwater // *Geophys Surv.* 2. – 1975. – P. 217–239.
- Vogel, J.C. Carbon-14 dating of groundwater // *Isotope hydrology*. – Vienna, 1970. – P. 225–237.
- Wigley, T.M.L. Effect of mineral precipitation of isotopic composition and ^{14}C dating of groundwater // *Nature*, vol. 263. – 1976. – P. 219–221.

Summary

Identification of the Middle Lithuanian Zone of Tectonic Lineaments Using Isotopic Methods in the Devonian Aquifer System

The objective of this study was to study the seepage via tectonic fractures and to estimate the corrected groundwater radiocarbon age of Upper–Middle Devonian aquifer system in Lithuania. Hydrochemical and isotopic data were used for this evaluation. The interpretation of the groundwater residence time in hydrogeological system by radiocarbon data is complicated and apparent. The investigation of isotopic geochemistry shows that obtained results can rarely be approached as true groundwater age.

In the direction of groundwater flow, the activity of radioactive carbon-14 isotope decreases not only due to its decay, but also due to various geochemical reactions in the rock and water carbonate system. The hydrochemical processes in old platform – type artesian basins attenuate the dissolved inorganic carbon in groundwater with old (dead) carbonates. Therefore, without certain model corrections, the radiocarbon age of groundwater

would be raised. Thus, in performing the groundwater radiocarbon dating the attenuation factor (q) is introduced in order to eliminate the effect of the “dead” carbonates. Since the numerous radiocarbon datings performed earlier for the Baltic Artesian Basin had not taken into account the above–mentioned attenuation, these data should be corrected. The geochemical processes in groundwater are more complicated than those modelled in calculations, the latter enable to obtain valid results of radioactive age of groundwater. Applying several most reliable methods of geochemical correction, the q factor value for groundwater in the Lithuanian Upper–Middle Devonian terrigenous and calcareous aquifers was determined to be close to 0.5. The attenuation factor value for Devonian karst evaporite system can be lower and range from 0.1 to 0.3. The radiocarbon age of groundwater in Šventoji–Upinkai aquifer spread in the Middle Lithuanian Plain ranges from the present one to even 29 thousand years. Such age is related to the flow of groundwater across the Narva aquiclude at the hydrogeologically active zone of meridional tectonic lineaments. The investigations carried out in the Middle Lithuanian Plain enabled to determine the helium content anomalies in groundwater in Kėdainiai District, and this also confirms the higher radioactive age of groundwater.