

# *Ekonominë geologija • Economic Geology • Ýêîíîî è÷ãñêàÿ äãîëîãèÿ*

---

## **Anglies dvideginio geologinio laidojimo perspektyvos Lietuvoje**

---

**Saulius Ðliaupa,**

**Jonas Satkûnas,**

**Rasa Ðliaupienë**

Ðliaupa S., Satkûnas J., Ðliaupienë R. Prospects of CO<sub>2</sub> geological sequestration in Lithuania. *Geologija*. Vilnius. 2005. No. 51. P. 19–28. ISSN 1392-110X.

Carbon dioxide is one of the most urgent global ecological problems. Considerable amounts of the gas emitted to atmosphere lead to a progressing climate warming. The annual exhaustion of CO<sub>2</sub> in Lithuania is 16.7 mln. tonnes. Different possibilities of elimination of CO<sub>2</sub> are considered, the geological sequestration of CO<sub>2</sub> being one of the most promising ways. A preliminary evaluation of the potential of the Lithuanian geological formations was performed. Two sequestration scenarios are discussed: (a) saline Cambrian aquifers in anticlinal structures including depleted oil fields, and (b) monoclinical saline aquifers. Two monoclinical saline terrigenous aquifers have suitable thermal and pressure conditions. The potential area of the Cambrian occupies Central and West Lithuania. The prospects of the Lower Devonian are related to West Lithuania. The potential of the latter compared to the Cambrian is in an order of 10:1. As regards anticlinal traps, the inventory of 116 local uplifts of the Cambrian reservoir and calculation of the potential amount of sequestered CO<sub>2</sub> were carried out. The largest structures can accommodate more than 1 mln. tonnes of CO<sub>2</sub>. However, a number of this type of structures is low. There is a more abundant group of structures that can host 400–500 thousand tonnes of gas, most of them related to known oil fields. Utilisation of CO<sub>2</sub> for enhanced oil recovery is viewed as a prospective way of CO<sub>2</sub> sequestration in West Lithuania. The total capacity of analysed structures is 36 mln. tonnes of CO<sub>2</sub>.

**Key words:** CO<sub>2</sub> sequestration, Lithuania, depleted oil field, saline aquifer.

Received 22 February 2005, accepted 21 April 2005

Saulius Ðliaupa, Rasa Ðliaupienë. Geologijos ir geografijos institutas, T. Ševèenkos 13, LT-03223 Vilnius. E-mail: sliupa@geo.lt

Jonas Satkûnas. Geological Survey of Lithuania, Konarskio 35, LT-03123 Vilnius. E-mail: jonas.satkunas@lgt.lt.

---

### **ÁVADAS**

Anglies dvideginio iðmetimas á atmosferà yra viena aðtriausio þmogaus intensyvios gamybinës veiklos ekologinio problemø XX amþiuje. Didþiuliai ðio cheminio junginio kiekiai atmosferoje gali sukelti katastrofiðkà klimato atðilimà ir su tuo susijusias skaudþias pasekmes. Per pastaruosius 150 metø anglies dvideginio koncentracija atmosferoje padidëjo be-

veik treðdaliu, daugiausia dël kuro deginimo. Tiesa, sunku vienareikðmiðkai teigti, jog XX a. stebimas 0,4–0,6°C klimato atðilimas yra susijæs tik su þmogaus veikla, ëia gali veikti ir natûralûs gamtos procesai (Bryant, 1997). Taëiau negalima ignoruoti ir fakto, kad per pastaruosius 250 metø á atmosferà buvo iðmesta 227 Gt anglies. Ði tendencija auga – per metus á atmosferà patenka 7 milijardai tonø anglies dvideginio, todël nenuostabu, kad vis didëja

pasaulio visuomenės pasiryšimas mažinti išmetamo CO<sub>2</sub> kiekį. Pagal Kioto protokolą, išsivysčiusios šalys iki 2008–2012 metų turi sumažinti anglies dvideginio emisiją 5,2% (baziniai metai – 1990-ieji). Protokolas pasirašė ir Lietuva.

Viena iš CO<sub>2</sub> mažinimo alternatyvų yra dujų laidojimas požeminėse ertmėse. Šis kelias nėra tolima vizija, pasaulyje jau veikia kelios sąmonės ir elektrinės, kurios laidoja anglies dvideginį geologiniuose sluoksniuose. CO<sub>2</sub> laidojimo projektų sėkmę lemia trys pagrindiniai kriterijai: 1) jie turi būti ekonomiškai efektyvūs, 2) turi suteikti ilgalaikio laidojimo galimybę, 3) būti ekologiškai saugūs. Saugojimo apimtys ištisus špūdingos – vidutinė 500 MW anglis deginanti elektrinė per metus išmeta apie 3 milijonus tonų anglies dvideginio.

Labiausiai atmosfera terdama deginant mazutą, orimulsiją, akmenis anglis ir durpes. Gamtinio dujų tarša šiuo atžvilgiu yra 30% mažesnė. Lietuvoje šilumą gaminančioje sąmonioje tarša vienam generuotos šilumos vienetui kinta nuo 25 kg CO<sub>2</sub>/MWh iki 370 kg CO<sub>2</sub>/MWh, o vidurkis yra 190 kg/MWh (Lietuvos aplinkos ministerijos informacija; www.laaif.lt). Tardiausios yra kurioje deginančioje elektrinėje, cemento sąmonioje. Bendri taršos mastai sudaro 16,7 mln. m. t. CO<sub>2</sub> per metus, arba 4 m. t. vienam žmogui. Apie 40% sudaro transporto išmetamos dujos.

## CO<sub>2</sub> GEOLOGINIO LAIDOJIMO SCHEMA

Geologinis anglies dvideginio laidojimas susideda iš kelių procesų: dujų sugavimo, transportavimo ir jo palaidojimo formacijoje.

**CO<sub>2</sub> sugavimas ir separacija.** Prieš supumpuojant CO<sub>2</sub> į geologinį sluoksnį, jį reikia sugauti ir atskirti nuo kitų elementų, kad būtų išgautas kuo grynesnis produktas (Herzog et al., 1997; Herzog, 2001). Dabar pasaulyje veikia per dešimt elektrinių, kuriose išmetamos dujos yra kaupiamos ir vėliau panaudojamos gaminant švairius produktus (sausą ledą, vulkanizuotą gumą, polikarbonatus ir pan.). Jo apimtys siekia 0,1 GtC per metus – nedaug lyginant su 7 GtC išmetimu į atmosferą. Pirmi penki pagrindiniai separacijos būdai (Audus, 1996): absorbcija (cheminė ir fizinė), adsorbicija (fizinė ir cheminė), pėmos temperatūros distiliacija, dujų separacijos membranos, mineralizacija ir biomineralizacija. CO<sub>2</sub> gaudančio komercinės sąmonioje šiuo metu taiko cheminės absorbcijos metodą su metanoetanolamino tirpalu.

**CO<sub>2</sub> transportavimas.** Dėpniausiai taršos šėdiniai yra nutolę nuo potencialio geologinio saugyklo, todėl CO<sub>2</sub> reikia transportuoti, efektyviausia – vamzdynais. Šiuo metu jau arengta daugiau kaip 3000 km CO<sub>2</sub> perdavimo vamzdynų, didžiausia dalis yra JAV (Gale, 2001). Būtinis slėgis – 80 atm. Galima rizika yra susijusi su dujotiekio eksploatacija (korozija, operatoriaus klaidos) ir avarijomis (pėmdirbystės, statybų ir pan.).

**CO<sub>2</sub> injekcija į sluoksnį** Dujos yra supumpuojamos į tinkamą geologinį kėnà. Pagrindiniai reikalavimai anglies dvideginio laidojimui: ilgalaikiškumas (geologiniai periodai), minimalios laidojimo išlaidos, tarp jo ir transportavimo, minimali aplinkosauginė rizika, laidojimo metodas neturi prieštarauti tarptautiniams ir valstybės ástatymams bei susitarimams. Kol kas pasaulyje yra nedaug CO<sub>2</sub> saugyklo, taėiau vykdomi rūgdėio dujų laidojimo ir CO<sub>2</sub> panaudojimo projektai suteikia vertingos informacijos plėtojant šia koncepcija. Vykdomo projektų apimtys kol kas gerokai mažesnės, nei reikalaujama pramoniniam CO<sub>2</sub> laidojimui, tuo tarpu CO<sub>2</sub> panaudojimo naftos telkiniuose projektai yra pakankamai dideli. Naftos telkinio intensyvavimo projektai vykdomi nuo 1972 m., o rūgdėio dujų (H<sub>2</sub>S kartu su CO<sub>2</sub>) laidojimas – nuo 1989 m. (Kanadoje yra per 30 tokių saugyklo, per metus palaidojama apie 200 mln. m<sup>3</sup> rūgdėio dujų), tad per pastaruosius kelis dešimtmečius sukauptas nemažas patyrimas šioje srityje. Be to, jau beveik dešimtmetį (nuo 1915 m.) steigiamos požeminės dujų saugyklos – CO<sub>2</sub> laidojimo prototipas.

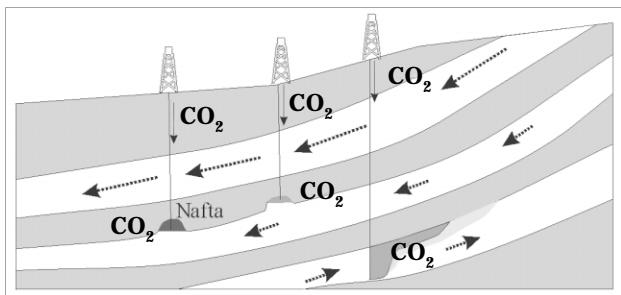
Pagal konservavimo pobūdą galima skirti du laidojimo tipus: hidrostratigrafinį ir geocheminį. Pirmuoju atveju lemiamą vaidmenį vaidina kolektoriaus izoliacija, antrojo veikimo principas grindžiamas tuo, kad CO<sub>2</sub>, reaguodamas su uoliena, ágauna mineralinę formą.

Anglies dvideginis gali būti laidojamas švairaus tipo geologiniuose kėnuose: išeksploatuotuose dujų ir naftos telkiniuose, šėriuose vandeninguose horizontuose, druskos ir anglies kloduose, tam tikrame molyje (Bachu, 2000).

1. *Naftos ir dujų kolektoriai.* Šis tipas turi nemažai privalumų. Pirmas – tai geras geologinis, geofizinis telkinio ištyrimas. Pasibaigus naftos ar dujų eksploatacijai, telkiniai gali būti pertvarkyti į CO<sub>2</sub> saugyklas. Faktiškai buvusio dujų telkinio panaudojimas yra pats tinkamiausias CO<sub>2</sub> laidojimo būdas. Jis duoda dvigubą naudą – padidinamas angliavandenilių išgavimas ir izoliuojama CO<sub>2</sub>.

2. *Laidojimas šėriuose vandeninguose horizontuose.* Lyginant su kitais metodais, vandeningo horizonto panaudojimas yra gana nauja idėja. Gilūs pėmės sluoksniai talpina šėrų vandenį, mažai tinkamą praktiniam panaudojimui. Didelis slėgis giliuose kolektoriuose lemia aukštą CO<sub>2</sub> izoliavimo potencialą. Iki 30% šėiskverbusio CO<sub>2</sub> ištirpsta vandenyje, likusi dalis kaupiasi viršutinėje kolektoriaus dalyje sudarydama pliumą (Law, Bachu, 1996). Saugyklos dydis priklauso nuo kolektoriaus poringumo, efektyvaus storio, slėgio, mineralizacijos, temperatūros (Speacher et al., 2003). CO<sub>2</sub> taip pat gali visam laikui likti mineralinės formos, taėiau tam būtinai gana ilgas laiko tarpas (Bachu et al., 1994; Kazhuba et al., 2003). Galimi du laidojimo tipai: a) antiklininėse struktūrinėse gaudyklėse, kuriose CO<sub>2</sub> kaupiamas panaėiai kaip natūralios dujos, ir b) monoklininiuose kolektoriuo-

se, kuriuose anglies dvideginio pliumas kaupiasi viršutinėje kolektoriaus dalyje ir migruodamas sluoksnyje palaipsniui ištirpsta poriniame vandenyje (1 pav.). Pirmojo tipo saugyklų potencialą lemia struktūros dydis, antrojo ištekliai yra daug didesni, juos riboja baseino parametrai, iš jų pagrindinis – plotas, kuriame CO<sub>2</sub> bus superkritinės (garų) būklės, kadangi laidoti dujas yra pavojinga dėl galimo jų išsiveržimo ir sekulius horizontus ir žemės paviršius.



**1 pav.** Anglies dvideginio geologinio laidojimo vandeninguose horizontuose koncepcijos: struktūrinėse pakilumose (gaudyklėse) ir monokliniame sluoksnyje

**Fig. 1.** Two concepts of CO<sub>2</sub> sequestration in Lithuania: (i) aquifers in anticlinal structures including depleted oil fields, and (ii) monoclinical saline aquifers

**3. Akmens druskos klodai.** Patirtis rodo, jog tokio tipo geologiniai kūnai yra tinkami ilgalaikiam dujų saugojimui. Dėju metu yra keli veikiantys CO<sub>2</sub> kapiūnynai. Pūnomiausias – Sleipnerio komercinis objektas. Projektą inicijavo Norvegijos vyriausybės nustatyta 50 JAV dolerių už vieną CO<sub>2</sub> toną bauda (vėliau sumažinta iki 38 dolerių). Druskos klodų potencialas yra labai didelis. Jungtinėse Amerikos Valstijose jis vertinamas apie 500 milijardų tonų dujų. Visgi, lyginant su sūriais vandeningais horizontais, šie klodai mažiau perspektyvūs.

**4. Akmens anglies klodai.** Akmens anglies klodai talpina didžiulius metano dujų, absorbuotų ant anglies paviršiaus, kiekius (Pashin, McIntire, 2003). Metanas išgaunamas mažinant slėgą, dažniausiai išpumpuojant požeminį vandenį. Alternatyvus metodas yra anglies dvideginio injekcija į sluoksną. Praktiniais bandymais nustatyta, kad CO<sub>2</sub> absorbcinė galia yra dvigubai didesnė nei metano, tad jis keičia metaną ir yra sujungiamas akmens anglies sluoksnyje. Tai perspektyvus metodas, duodantis dvigubą efektą: palaidojamas CO<sub>2</sub> ir gaunama naudinga žaliava – švarus kuras. Pasaulinis CO<sub>2</sub> laidojimo potencialas anglies kloduose įvertintas 7,1 mlrd. tonų.

**5. Laidojimas molingose uolienose.** Tai viena iš CO<sub>2</sub> laidojimo galimybių, tiesa, kol kas praktiškai nepatikrinta. Detalūs tyrimai atliekami Kentukio devono juoduosiuose molingose sluoksniuose, kurie dar turi milžinišką gamtinių dujų potencialą. Panašiai kaip anglies klodų atveju, metanas desorbuojamas iš anglies dvideginio 1:2 santykiu, todėl molis gali būti puikus CO<sub>2</sub> kolektorius.

CO<sub>2</sub> sugavimas ir laidojimas kol kas yra brangus (Audus, 1996). Šiandien vienos tonos laidojimo kaštai yra 100–300 JAV dolerių (duomenys iki 2003 m.). Vykdomų projektų tikslas yra pasiekti 10 JAV dolerių už anglies toną (2,7 tonos CO<sub>2</sub>) ribą iki 2015 metų (Biggs, 2002). Paėia didžiausią kaštų dalį apie tris ketvirtadalius visų išlaidų, sudaro CO<sub>2</sub> sugavimas ir separacija. Transportavimo (vamzdynuose) išlaidos priklauso nuo reljefo, gyventojų tankumo ir pan. Vidutinė kaina, aptarnaujant vidutinio pajėgumo 1500 MW anglies jėgainę, yra apie 0,5 JAV dolerio/metrų tona / 100 km. Kartu su injekcija kaina gali būti 3–5,5 JAV doleriai už CO<sub>2</sub> toną. Injekcijos ir saugojimo geologiniame sluoksnyje išlaidos yra mažiausios. Kartu su sugavimu, transportavimu, injekcija ir saugojimu išlaidos 1500 MW jėgainėje yra 2–15 JAV dolerių už vieną CO<sub>2</sub> toną. Vidutinė dujų laidojimo kaina sūriame vandeningame horizonte yra trys JAV doleriai, išeksploatuotame naftos ar dujų telkinyje – 4–5 JAV doleriai.

Reikia pažymėti, jog CO<sub>2</sub> laidojimas gali duoti ir pelno. Dujas galima panaudoti ūvairioms praktinėms reikmėms ir iš dalies atpirkti tas išlaidas, kurios buvo išleistos jas laidojant. Tokios perspektyvios sritys – naftos gavybos didinimas, dumblių augimo skatinimas (panaudojami kaip biomasė alternatyvaus kuro gamyboje). Siūloma auginti biomasę CO<sub>2</sub> prisotintuose dirbtiniuose vandens telkiniuose ir ją paversti maistu, pašarais, kuru. Dabartiniu metu šiems tikslams pagaminama apie 5000 tonų mikrodumblių. Be abejo, tai nėra pagrindinis veiksnys mažinant anglies dvideginio išmetimą į atmosferą, bet suteikia palankų ekonominą ir psichologinį aspektą.

## CO<sub>2</sub> SAUGYKLOS VERTINIMO PAGRINDINIAI KRITERIJAI

Vertinant CO<sub>2</sub> laidojimo vandeninguose horizontuose galimybes, būtina atsižvelgti į kelis pagrindinius kriterijus – sedimentacinio baseino tektoninę padėtį, kolektorių ir vandensparų pasiskirstymą, geoterminą ir hidrodinaminą režimą, ekonominą, politinį-socialinį aspektą (Bachu, 2000; 2002). Pagal pirmą kriterijų CO<sub>2</sub> saugojimui labiausiai tinka kratoniniai sedimentaciniai baseinai (tokie kaip Baltijos baseinas), o aktyvios tektoninės sritys yra išbraukiamos iš kandidatų sąrašo. Svarbus yra hidrodinaminis režimas. Vandeninguose horizontuose, kuriuose požeminis vanduo migruoja baseino periferijos link, gali kilti tam tikrų technologinių ir aplinkosaugos problemų (Magara, 1976). Geriausios sąlygos yra vandeninguose horizontuose, kuriuose požeminis vanduo migruoja žemyn arba yra stagnacinės būklės. CO<sub>2</sub> geologiniame kūne gali migruoti trimis pagrindinėmis formomis: ištirpęs vandenyje, dujų pavidalo ir superkritinės būklės (garai). Tai priklauso nuo slėgio ir temperatūros. CO<sub>2</sub> vandens mišinys yra sunkesnis už vandenį, todėl jis grimzta. Kritinis taškas, kada CO<sub>2</sub> elgiasi ir kaip du-

jos, ir kaip skystis, yra 32°C ir 7,8 MPa (pvz., kambro kolektorius centrinėje Lietuvoje). Analizuojant monoklininio tipo sūrių vandeningų horizontų galimybes, kritine riba pasirenkama 32°C ir 7,8 MPa. Esant 2,5°C geoterminiam gradientui, superkritinė CO<sub>2</sub> būklė pasiekama apie 800 metrų gylyje. Tačiau geoterminis gradientas, klimatas švairiuose regionuose yra skirtingi. Pavyzdžiui, Teksase, kur temperatūros gradientas yra 3°C/100m, CO<sub>2</sub> pasieks superkritinę būklę 150–500 m gylyje, o Mišigano baseine – 0,8–1 km gylyje. Tarp rizikos veiksnių minimi seni grąžiniai ir lūpio zonos, išilgai kurių anglies dvideginis gali patekti ir aukščiau slūgsančius geriamojo vandens horizontus.

## DUOMENYS

Tiriant Lietuvos gelmių CO<sub>2</sub> laidojimo potencialą, buvo įvertinta keletas parametrų. Siekiant nustatyti temperatūriną reimą, buvo panaudoti 160-ies giliųjų grąžinių temperatūros matavimo duomenys (Džiaupa, 2002), peržiūrėta hidrostatinio slėgio informacija. Kambro poringumo duomenų bazę sudarė per 10 000 poringumo ir skvarbumo matavimų (Džiaupa et al., 2003), devono terigeninių kolektorių duomenų bazė – keli dešimtai matavimų. Vandens mineralizacijos duomenys gauti iš kambro (170 grąžinių), apatinio devono ir Perno (75 grąžiniai), Upninko-Šventosios kolektorių (1300 grąžinių). Kiti vandeningi horizontai neanalizuoti, kadangi jų termobarinės sąlygos nėra palankios CO<sub>2</sub> laidojimui.

Įvertinant kambro kolektoariaus vietinių gaudyklės potencialą inventorizuota 116 struktūrų, išskirtų pagal grąžimo ir seisminius duomenis. Apibūdintas kiekvienos struktūros plotas, amplitudė, temperatūra, slėgis, vandens mineralizacija, poringumas, efektyvūs sluoksnio storis. Struktūrų gabaritai apskaičiuoti Mapinfo Professional GIS programa. Analizuojant kambro struktūras taip pat remtasi Lietuvos dujų saugyklų tyrimų duomenimis (Piske et al., 2004).

## LIETUVOS GELMIŲ POTENCIALAS

Lietuva yra Baltijos sedimentacinio baseino rytinėje ir centrinėje dalyse, nuosėdinės dangos storis kinta nuo 200 metrų šalies pietryčiuose iki 2,3 km Baltijos jūros priekrantėje. Pjūvis pasižymi litologinės sudėties ir hidrogeologinių sąlygų švairove. Viršutinė nuosėdinės dangos dalis yra aktyvios vandens apykaitos zonoje, kurią giliau keičia pereinamoji ir stagnacinė zonos.

Lietuvos sąlygomis tinka du anglies dvideginio saugojimo ir laidojimo scenarijai, kurie atitinkamai reikalauja ir skirtingos vertinimo strategijos. Pirmąją potencialių objektų grupę sudaro antiklininio tipo struktūros, tarp jų ir naftos telkiniai. Antrajam tipui priklauso monoklininio tipo sūrių vandeningi horizontai.

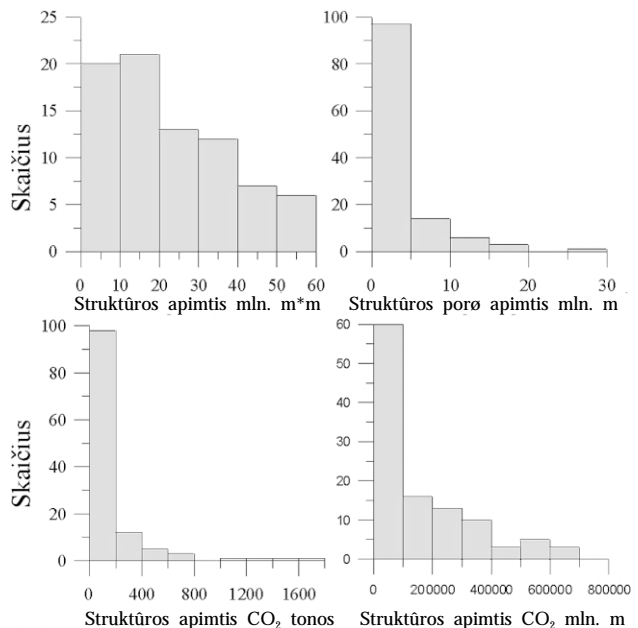
## Antiklininio tipo saugyklos

Antiklininio tipo struktūros yra saugiausios, tačiau jų potencialas, lyginant su monokliniais vandeningais horizontais, yra labai ribotas. Kaip rodo ilgalaikis tyrimas Lietuvoje patirtis, patikimos vietinės pakilumos yra paplitusios tikrai kambro kolektoariau, todėl tik šis geologinis sluoksnis analizuotinas kaip perspektyvus anglies dvideginio laidojimui pagal pirmąją (struktūriną) scenarijų.

Įvertinant vienos ar kitos struktūros perspektyvumą yra atsižvelgiama į keletą parametrų. Anglies dvideginio talpos potencialas gali būti apskaičiuotas pagal formulę (Tanaka et al., 1995):

$$CO_2 = Ef \times A \times h \times \Phi \times Sg/BgCO_2 \times Ef \times A \times h \times \Phi \times (1-Sg) \times RsCO_2;$$

čia Ef – injekcijos efektyvumas (dalis), A – struktūros plotas m<sup>2</sup>, h – efektyvus kolektoariaus storis m, Φ – poringumas (vieneto dalis), Sg – CO<sub>2</sub> prisotinimas (vieneto dalis), BgCO<sub>2</sub> – dujų tūrio plėtimosi veiksnys m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>; RsCO<sub>2</sub> – dujų tirpumas vandenyje m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.



**2 pav.** Lietuvos kambro struktūrų dydžio, porų apimtys (viršuje) ir CO<sub>2</sub> talpos (apačioje) histogramos (116 pakilumų)

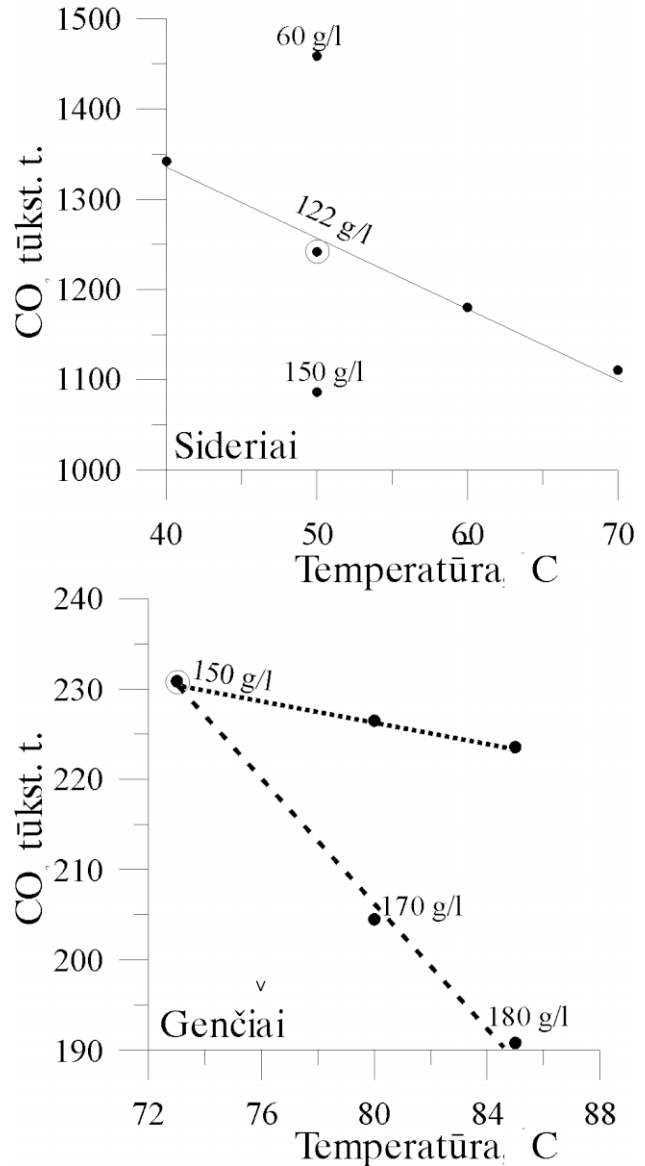
**Fig. 2.** Histograms of volumetrics and pore space (above) and CO<sub>2</sub> capacity (below) of Cambrian structures in Lithuania (116 uplifts)

Svarbus parametras yra struktūros dydis. Lietuvoje pakilumos nėra didelės. Inventorizavus 116 kambro uždaru pakilumų nustatyta, kad daugiau kaip pusė jų neviršija 20 mln. m<sup>3</sup> (2 pav.). Apie 20% įnominė struktūrų tūris yra 20–40 mln. m<sup>3</sup> ir tik nedidelis siekia 40–60 mln. m<sup>3</sup>. Struktūrų gabaritai nėra vienintelis parametras, nulemiantis jos talpą. Svarbus

yra uolienø efektyvus poringumas ir efektyvø sluoksniø storis. Papildomai ávertinus ðiuos parametrus nustatyta, kad 93 struktūrø porø talpa yra mažesnë nei 5 mln. m<sup>3</sup>, 17 struktūrø – 5–10 mln. m<sup>3</sup> ir tik 6 struktūrø – 10–30 mln. m<sup>3</sup>. Pastarosios yra perspektyviausios.

CO<sub>2</sub> talpos potencialas buvo apskaičiuotas panaudojus MidcarbAquifer programà (Kanzaso universitetas). Skaiëiavimai rodo, kad struktūrø talpa yra labai skirtinga. Ji priklauso ne tik nuo jø dydþio ir efektyvaus poringumo, bet ir nuo temperatūros, vandens mineralizacijos, slëgio. Daugumos objektø talpa nevirðija 100 tûkst. tonø (50 mln. m<sup>3</sup>), tad jos nėra perspektyvios CO<sub>2</sub> laidojimui (2 pav.). Keliolikos struktūrø (pvz., Girkaliø, Malûkø, Genëiø, Kretingos) potencialas siekia 150–300 tûkst. tonø (90–150 mln. m<sup>3</sup>) CO<sub>2</sub>. Kita struktūrø grupë (Degliai, P. Ðiùpariai) gali sutalpinti po 400–500 tûkst. tonø (200–250 mln. m<sup>3</sup>) anglies dvideginio. Didþiausios struktūros, kurios talpina per 1000 tûkst. tonø CO<sub>2</sub> (> 500 mln. m<sup>3</sup>), yra Sideriø, P. Salantø. Maksimalia talpa pasiþymi Vaðkø pakiluma, esanti Ðiaurës Lietuvoje, jos talpa virðija 2800 tûkst. tonø anglies dvideginio (daugiau kaip 1,5 mlrd. m<sup>3</sup>). Tiesa, pagal termobarines sàlygas pastarojo objekto potencialas lieka problemiškas. Èia nėra atlikta geoterminio tyrimø. Tik ið bendros regioninës padëties galima spëti, kad kambro kolektoriaus temperatūra yra apie 30°C, tad ji gali bûti kiek per þema, kad palaikytø rezervuare superkritinà buklæ; anglies dvideginis bus skystas, tai yra sunkesnis uþ porinà vandenà, todėl migruos þemyn iðsiverþdamas ið struktūros.

Poþeminio vandens temperatūra ir mineralizacija yra svarbūs CO<sub>2</sub> elgsenai kolektoriuje. Neávedus vandens mineralizacijos pataisos, Vaðkø struktūroje modeliuojamas 29,4 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> dujø tirpumas, tuo tarpu pasirinkant realias porinio vandens cheminës sudëties charakteristikas ði reikðmë sumaþëja daugiau kaip treðdaliu – 19 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Temperatūros poveikis yra mažiau reikðmingas. Vakarø Lietuvoje mineralizacijos pataisa sumaþina struktūrø potencialà vidutiniðkai 75%, o Pietvakariø Lietuvoje – net 85%. Ðio parametrorø jautrumas iliustruojamas Sideriø ir Genëiø struktūrø modeliais (3 pav.). Sideriø pakilumoje vandens mineralizacija yra 122 g/l, CO<sub>2</sub> talpa ávertinta 1,24 mln. tonø. Esant 150 g/l mineralizacijai, struktūros potencialas krenta iki 1,1 mln. tonø (3 pav.), o sumaþëjus vandens mineralizacijai iki 60 g/l, jos galimybës, atvirkðusiai, iðauga iki 1,46 mln. tonø (beveik 20%). Didëjant temperatūrai struktūros potencialas maþëja – pasirinkus 40°C kolektoriaus temperatūrà, saugojimo galimybës iðauga iki 1,35 mln. tonø, o temperatūrai padidëjus iki 70°C, priešingai, jos sumaþëja iki 1,12 mln. tonø. Analogiškos tendencijos nustatytos ir Genëiø tipo struktūroje (3 pav.). Bendras inventorizuotø 116 Lietuvos kambro struktūrø CO<sub>2</sub> talpos potencialas ávertintas 36 mln. t., arba 19 mlrd. m<sup>3</sup>.



3 pav. Sideriø (virðuje) ir Girkaliø (apaëioje) tipo struktūrø CO<sub>2</sub> potencialo priklausomybë nuo porinio vandens temperatūros ir mineralizacijos (Vakarø Lietuva). Apskritimu paþymëtas taðkas rodo ðio telkinio bûdingas sàlygas

Fig. 3. CO<sub>2</sub> sequestration potential depending on formation water temperature and salinity in Sideriai and Genëiai type structures, West Lithuania. Circled dots indicate thermobaric conditions in these structures

Kintant vandeningo horizonto slûgsojimo sàlygoms, keiëiasi ir anglies dvideginio charakteristikos. Ðiai kaitai ávertinti atliktas modeliavimas MidcarbCO2Prop programa (Kanzaso universitetas). Pirmiausiai keiëiasi dujø suspaudimas. Vaðkø ir Sideriø struktūrose jis yra atitinkamai 0,29 ir 0,33, o Vakarø Lietuvoje siekia 0,43–0,50. Gilëjant kolektoriui, didëja dujø klampumas: Vaðkø struktūroje jis prognozuojamas  $2,9 \cdot 10^{-3}$  Pa s, o Degliø struktūroje –  $4,8 \cdot 10^{-3}$  Pa s. Tûris kinta atitinkamai nuo  $2,8 \cdot 10^{-3}$  iki  $3 \cdot 10^{-3}$ .

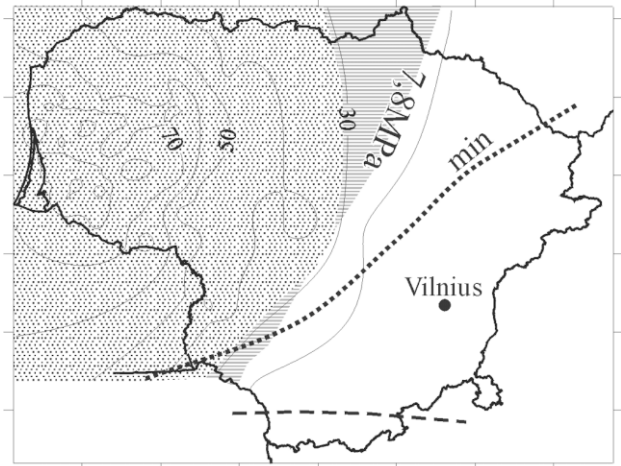
Aukštēiau esanēiuose stambiuose devono kolekto-riuose (Gargždø-Pernø, Upninkø-Đventosios) struktū-riņiø saugyklø tikimybē nedidelē. Sudaryti detalūs Lie-tuvos struktūriniai ģemēlapiai (Lazauskienē, Đliaupa, 2002) rodo, kad viduriniame ir virđutiniame devone praktiđkai nēra uđdarø pakilumø (atviros migracijai ā rytus). Kambro struktūras atkartoja apatinio devono Gargždø serijos sluoksniai, taēiau jø hidrodinaminē izo-iacija dēl lēđiø tipo sluoksnio struktūros yra labai ne-patikima, todēl laidoti dujas intraformaciniuose kolek-toriuose neperspektyvu.

#### Monoklininiai sūrūs vandeningi horizontai

Anglies dvideginis gali bŭti supumpuojamas ā gilius, sūrūs, vandeningus sluoksnius. Skirtingai nuo minē- to laidojimo tipo, kai būtini pakankamai dideli uđda-ros pakilumos gabaritai, ēia svarbiausios yra baseino hidrodinaminēs, temperatūros bei slēgio sālygos, uđ- tikrinanēios stagnacijā (dar palankesnis variantas, kai poĝeminis vanduo juda baseino centrinēs dalies link) ir CO<sub>2</sub> superkritinā būklē. Injektuotas anglies dvide- ginis iđ dalies iđtirpsta poriniame vandenyje. Vakarø Lietuvoje, kambro kolekto-riuje, iđtirpusiø dujø dalis vykdamt injekcijā vertinama 10–20%. Likusi dalis kau- piasi sluoksnio kraige sudarydama garø pliumā. Vei- kiant plūduro efektui, pliumas migruoja baseino pe- riferijos link, be to, dēl to paties efekto jo storis palaipsniui maĝėja. Patekās ā anglies dvideginio ne- prisotintas sritis (tolstant nuo injekcinio grāĝinio), CO<sub>2</sub> toliau tirpsta vandenyje, vyksta difuziniai proce- sai, kol galø gale garø pliumas iđnyksta, o anglies dvideginis iđsisklaido vandeningame horizonte. Pagrin- diai rizikos veiksniai yra pliumo migracijos nuoto- lis baseine (jis turi bŭti maĝesnis uĝ atsidengusā sluoksnā ģemēs pavirđiuje, susijungimā su aukōtesniais vandeningais horizontais, dujinēs būklēs ribā), taip pat vietinēs laidĝios zonos, seni grāĝiniai ir plyđiuo- tos zonos.

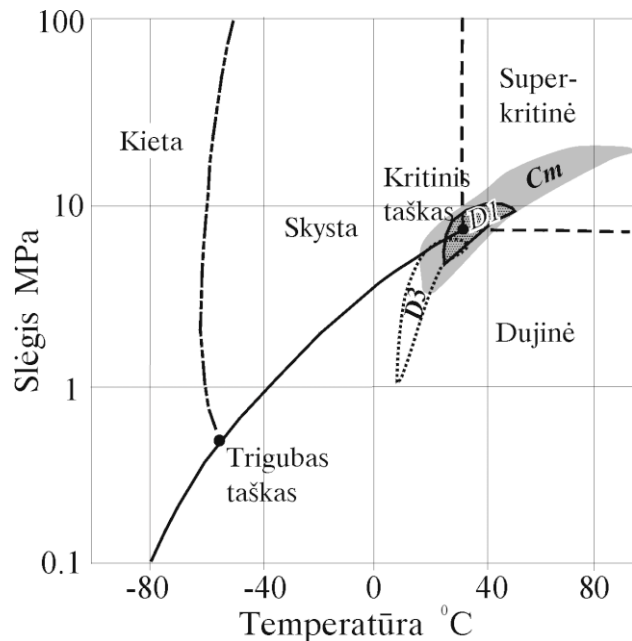
Pagal temperatūros ir slēgio sālygas Lietuvos pjū- vyje yra trys perspektyvūs sūrūs vandeningi horizo-antai – kambro, Gargždø-Pernø (apatinis devonas ir vidurinio devono apaēia) ir Upninkø-Đventosios (vi- durinio devono virđus ir virđutinio devono apaēia). Kiti vandeningi sluoksniai, paplitā Lietuvos nuosēdi- nēs dangos pjūvyje, yra ģemesnēs temperatūros ir slē- gio nei reikalaujama, todēl juose CO<sub>2</sub> laidoti negali- ma.

Pagal termobarines charakteristikas paēios palan- kiausios yra kambro vandeningo horizonto sālygos (4 pav.). Kritinē 32°C izoterma yra Centrinēje Lietuvo- je, ōalies vakaruose temperatūra siekia 70–85°C. Đis aukōtos temperatūros plotas apytiksliai sutampa su didesnio nei 7,8 MPa slēgio sritimi, Vakarø Lietuvo- je jis siekia iki 20 MPa. Tad visa vakarinē Lietuvos pusē điuo aspektu yra perspektyvi – ēia anglies dvi- deginis bus superkritinēs būklēs (5 pav.). Rytinēje Lietuvos pusēje CO<sub>2</sub> yra dujos, tik nedideliame plote jis virs skysēiu (tarp 32°C izotermos ir 7,8 MPa izo-



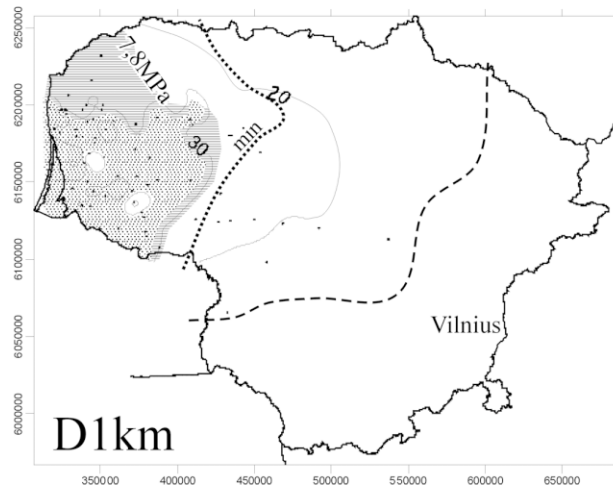
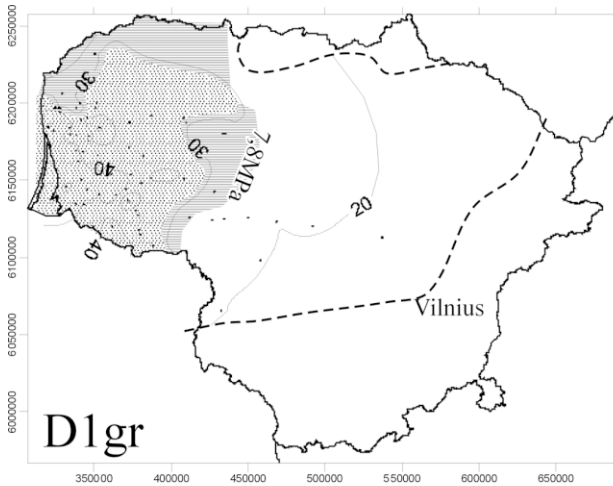
**4 pav.** Kambro kraigo temperatūrø ģemēlapis (izolinijos kas 10°C). Tađkuotas plotas rodo kolekto-rius sālygas esant >32°C, taip pat parodyta kritinē 7,8 MPa slēgio riba. Brŭk- ninē linija ģymi kambro paplitimo ribā, tađkinē – staigiā poĝeminio vandens mineralizacijos kaitā

**Fig. 4.** Temperatures of top of Cambrian reservoir. Dotted area indicates temperatures of Cambrian aquifer exceeding 32 °C, stripped area >7.8 MPa pressure. Hatched line indicates the limit of distribution of Cambrian sediments, dotted line punctuates sharp change of formation water salinity



**5 pav.** CO<sub>2</sub> fazinēs būklēs priklausomybē nuo slēgio ir tem- peratūros (Bachu, 1999) Lietuvos kambro, Gargždø-Pernø ir Upninkø-Đventosios kolekto-riø termobarinēmīs sālygomis

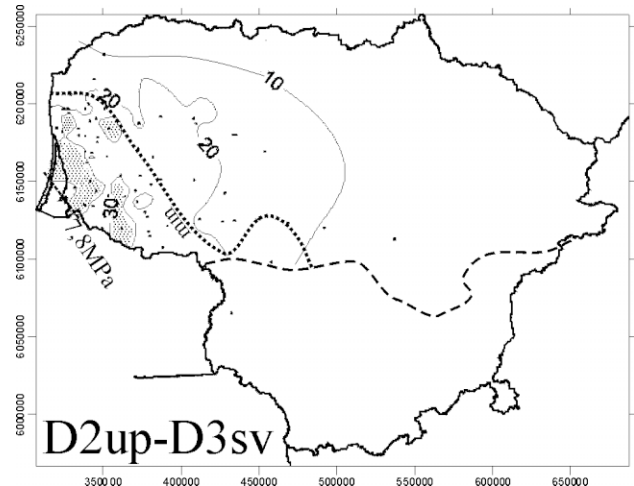
**Fig. 5.** CO<sub>2</sub> equilibrium diagram temperature vs. pressure (after Bachu, 1999). Thermobaric characteristics of the Li- thuanian Cambrian, Gargždai-Pārnø (Lower-Middle Devonian) and Upninkai-Šventoji (Middle-Upper Devonian) aquifers are shown



**6 pav.** Gargždų serijos ir Kemerio regioninio aukšto kraigo temperatūrų žemėlapis. Sutartinius ženklus žr. 4 pav. Tačiau žymi grafinius, panaudotus sudarant žemėlapią **Fig. 6.** Temperatures of top of Gargždai Group and Kemeris Regional Stage. Legend the same as in Fig. 4. Dots indicate wells used for compilation of map

baros; 4 pav.). Kolektořio sudaro vidurinio kambro Deimenos regioninio aukšto smiltainis, Centrinėje Lietuvoje taip pat aptinkamas apatinio kambro smiltainis (Džiaupa et al., 2003). Storis kinta nuo 20–30 iki 60–70 m; smiltainis yra kvarcinės sudėties, smulkiagrūdis.

Gargždų-Pernų vandeningame horizonte CO<sub>2</sub> gali būti laidojamas Vakarų Lietuvoje, kur temperatūra ir slėgis viršija 32°C ir 7,8 MPa (6 pav.). Maksimali temperatūra kraige siekia iki 45°C, slėgis – 9 MPa, kai kuriose vietose (pvz., išilgai nuleisto Telšių lūpio sparno) jis viršija 10 MPa. CO<sub>2</sub> eia bus superkritinės būklės, tuo tarpu Centrinėje ir Rytų Lietuvoje – dujinės konsistencijos (5 pav.). Pereinamojoje zonoje CO<sub>2</sub> yra skystas (6 pav.). Vandeningo horizonto storis siekia iki 350 metrų. Apatinė dalis (Gargždų serija) pasižymi prastomis kolektořinėmis savybėmis, eia daug molio sluoksnių, smiltainiai sudaro nedidelę pjūvio dalį ir vyrauja tik atskiruose plotuose rytinėje



**7 pav.** Upninkų-Šventosios vandeningo horizonto kraigo temperatūrų žemėlapis. Sutartinius ženklus žr. 4 pav. Tačiau žymi grafinius, panaudotus sudarant žemėlapią **Fig. 7.** Temperatures of top of Upninkai-Šventoji aquifer. Legend the same as in Fig. 4. Dots indicate wells used for compilation of map

Lietuvos dalyje. Kemerio ir Pernų sluoksniai pasižymi geromis kolektořinėmis savybėmis, pjūvyje vyrauja silpnai cementuotas smiltainis, kurio poringumas paprastai yra 25–30%.

Trečia perspektyvi formacija yra Upninkų-Šventosios vandeningas horizontas, kurio storis siekia iki 240 metrų. Deja, superkritinės būklės CO<sub>2</sub> tėra tik nedideliame plotelyje Vakarų Lietuvoje (7 pav.). 32°C viršijanti temperatūra išmatuota išilgai pietinio Telšių lūpio sparno, pajūrio zonoje ir pietvakariuose. Tuo tarpu slėgis beveik visur yra mažesnis nei 7,8 MPa, tad pagal šią parametρά Upninkų-Šventosios kolektořius Lietuvos teritorijoje praktiškai netinka CO<sub>2</sub> laidoti, nepaisant labai gerų kolektořinių savybių – pjūvyje vyrauja silpnai sucementuotas smiltainis, jo poringumas yra 22–33%, skvarbumas viršija 1 darsi. CO<sub>2</sub> bus dujų pavidalo (5 pav.).

Kadangi superkritinės būklės anglies dvideginio garai yra lengvesni už vandenį, jie kaupiasi kolektořiaus viršuje ir, esant blogai izoliacijai, gali patekti į aukščiau slūgsančius vandeningus horizontus užterdami geriamąjį vandenį arba prasiveržti į žemės paviršių. Todėl virš kolektořiaus esančių sluoksnių izoliacinės savybės yra svarbus parametras vertinant objekto perspektyvumą. Gerą kambro sluoksnių izoliaciją patvirtina angliavandenilių įvalgybos praktika: Vakarų Lietuvoje, Kaliningrado srityje surastas ne vienas naftos telkinys (Zdanavičiūtė, Sakalauskas, 2001), o Lenkijos delfe yra eksploatuojamos gamtinės dujos (Dompalski et al., 2004). Gerą uždaramą lemia ordoviko molinga karbonatinė stromė, kurios storis Baltijos baseine kinta nuo 40 iki 250 metrų; virš jos slūgso silūro molis. Tiesa, vietomis apatinio paleozojaus stromė kerta tektoniniai lūpiai, išilgai kurių ga-

li vertikaliai pratekėti dujos ir skysčiai, tačiau šis vietinis veiksnys gali būti įvertintas atlikus detalius gręžimo ir geofizinius tyrimus.

Gargždų-Pernų kolektoriaus izoliacija taip pat yra gana patikima, nors charakteristikos gerokai nusileidžia ordoviko-silūro dangai. Ant smėlingo uolienos slūgso 70–160 m storio Narvos regioninio aukšto dolomitinis mergelis su dolomito ir stipriai sukementuoto smiltainio sluoksniais. Gamtinio analogo, kurie patvirtintų šios dangos patikimumą, nėra. Kita vertus, lyginant su apatiniu paleozojumi, čia mažiau pasireiškė lūpinė tektonika.

Upninkų-Đventosios kolektorius izoliuotas prasčiausiai. Virš jo slūgso keliolikos metrų storio Jaros svitos molingos uolienos, aukščiau pereinančios į Suosos-Kupiškio vandeningą horizontą. Tad netgi palankiomis termobarinėmis sąlygomis šis kolektorius vargu ar gali būti naudojamas dėl prastos izoliacijos keliamos didelės rizikos.

Taigi perspektyviais Lietuvoje galima laikyti Vakarų ir Centrinės Lietuvos kambro bei Vakarų Lietuvos Gargždų-Pernų vandeningus sluoksnius. Jų potencialas, lyginant su antiklininėmis gaudyklėmis, yra daug didesnis. Palyginimui apskaičiuotas CO<sub>2</sub> laidojimo potencialas kambro ir apatinio devono kolektoriaus pietinėje Vakarų Lietuvos dalyje hipotetiniame 5 × 5 km ir 10 × 10 km plote. Sąlygos: a) kambre – slėgis 20 MPa, temperatūra 80°C, viršutinio kolektoriaus (Girulių svita – Ablingos svitos viršutinė dalis) storis 25 m, efektyvus storis 8 m, poringumas 7%, vandens mineralizacija 160 g/l, apatinio kolektoriaus (apatinė Ablingos svitos dalis ir Pajūrio svita) – atitinkamai 30 m, 20 m, 13%, 160 g/l; b) apatiniame devone – slėgis 9,5 MPa, temperatūra 35°C, storis 150 m (Gargždų serija traktuojama kaip mažai perspektyvi), efektyvus storis 100 m, poringumas 22%, vandens mineralizacija 55 g/l. Apskaičiuotos CO<sub>2</sub> sutalpinimo reikšmės: a) kambre – 2 mln. tonų, arba 1,1 mlrd. m<sup>3</sup> (5 × 5 km plote), ir 8,2 mln. tonų, arba 4,4 mlrd. m<sup>3</sup> (10 × 10 km plote); b) apatiniame devone – 23 mln. tonų, arba 12 mlrd. m<sup>3</sup> (5 × 5 km plote), ir 90 mln. tonų, arba 47 mlrd. m<sup>3</sup> (10 × 10 km plote). Reikia pažymėti, kad devono uolienos potencialą kiek padidina ir mineralinė sudėtis, kadangi lauko ūpatas gerai reaguoja su anglies dvideginiu sujungdamas jį kolektoriuje. Matome, kad tame pačiame plote apatinio devono potencialas yra beveik dešimt kartų didesnis nei kambro kolektoriaus. Didžiojo teršėjo AB „Mažeikių nafta“ ir AB „Akmenės cementas“ taršos apimtys siekia apie du ir vieną mln. t. CO<sub>2</sub> per metus, taigi apatinio devono sluoksnis galėtų visiškai patenkinti šio objekto pajėgumus.

Svarbus devono pranašumas yra CO<sub>2</sub> garų tankis. Skaičiavimai rodo, kad kambro kolektoriuje Pietvakarių Lietuvoje garų tankis bus 0,57 g/cm<sup>3</sup>, o apatinio devono kolektoriuje – 0,65 g/cm<sup>3</sup>. Pastaroji reikšmė mažiau skiriasi nuo porinio vandens tankumo, todėl plūdimo efektas bus mažesnis, o tai lemia lė-

tesnė garų pliuo migracija baseino periferijos link. Be to, devono sluoksnio polinkio gradientas, lyginant su kambro, yra mažesnis.

### Alternatyvos

CO<sub>2</sub> geologiniam laidojimui perspektyvūs ne tik vandeningi horizontai ir struktūrinės gaudyklės. Kaip alternatyva dažnai nurodomi druskos klodai ir karbonatiniai kolektoriai. Kol kas surastas tik vienas Usėnų druskos kupolas Pietvakarių Lietuvoje, kuris yra nedidelis, todėl nelaikomas perspektyviu. Anksčiau prognozuoti druskos kupolai kitose Pietvakarių Lietuvos vietose, peržiūrėjus geofizinių tyrimų gręžiniuose medžiagą, nepasitvirtino. Pagal termobarines charakteristikas yra tinkami ordoviko ir silūro karbonatai, tačiau jų kolektorinės savybės labai prastos (Jacyna ir kt., 2004), todėl jie nėra analizuojami kaip perspektyvūs. Viršutinio ordoviko detritinių klėčių geometrija labai sudėtinga, tad kol kas sunku spręsti apie jų panaudojimą.

### IŠVADOS

Lietuvoje CO<sub>2</sub> geologiniam laidojimui perspektyviausias ir didžiausią potencialą turi monoklininis sūrus vandeningas horizontas. Pagal slėgio ir temperatūros sąlygas perspektyvūs du kolektoriai – vidurinio kambro bei devono Gargždų-Pernų; čia anglies dvideginis vakarinėje Lietuvos dalyje yra superkritinės būklės ir geriausiai tinka giluminiam laidojimui. Upninkų-Đventosios horizontas, nepaisant labai gerų kolektorinių savybių, praktiškai neperspektyvus dėl ribinio temperatūros ir slėgio sąlygų. Didžiausias perspektyvus plotas išskiriamas kambro uolienose (Vakarų ir Centrinė Lietuva), o Gargždų-Pernų vandeningos uolienos yra perspektyvios tik pačioje vakarinėje mūsų šalies dalyje. Pagal dangos kokybę pirmauja abu pirmieji kompleksai, ypač kambro, tuo tarpu Upninkų-Đventosios smėla dengia mažai patikima Jaros molinga svita. Atsižvelgiant į neišvengiamą anglies dvideginio pliuo migraciją baseino pakraščio link, didžiausiu saugumu pasižymi kambro kolektorius, tačiau pagal talpumą apatinio devono kolektorius gerokai jį lenkia – objekto pajėgumo santykis yra apie 1:10. Šis būdas pranašesnis už antiklininio tipo saugyklas (neminint skirtingo apimčių) dėl mažos priklausomybės nuo vietinių geologinių sąlygų – praktiškai bet kokia anonė, išmetanti anglies dvideginį gali čia pat laidoti dujas po ja esančiame kolektoriuje, tad transporto išlaidos minimalios. Be hidrodinaminio laidojimo, apatinio devono kolektoriuje tam tikrą naudą teikia ir anglies dvideginio sujungimas į mineralą. Apatinio devono sluoksnyje prognozuojamas mažesnis CO<sub>2</sub> pliuo migracijos greitis.

Antiklininio (struktūrinio) tipo laidojimo potencialas labai ribotas ir vargu ar gali būti traktuojamas kaip perspektyvus. Inventurizuotų 116 struktūrų bendras CO<sub>2</sub> laidojimo potencialas Lietuvoje yra 36 mln. t., arba 19 mlrd. m<sup>3</sup>. Lyginant su CO<sub>2</sub> išme-



timu á atmosferà – 16,7 mln. t. per metus – tai labai maþi skaièiai. Didþiausios struktûros kambro kolektoriuje gali sutalpinti per milijonà tonø CO<sub>2</sub> (500 mln. m<sup>3</sup>), taèiau tokioj tãra keletas. Pati stambiausia Vãdkø struktûra gali saugoti 2,8 mln. t., taèiau slãgio ir temperatûros santykis nãra gerai þinomas, tad struktûros perspektyvos dar diskutuotinos. Vidutinãs klasãs struktûrø, kuriose galima sutalpinti po 400–500 tûkst. tonø (200–250 mln. m<sup>3</sup>) dujø, yra kelios deðimtys, jos ðapniausiai susijusios su þinomais naftos telkiniais. Pastarieji yra perspektyvûs CO<sub>2</sub> geologiniam laidojimui, kadangi siûlo dvigubà naudà: sumaþinamas anglies dvideginio iðmetimas á atmosferà ir gerokai padidinamas naftos iðgavimas – vadinamoji treèioji naftos gavybos intensifikacija (EOR) (Crawford et al., 1963). Didþiausia grupã sudaro smulkios, neperspektyvios struktûrëlës (< 100 tûkst. tonø).

Alternatyvios formacijos, pvz., permø akmens druska ir apatinio paleozojaus karbonatai, nãra perspektyvios. Pirmoji yra per maþa ir neturi tinkamø termobariniø sãlygø, o karbonatai yra labai prasti kolektoriai.

## PADEKA

Sauliaus ir Rasos Ðliaupø darbà tema „CO<sub>2</sub> geologinio laidojimo galimybãs Lietuvoje“ parãmã Lietuvos mokslo ir studijø fondas. Autoriai dãkoja G. Motuzai ir D. Michelevièiui uþ kritines pastabas ir diskusijas.

## Literatûra

- Audus H. 1996. Greenhouse gas mitigation technology: An overview of the CO<sub>2</sub> capture and sequestration studies and further activities of the IEA Greenhouse Gas R & D Programme. *Energy*. **2**. 217–221.
- Bachu S. 2000. Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change. *Energy Convers. Manage.* **41**(9). 953–970.
- Bachu S., Gunter W. D., Perkins E. H. 1994. Aquifer disposal of CO<sub>2</sub>: hydrodynamic and mineral trapping. *Energy Convers. Mgmt.* **35**. 269–79.
- Biggs S. D. 2002. Sequestering Carbon from Power Plants: The Jury is Still Out. Submitted to the Technology and Policy Program in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Technology and Policy. 66 p.
- Bryant E. 1997. Climate process and change. Cambridge, UK. Cambridge University Press. 209 p.
- Crawford H. R., Neill G. H., Bucy B. J., Crawford P. B. 1963. Carbon dioxide – a multipurpose additive for effective well stimulation. *Journal of Petroleum Technology*. **237**. 52–64.
- Domþalski J., Górecki W., Mazurek A., Mytko A., Strzeteski W., Szamalek K. 2004. The prospects for petroleum exploration in the eastern sector of Southern Baltic as relevant by sea bottom geochemical survey correlated with seismic data. *Przeglãd Geologiczny*. **52**(8/2). 792–799.
- Gale J. 2001. Geological Storage of CO<sub>2</sub> – Safety Aspects Related to Transmission of CO<sub>2</sub>. *IEA Greenhouse Gas R & D Programme*. **11**. 125 p.
- Herzog H., Drake E., Adams E. 1997. CO<sub>2</sub> Capture, Reuse, and Storage Technologies for Mitigating Global Climate Change. *A White Paper. Final Report DOE*. Order No. DE-AF22-96PC01257.
- Herzog H. J. 2001. What future for carbon capture and sequestration. *Environmental Science and Technology*. **35**. 148–153.
- Kaszuba J., Janecky D. R., Snow M. G. 2003. Carbon dioxide reaction processes in a model brine aquifer at 200°C and 200bars: Implications for geologic sequestration of carbon. *Applied Geochemistry*. **18**. 1065–1080.
- Law DH-S, Bachu S. 1996. Hydrogeological and numerical analysis of CO<sub>2</sub> disposal in deep aquifers in the Alberta sedimentary basin. *Energy Conversion and Management*. **37**. 1167–1174.
- Lazauskienã J., Ðliaupa S. 2002. Lietuvos prekartero stratonø struktûriniai þemëlapiai – þingsnis link Lietuvos þemës gelmiø erdvinio modelio. *Lietuvos geologijos tarnybos 2001 metø veiklos rezultatai*. 56–57.
- Jacyna J., Zdanavièiûtë O., Vikðraitienã J., Monkevièius A. 2004. Vidurio Lietuvos silûro rifogeniniai dariniai ir naftos telkiniø aptikimo perspektyvos. *Geologija*. **48**. 29–37.
- Magara K. 1976. Water expulsion from clastic sediments during compaction – directions and volumes. *Am Ass Petr Geol Bull.* **60**. 543–53.
- Pashin J. C., McIntyre M. R. 2003. Temperature–pressure conditions in coalbed methane reservoirs of the Black Warrior basin: implications for carbon sequestration and enhanced coalbed methane recovery. *International Journal of Coal Geology*. **54**. 167–183.
- Piske J., Bleschert K.-H., Klafki M. J. A., Kugelevicius J. A., Paliukas R., Satkunas J., Sliupa S. 2004. Underground Gas Storage Opportunities in Lithuania. *AAPG Meeting Abstracts*. Prague.
- Ðliaupa S. 2002. Lietuvos geoterminiø duomenø sistema. *Lietuvos geologijos tarnybos 2001 metø veiklos rezultatai*. 51–53.
- Ðliaupa S., Hoth P., Shoegenova A., Huenges E., Rasteniene V., Freimanis A., Bitiukova L., Joeleht A., Kirsimae K., Laskova L., Zabele A. 2003. Characterization of Cambrian reservoir rocks and their fluids in the Baltic States (CAMBALTICA). (ed. W. Bujakowski) *Cleaner Energy Systems Through Utilization of Renewable Geothermal Energy Resources*. “Kajc”. Krakow. 61–73.
- Zdanavièiûtë O., Sakalauskas K. (eds.), 2001. Petroleum geology of Lithuania and southeastern Baltic. Vilnius, Geological Institute. 204 p.

**Saulius Ðliaupa, Jonas Satkûnas, Rasa Ðliaupienã**

## PROSPECTS OF GEOLOGICAL CO<sub>2</sub> SEQUESTRATION IN LITHUANIA

### Summary

Carbon dioxide is one of the most urgent global-scale ecological problems. Huge amounts of the gas emitted to at-

mosphere since the nineteenth century lead to a progressing climate warming. The annual emission of CO<sub>2</sub> in Lithuania is 16.7 mln. tonnes. Different possibilities of CO<sub>2</sub> elimination are considered, the geological sequestration of CO<sub>2</sub> being one of the most promising ways.

The potential of the Lithuanian geological formations is discussed. Two sequestration scenarios are discussed: (a) saline Cambrian aquifers in anticlinal structures including depleted oil fields, and (b) monoclinical saline aquifers. Two monoclinical saline aquifers have suitable thermal (>32 °C) and pressure (>7.8 MPa) conditions where carbon dioxide is sequestered in the supercritical state. The prospective area of the Cambrian occupies Central and West Lithuania, it is represented by up to 70 m thick quartz sandstones with subordinate shales. The prospects of the Lower Devonian terrigenous deposits up to 350 m thick are related to West Lithuania. The sealing of the Cambrian is very good, while the caprocks overlying the Lower Devonian reservoir are considered as suitable. Due to better reservoir properties, larger thickness, lower temperature and water salinity the potential of the Lower Devonian aquifer is by an order higher than that of the Cambrian aquifer. The updip migration of the CO<sub>2</sub> plume at the top of the aquifer will be of the lower velocity in the Lower Devonian aquifer owing to a higher vapour density and a lower angle of the layer dip. Also, some mineral sequestration effect is expected in the Lower Devonian related to a high percentage of feldspar, whereas the Cambrian is composed of quartz arenites.

Of all potential aquifers, only the Cambrian shows favourable structural conditions for CO<sub>2</sub> sequestration in anticlinal structures. Inventory of 116 local uplifts was carried out. The volumetric characteristics of each structure (area, thickness, net-to-gross, porosity) were defined. The amount of sequestered CO<sub>2</sub> was modelled, incorporating the temperature, pressure, salinity of the pore water. The total capa-

city of all analysed structures is 36 mln. tonnes of CO<sub>2</sub>. The largest structures can accommodate >1 mln. tonnes of CO<sub>2</sub>. However, there are only several structures that large. More numerous are structures that can host 400–500 thousand tonnes of gas; most of them are related to known oil fields. Utilisation of CO<sub>2</sub> for enhanced oil recovery is viewed as a prospective way of CO<sub>2</sub> sequestration in West Lithuania.

Naöëþñ Øëÿoià, Éííañ Nàöëóí añ, Ðañà Øëÿoiáí à  
Í ÁÐÑÍ ÁËÒËÁÓ ÁÁÍ ËÍ ÁË×ÁÑËÍ ÁÍ  
ÇÁÓÍ ÐÍ Í ÁÍ ËΒ ÓÁËÁËËÑËÍ ÁÍ ÁΑÇΑ Α  
ËËÒÁÁ

Ðàçþì à  
Áúáðíñú óäëäëñëíáí äàçà à àòì íñòáðó  
í ðáññòáäëÿþò ñí áí é í äëääæí äëóóþ ÿëí ëí äë+añëóþ  
í ðí äëáì ó. Á Ëëòáá í í è ñí ñòáäëÿþò 16,7 í ëí. ò äëä-  
áí áí í. Í áí èí èç áí çì í áí úò í óðáé í í óí áí úò áí èþ  
ÿoi é í ðí äëáí ú ÿäëÿáñÿ çáóí ðí í áí é á NÍ<sub>2</sub> á  
ääí ëí äë+añëó ñëí ÿò. Ðáññí áððëääëñú ááá ñóáí áðëÿ  
çáóí ðí í áí é é: 1) á í í í í ëëëí äëúí í í ñí ë, í í í  
áí áí í í í í í áí ðëçí í ðà è 2) á ëí äëäëúí úò  
é áí áðëéñëéò í í áí ÿòëÿò. Áí ëüøëí í í ðáí óëäëí í  
í äëääááò í áðáúé ñóáí áðëé. Á Ëëòáá áúÿäëáí ú ááá  
í áðñí äëðëáí úò í áñ+áí úò ñí ë, í úò áí áí í í í úò  
áí ðëçí í ðà - é áí áðëéñëéä è í éæí éääáí í çëé  
í áñ+áí éëè. Í ó áðí poi ó çöéí áþëþ í óáí áí í í ðáí óëäé  
116 ñòðóëòóð. Ëò í áúéé í í ðáí óëäé ñí ñòáäëÿð 36  
í ëí. ò NÍ<sub>2</sub>. Í í ðáçí áðó (í í ðáí óëäéó çáóí ðí í áí éÿ  
NÍ<sub>2</sub>) ñòðóëòóðú ðáçáäëáí ú í á òððë áðóí í ú: 1) 1–3  
í ëí. ò; 2) 400–500 òúñ. ò; 3) <100 òúñ. ò.  
Í áðñí äëðëáí úí è ÿäëÿþòñÿ ñòðóëòóðú áòí ðí é  
áðóí í ú, í í ñëí ëüéó í í í äëä èç í èò ñí ááðäëò í á çòú  
è á ñëó+áá çáóí ðí í áí éÿ NÍ<sub>2</sub> í í äëò áúòú èçáëä+áí á  
ääí éí äÿ í í ëüçà.