

2015 m. Saulius Lozovskis, apgynęs geologijos krypties magistrinį darbą, kurio vadovas buvo prof. habil. dr. Valentinas Baltrūnas, Vilniaus universitete įstojo į geologijos krypties mokslų doktorantūros studijas. Disertacijos tema „Vakarų Lietuvos apatinio silūro molingų uolienu petrografinė sudėtis ir petrofizinės savybės – dujų skalūnų perspektyvų geologinis vertinimas“. Jo mokslinis vadovas prof. habil. dr. Saulius Šliaupa.

Saulius Lozovskis, Vilniaus universitetas
Saulius Šliaupa, Gamtos tyrimų centras
Jurga Lazauskienė, Vilniaus universitetas
Rasa Šliaupienė, Gamtos tyrimų centras

LIETUVOS APATINIO SILŪRO DUJŲ SKALŪNŲ PERSPEKTYVOS – GEOLOGINIS VERTINIMAS



Anotacija

Lozovskis S., Šliaupa S., Lazauskienė J., Šliaupienė R. Lietuvos apatinio silūro dujų skalūnų perspektyvos – geologinis vertinimas // *Geologijos akiračiai*. ISSN 1939-0006. 2020, nr. 3–4, p. 25–36.

Netradicinių gamtinių dujų išgavimo perspektyvos Lietuvoje daugiausia siejamos su apatinio silūro molio skalūnais. Vakarų Lietuvoje jie slūgso giliausiai, čia termiškai brandžiausios uolienos. Straipsnyje aptariamos Lietuvos vakarinės dalies apatinio silūro uolienu petrofizinės charakteristikos, svarbios sprendžiant dėl šių molio skalūnų geologinių perspektyvų. Taikyti tiek laboratoriniai kerno mėginių tyrimai, tiek ir geofizinių tyrimų gręžiniuose duomenų interpretacija.

Abstract

Lozovskis S., Šliaupa S., Lazauskienė J., Šliaupienė R. Prospects of the Lower Silurian gas shales of Lithuania – geological assessment // *Geologijos akiračiai*. ISSN 1939-0006. 2020, no. 3–4, pp. 25–36.

The Lower Silurian shales of west Lithuania are considered as a prospective formation for unconventional gas production. They occur at maximum depths (1.5–2 km) in west Lithuania and are characterised by high thermal maturity of organic matter. The paper presents an overview of the petrophysical properties of shales. Laboratory and geophysical well logging data were applied to characterise the shales.

Raktiniai žodžiai: apatinis silūras, molio skalūnas, gamtinės dujos, petrofizinės ir mechaninės savybės, organinė medžiaga.

Keywords: Lower Silurian, shales, natural gas, petrophysical and mechanical properties, organic matter.

Received 27 August 2020, accepted 30 October 2020

Saulius Lozovskis. Vilniaus universitetas. M. K. Čiurlionio g. 21/27, LT-03101 Vilnius, Lithuania, e-mail: saulius.lozovskis@gf.vu.lt. Saulius Šliaupa. Gamtos tyrimų centras. Akademijos g. 2, LT-08412 Vilnius, Lithuania, e-mail: saulius.sliaupa@gamtc.lt. Jurga Lazauskienė. Vilniaus universitetas. M. K. Čiurlionio g. 21/27, LT-03101 Vilnius, Lithuania, e-mail: jurga.lazauskiene@lgt.lt. Rasa Šliaupienė. Gamtos tyrimų centras. Akademijos g. 2, LT-08412 Vilnius, Lithuania, e-mail: rasa.sliaupiene@gamtc.lt.

IVADAS

Dujų eksploatacijos kriterijus atitinkantis molio skalūnai paplitę daugelyje Europos šalių. Lengviau išvardyti valstybes, kur jie nebuvo klasifikuoti kaip perspektyvios geologinės formacijos. Tai Čekija, Balkanų pusiasalio šalys, Šveicarija, Suomija, Norvegija, Baltarusija, Latvija, Estija. Tai susiję su specifinėmis geologinėmis kiekvieno regiono sąlygomis. Molio skalūnų amžius kinta nuo kambro (pvz., pietų Švedijoje, vidurio Lenkijoje) iki paleogeno (pvz., eoceno Ebro baseinas Ispanijoje, oligoceno baseinas Vengrijoje) ir neogeno (pvz., Transilvanijos baseinas Rumunijoje, smulkios riftinės įdubos Vengrijoje, Austrijoje, Slovėnijoje, Kroatijoje) (Resource..., 2017). Labiausiai Europoje paplitę karbono amžiaus molio skalūnai, papildyti organine medžiaga. Taip pat gausūs sedimentaciniai baseinai, kuriuose labai giliai randama molio skalūnų, susiformavusių silūro ir jūros laikotarpiais. Kito amžiaus dariniai yra gerokai retesni ir smulkesni.

Silūro molio skalūnų, perspektyvių dujų eksploatacijos požiūriu, aptikta ne vienoje Europos šalyje. Didžiausi išteklių Baltijos sedimentaciniame baseine ir piečiau esančiame Polesės-Liublino baseine pietrytinėje Lenkijos dalyje ir Ukrainos vakariniame pakraštyje. Taip pat tam tikros viltys siejamos su silūro molio skalūnais Ispanijoje (Kantabrijos masyve), viršutinio silūro molingomis uolienomis Rumunijoje (Moseno platforma) (Resource..., 2017). Apatinio silūro molio skalūnai, kuriuose gausu organinės medžiagos, plačiai paplitę Šiaurės Afrikoje, Arabijos pusiasalyje, Kinijoje. Visi šie baseinai atspindi ankstyviausio silūro staigų atšilimą po hirnantičio (vėlyvojo ordoviko) apledėjimo, tai lėmė vandenyno srovių esminį persitvarkymą ir organinės medžiagos kaupimąsi žemynų šlaitų nuosėdose (Moreau, 2011).

Apatinio paleozojaus storumė yra patvirtinta angliavandenilių sistema Baltijos sedimentaciniame baseine (Zdanavičiūtė,

Sakalauska, 2001). Įdomu pažymėti, kad daugelyje giluminio geologinio kartografavimo gręžinių pietryčių Lietuvoje aptinkama naftos migracijos pėdsakų ordoviko klintyse (tarp jų ir istoriniame Vilniaus-1 gręžinyje). Tad apatinio paleozojaus uolienos tiesiogine prasme „persunktos“ naftos migracijos pėdsakų Lietuvoje. Ilgamečiai organinės medžiagos tyrimai leidžia identifikuoti naftos šaltinius – tai Baltijos sedimentacinio baseino pačio vakarinio pakraščio viršutinio kambro–apatinio ordoviko (tremadokio) alūniniai skalūnai (Zdanavičiūtė, Lazauskienė, 2009). Lietuvos teritorijoje organinės medžiagos dalis apatinio ir vidurinio kambro argilituose neviršija 1 proc. Ordoviko storumėje išsiskiria du molingi kelių metrų storio sluoksniai, kuriuose gausu organinės medžiagos. Jie priskiriami Moseno (Oandų regioninis aukštas) ir Fjakos (Rakverės regioninis aukštas) sluoksniams. Perspektyviausia yra apatinio silūro molinga storumė vakarų Lietuvoje. Jos storis apie 120–200 metrų, organinės medžiagos kiekis molingose uolienose kinta nuo daugiau kaip 2 proc. iki 22 proc. (Zdanavičiūtė, Lazauskienė, 2009; Šliaupa et al., 2016). Tai svarbiausi parametrai sprendžiant dėl molio skalūnų eksploatacijos potencialo.

Straipsnyje aptariamos iki šiol mažai tirtos apatinio silūro molingų uolienų petrofizinės ir mechaninės charakteristikos, svarbios sprendžiant dėl jų tinkamumo skalūnų dujų paieškai. Neretai kyla painiava apibūdinant silūro molingas nuogulas – argilitas, molis, molio skalūnas. Litologiniu požiūriu tinkamiausias argilito terminas. Skalūnas – tai gamybinio pobūdžio uolienos apibūdinimas (pvz., Estijos degieji skalūnai, kurių sudėtis labai įvairi – nuo molių iki klinčių).

TYRIMŲ METODAI IR MEDŽIAGA

Sprendžiant dėl molio skalūnų perspektyvų labai svarbus parametras yra organinės medžiagos kiekis. Laboratorijoje nustatomas bendras organinės medžiagos

kiekis, bet dažniausiai – bendras organinės anglies kiekis. Nuo to, kokia yra organinės medžiagos dalis uolienoje, priklauso, ar molio skalūnas klasifikuojamas kaip potenciali naudinga uoliena, ar ne.

Tiriant organinės medžiagos sudėties charakteristikas taikyta *Rock-Eval* pirolizės metodika, naudojant MX7304AM masių spektrometrą (Ukraina). Nustatyti būdingi organinės medžiagos rodikliai, kurie atskleidžia jos kiekį uolienoje, terminį brandumą ir kt.

Apatinio silūro skalūnų uolienu stiprumo parametrai nustatyti remiantis Lietuvos geologijos tarnybos laboratorijoje atliktų bandymų rezultatų interpretacija. Išmatuotas vienašis gniuždomasis ir tempiamasis stipris. Norint tiksliau įvertinti eksploatacines molio skalūnų savybes atlikti uolienu katijonų mainų gebos (angl. trumpinys CEC), uolienu atsparumo erozijai bei jų brinklumo (angl. trumpinys CST) tyrimai, bendradarbiaujant su „Core Laboratories“ (<https://www.corelab.com>) ir „Weatherford Laboratories“ (<https://www.weatherford.com>). Kitos petrofizinės charakteristikos susistemintos remiantis ankstesnių laboratorinių tyrimų rezultatais ir geofizinių tyrimų gręžiniuose duomenimis, saugomais Lietuvos geologijos tarnybos (LGT) geologijos fonde. Petrografiniam molio skalūnų apibūdinimui naudotas Gamtos tyrimų centre esantis skenuojantis elektroninis mikroskopas (angl. trumpinys SEM) su energijos dispersijos spektrometru (angl. trumpinys EDS). Pastaruoju operatyviai nustatoma mineralų cheminė sudėtis, tai leidžia patikslinti mineralus (pvz., geležies arba magnio chloritas). Šie tyrimai derinti su rentgeno spindulių difrakcijos (angl. trumpinys XRD) analizėmis, jos buvo atliktos „Core Laboratories“ (<https://www.corelab.com>) bei Fizinių ir technologijos mokslų centro laboratorijoje Vilniuje.

Tirti mėginiai imti iš gilių naftos paieškos ir eksploatacijos gręžinių, kurie atskiruose intervaluose gręžti su kernu. Iš viso tirti 58 gręžiniai. Atlikti 17 mėginių iš 14

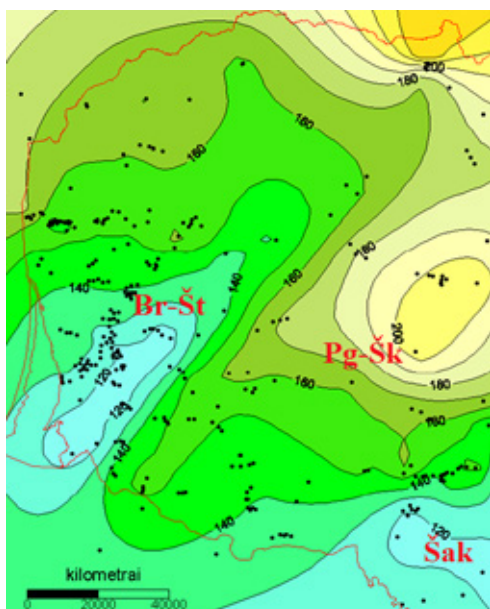
gręžinių *Rock-Eval* pirolizės tyrimai. XRD analizė atlikta 73 mėginiuose, paimtuose iš 16 gręžinių. Katijonų mainų gebos (CEC), uolienu atsparumo erozijai bei jų brinklumo (CST) tyrimai vykdyti tiriant 72 mėginius iš 8 gręžinių. Geofizinių tyrimų gręžiniuose diagramos (gama, varžų ir akustinės) tirtos iš 20 gręžinių. Kitos petrofizinės savybės (pvz., poringumas) nustatytos remiantis gręžinių ataskaitomis, saugomomis LGT geologijos fonde. Iš naftos žvalgybos ataskaitų surinkti 258 ankstyvojo ir vėlyvojo silūro molių uolienu poringumo matavimų, atliktų tiriant 46 gręžinius, duomenys.

BENDRA APATINIO SILŪRO CHARAKTERISTIKA

Silūro nuosėdinės uolienos paplitusios visoje Lietuvos teritorijoje, išskyrus pačią pietrytinę dalį, kur jos buvo nudenuotos karbono ir ankstyvojo permo metu kylant Baltarusijos–Mozūrijos anteklizei. Silūro uolienu storis kinta nuo 200 m rytuose iki 850 m pačioje vakarinėje dalyje (Paškevičius, 1994). Apatinio silūro nuogulų storiai Lietuvoje mažai kaitūs, tai siejama su „badavimo“ režimu sedimentacijos metu (Lazauskienė et al., 2003).

Apatinio silūro litologinis kompleksas labai kaitus ir priklauso nuo sedimentacijos sąlygų. Tuo laikotarpiu vakarinis Baltikos kontinento pakraštys buvo spaudžiamas žemyn užslenkančios Rytų Avalonijos mikroplokštės, sandūroje susidarė vėliau (devono metu) eroduoti kalnai (Lazauskienė et al., 2003). Vakarų Lietuvoje susiklostė moliingas dumblas, kuriame gausu organinės medžiagos. Šią gausą jūros dugne paaiškina iš esmės pasikeitusios globalios vandenynų srovės ištirpus Šiaurės Afrikos–Amazonės (dažnai vadinamo Sacharos) hirnantčio ledynui. Vidurio Lietuvoje susiklostė seklesni ir karbonatingesni moliai. Rytuose formavosi sekliavandenės nuogulos.

Vakarinėje Lietuvos dalyje nustatyta dėsninga subregioninio mastelio storių kaita,



1 pav. Apatinio silūro storių žemėlapis. Struktūros: Br-Št – Barzdėnų-Šatrijos pakiluma, Pg-Šk – Pagėgių-Šaukėnų įlankis, Šak – Šakių pakiluma

Fig. 1. Isopach map of the Lower Silurian succession of the western part of Lithuania. Structures: Br-Št – Barzdėnai-Šatrija uplift, Pg-Šk – Pagėgiai-Šaukėnai depression, Šak – Šakiai uplift

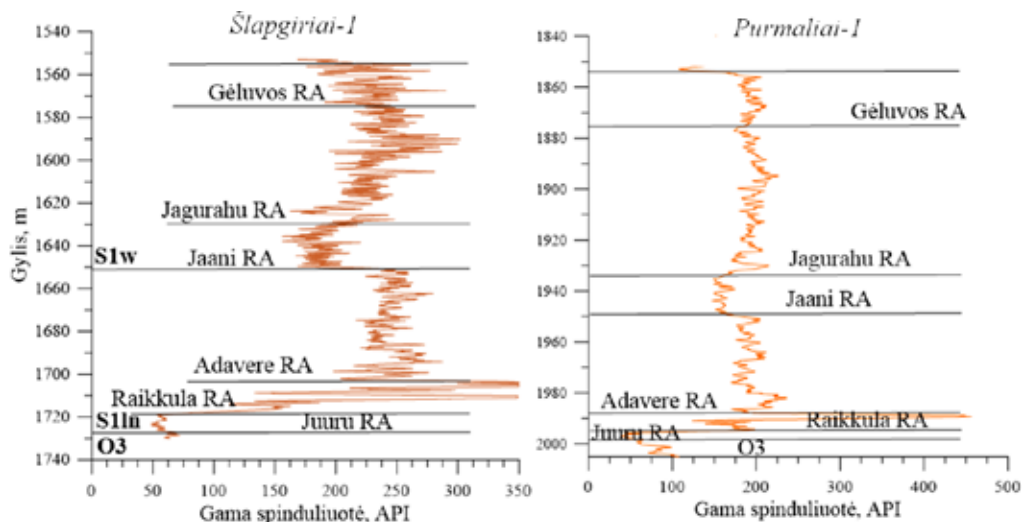
kuri veikiausiai atspindi tuometinius mažos amplitudės vertikalius Žemės plutos judesius (1 pav.). Išskiriama Barzdėnų-Šatrijos

(pagal atraminių grėžinių pavadinimus) pakiluma ir Pagėgių-Šaukėnų įlankis. Struktūros orientuotos ŠR-PV kryptimi.

Tyrimams labai praverčia grėžinių geofizinės diafragijos kreivių interpretacija, nors ji gali būti ir ne visai tiksliai išskiriant stratigrafinius padalinius. Gamybinio požiūriu toks skirstymas pateisinamas, kadangi išskirti stratigrafiniai vienetai atitinka litologiškai koreliuojamus skirtingus geologinius sluoksnius, kurie yra eksploatacinio vertinimo tikslas (2 pav.).

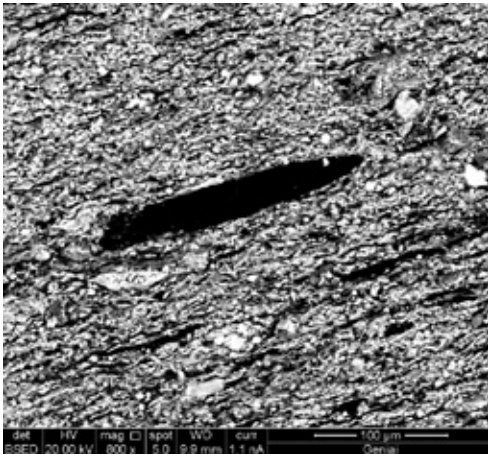
ORGANINĖS MEDŽIAGOS CHARAKTERISTIKA

Organinės medžiagos charakteristikos yra lemiamos sprendžiant dėl molio skalūnų perspektyvumo. Svarbu organinės medžiagos terminis brandumas, tipas, jos kiekis uolienoje. Iki pastarųjų metų tiriant silūro molingas uolienas pagrindinis dėmesys buvo skiriamas organinės medžiagos apibūdinimui uolienų mėginiuose (Zdanavičiūtė, Lazauskienė, 2009; Šliaupa et al., 2016). Petrografiniai organinės medžiagos tyrimai parodė, kad ją sudaro įvairios prigimties termiškai paveiktos organinės liekanos – fitoplanktono, zooplanktono,



2 pav. Apatinio silūro gama diafragija; Šlapgirio-1 grėžinys (Kelmės rajonas) ir Puraliai-1 (prie Klaipėdos). Trumpinys RA – regioninis aukštas

Fig. 2. Gamma-ray log of the Lower Saurian section, well Šlapgiriai-1 (Kelmė district) and well Puraliai-1 (close to Klaipėda)



3 pav. Skenuojančio elektroninio mikroskopo mikrofotografija; landoverio molio skalūnas, Genių-1 gręžinys, gyl. 1 756,2 m (pietinė vakarų Lietuva). Organinė medžiaga (juoda) kaupiasi ant sluoksniavimosi paviršių. Pažymėtinas molio sluoksniuotumas dėl uolienos sutankėjimo, kuris apsprendžia jos skalumą. Vietomis matomi karbonatiniai (kalcitas) lešiai, taip pat mažai apzulinatas aleuritinis detritas

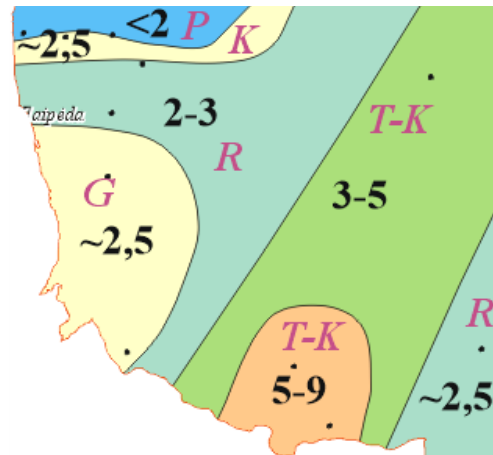
Fig. 3. SEM micrograph of the Lower Silurian shale, well Geniai-1 (South of West Lithuania, depth 1759,2 m). Organic matter is accumulated on bedding surfaces. Clay minerals are horizontally oriented owing to burial compaction. Some small accumulations of peletal calcite are present, as well as abundant little rounded silty detrital grains

bakterijų (Zdanavičiūtė, Swadovska, 2002). Organinės liekanos kaupėsi ant sluoksniavimosi paviršių (3 pav.).

Iki šiol pagrindinės žinios apie organinės medžiagos kiekį (arba bendrą organinės anglies kiekį) rėmėsi išskirtinai gręžinių kerno analize. Deja, vakarinėje Lietuvos dalyje gilūs gręžiniai buvo gręžiami išimtinai (su retomis išimtimis) naftos paieškų tikslais, todėl kambro naftingus smiltainius dengiančios nuosėdinės uolienos gręžtos be kerno – šitaip taupytos gręžti skirtos lėšos. Tik apatinio silūro pade esančios apatinio landoverio mikritinės klintys specialistų buvo vertinamos kaip perspektyvus naftingas plyšinis kolektorius. Todėl šis sluoksnis ir aukščiau slūgsantis Raikiulus (*Raikkūla*) organinės medžiagos gausus molis taip pat buvo gręžiami su kerno pakėlimu. Tačiau šio molingo sluoksnio storis retai viršija 10 metrų. Taigi didžioji dalis apatinio silū-

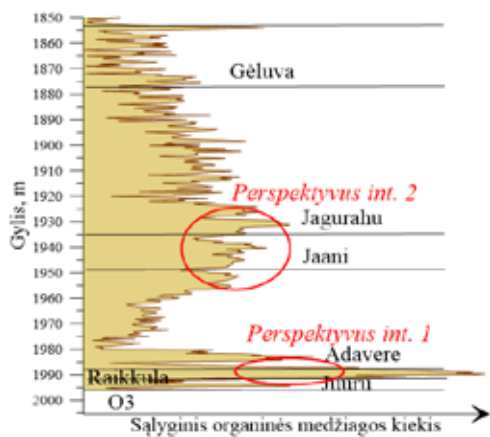
ro pjūvio liko netirta. Kompensuojant šį trūkumą pasitelkti geofizinės diagrafijos gręžiniuose duomenys, konkrečiai – gama spinduliuotės diagrafija (Šliaupa et al., 2016; 2020). Nustatyta glaudi tiesioginė koreliacija tarp organinės medžiagos kiekio ir gama spinduliuotės intensyvumo. Maksimalios organinės medžiagos kiekio reikšmės apskaičiuotos rytinės vakarų Lietuvos dalies gręžiniuose (4 pav.). Tokių netolygų (ir iš pirmo žvilgsnio prieštarą) organinės medžiagos teritorinį pasiskirstymą geriausiai paaiškina gilaus šelfo dugno reljefo lokalūs nelygumai. Tauragės–Kuršėnų organinės medžiagos maksimumas atitinka Pagėgių–Šaukėnų įlinkį, o pati vakarinė Lietuvos dalis veikiama Barzdėnų–Šatrijos pakilumos. Tai rodo, kad subregioninėje tektoninėje įduboje šelfo dugne kaupėsi gausesnė atmirusi organinė medžiaga, lyginant su dugno pakilumomis.

Kitas svarbus rezultatas nustatytas analizuojant atskirų gręžinių elektros varžų ir akustinių bangų greičių (tiksliau, lėtumo) diagrafijos kreives (Šliaupa et al., 2016). Turimi negausūs kerno duomenys rodo,



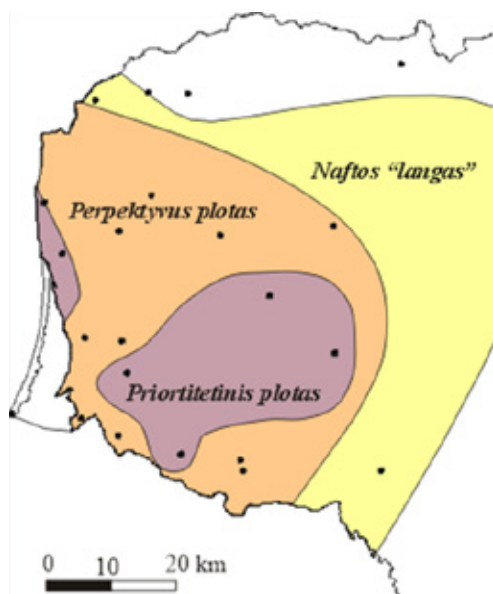
4 pav. Organinės medžiagos pasiskirstymo apatinio silūro molio skalūnuose rajonavimo schema. Skaičiai rodo vidutinį (TOC, %) organinės medžiagos kiekį. Rajonai: R – Raseinių, T-K – Tauragės–Kuršėnų, R – Rietavo, G – Gargždų, K – Kretingos, P – Platelių

Fig. 4. Lateral distribution of organic matter (TOC, %) in the Lower Silurian shales. Areas: R – Raseiniai, T-K – Tauragė-Kuršėnai, R – Rietavas, G – Gargždai, K – Kretinga, P – Plateliai



5 pav. Sąlyginio organinės medžiagos kiekio kaita apatinio silūro molio skalūnuose, apskaičiuota pagal akustinės ir elektros varžų diafragijos duomenis, Šlapgirių-1 grėžinyje Fig. 5. Relative vertical distribution of organic matter in the Lower Silurian shales calculated by interpretation of acoustic and electrical resistivity data, well Šlapgiriai-1

kad maksimali organinės medžiagos koncentracija siejama su Raikiulos regioninio aukšto juodais graptolitiniais argilitais. Jie išsiskiria ir gama diafragijos kreivėse



6 pav. Apatinio silūro molio skalūnų rajonavimas pagal organinės medžiagos terminio brandumo rodiklius Fig. 6. Areas of different thermal maturity of organic matter of the Lower Silurian shales

(5 pav.). Tą patvirtina minėtas varžų ir akustinių bangų greičių diafragijos duomenų taikymas. Raikiulos sluoksnis labai ryškiai pabrėžia hirmantčio Šiaurės Afrikos–Amazonės ledyno tirpimą (Moreau, 2011).

Pjūvyje išryškintas ir antras perspektyvus sluoksnis, papildytas organine medžiaga. Kad ir kaip būtų keista, jos pagrindinė dalis (Jaani RA) susijusi su minimaliomis gama spinduliuotės reikšmėmis, o rytuose esantys grėžiniai rodo, jog tai siejama su karbonatinių priemaišų moliuose padidėjimu (Jaani apledėjimas). Kol kas mechanizmo klausimas lieka atviras, tačiau gauti rezultatai leidžia šiek tiek keisti netradicinių dujų paieškų strategiją (jei kada nors tokia paieška bus vykdoma) vakarų Lietuvoje.

Organinės medžiagos terminis brandumas yra antras esminis parametras išskiriant perspektyvius molio skalūnų gamtinių dujų paieškos plotus. Remiantis *Rock-Eval* pirolizės analizės duomenimis, vakarų Lietuvos teritoriją galima suskirstyti į kelis plotus: 1) naftos lango periferinė dalis; 2) perspektyvus plotas, kuriame apatinio silūro organinės medžiagos terminis brandumas (T_{maks}) siekia 440–448 °C; 3) du prioritetingi plotai (Klaipėdos ir pietvakarių Lietuvos) – čia T_{maks} siekia 448–455 °C (tokoje temperatūroje laboratorijoje generuojama didžioji dalis angliavandenilių) (6 pav.).

1 lentelėje apibendrintos vakarinės Lietuvos dalies apatinio silūro molio skalūnų perspektyvos siekiant išgauti gamtines dujas. Kaip matyti, pagal šiuos rodiklius išsiskiria prioritetingi plotai (aptarti aukščiau) – nuo ribinės iki geros ir labai geros kokybės. Perspektyvaus ploto trys rodikliai yra mažesni nei ribiniai, kiti kinta nuo ribinės iki geros kokybės. Naftos langas turėtų būti klasifikuojamas kaip neturintis perspektyvų, čia ganėtinais didelis tik organinės medžiagos kiekis.

MOLIO SKALŪNŲ PETROFIZINĖS IR MECHANINĖS SAVYBĖS

Trapumas. Uolienos trapumas yra svarbus parametras prognozuojant hidraulinio

1 lentelė. Vakarų Lietuvos apatinio silūro molių organinės medžiagos vertinimų kriterijai
Table 1. Ranking criteria of different of organic matter of the Lower Silurian shales

Rodiklis	Prioritetinis plotas	Perspektyvus plotas	Naftos lango kraštinė dalis	Minimalūs reikalavimai
TOC (%)	2,5–5,0	2,5–9,0	~2,5	2,0 (puikus >6,0)
Tmaks. (°C)	448–442	444–439	438–435	448
% Ro	0,70–1,15 (1,94)	0,72–0,93	Nėra duomenų	1,1 (0,6–1,1 – kondensatas)
PI	0,10–0,12		0,05	0,08
S2 (mg/g)	2,88–10,57		0,33–1,72	5–10 (geras) >10 (puikus)
S1+S2	22,0–42,0		6,7–37,6	7,5–14,0 (geras ir labai geras) >14 (puikus)
TOC/HI	2,03/315–9,72/591			Patenkinama nafta
TOC/S2	0,18–0,44			>0,24 (mišus kerogenas II–III, generuoja naftą ir dujas)

Pastaba: TOC (%) – bendras organinės anglies kiekis, Tmaks. (°C) – pirolizės S2 maksimumo temperatūra, % Ro – vitritino atspindys naftoje, PI – produktyvumo indeksas, S2 – pagrindinis pirolizės pikas, S1+S2 – pirmo ir antro pirolizės pikų bendra suma, TOC/HI – bendro organinės anglies kiekio santykis su S2 pikų.

ardymo efektyvumą. Kaip žinoma, įprastinis molis pasižymi plastinėmis deformacijomis. Dideliame gylyje molis yra labai sutankintas, be to, silūro argilituose nemažai kitų mineralų priemaišų, vieni jų pasižymi trapumu, kiti, atvirkščiai, valkšnumu. Tad konkreti molinga uoliena gali pasižymėti trapumu.

Dažniausiai taikomas metodas remiasi mineralinės uolienos sudėties įvertinimu. Atlikta rentgenostruktūrinė analizė (XRD), papildyta mikroskopiniais tyrimais. Žemiau pateikiamos apibendrintos apatinio silūro atskirų regioninių aukštų mineralinės sudėties charakteristikos (2 lentelė).

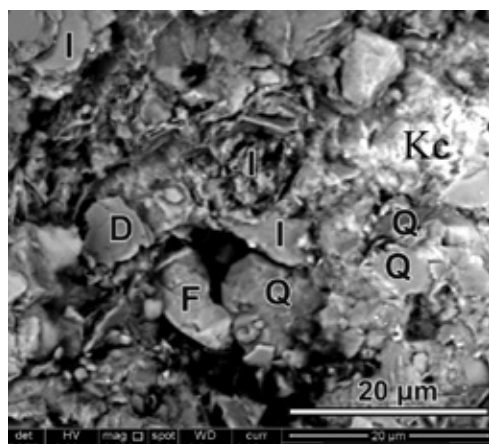
Kaip matyti, pagrindinę tirtų mėginių dalį sudaro molio mineralai – daugiausia hidrožerutis (ilitas) (7 pav.), paprastai su smektito sluoksneliais gardelėje, dažnas chloritas, aptinkami nedideli kiekiai kaolinito. Bendras molio mineralų kiekis uolienoje – 40–60 proc. Antrą didžiąją mineralų dalį sudaro aleuritiniai kvarco grūdėliai. Jie mažai apzulinti, paprastai tai būdinga smulkiai frakcijai. Jie sudaro apie 30 proc. uolienos.

Lauko špatai vaidina antraeilį vaidmenį, bendrai sudaro apie 6 proc. uolienos, vyrauja kalio lauko špatas, nors kartais nustatomas didesnis santykinis plagioklazo kiekis. Lauko špato grūdėliai dažniausiai iš dalies arba visiškai koroduoti (juos keičia molio mineralai), tai rodo porinio vandens cheminį agresyvumą galimai naftos formavimosi metu. Kartais ardomi netgi kvarco grūdėliai. Karbonatinės priemaišos sudaro apie 10 proc. uolienos. Vyrauja kalcitas, kuris dažniausiai formuoja mikritinius lęšius (ankstyvoji diagenėzė), rečiau atskirus kristaliukus (vėlyvoji diagenėzė). Uolienoje gerokai rečiau, tačiau taip pat visuose mėginiuose aptinkama siderito (procento dalys; sideritas galėjo susidaryti bioturbacijos paveikto dumblo paviršiuje ankstyvosios diagenėzės metu arba dėl organinės medžiagos terminio dekarboksilinimo vidutiniuose gyliuose). Gerokai daugiau yra piritas, jo taip pat randama visuose mėginiuose.

Pagal uolienų mineralinės sudėties klasifikaciją daugelis tirtų molio skalūnų

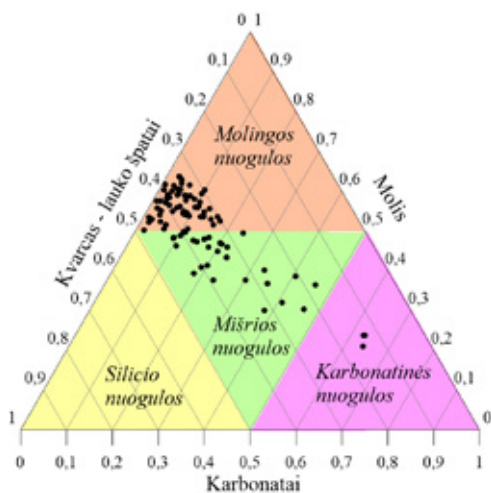
2 lentelė. Vakarų Lietuvos apatinio silūro suvestinė mineralinė sudėtis
Table 2. Summary of mineral composition of the Lower Silurian shales

	Kvarcas	K špatas	Plagioklazas	Kalcitas	Sideritas	Dolomitas	Piritas	Kaolinitas	Chloritas	Iltas+I-S	TOC
Nuo-iki	22–34	2–6	0,1–4	0,1–20	0,1–0,4	0,5–3	0,5–3	1–4	5–12	33–48	3,6–16
Vid.	27	4,3	2	10	0,2	1,5	1,8	2,5	8,5	42	8



7 pav. Elektroninio skenuojančio mikroskopo mikrofotografija; Mikoliškių-1 gręžinys, gylis 2 032,0 m (landoveris). Trumpiniai: I – illitas, Q – kvarcas, F – lauko špatas, D – dolomitas, Kc – kalcitas. Uolienos sudėtyje vyrauja ilito molio mineralai, yra mikritinio kalcito smulkių lęšių, blogai apzulinutų aleuritinės frakcijos kvarco ir lauko špato grūdelių, organinės medžiagos sankaupėlių

Fig. 7. SEM micrograph, well Mikoliškės-1. Abbreviations: I – illite, Q – quartz, F – feldspars, D – dolomite, Kc – calcite. Illite predominates; some peletal calcite lenses are present; poorly sorted detrital grains; accumulations of organic matter (black)



8 pav. Apatinio silūro (daugiausia landoverio) molio skalūnų mineraloginės sudėties klasifikacija

Fig. 8. Classification of the Upper Saurian (mainly Llandovery) shales

priskiriami molingoms nuoguloms, nemaža dalis yra mišrios sudėties, keli mėginiai klasifikuojami kaip karbonatinė molinga medžiaga (8 pav.). Kaip matyti trikampia-

me grafike, taškų debesis išsidėstęs viena juosta, o tai rodo bendrą uolienuų sedimentacijos aplinką.

Vertinant apatinio silūro molio skalūnų trapumą taikytos įvairios koreliacinės formulės, siejančios trapumą su uolienos mineraline sudėtimi. Žemiau pateikiamas dažniausiai naudojamas (Wang, Gail, 2009) priklausomybės pavyzdys:

$$MTI = (Kv+Dol) / (Qz+Dol+Kc+Mol+TOC),$$

čia MTI – mineralinio trapumo indeksas, Kv – kvarcas, Dol – dolomitas, Kc – kalcitas, Mol – molis, TOC – bendroji organinė anglis.

Skaičiavimai rodo, kad vakarų Lietuvos molio skalūnų mineralinio trapumo indeksas (MTI) kinta nuo 0,25 iki 0,35, tad uolienos klasifikuojamos kaip nežymiai valkšnios ir trapios. Dažnai nurodoma MTI ribinė reikšmė >0,4, tad dauguma tirtų mėginių nėra vertintini kaip palankūs hidrauliniams ardymui. Tačiau, kaip minėta, beveik visi tirti mėginiai yra paimti iš apatinio Raikiulos sluoksnio, o apatinio silūro pjūvio didžiosios dalies parametrai nebuvo tirti, išskyrus tyrimus diafragijos metodais. Todėl naudoti geofizinės diafragijos gręžiniuose duomenys. Interpretuota akustinių bangų diafragija. Literatūroje siūlomos įvairios koreliacijos formulės, padedančios nustatyti diafragijos trapumo indekso (DTI) ir akustinių bangų greičio (lėtumo) priklausomybę. Vienas iš pavyzdžių, pasiūlytų vertinant Barneto telkinio molio skalūnų (vienų labiausiai ištirtų pasaulyje, JAV) trapumą (Jin et al., 2014):

$$DTI = -0,01104 \times DTC + 1,4941,$$

čia DTI – diafragijos trapumo indeksas, DTC – akustinių seisminių bangų „lėtumas“ (mks/pėda).

3 lentelėje pateikta atskirų apatinio silūro regioninių aukštų DTI reikšmių suvestinė. Mažiausiu trapumu, kaip ir tikėtasi, pasižymi Raikiulos regioninio aukšto (RA) moliai (0,54) ir aukščiau slūgsantys Adaverės RA moliai (0,57). Aukščiau slūgsantys uenlokio molio

3 lentelė. Atskirų apatinio silūro regioninių aukštų DTI (Jin et al., 2014) koreliacinė formulė
 Table 3. Logging brittleness index of the Lower Silurian shales (Jin et al., 2014) correlation

Sluoksnis	Gėlūvos RA	Jaagurahu RA	Jaani RA	Adaverės RA	Raikiulos RA
Nuo–iki	0,53–0,68	0,52–0,66	0,54–0,68	0,48–0,69	0,49–0,67
Vid.	0,61	0,61	0,60	0,57	0,54



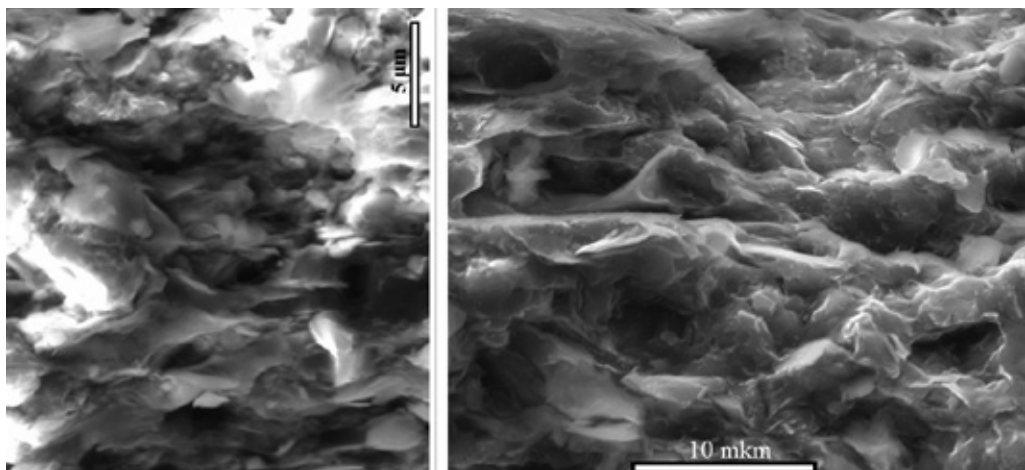
9 pav. Apskaičiuotas Jaagurahu RA molingų uolienu DTI, taikyta Jin et al. (2014) koreliacijos formulė (Vudfordo molio skalūnai)

Fig. 9. Logging brittleness index variations of the Jaagurahu RSt shales after Jin et al. (2014) correlation

skalūnai pasižymi panašiomis vidutinėmis reikšmėmis 0,60–0,61. Tad atsižvelgiant į apatinę ribinę 0,40 trapumo indekso reikšmę didžioji apatinio silūro molingos storumės dalis yra tinkama hidrauliniams ardymui. Taikant kitas koreliacines formules gauti tik nežymūs skirtumai tarp reikšmių.

Sudarytuose skirtingų apatinio silūro regioninių aukštų uolienu DTI kaitos žemėlapiuose pastebėtos tos pačios tendencijos visame tyrimų plote. Mažiausiu trapumu pasižymi rytinėje dalyje esantys grėžiniai, didžiausiu – vakarinėje dalyje (9 pav.). Tad pačios vakarinės Lietuvos dalies apatinio silūro molio skalūnų hidraulinio ardymo savybės yra geriausios, šis skirtumas gana žymus.

Akustinių bangų diafragma ne tik atspindi uolienu mineralinę sudėtį, bet ir yra jautri nuosėdinių uolienu sutankėjimui – grimzta po naujai besiklostančiais sluoksniais, nuogulos tankėja (10 pav.). Atitinkamai mažėja ir tuštumų, kuriose gali būti susikauptosios gamtinės dujos. Tad poringumas yra

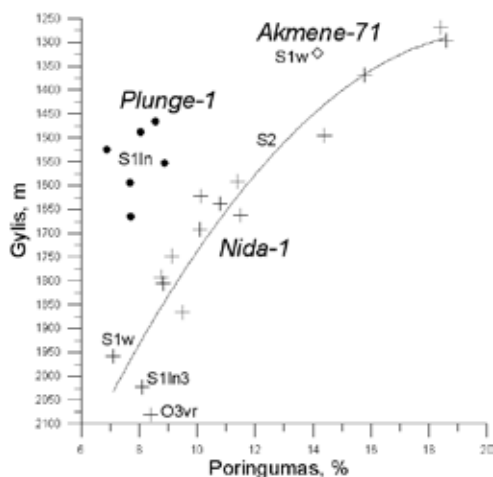


10 pav. SEM mikrografijos, iliustruojančios skirtingą apatinio silūro molio skalūnų poringumą (kairėje – Vilkaiviškio-131 grėžinys (poringumas apie 15 proc.), dešinėje – Barzdėnai-1 grėžinys, gylis 1990,1 m (poringumas 5–6 proc.))

Fig. 10. SEM micrograph illustrating porosity of the Lower Silurian shales (left – well Vilkaiviškis-131 (middle Lithuania, porosity 15 %); right – well Barzdėnai-1 (depth 1990,1 m, southwest Lithuania, porosity 5-6%))

svarbus parametras vertinant eksploatacines molio skalūnų charakteristikas. Tiriant uolienu mėginius skenuojančiu elektroniniu mikroskopu lengva pastebėti, jog vidurio Lietuvos apatinio silūro molingos uolienos yra porėtesnės, lyginant su vakarų Lietuvos mėginiais. Tai konstatuota ir remiantis laboratoriniais silūro uolienu tyrimais. Naujų laboratorinių tyrimų kol kas atlikta nedaug, tačiau duomenų gausiai pateikiama gamybinėse ataskaitose, saugomose LGT geologiniuose fonduose.

Vakarų Lietuvoje yra tik keletas gręžinių, kuriuose uolienu poringumas būtų matuotas laboratorijoje visame silūro storumės pjūvyje. Vienas tokių retų atvejų yra Nidos-1 gręžinys. Aiškiai matoma poringumo mažėjimo tendencija didėjant gyliui. Taip pat grafike pateikti ir kitų gręžinių duomenys (11 pav.), papildantys bendrą poringumo ir gylio grafiką. Įdomu, kad poringumas Plun-



11 pav. Argilitų poringumas. Taškai – Plungės-1 gręžinio apatinio silūro landoverio argilitas; kryžiai – Nidos-1 gręžinio viršutinio silūro argilitai (giliausi mėginiai – apatinio silūro uenlokis ir landoveris, viršutinis ordovikas); rombas – Akmenės-71 gręžinio apatinio silūro uenlokio argilitas. Linija rodo antro laipsnio koreliacinę kreivę Akmenės gręžinio argilito poringumui nustatyti

Fig. 11. Porosity of Silurian shales, well Nida-1. Lower Silurian shale data are plotted for comparison (dots – well Plungė-1, diamond – well Akmenė-71)

gės-1 ir Akmenės-71 gręžiniuose yra 3–4 proc. mažesnis, lyginant su Nidos-1 gręžiniu.

Apatinio silūro molingų uolienu 6–8 proc. poringumas yra teigiamas eksploatacinis rodiklis. Šios reikšmės artimos plačiai aprašytiems Barneto (JAV) molio skalūnams – 3–6 proc., Vudfordo (JAV) skalūnams (~2 500 m gylio) – 3,5–6,5 proc. Tad remiantis šiuo palyginimu galima tvirtinti, jog Lietuvos vakarinės dalies apatinio silūro molio skalūnai yra tinkamos kokybės.

Katijonų mainų geba. Molio mineralai turi neigiamą elektros krūvį. Tad jie pasižymi didesnėmis sorbcinėmis savybėmis (t. y. pritraukti iš fluído tirpalo įvairias medžiagas ir jas sulaikyti; tai, beje, puikiai žinoma kosmetikos pramonėje ir medicinoje). Kuo didesnė molio katijonų mainų geba (KMG), tuo labiau moliai sulaiko porose ir plyšiuose esančias dujas, tai neigiamas parametras. Tirtų vakarų Lietuvos apatinio silūro molio mėginių KMG kinta nuo 0,2 iki 8,8 mekv./100 g (Šliaupa et al., 2020). Tai mažos reikšmės, siejamos su tirtų mėginių mineraline sudėtimi: vyrauja hidrožerutis ir chloritas, didelė detritinių grūdelių dalis uolienoje. Šios reikšmės yra panašios į tirtų Jungtinės Karalystės landoverio ir uenlokio molio (5–11 mekv./100 g), taip pat Lenkijos apatinio paleozojaus argilitų (3–12 mekv./100 g) duomenis. Palyginimui, bentonito KMG yra 60–108 mekv./100 g (priklauso nuo uolienos tipo) (Vaitkevičienė, Narkūnienė, 2017).

Atsparumas erozijai. Atliekant hidraulinį molio skalūnų ardymą molio dalelės gali būti atplėštos ir išneštos su cirkuliuojančiu vandeniu, tai trikdo eksploatacijos procesą. Hidraulinio ardymo metu mobilizuotos dalelės gali užkimšti naujus ir atsivėrusius senus plyšius bei poras, šitaip užblokuodamos dujų veržimąsi į eksploatacinį gręžinį. Tad svarbi molio skalūnų savybė yra atsparumas vandens srovės erozijai. Vertinant uolienu stabilumą atliekami laboratoriniai tyrimai besisukančio kaitinamo būgno metodu (angl. *Roller Oven*). Prieš tyrimus susmulkintos uolienos veikiamos cirkuliuojančio fluído. Skačiuojamas ant

būgno filtro mobilizuotų dalelių (nuosėdų) kiekis – jos cirkuliuojančio fluido buvo atplėstos nuo uolienos. Kuo apnašų ant filtro daugiau, tuo mažiau uoliena atspari erozijai. Laboratorijoje tirtų silūro molio skalūnų apnašų dalis ant filtro siekė 1,9–6 proc. mėginio pradinės masės (vidutiniškai 3,8 proc.) (Šliaupa et al., 2020). Tad uolienos klasifikuojamos kaip atsparios (reti mėginiai) ir vidutiniškai atsparios (dauguma mėginių) vandens erozijai. Kadangi didelę įtaką erozijai turi molio mineralų neigiamas krūvis, papildomais tirpalais galima sumažinti mechaninį fluidų agresyvumą. Kaip rodo praktika, geriausiomis savybėmis pasižymi organiniai junginiai. Dyzelinas silūro mėginių eroziją sumažino iki 0,4–1,2 proc. mobilizuotų apnašų kiekio – tai mažos erozijos rodiklis. Dažniausiai praktikoje naudojami paprastesni junginiai, kaip NaCl, KCl, NH₄Cl (tirpalo koncentracija 3–7 proc.). Geriausių rezultatų gauta pridėjus į distiliuotą vandenį KCl (7 proc.), erozija yra apie 3,0 proc. („vidutinė“ erozija).

Brinklumas. Hidrauliškai trupinant molio skalūną, į sistemą papildomai patenka vandens, kuris neišvengiamai reaguoja su molio mineralais. Ši reakcija gali sukelti molio mineralų brinkimą, o tai užakina plyšių sistemą ir užveria kelius gamtinių dujų srautui. Dalelių paviršių hidratacija turi mažą poveikį, pagrindinis procesas yra osmosinio slėgio kontroliuojamas uolienos brinkimas. Tai plačiai naudojama aplinkosauginiuose barjeruose (salinizacijos–desalinizacijos osmosinės konsolidacijos ciklai). Dažniausiai taikomas laboratorinio vertinimo metodas yra kapiliarinės filtracijos greitis (laikas) (angl. *Capillary Suction Time*, CST). Molio mėginys sutrinamas, mirkomas, vėliau naudojamas sausinimo filtras. Kuo labiau molingos uolienos mineralinės dalelės sulauko vandenį (brinklios), tuo ilgesnis filtracijos fronto plitimo tarp dviejų fiksuotų taškų laikas (CST). Tirti Lietuvos mėginiai pagal laboratorijos kalibruotą klasifikacijos schemą yra mažo brinklumo. Distiliuoto vandens fronto plitimo sąlyginis laikas 1,72–3,70.

NaCl, KCl, NH₄Cl priemaišos filtracijos laiką sutrumpino pusiau (ypač KCl) (Šliaupa et al., 2020). Mažas brinklumas, kaip ir atsparumas erozijai, susijęs su anksčiau aprašyta specifine apatinio silūro molio skalūnų mineraline sudėtimi.

IŠVADOS

Apžvelgus molio skalūnų mineralinės sudėties charakteristikas galima teigti, kad apatinio silūro molingos uolienos pasižymi geromis mechaninėmis ir petrofizinėmis savybėmis. Nustatytas uolienų trapumas ir poringumas yra aukščiau kritinės ribos, todėl argilitai traktuojami kaip tinkami eksploatacijai, taikant hidraulinio ardymo technologiją. Geros ir kitos petrofizinės savybės: atsparumas vandens srovės erozijai, nežymus brinklumas, maža katijonų mainų geba. Tokios petrofizinės savybės siejamos su specifine vakarų Lietuvos apatinio silūro molio skalūnų mineraline sudėtimi – molio frakcijoje vyrauja diagenetinės kilmės hidrožerutis ir chloritas, nemažą uolienos dalį sudaro detritiniai grūdėliai ir karbonatai.

Kol kas labiausiai diskutuotinas lieka organinės medžiagos vaidmuo. Kaip rodo mėginių tyrimai ir diagrafijos gręžiniuose duomenų interpretacija, organinės medžiagos kiekis gerokai viršija kritinę ribą, todėl šis rodiklis vertinamas kaip palankus molio skalūnų eksploatacijos parametras. Taip pat kerogeno tarpinis tipas II–III irgi ganėtinai palankus gamtinių dujų generacijai. Sprendžiant dėl apatinio silūro perspektyvumo vakarų Lietuvoje pagrindinė problema yra terminis organinės medžiagos brandumas. Lietuvos naftos telkiniuose kartu su nafta išgaunamas tik labai nedidelis kiekis gamtinių dujų (Zdanavičiūtė, Sakalauskas, 2004), tai netiesioginis požymis, rodantis, kad dujų generacija vakarų Lietuvoje nepasiekė pagrindinės stadijos. Tad ateityje prieš darant išvadas apie silūro dujų molio skalūnų eksploatacines geologines prielaidas būtini papildomi detalesni paleogeoterminių rodiklių tyrimai vakarinėje Lietuvos dalyje.

LITERATŪRA

- Jin, X., Shah, S., Truax, J., Roegiers, J. C. A practical petrophysical approach for brittleness prediction from porosity and sonic logging in shale reservoirs. Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Amsterdam, The Netherlands, 27–29 October 2004, 18 p.
- Lazauskienė, J., Šliaupa, S., Musteikis, P., Brazauskas, A. Sequence stratigraphy of the Baltic Silurian succession: Tectonic control on the foreland infill. Geological Society, London, Special Publications, 2003, 208, p. 95–115.
- Moreau, J. The Late Ordovician deglaciation sequence of the SW. Basin Research, 2011, 23, p. 449–477.
- Paškevičius, J. Baltijos respublikų geologija. Vilnius: Valstybinis leidybos centras, 1994, 447 p.
- Resource estimation of shale gas and shale oil in Europe. Deliverable T7b. European Unconventional Oil and Gas Assessment (EUOGA). Report for DG JRC in the Context of Contract JRC/PTT/2015/F.3/0027/NC “Development of shale gas and shale oil in Europe”. 2017, 34 p.
- Šliaupa, S., Šliaupienė, R., Žaludienė, G., Vaskaboinkava, T., Bibikava, A., Evstratenko, L., Kovkhuto, A. Prospects of Lithuanian Silurian shale gas, Baltic sedimentary basin. Oil Shale. 2016, 33(4), p. 357–372.
- Šliaupa, S., Lozovskis, S., Lazauskienė, J., Šliaupienė, R. Petrophysical and mechanical properties of the lower Silurian perspective oil/gas shales of Lithuania. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 79, art. no. 103336, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103336>.
- Vaitkevičienė, V., Narkūnienė, A. Paviršiaus kompleksinių junginių susidarymo ir jonų mainų modeliavimo taikymas bentonito sorbcijos gebai vertinti pasirinktų radionuklidų atžvilgiu galimomis giluminio atliekyno sąlygomis Lietuvoje. Cheminė technologija, 2017, 1(68), p. 36–46.
- Wang, F. P., Gale, J. F. W. Screening criteria for shale-gas systems: Gulf Coast. Association of Geological Societies Transactions, 2009, 59, p. 779–793.
- Zdanavičiūtė, O., Sakalauskas, K. Petroleum geology of Lithuania and southeaster Baltic. Vilnius: GI publikacijos. 2001, 204 p.
- Zdanavičiūtė, O., Swadowska, E. Petrographic and pyrolysis-gas chromatography investigations of the Early Palaeozoic organic matter of Lithuania. Geologija, 2002, 40, p. 15–23.
- Zdanavičiūtė, O., Lazauskienė, J. Organic matter of Early Silurian succession – the potential source of unconventional gas in the Baltic Basin (Lithuania). Baltica, 2009, 22(2), p. 89–98.

Summary

PROSPECTS OF THE LOWER SILURIAN GAS SHALES OF LITHUANIA – GEOLOGICAL ASSESSMENT

The Lower Silurian shales are considered to be the most prospective formation for assessment of unconventional natural gas resources in Lithuania to the reason for this is the deep burial of shales (1.5–2 km) and rather large thickness (120–200 m) compared to other Lower Palaeozoic organic-rich shales. Until recently, characterisation of the Lower Silurian shales was based mainly on laboratory studies of organic matter in drill core samples, while other parameters (mechanical and petrophysical) were ignored. Recently, some studies were carried out to compensate for those gaps. TOC content varies between 2% to 20 %. The rate of

thermal maturity of organic matter still remains under question. Organic matter of shales shows oil window maturity, while only several local areas can be (with some caution) classified as having been placed in a natural gas window. As for the mechanical and petrophysical properties of the Lower Silurian shales, they are of good quality. Porosity and brittleness of shales are above the lower limit defined for gas shales. Other petrophysical parameters are also favourable for gas exploitation, including low swelling, low cation exchange capacity and high resistance to erosion. These positive characteristics are due to the specific mineral composition of the Lower Silurian shales, i.e. predominance of illite and less chlorite in the clay fraction, abundance of silty detrital grains (quartz and much less feldspars), and admixture of the early and late diagenetic carbonates (calcite and dolomite).