

Simona Rinkevičiūtė, Vilniaus universiteto Geomokslų instituto Geologijos ir mineralogijos katedra

MULDE / LUNDGRENI BIOĖVYKIO (SILŪRAS) ĮTAKA OSTRAKODŲ PALEOEKOLOGINEI DINAMIKAI

Anotacija

Šio tyrimo tikslas – įvertinti ostrakodų ekologinę dinamiką Mulde / *lundgreni* bioįvykio intervale (silūro periodas, uenlokio aukštas). Straipsnyje pateikiami detalūs rezultatai, susiję su šio ir kitų silūro bioįvykių poveikiu ostrakodams bendrų ekologinių tendencijų kontekste. Tyrimai padėjo geriau suprasti vandenynų ekosistemų dinamiką ir sisteminius paleobendrijų pokyčius bei praplėtė žinias apie trumpalaikius (iki ~2 mln. m. trukmės) bioįvykius ir ostrakodų bendrijų bei rūšių vaidmenį ekosistemose. Taip pat išryškinta didelės laikinės raiškos svarba tiriant tokius procesus. Nustatyta, kad ostrakodų įvairovės pokyčiai susiję su jūros lygio svyravimais, kuriuos lėmė ilgalaikiai (405 tūkst. m.) ir trumpalaikiai (100–120 tūkst. m.) Milankovičiaus ekscentriciteto ciklai. Lokalios ostrakodų rūšių įvairovės analizė parodė, kad Mulde / *lundgreni* bioįvykis turėjo stiprų, tačiau trumpalaikį poveikį ostrakodų α įvairovei.

Abstract

The aim of this study is to assess the ecological dynamics of ostracods during the Mulde / *lundgreni* bioevent interval (Wenlock, Silurian). This study presents detailed results on the impact of this bioevent on ostracods in the context of other Silurian bioevents and broader ecological trends. The research contributes to a better understanding of marine ecosystem dynamics and systemic transitions within paleocommunities, and expands knowledge of short-term bioevents (lasting up to ~2 Myr) and the role of ostracods and species in marine ecosystems. It also highlights the importance of high temporal resolution in the study of such processes. The results show that changes in ostracod diversity are related to sea-level fluctuations driven by long-term (405 kyr) and short-term (100–120 kyr) Milankovitch eccentricity cycles. Analysis of local species diversity indicates that the bioevent had a strong but short-lived impact on ostracod α -diversity.

Raktiniai žodžiai: ostrakodai, silūras, Baltijos baseinas, Mulde bioįvykis.

Keywords: ostracod, Silurian, Baltic Basin, Mulde bioevent.

Received 17 March 2026, accepted 24 April 2026

Simona Rinkevičiūtė. M. K. Čiurlionio g. 21, 03101 Vilnius, Lietuva, el. p. simona.rinkeviciute@chgf.vu.lt

ĮVADAS

Vienas trumpiausių paleozojaus periodų – silūras, tačiau gausi globalių bioįvykių (reikšmingų ir dažniausiai staigių gyvybės formų įvairovės ir gausos pokyčių) seka rodo, kad tai buvo ir vienas nestabiliausių geologinės istorijos laikotarpių. Kodėl ir kaip vyko šie organizmų gausos svyravimai, iki šiol nėra iki galo aišku (Jeppsson, Calner, 2002; Spiridonov ir kt.,

2020 a). Viena iš šio nepastovumo priežasčių galėjo būti ordoviko pabaigoje–silūro pradžioje įvykęs masinis Hirnančio išmirimas (Kaljo ir kt., 2008; Mergl, 2011). Jis siejamas su jūros lygio svyravimais, apledėjimo epizodais ir vandenynuose paplitusia anoksija (deguonies stoka, dėl kurios sutrinka gyvybiniai ląstelių procesai). Stratigrafiniuose tyrimuose šie įvykiai atpažįstami pagal organizmų gausos ir įvairovės svyravimus (Kaljo ir kt., 1996; Spiridonov ir kt.,

2015; Paškevičius, 2019) bei stabilųjų izotopų ir cheminių elementų duomenų anomalijas (Cramer ir kt., 2006; Radzevičius ir kt., 2014b; Jarochowska, Munnecke, 2016).

Iš visų atpažintų silūro biotinių krizių savo mechanizmu išsiskiria Mulde / *lundgreni* bioįvykis (vidurinis–viršutinis homeris) (Jeppsson, 1997). Manoma, kad jis susijęs su didelio masto jūros lygio svyravimu, sukėlusiu labai stiprų, tačiau trumpalaikį (Urbanek, 1993; Kaljo ir kt., 1996) poveikį graptolitams, – jų išmirimą ir konodontų bendrųjų persitvarkymą (Spiridonov ir kt., 2017 b). Gotlando saloje atlikti tyrimai parodė, kad Mulde / *lundgreni* bioįvykio intervale konodontai patyrė keletą įvairovės sumažėjimo epizodų (išmirimų) ir net visiškų regioninių išnykimų (Jeppsson, 1998).

Mulde / *lundgreni* bioįvykio interpretacijos prieštaringos. Nuomonių įvairovė kyla dėl skirtingų tyrimo perspektyvų ir keliamų klausimų: stebimi globalūs ar regioniniai rūšių atsiradimai ir išnykimai; analizuojami bendrųjų sudėties pokyčiai ar konkrečių biotos grupių bendrųjų struktūros kaita ir pan. Net jei tam tikros rūšys aplinkos pokyčius išgyvena, jų santykinis ir absoliutusias indėlis į ekosistemą lemia jų vaidmenį biosferoje ir galimą įtaką kitų kladų evoliucijai (Hull ir kt., 2015).

Svarbi jūrinių ir sausuminių ekosistemų dalis yra ostrakodai, suteikiantys vertingų įžvalgų apie globalius viso fanerozojaus biotinius modelius (Siveter, 2008). Nuo pat ordoviko iki dabar jie yra svarbi bentoso bendrųjų dalis (Horne, 2003; Wilkinson ir kt., 2007). Šiai grupei būdinga didelė taksonominė įvairovė (apie 65 tūkst. iškastinių ir dabartinių rūšių), gausa (Rinkevičiūtė ir kt., 2022) ir mažas dydis (suaugusių individų ilgis paprastai 0,2–30 mm). Platus jų paplitimas įvairiose buveinėse (jūrose, ežeruose, ertmėse tarp augalų ir dirvožemyje) bei atsparumas aplinkos sąlygoms (platus druskingumo, temperatūros ir pH diapazonas) leidžia tirti ostrakodų pasiskirstymo modelius labai įvairiose aplinkose (Whatley, 1998). Dėl šių savybių ostrakodai yra svarbus biostratigrafinių, biogeografinių, paleoaplinkos tyrimų objektas (Mohibullah ir kt., 2010; Williams ir kt., 2015).

Silūro ostrakodų tyrimai Baltijos baseine (BB) pradėti dar XIX a., tiriant fosilijų medžiagą iš Gotlando salos ir Švedijos (Hisinger, 1840), taip pat iš silūro atodangų Estijoje ir iš riedulių kitose šalyse (Schmidt, 1858; Eichwald, 1860). Vėliau buvo aprašyti ir Lietuvos bei Prūsijos teritorijose randami ostrakodai iš riedulių (Chmielewski, 1900). Po gana ilgos tyrimų pertraukos, siekiant atlikti gręžinių koreliaciją, aprašyti Vakarų Lietuvos, Vakarų Latvijos ir Šiaurės Lenkijos gręžinių ostrakodai (Sarv, 1977 a, b). Šie tyrimai suteikė naujų įžvalgų apie jų vaidmenį stratigrafijoje ir paskatino peržiūrėti viršutinio silūro litostratigrafiją (Paškevičius, Karatajtūtė Talimaa, 1971).

Pirmasis išsamiai silūro ostrakodus Lietuvoje aprašė Algimantas Pranskevičius (1971; 1972 a, b; 1975). Analizuojant faunos paplitimą, nustatytos ir aprašytos būdingos ostrakodų rūšys. Nijolė Sidaravičienė sudarė didelę kiekybinę silūro ostrakodų duomenų bazę ir sukaupe reikšmingą silūro ir ordoviko ostrakodų paleontologinę kolekciją.

Mulde / *lundgreni* ir kitų silūro bioįvykių poveikis bentoso faunai vis dar nepakankamai ištirtas (Spiridonov ir kt., 2017 a). Ostrakodai taip pat retai analizuojami silūro bioįvykių ar platesnių ekologinių tendencijų kontekste (Crasquin, Horne, 2018). Ankstesni mažos laikinės raiškos tyrimai (kai vertinamas tam tikrų organizmų savybių, jų rūšių buvimas ar nebuvimas bei kaita ilgesniu laikotarpiu) leido teigti, kad Mulde / *lundgreni* bioįvykis didelės įtakos ostrakodams neturėjo (Cramer ir kt., 2012), panašiai kaip ir kiti silūro bioįvykiai visai bentoso faunai (Mergl ir kt., 2018).

Siekiant atskleisti vandenynų persitvarkymą lemiančius veiksnus ir geriau suprasti ekosistemų reorganizacijos mechanizmus, būtina tiksliai įvertinti bioįvykių tempą ir išskirti jų stadijas (Cramer ir kt., 2015). Tikėtina, kad prieštaringi tyrimų rezultatai susiję su mažos rezoliucijos duomenimis. Tai patvirtina ir skirtingai įsivaizduojama Mulde / *lundgreni* bioįvykio trukmė. Anksčiau, remiantis geochronologiniais ir integruotais stratigrafiniais tyrimais, jis buvo suvokiamas kaip gana ilgas procesas (Radzevičius ir kt., 2016a), trukęs apie 1 mln. m. (Cramer ir kt.,

2012). Vis dėlto skirtingų taksonų palyginimas rodo, kad pagrindinis ekologinio streso impulsas buvo sutelktas gana siaurame laiko intervale (Spiridonov, 2017; Rinkevičiūtė ir kt., 2022; Whittingham ir kt., 2022).

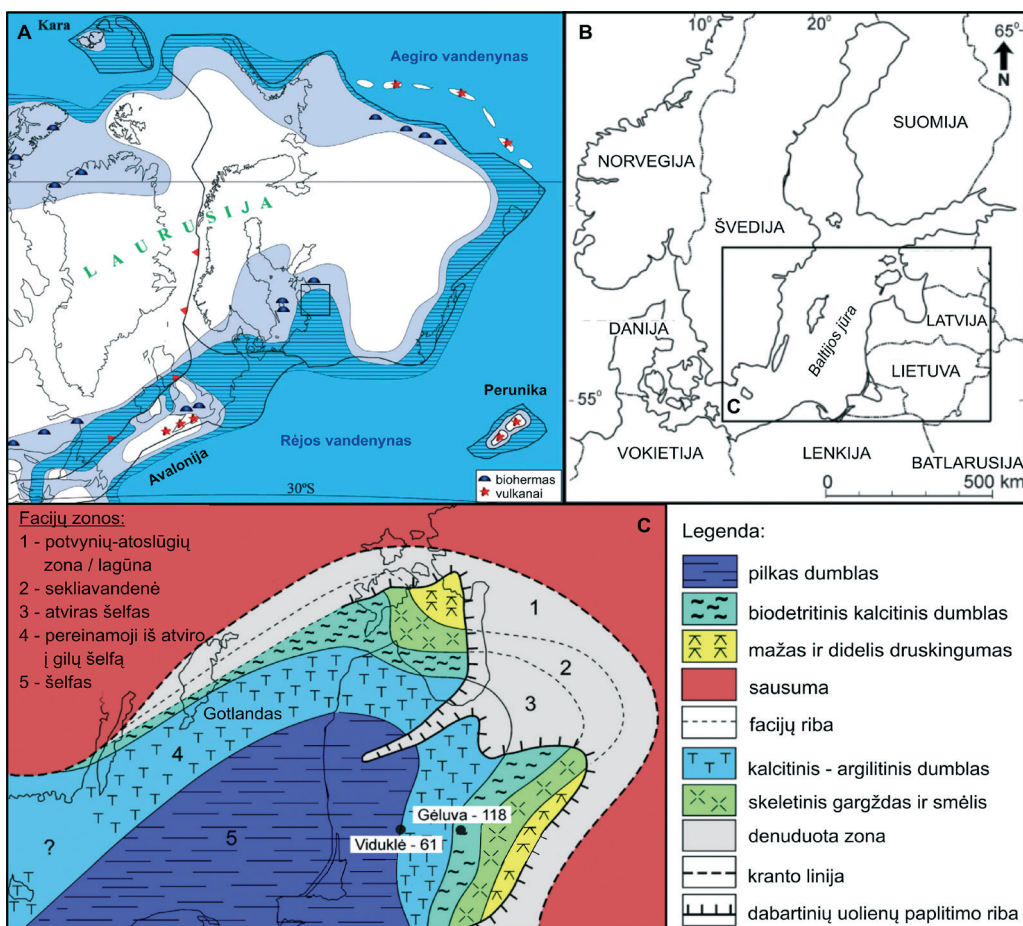
Šis tyrimas pateikia vieną iš didžiausių laikinės raiškos tyrimų visame paleozojuje ir pirmą itin didelės raiškos (<10 tūkst. m.) ostrakodų tyrimą Mulde / *lundgreni* bioįvykio intervale.

METODIKA

Baltijos baseinas (BB) silūro metu buvo vakarinėje Baltikos paleokontinento dalyje, Rytų

Europos kratono vakariniame pakraštyje (1 pav.). Vėlyvajame homeryje ir ludlovyje BB buvo išsidėstęs pietiniame pusrutulyje netoli pusiaujo ir turėjo sąsają su Rėjos paleovandenynu (Cocks, Torsvik, 2005). Seklios jūrinės facijos randamos rytinėje, o atviros jūros facijos – vakarinėje dabartinės Lietuvos dalyje (Lazauskienė ir kt., 2002).

Šiame darbe nagrinėta iš gręžinio Gėluva-118 kerno paimta ostrakodų, graptolitų ir stabilijų izotopų ($\delta^{13}\text{C}$ ir $\delta^{18}\text{O}$) medžiaga (Lietuvos geologijos tarnybos prie Aplinkos ministerijos Žemės gelmių informacijos centras). Šis gręžinys yra Lietuvoje silūro metu buvusio BB rytinėje dalyje, pereinamojoje



1 pav. Geografinė ir paleogeografinė uenlokio Mulde / *lundgreni* įvykio ostrakodų ekologinės dinamikos tyrime naudoto gręžinio Gėluva-118 ir susijusio gręžinio Viduklė-61 padėtis silūro BB (A – pagal Cocks, Torsvik, 2005; B, C – pagal Spiridonov ir kt., 2020 a)

Fig. 1. Paleogeographic location of the studied core (Gėluva-118) and the reference core (Viduklė-61) within the Silurian BB (A – after Cocks and Torsvik, 2005; B, C – after Spiridonov et al., 2020 a)

šelfo zonoje tarp seklių ir gilesnių facijų. Tirtas intervalas priklauso Jagaraho (*Jaagarahu*) ir Gėluvos regioniniams aukštams (Radzevičius ir kt., 2016a). Iš viso paimta 140 uolienų mėginių 952,1–1 049 m gylio intervale. 951,1–1 007 ir 1 020–1 049 m gylio intervaluose mėginiai buvo imami kas 1 m. Remiantis ankstesniais tyrimais (Cramer ir kt., 2012), manyta, kad Mulde / *lundgreni* biojvykis trunko apie 1 mln. m. Siekiant gauti itin aukštos raiškos duomenis, biojvykio išmirimo intervale (1 008–1 018,8 m) mėginiai buvo imami kas 0,2 m. Lyginant gręžinius Gėluva-118 ir Viduklė-61 nustatyta, kad pirmajame sedimentacija vyko maždaug 2,5 karto greičiau (1 m kerno atitinka maždaug 8 000 metų) (Radzevičius ir kt., 2014).

Šiame tyrime taikyti fiziniai uolienų ardy-mo metodai (Martinsson, 1962; Green, 2001), parinkti atsižvelgiant į konkretų uolienos tipą. Iš viso mėginiuose rasta 24 587 ostrakodų fosilijos su pakankamai gerai išlikusiais ostrakodų karapaksais. Geldelės ar jų fragmentai, remiantis prieinama literatūra, identifikuoti iki genties arba rūšies lygmens.

Skirtingų taksonų ostrakodų nuotraukos padarytos skenuojančiu elektroniniu mikroskopu „Quanta 250“ su „Oxford“ EDS (energijos dispersijos sistema) Gamtos tyrimų centre Vilniuje. $\delta^{13}\text{C}$ ir $\delta^{18}\text{O}$ analizės atliktos naudojant „Thermo Gasbench II / Thermo Delta V“ masių spektrometrą Masių spektrometrijos laboratorijoje Fizinių ir technologijos mokslų centre.

Siekiant įvertinti ostrakodų taksonominės sudėties kaitą, duomenims pritaikytas kiekybinis empirinės divergencijos testas, skirtas struktūrinių pokyčių taškams aptikti (James, Matteson, 2014). Skaičiavimai atlikti naudojant statistinio duomenų apdorojimo programą „R“ ir integruotą *ecp* paketą (R Development Core Team, 2015).

TYRIMŲ REZULTATAI

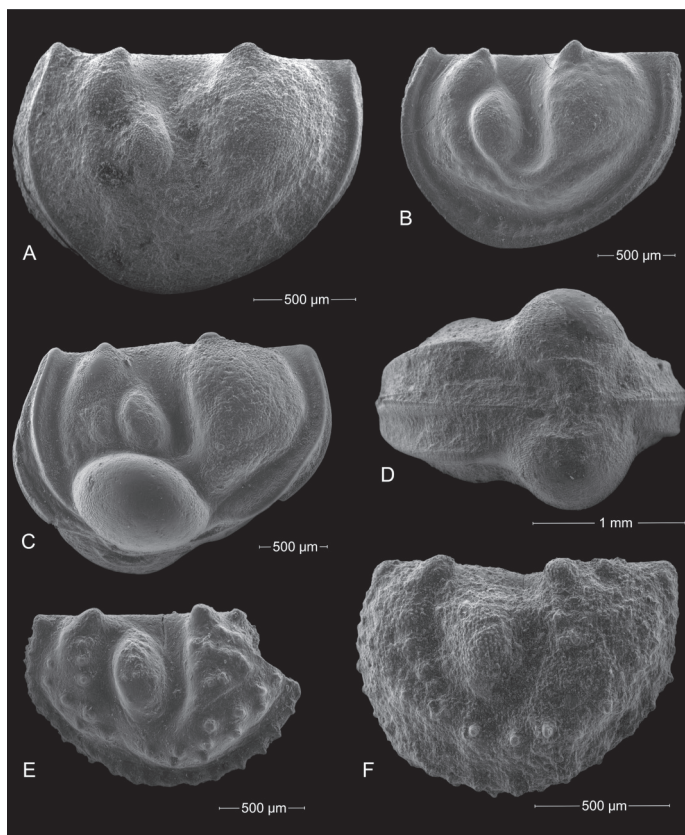
Šiame tyrime sisteminis ostrakodų suskirstymas grindžiamas remiantis ankstesniais tyrimais (Benson ir kt., 1961; Neckaja,

1966, 1973; Schallreuter, 1986; Vannier ir kt., 1989). Papildomai naudotasi WoRMS, „World Ostracoda Database“ (Brandao ir kt., 2024), taip pat *fossilid.info* duomenų baze.

Iš viso aprašyta 31 rūšis (2–4 pav.), iš jų 29 priklauso penkiems skirtingiems pobūriams: *Palaecocopa* ir *Leiocopa* (būdingi stabilios karbonatinės aplinkos sąlygoms), *Binodicopa* (prisitaikę prie didelio streso ir nestabilių aplinkų, kuriose vyrauja klastinė medžiaga), *Cytherelliformes* (dažniausiai siejami su karbonatinėmis aplinkomis (?)) ir *Metacopa* (galintys išgyventi tiek stabiliose, tiek nestabiliose aplinkose) (Vannier, 1989; Meidla, 1996; Truuver, 2021).

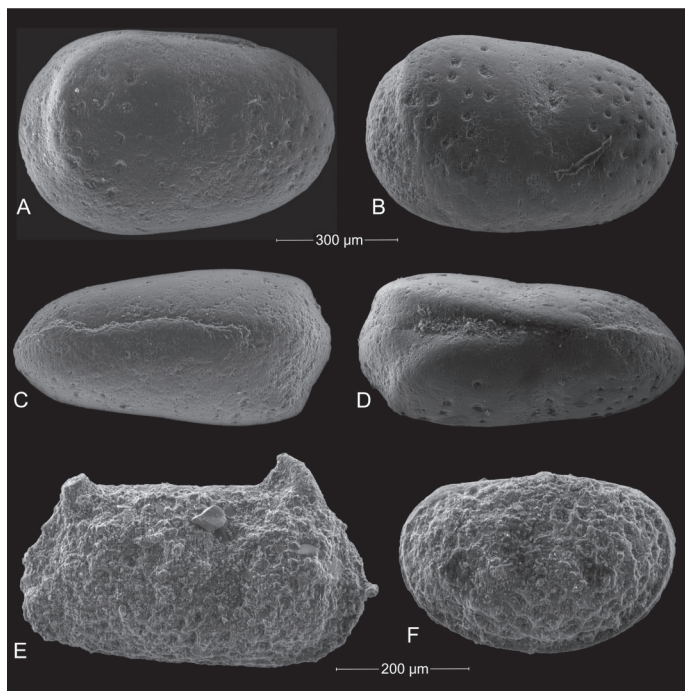
Remiantis skaitiniu stratigrafinio laiko serijos suskirstymu pagal reikšmingumo lygį $\alpha = 0,01$ (99 %), išskirtos šešios ostrakodų bendrijos (H.ostr 1–6) (5 pav.). H.ostr 1 – pirmoji seniausioje (apatinėje) tirtą intervalą dalyje (1 049–1 039 m; apatinis homeris) išskirta ostrakodų bendrija. Jai priklausė 8 ostrakodų rūšys. Dominuojanti rūšis – *Craspedobolbina insulicola* (67 %), gausios buvo *Cavellina plana* (17,7 %), aptiktos tik trijuose mėginiuose viršutinėje bendrijos dalyje (du iš trijų mėginių sudaro 97 % visų radinių) ir *Circulinella silurica* (10,6 %), tolygiai pasiskirsčiusi visoje bendrijoje. Taip pat nustatytos *Klonkina thomae* (2 %), *Xystista auricularis* (1 %), *Microcheilinella rozhdestvenskaja* (1 %), *Aechmina* sp. (0,43 %) ir *Beyrichia* sp. (0,17 %) rūšys.

H.ostr 2 ostrakodų bendrija taip pat priklauso *lundgreni* graptolitų biozonai (1 038–1 013 m). Joje nustatyta 17 rūšių, iš kurių stipriai dominuoja *Craspedobolbina insulicola* (95 %). Kiekviena iš kitų rūšių sudaro mažiau nei po 2 % bendrijos sudėties. Nepaisant nedidelio indėlio į bendrijos struktūrą, joje pirmą kartą aptikta dešimt rūšių, kurios nebuvo nustatytos H.ostr 1 intervale. Dalis šios įvairovės gali būti susijusi su ribiniu efektu, kai rūšių paplitimo intervalas sutampa su tiriamo stratigrafinio intervalo ribomis. Paskutiniame mėginyje (1 013 m) ostrakodų nerasta; ši riba žymi *lundgreni* graptolitų biozonos pabaigą ir



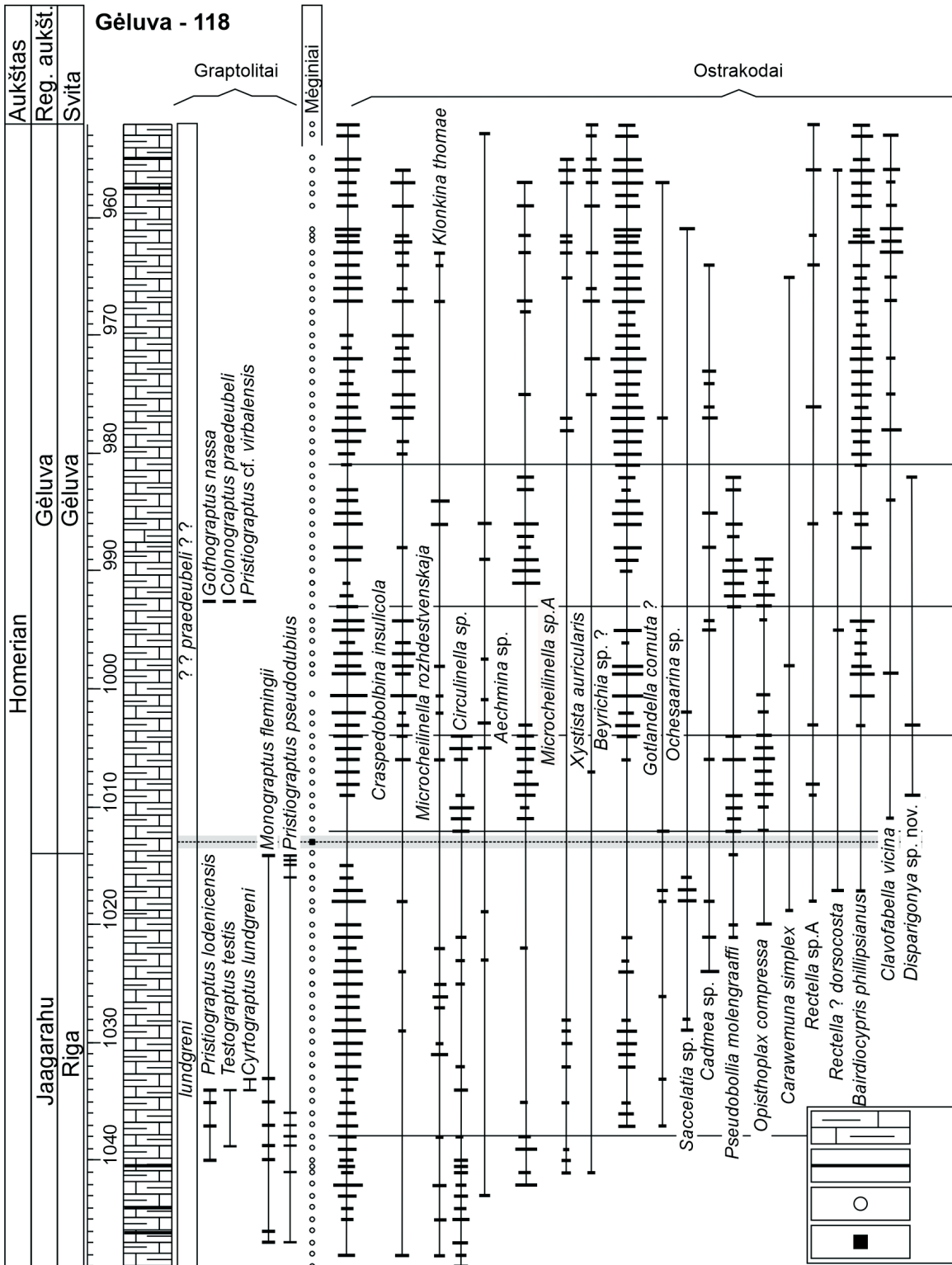
2 pav. Gręžinio Gėluva-118 ostrakodų mikrografijos iš skenuojančio elektroninio mikroskopo. *Craspedobolbina* (*Mitrobeyrichia*) *insulicola* Martinsson: A – kairioji geldelė, gylis 965 m; B – kairioji geldelė, gylis 978 m; C – patelės kairiosios geldelės vaizdas, gylis 966 m; D – pilvinės pusės vaizdas, gylis 965 m; E, F – *Beyrichia* sp. A: E – dešinioji geldelė, gylis 953 m; F – kairioji geldelė, gylis 956 m

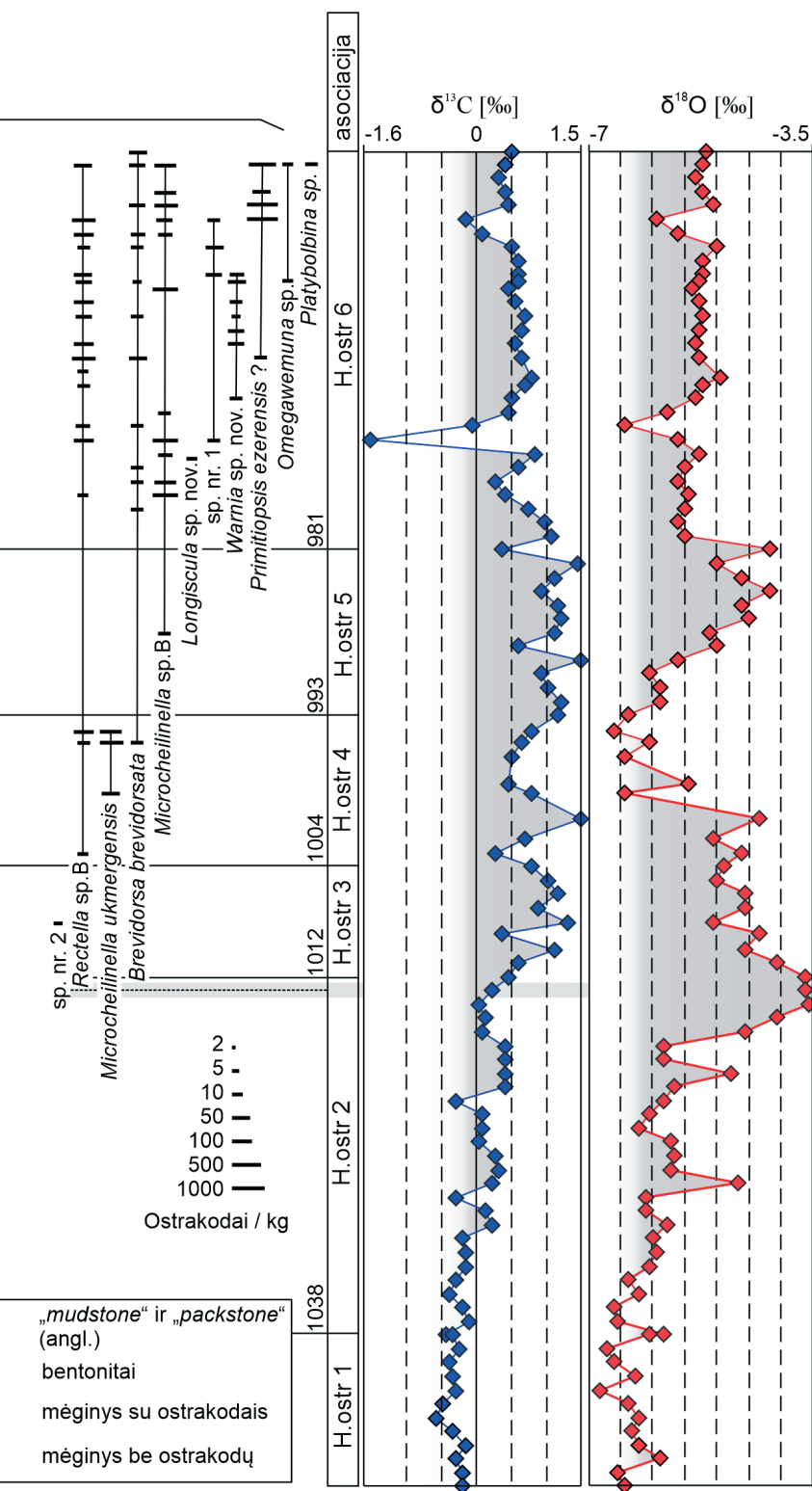
Fig. 2. Scanning electron microscope micrographs of ostracods from the Gėluva-118 drill core. *Craspedobolbina* (*Mitrobeyrichia*) *insulicola* Martinsson: A – Left valve, depth 965 m; B – Left valve, depth 978 m; C – View of the female left valve, depth 966 m; D – Ventral view, depth 965 m; E, F – *Beyrichia* sp. A: E – Right valve, depth 953 m; F – Left valve, depth 956 m



3 pav. Gręžinio Gėluva-118 ostrakodų mikrografijos iš skenuojančio elektroninio mikroskopo. *Gotlandella?* sp. A – dešinioji geldelė, gylis 961,5 m; B – dešinioji geldelė; C – pilvinio krašto vaizdas, gylis 961,5 m; D – nugarinio krašto vaizdas, gylis 961,5 m; E – Gen. A sp. A, kairioji geldelė, gylis 957 m; F – Gen B sp. B, kairioji geldelė, gylis 1 008 m

Fig. 3. Scanning electron microscope micrographs of ostracods from the Gėluva-118 drill core. *Gotlandella?* sp. A – Right valve, depth 961.5 m; B – Right valve; C – Ventral margin view, depth 961.5 m; D – Dorsal margin view, depth 961.5 m; E – Gen. A sp. A, left valve, depth 957 m; F – Gen. B sp. B, left valve, depth 1 008 m

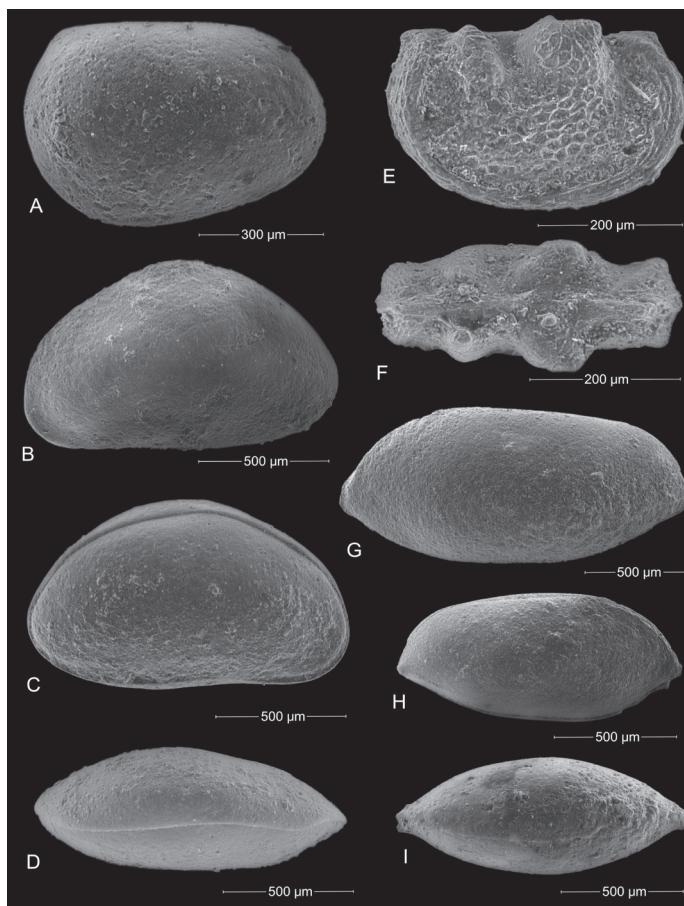




5 pav. Litologijos, graptolitų, ostrakodų ir išskirtų ostrakodų bendrijų (išskirtos 99 % reikšmingumo lygmeniu) stratigafinis pasiskirstymas, karbonatinių uolienų $\delta^{13}\text{C}$ ir $\delta^{18}\text{O}$ dėsningumai (pagal Rinkevičiūtę ir kt., 2022)

Fig. 5. Stratigraphic distribution of lithology, graptolites, ostracods, and ostracod compositional assemblages (distinguished by a 99 % significance level), carbonate $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ trends)

4 pav. Gręžinio Gėluva-118 ostrakodų mikrografijos iš skenuojančio elektroninio mikroskopo. A – *Circulinella silurica* Schallreuter ir Hinz-Schallreuter, kairioji geldelė, gylis 1 004 m; B–D – *Wenlockiella phillipsianus* (Jones et Holl): B – kairiosios geldelės vaizdas, gylis 994,2 m; C – dešinėsios geldelės n. vaizdas, D – nugarinės pusės vaizdas, gylis 994,2 m; E, F – *Klonkina thomae* Schallreuter: E – dešinėsios geldelės vaizdas, gylis 1 022 m; F – nugarinės pusės vaizdas, gylis 1 026 m; G–I – *Cadmea* sp. A: G – kairioji geldelė, gylis 964 m; H – dešinėsios geldelės vaizdas, gylis 964 m; I – nugarinio krašto vaizdas, gylis 1 021 m Fig. 4. Scanning electron microscope micrographs of ostracods from the Gėluva-118 drill core. A – *Circulinella silurica* Schallreuter and Hinz-Schallreuter, left valve, depth 1 004 m; B–D – *Wenlockiella phillipsianus* (Jones et Holl): B – Left valve view, depth 994.2 m; C – Right valve view; D – Dorsal view, depth 994.2 m; E, F – *Klonkina thomae* Schallreuter: E – Right valve view, depth 1 022 m; F – Dorsal view, depth 1 026 m; G–I – *Cadmea* sp. A: G – Left valve, depth 964 m; H – Right valve view, depth 964 m; I – Dorsal margin view, depth 1 021 m



Mulde / *lundgreni* bioįvykio bei pirmojo homerio ekskurso pradžia.

H.ostr 3 ostrakodų bendrija koreliuoja su pirmojo homerio ekskurso pirmąja (kylančiąja) dalimi (1 012–1 005 m). Iš viso bendriją sudarė 16 rūšių. Kaip ir H.ostr 1 bei H.ostr 2, dominuoja *Craspedobolbina insulicola* (34 %) rūšis, tačiau bendras fosilijų skaičius ir šios rūšies indėlis į bendrijos sudėtį gerokai mažesnis. Kitos svarbios bendrijos rūšys yra *Cavellina plana* (19 %), *Opisthoplax compressa* (13 %), *Pseudobolbia krekenuaiensis* (10 %) ir *Circulinella silurica* (19 %). Kiekviena iš likusių rūšių sudaro mažiau nei po 1 %. Šiame intervale taip pat aptiktos trys naujos rūšys, kurių nebuvo ankstesniuose intervaluose, o tai rodo tolesnį vietinės įvairovės didėjimą.

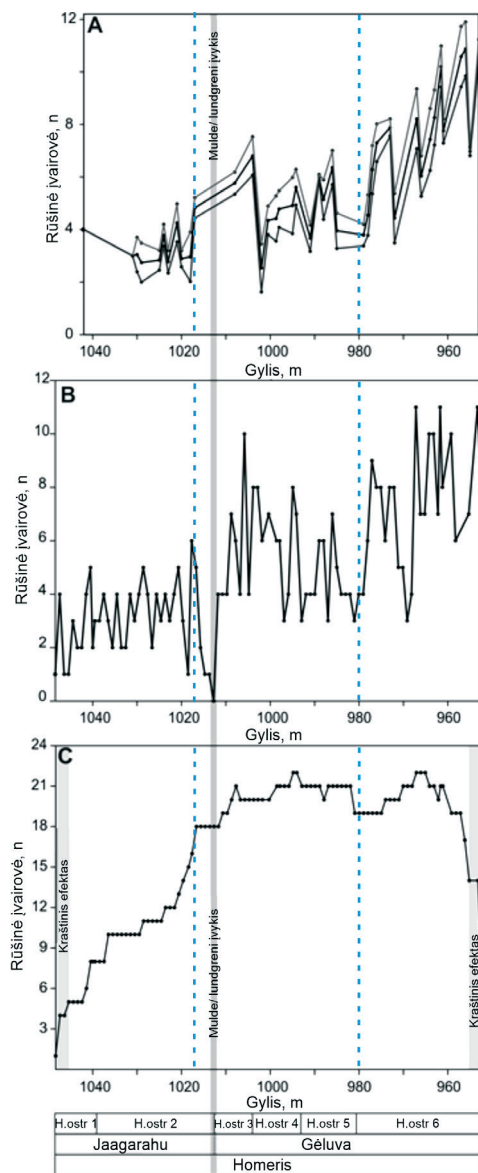
H.ostr 4 ostrakodų bendrijoje (1 004–994,2 m) nustatyta 20 ostrakodų rūšių. Dominuoja *Craspedobolbina insulicola* (68 %), kuri šioje bendrijoje pasiekia absoliutų gausos piką, – rasta 5 856 šios rūšies fosilijos, sudarančios 23,8 % visų tiriamame intervale aptiktų fosilijų. Kitos bendrijos sudėčiai svarbios rūšys – *Gotlandella?* sp. (22 %), *Microcheilinella rozhdestvenskaja* (4 %) ir *Wenlockiella phillipsianus* (3 %). Likusios 16 bendrijai priklausančių rūšių sudaro mažiau nei po 1 %. Šioje bendrijoje taip pat aptiktos trys rūšys, kurių ankstesniuose intervaluose nenustatyta.

H.ostr 5 ostrakodų bendriją (993–980 m) sudaro 15 rūšių. Ši bendrija nuo ankstesnių skiriasi ryškiu rūšinės sudėties pasikeitimu ir tolesniu bendrijos persitvarkymu.

Gotlandella? sp. (34 %) kartu su *Craspedobolbina insulicola* (33 %) tampa kodominantinėmis rūšimis. Svarbi šios bendrijos rūšis yra *Cavellina plana* (22 %), taip pat aptinkamos *Pseudobolbia krekawaiensis* (6 %), *Opisthoplax compressa* (3 %) ir *Klonkina thomae* (1 %). Likusios rūšys sudaro mažiau nei po 1 %. Keturių rūšių, aptiktų ankstesnėse bendrijose, šioje ir H.ostr 6 bendrijose nerasta, tačiau nustatyta viena nauja rūšis.

H.ostr 6 bendrija (981–952,1 m) ryškiai skiriasi tiek nuo H.ostr 5, tiek nuo kitų bendrijų. Jai būdinga didelė rūšinė įvairovė – iš viso nustatytos 25 ostrakodų rūšys. Dominuojančia tampa nauja *Gotlandella?* sp. (56,7 %) rūšis, svarbi išlieka *Craspedobolbina insulicola* (25,6 %). Taip pat reikšmingos *Wenlockiella phillipsianus* (5 %), *Microcheilinaella rozhdstvenskaja* (4 %), *Clavobabellia?* sp. (2 %), *Primitiopsis ezerensis* (2 %) ir *Nyhamnella?* sp. n. (1 %) rūšys. Likusios sudaro mažiau nei po 1 %. Šioje bendrijoje aptiktos šešios naujos rūšys. *Gotlandella* genties (šm. *Cavellinidae*) individų gausos didėjimas viršutinėje tirtu intervalo dalyje sutampa su jūros lygio regresijos sąlygomis, nustatytomis remiantis integruotos stratigrafijos duomenimis (Rinkevičiūtė ir kt., 2022). Tai atitinka šio taksono ekologines ypatybes, nes *Gotlandella* siejama su seklios jūros aplinka (Crasquin-Soleau ir kt., 2006).

Įvertinta pavyzdžių lokali standartizuota išretinta ostrakodų rūšinė įvairovė (alfa lygio) (6 pav., A), stebėta kiekvieno mėginio rūšių gausa (6 pav., B) ir tęstinė rūšių gausa mėginiuose (6 pav., C). Standartizuotos išretintos įvairovės laiko eilutė gali būti suskirstyta į tris intervalus. Pirmasis atitinka laikotarpį prieš Mulde / *lundgreni* bioįvykį ir pasižymi gana stabilia, tačiau žema rūšine įvairove. Antrasis intervalas žymi laikotarpį iškart po Mulde / *lundgreni* bioįvykio: 1 018–980 m intervale stebimas staigus rūšinės įvairovės padidėjimas, panašaus lygio jis išlieka visame šiame intervale. Trečiasis intervalas sutampa su H.ostr 6 bendrijos zona ir pasižymi didėjančia lokali įvairovės tendencija (980–953 m). Iš standartizuoto išretinimo



6 pav. Ostrakodų rūšinė įvairovė: A – standartizuotų pavyzdžių išretinta įvairovė su $\pm \sigma$ pasitikėjimo ribomis (cenzuso lygis = 142); B – kiekviename mėginyje stebėtas rūšių gausumas; C – tęstinis rūšių gausumas mėginiuose; intervalo pradžioje ir pabaigoje pastebimas kraštinis efektas, todėl šias dalis reikia interpretuoti atsargiai. Šviesiai mėlyna spalva pažymėtos išskirtų įvairovės intervalų ribos (pagal Rinkevičiūtė ir kt., 2022)

Fig. 6. Ostracod species diversity: A – rarefied per sample species richness with $\pm \sigma$ confidence limits (census level = 142); B – per sample observed species richness; C – range-through species richness; the beginning and end of the record show an edge effect, therefore these parts should be interpreted with care

grafiko (6 pav., A) matyti, kad Mulde / *lundgreni* bioįvykio sukeltas ostrakodų bendrijos sutrikdymas turėjo trumpalaikį poveikį lokalių įvairovės dinamikai.

Neapdorota rūšinė įvairovė rodo didesnius ir ryškesnius svyravimus (6 pav., B). Vis dėlto aiškiai išryškėja viena svarbi kiekybinė tendencija – perėjimas nuo žemos rūšinės įvairovės laikotarpio prieš Mulde / *lundgreni* bioįvykį (*Jagaraho* (*Jaagarahu*) regioninis aukštas) prie didesnės rūšinės įvairovės viršutinio homerio metu (*Gėluvos* regioninis aukštas). Pačioje Mulde / *lundgreni* bioįvykio pradžioje stebimas staigus įvairovės sumažėjimas: visame tirtame intervale nustatytas tik vienas mėginys (1 013 m gylyje), kuriame ostrakodų nerasta. Jis buvo paimtas iškart po paskutinio aptikto *C. lundgreni* graptolito, kurio pasirodymas žymi *lundgreni* graptolitų biozoną. Po šio staiga įvairovės sumažėjimo neapdorota rūšinė įvairovė vėl padidėja ir pasiekia prieš išmirimą buvusį ar dar aukštesnį rūšinės įvairovės lygį.

Tęstinio intervalo rūšinė įvairovė atspindi lokalią rūšinę įvairovę, darant prielaidą, kad rūšis tarp pirmojo ir paskutiniojo jos pasirodymo egzistavo visą laiką. Tokiu atveju mėginiai, kuriuose konkrečios rūšies neaptikta, tačiau jie patenka tarp pirmojo ir paskutiniojo rūšies pasirodymo intervalų, laikomi teigiamais šios rūšies buvimo atžvilgiu. Tęstinio intervalo rūšinės įvairovės kreivė (6 pav., C) rodo labai panašią tendenciją, kaip ir pirmosios dvi analizės: minimali rūšinė įvairovė stebima prieš pat Mulde / *lundgreni* bioįvykį, o viršutinis homeris pasižymi didele rūšine įvairove. Mažas stebėtų rūšių skaičius tiriamo intervalo pradžioje ir pabaigoje greičiausiai susijęs su rūšių pasirodymo intervalų spragomis arba vadinamuoju kraštiniu efektu. Nepaisant to, tęstinio intervalo rūšinės įvairovės grafike aiškiai matomas rūšinės įvairovės didėjimas netrukus po Mulde / *lundgreni* bioįvykio. Pasiekusi aukščiausias reikšmes, įvairovė išlieka panašaus lygio iki pat tiriamo intervalo pabaigos. Tai kontrastuoja su standartizuotos išretintos ir neapdo-

rotos rūšinės įvairovės rezultatais, rodančiais ryškesnius svyravimus.

Šie skirtumai leidžia daryti prielaidą, kad lokaliu mastu retos rūšys patyrė staigius ekologinius pokyčius (laikinus pasirodymus ir išnykimus), kurie reikšmingai veikė bendrus įvairovės rodiklius ir jų grafikus, tačiau turėjo gerokai mažesnę įtaką tęstinio intervalo rūšinės įvairovės rezultatams.

DISKUSIJA

Aprašyti gręžinio Gėluva-118 paleobendrijų dėsningumai suteikia naujų įžvalgų apie viduriniojo homerio Mulde / *lundgreni* bioįvykį. Šis tyrimas pateikia aukštos (dešimčių tūkstančių metų) ir itin aukštos (tūkstančių metų Mulde / *lundgreni* išmirimo intervale; 1 008–1 018,8 m gylysi) laikinės raiškos vaizdą, atskleidžiantį bioįvykio poveikį karbonatiniams bentoso organizmams.

Ostrakodų rūšinės sudėties ir gausos tirtame intervale duomenys rodo, kad Mulde / *lundgreni* bioįvykis, priešingai nei pelaginės faunos atveju, masinio bentoso faunos išmirimo nesukėlė. Perėjimas iš vidurinės *lundgreni* graptolitų biozonos į vėlyvąjį uenlokį pasižymi stabiliu lokalių rūšinės įvairovės didėjimu. Šios išvados grindžiamos tiek standartizuotos išretintos, tiek neapdorotos rūšinės įvairovės duomenimis, kurie rodo, kad Mulde / *lundgreni* bioįvykis turėjo stiprų, tačiau trumpalaikį poveikį ostrakodų įvairovei.

Svarbu pabrėžti, kad 2–3 kartus žemesnės raiškos duomenys būtų neleidę identifikuoti laikino ostrakodų rūšinės įvairovės sumažėjimo epizodo. Vienintelis mėginys (1 013 m gylyje), kuriame ostrakodų fosilijų neaptikta, būtų likęs nepastebėtas, o papildomas itin aukštos raiškos mėginių ėmimas (kas 0,2 m) Mulde / *lundgreni* bioįvykio išmirimo fazėje nebūtų atliktas. Aukštos raiškos duomenys rodo, kad bioįvykio poveikis bentoso faunai buvo itin staigus ir intensyvus.

Žemesne gausa pasižyminčių mėginių intervalas (1 014,4–1 012,6 m) stratigrafiškai koreliuoja su Ančios pluoštu, būdingu

atviro šelfo facijoms. Ši koreliacija pagrįsta viršutinėje Ančios pluošto dalyje (gręžinys Viduklė-61, 1 308 m) aptikto bentonito sluoksnio geochemine sudėtimi, atitinkančia Grotlingbo bentonitą Gotlande (Kiipli ir kt., 2008). Ančios pluoštas pasižymi vyraujančiomis anoksinėmis sąlygomis, jame beveik visiškai nėra bentoso faunos, jis sudarytas iš mikrosluoksniuotų klinčių (Radzevičius ir kt., 2014 a). Šie duomenys rodo, kad ribojančios bedegumonės sąlygos buvo išplitusios ir į seklesnes baseino dalis, stipriai paveikdamos bentoso fauną. Bentoso ir pelaginės faunos nebuvimas gali rodyti ir aplinkos toksiskumą ar kitų stresorių poveikį (Kozłowski, 2020).

Mažos gausos intervalas (maždaug 2,2 m storio) rodo, kad Mulde / *lundgreni* bioįvykio sukeltas stresas bentoso faunai geologiniu mastu buvo trumpalaikis. Šis streso intervalas atitinka su trumpalaikiais Žemės orbitos ekscentriciteto svyravimais susijusio penktojo lygio ciklo trečiąją dalį, t. y. apie 30–40 tūkst. m. trukmę (Radzevičius ir kt., 2014, 2017; Catuneanu, 2022). Remiantis ostrakodų įvairovės ir gausos duomenimis, bendrijų atsikūrimas po streso epizodo taip pat vyko tūkstančius ar dešimtis tūkstančių metų.

Tyrime įvertinti ostrakodų bendrijų pokyčiai Mulde / *lundgreni* bioįvykio metu, nustatyta šio bioįvykio intervalo struktūra (Rinkevičiūtė ir kt., 2025). Tam naudotas binarinis segmentavimo algoritmas (angl. *HespDiv*; metodo plėtinys), pritaikytas vienmačiams stratigrafiniams duomenims (Daumantas, Spiridonov, 2024). Remiantis ostrakodų duomenimis, išskirti penki etapai ir nustatytos jų trukmės: 1) iki įvykio (angl. *Before Event*); 2) griūties fazė (angl. *Collapse*) – apie 50 tūkst. m.; 3) maksimalaus streso fazė (angl. *Maximal Stress*) – apie 120 tūkst. m.; 4) atsigavimo fazė (angl. *Recovery*) – apie 80 tūkst. m.; 5) po įvykio (angl. *Post Event*). Bendra Mulde / *lundgreni* bioįvykio trukmė turėtų būti apie 260 tūkst. m. (pasikliauties intervalas 100–1 136 tūkst. m.), o tai gerokai mažiau, nei anksčiau manyti

1–2 mln. m. (Jeppsson, Calner, 2002; Cramer ir kt., 2012).

Mulde / *lundgreni* bioįvykis dažniausiai nagrinėtas remiantis pelaginės faunos duomenimis, o bentoso organizmų tyrimų vis dar trūksta (Cramer ir kt., 2012). Ankstesniuose darbuose rašoma, kad bentoso fauna patyrė nedidelius pokyčius arba išliko stabili, tačiau tokie teiginiai greičiausiai susiję su mažos raiškos duomenimis (Jeppsson ir kt., 1995). Ankstesni tyrimai Mulde / *lundgreni* bioįvykį siūlo laikyti stratigrafiniu artefaktu, susijusiu su dėl jūros lygio svyravimų įvykusiais biofacijų poslinkiais (Jarochowska, Munnecke, 2016 a; Jarochowska ir kt., 2016 b). Ostrakodai labiausiai paplitę sekliose, deguonies turtingose paleoaplinkose, bet vykstant šoniniam biofacijų poslinkiui ir gilesnėse baseino dalyse turėjo atsirasti daug gausesnės ir įvairesnės jų bendrijos. Vis dėlto šis tyrimas to nepatvirtina: ostrakodų gausa bioįvykio metu mažėja kelis kartus, o kai kurie mėginiai buvo visiškai tušti.

Bentoso ostrakodų bendrijų žlugimas, persitvarkymas ir perėjimas į naują būseną truko panašiai tiek, kiek ir vėlyvojo kvartero ledynmečių ciklai (Palacios ir kt., 2022). Po Mulde / *lundgreni* bioįvykio stebimas santykinis ostrakodų bendrijų stabilumas atitinka „koordinuotos stazės“ (angl. *coordinated stasis*) modelį, kuris aiškina ilgalaikį rūšių bendrijų stabilumą, pertraukiamą staigių pokyčių epizodų (Brett ir kt., 1966; Brett, Baird, 1995). Be to, tyrimas patvirtina santykinai greitą Mulde / *lundgreni* bioįvykio eigą, pirmą kartą aprašytą remiantis pelaginių graptolitų ir pusiau pelaginių konodontų fosilijų duomenimis. Atskleistas reikšmingas ir greitas bioįvykio poveikis bentoso ekosistemoms ir vėlesnio jų persitvarkymo dinamikai. Tai rodo, kad kaitos tempas buvo panašus visose jūrinėse aplinkose.

Mėginiai, kurie stratigrafiškai vėlesni nei žemos gausos intervalas (nuo 1 012,8 m), pasižymi tokia pat arba didesne rūšine įvairove nei prieš Mulde / *lundgreni* bioįvykį. Panašus lokalus ir laikinas ostrakodų išnykimas stebėtas po Kinnekulle K-bentonito katastrofiško

išsiveržimo vėlyvajame ordovike Estijoje, kur bendrųjų atsikūrimas taip pat vyko labai greitai (maždaug per 10 tūkst. m.) (Perrier ir kt., 2012).

Statistinė rekurencijos analizė parodė, kad vienintelis statistiškai reikšmingas bendrųjų panašumo sumažėjimas sutampa su Mulde / *lundgreni* bioįvykiu (Rinkevičiūtė ir kt., 2022). Be to, pastebimi mažesnio masto svyravimai, galimai susiję su ketvirtojo (100–120 tūkst. m.) ir penktojo (405 tūkst. m.) lygmens jūros lygio ciklais. Tai rodo galimą ryšį tarp paleobendrųjų dinamikos ir hierarchinių astronominių veiksnių.

Palyginus jūros lygio ir ostrakodų bendrųjų rekurencijos dažnių kreives matyti, kad Mulde / *lundgreni* bioįvykis galėjo būti susijęs su beveik tobulu ketvirtojo ir penktojo lygmens ciklų žemiausių reikšmių sutapimu. Antroji ketvirtojo lygmens regresija žymi pripažintą stratigrafinę ribą viršutiniame homeryje (Ho2–Ho3) (Cramer ir kt., 2011) (3 pav.), ir sutampa su *ludensis* graptolitų biozono pradžia. Tikėtina, kad ši regresija turėjo gerokai silpnesnį poveikį ostrakodų bendrijoms dėl ketvirtojo ir penktojo lygmens ciklų regresijų nesutapimo.

Pagrindiniai persitvarkymo taškai ostrakodų įvairovės duomenyse ir Milankovičiaus jūros lygio ciklai sutampa, o tai palaiko hipotezę, kad orbitiniai Žemės parametrai buvo vienas pagrindinių veiksnių, turėjusių įtakos ne tik pelaginėms ir pusiau pelaginėms (Spiridonov ir kt., 2016; Crampton ir kt., 2018), bet ir silūro bentoso ekosistemoms.

Staigius bendrųjų perėjimus į alternatyvias būsenas galima aiškinti remiantis vadinamąja bendrųjų dinamikos teorija (angl. *sloshing bucket*). Pagal ją ekosistemos persitvarko tik veikiamos stiprių (dažniausiai išorinių) veiksnių, o po perturbacijos ekosistema įgyja naują, santykinai stabilią būseną (Eldredge, 2003). Panašūs kelių lygmenų būsenų perėjimai aprašyti BB pradžios kono dontų paleobendrųjų dinamikoje, kur vienas pagrindinių šiuos pokyčius lemiančių veiksnių taip pat yra Milankovičiaus ciklai (Spiridonov ir kt., 2020 a, b).

Kalbant apie pelagines ir hemipelagines rūšis, Mulde / *lundgreni* bioįvykio intervalo dinamika dažnai priskiriama „masinio retumo“ (angl. *mass rarity*) kategorijai (Radzevičius ir kt., 2014; Spiridonov, 2017b), pagal kurią ekosistemos pusiausvyros sutrikdymas lemia sumažėjusią faunos gausą ir lokalią rūšinę įvairovę (Hull ir kt., 2015). Išanalizavus ostrakodų gausos ir įvairovės tendencijas galima teigti, kad, nepaisant ankstesnių tyrimų išvadų, nurodančių, jog Mulde / *lundgreni* bioįvykis bentoso organizmus paveikė minimaliai (Jeppsson, Calner, 2002), ši koncepcija gali būti taikoma ir bentoso faunai.

IŠVADOS

Vidurinio ir viršutinio homerio ostrakodų paleobendrijos suskirstytos į šešias skirtingas asociacijas. Jų ribos sutampa su ketvirtos ir penktos eilės ciklų svyravimais, kurie atitinka ilgųjų (405 tūkst. m.) ir trumpųjų (100–120 tūkst. m.) Milankovičiaus ekscentriciteto ciklų periodiškumą. Palyginus ketvirtos ir penktos eilės ciklų ir ostrakodų bendrųjų kaitos kreives matyti, kad Mulde / *lundgreni* bioįvykis galėjo būti nulemtas minėtų ciklų žemiausių reikšmių sutapimo. Dėl to galėjo įvykti ypač didelės amplitudės jūros lygio regresija ir su ja susiję faunos bendrųjų pokyčiai. Ostrakodų rūšių lokalsios įvairovės analizė parodė, kad Mulde / *lundgreni* bioįvykis turėjo stiprų, tačiau trumpalaikį poveikį α įvairovei. Išskirtų asociacijų įvairovė ir gausa buvo didesnė nei paties bioįvykio metu.

Iš tyrimo duomenų pašalinus dominuojančią *Craspedobolbina insulicola* rūšį, statistinė kiekybinė analizė parodė, kad Mulde / *lundgreni* bioįvykio metu įvyko staigus perėjimas nuo mažiau stabilių prie stabilesnės sudėties ostrakodų bendrųjų. Palyginus rūšinę ostrakodų bendrųjų sudėtį prieš Mulde / *lundgreni* bioįvykį ir po jo, matyti, kad rūšinė ostrakodų sudėtis pasižymi santykinu stabilumu visame tirtame intervale, kurį pertraukia trumpalaikis (dešimčių tūkstančių metų trukmės) staigių pokyčių epizodas.

Literatūra

- Benson, R. H., Berdan, J. M., & Bold, W. A. Treatise on invertebrate paleontology / Part Q, Arthropoda 3: crustacea, ostracoda. New York: Raymond Cecil Moore Publisher, Geological society of America; University of Kansas, 1961.
- Brett, C. E., & Baird, G. C. Coordinated stasis and evolutionary ecology of Silurian to Middle Devonian faunas in the Appalachian Basin. In D. H. Erwin and R. L. Anstey (Eds.) *New Approaches to Speciation in the Fossil Record*. Columbia University Press, 1995, p. 285–315.
- Brett, C. E., Ivany, L. C., & Schopf, K. M. Coordinated stasis: An overview. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1966, 12, p. 1–20.
- Brandão, S. N., Antonietto, L. S., Nery, D. G., Pereira, J. S., Praxedes, R. A., Santos, S. G., Karanovic, I. World Ostracoda Database. Accessed through: World Register of Marine Species, 2024 (prieiga internete: <https://www.marinespecies.org>).
- Catuneanu, O. Principles of Sequence Stratigraphy. Elsevier, 2022, p. 1–454.
- Chmielewski, C. Die Leperditien der obersilurischen Geschiebe des Gouvernement Kowno und der Provinzen Ost- und Westpreussen. In *Schriften der Physikalisch-Ökonomischen Gesellschaft zu Königsberg*, 1900, p. 1–59.
- Cocks, L. R. M., & Torsvik, T. H. Baltica from the late Precambrian to mid-Palaeozoic times: the gain and loss of a terrane's identity. *Earth-Science Reviews*, 2005, 72 (1–2), p. 39–66 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.04.001>).
- Cramer, B. D., Brett, C. E., Melchin, M. J., Maennik, P., Kleffner, M. A., McLaughlin, P. I., [...] & Saltzman, M. R. Revised correlation of Silurian Provincial Series of North America with global and regional chronostratigraphic units and $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ chemostratigraphy. *Lethaia*, 2011, 44 (2), p. 185–202 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.2010.00234.x>).
- Cramer, B. D., Condon, D. J., Söderlund, U., Marshall, C., Worton, G. J., Thomas, A. T., [...] & Jeppsson, L. U-Pb (zircon) age constraints on the timing and duration of Wenlock (Silurian) paleocommunity collapse and recovery during the “Big Crisis”. *Bulletin*, 2012, 124 (11–12), p. 1 841–1 857 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1130/B30642.1>).
- Cramer, B. D., Kleffner, M. A., & Saltzman, M. R. The late Wenlock Mulde positive carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$) excursion in North America. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar* (GFF), 2006, 128 (2), p. 85–90 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1080/11035890601282085>).
- Cramer, B. D., Vandenbroucke, T. R., & Ludvigson, G. A. High-Resolution Event Stratigraphy (HiRES) and the quantification of stratigraphic uncertainty: Silurian examples of the quest for precision in stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 2015, 141, p. 136–153 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.011>).
- Crampton, J. S., Meyers, S. R., Cooper, R. A., Sadler, P. M., Foote, M., & Harte, D. Pacing of Paleozoic macroevolutionary rates by Milankovitch grand cycles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115 (22), p. 5 686–5 691 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1073/pnas.1714342115>).
- Crasquin, S., & Horne, D. J. The palaeopsychrosphere in the Devonian. *Lethaia*, 2018, 51, p. 547–563 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1111/let.12277>).
- Crasquin-Soleau, S., Vaslet, D., & Le Nindre, Y. M. Ostracods of the Permian-Triassic Khuff Formation, Saudi Arabia: palaeoecology and palaeobiogeography. *GeoArabia*, 2006, 11 (1), p. 55–76 (prieiga internete: <https://doi.org/10.2113/geoarabia110155>).
- Daumantas, L., & Spiridonov, A. Hespdiv: an R package for spatially constrained, hierarchical and contiguous regionalization in palaeobiogeography. *Palaeontology*, 2024, 67 (e12 702), p. 1–22.
- Eichwald, E. Lethaea Rossica ou Paléontologie de la Russie, Décrite et Figurée par Edouard d'Eichwald. Première Volume, Second section de l'ancienne Période, contenant la continuation. *Flore de la Faune de l'ancienne Période, savoir les Mollusques jusqu'aux Reptiles*. Stuttgart: E. Schweizerbart, 1860, p. 680–1 657.
- Eldredge, N. The Slashing Bucket: how the Physical Realm Controls Evolution. In *Evolutionary Dynamics: Exploring the Interplay of Selection, Accident, Neutrality, and Function* (SFI Studies in the Sciences of Complexity Series). New York: Oxford University Press, 2003.
- Green, O. R. A. Manual of Practical Laboratory and Field Techniques in Palaeobiology, Springer-Science and Business Media. B. V. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. Kluwer Academic Publishers, 2001.

- Hisinger, W. Anteckningar i Physik och Geognosie under Resor uti Sverige och Norrige. *Sjunde Häftet. Bidrag till Sveriges Geognosie* [Forsättning af Anteckningar i Physik och Geognosie m. m. P.A.]. Stockholm: Norstedt & Söner, 1840, p. 1–147.
- Horne, D. J. Key events in the ecological radiation of the Ostracoda. *The Paleontological Society Papers*, 2003, 9, p. 181–202.
- Hull, P. M., Darroch, S. A., & Erwin, D. H. Rarity in mass extinctions and the future of ecosystems. *Nature*, 2015, 528 (7 582), p. 345–351 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1038/nature16160>).
- James, N. A., & Matteson, D. S. An R package for nonparametric multiple change point analysis of multivariate data. *Journal of Statistical Software*, 2014, 62.
- Jarochowska, E., & Munnecke, A. Late Wenlock carbon isotope excursions and associated conodont fauna in the Podlasie Depression, eastern Poland: a not-so-big crisis? *Geological Journal*, 2016 a, 51 (5), p. 683–703 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1002/gj.2674>).
- Jarochowska, E., Munnecke, A., Frisch, K., Ray, D. C., & Castagner, A. Faunal and facies changes through the mid Homerian (Late Wenlock, Silurian) positive carbon isotope excursion in Podolia, western Ukraine. *Lethaia*, 2016 b, 49 (2), p. 170–198 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1111/let.12137>).
- Jeppsson, L. Silurian oceanic events: summary of general characteristics. In E. Landing and M. E. Johnson (Eds.) *Silurian Cycles: Linkages of Dynamic Stratigraphy with Atmospheric, Oceanic and Tectonic Changes* New York State Museum Bulletin: James Hall Centennial Volume, 1998, 491, p. 239–257.
- Jeppsson, L., Aldridge, R. J., & Dorning, K. J. Wenlock (Silurian) oceanic episodes and events. *Journal of the Geological Society*, 1995, 152 (3), p. 487–498 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1144/gsjgs.152.3.0487>).
- Jeppsson, L., & Calner, M. The Silurian Mulde event and a scenario for secundo–secundo events. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2002, 93, p. 135–154 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1017/S0263593300000377>).
- Kaljo, D., Boucot, A. J., Corfield, R. M., Le Herisse, A., Koren, T. N., Kriz, J., et al. Silurian bio-events. In O. H. Walliser (Ed.) *Global Events and Event Stratigraphy in the Phanerozoic*. Berlin: Heidelberg, Springer, 1996, p. 173–224.
- Kaljo, D., Hints, L., Männik, P., & Nölvak, J. The succession of Hirnantian events based on data from Baltica: brachiopods, chitinozoans, conodonts, and carbon isotopes. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 2008, 57 (4), p. 197–218 (prieiga internete: <https://doi.org/10.3176/earth.2008.4.01>).
- Kiipli, T., Radzevičius, S., Kallaste, T., Motuza, V., Jeppsson, L., & Wickström, L. M. Wenlock bentonites in Lithuania and correlation with bentonites from sections in Estonia, Sweden and Norway. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar* (GFF), 2008, 130 (4), p. 203–210 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1080/11035890809452773>).
- Kozłowski, W. Marine snow and epipelagic suspensoids in the Reda carbonates and a pronounced mid-Ludfordian (Silurian) CIE in the axis of the Baltic Basin (Poland). *Acta Geologica Polonica*, 2020, 70 (4), p. 529–567.
- Lazauskienė, J., Stephenson, R., Šliaupa, S., & van Wees, J. D. 3-D flexural modelling of the Silurian Baltic Basin. *Tectonophysics*, 2002, 346 (1–2), p. 115–135 (prieiga internete: [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00231-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00231-1)).
- Martinsson, A. Ostracodes of the family Beyrichiidae from the Silurian of Gotland. *Acta Universitatis Upsaliensis*, 1962, 367 p.
- Meidla, T. Late Ordovician Ostracodes of Estonia. Tartu: Tartu University Press, 1996.
- Mergl, M., Frýda, J., & Kubajko, M. Response of organophosphatic brachiopods to the mid-Ludfordian (Late Silurian) carbon isotope excursion and associated extinction events in the Prague Basin (Czech Republic). *Bulletin of Geosciences*, 2018, 93 (3), p. 369–400.
- Mohibullah, M., Afzal, J., Williams, M., Meidla, T., Siveter, D. J., & Zalasiewicz, J. A. Ostracods from Upper Ordovician (Katian) carbonate lithofacies in southwest Scotland. *Geological Magazine*, 2010, 147 (6), p. 919–939 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1017/S0016756810000385>).
- Neckaja, A. I. Ordovician and Silurian Ostracods of the USSR (families Schmidtellidae, Longisculidae and some new species from other families) [Остракоды Ордовика и Силура СССР]. *Works of NIGRY*, 1966, 251, p. 3–101.
- Neckaja, A. I. Ostracods of the Ordovician and Silurian of the USSR [Остракоды ордовика и силура СССР]. *Works of NIGRY*, 1973, 324, p. 3–104.
- Palacios, D., Hughes, P. D., García-Ruiz, J. M., & Andrés, N. The Quaternary ice ages. In *European Glacial Landscapes*. Elsevier, 2022, p. 9–18 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823498-3.00006-6>).

- Paškevičius, J. Zonation of Lithuanian Silurian graptolites and other faunal groups. *Geologija. Geografija*, 2019, 5, p. 86–100.
- Paškevičius, J., & Karatajūtė-Talimaa, V. Biostratigraphy and correlation of the Downton sediments of the Baltic region. *Silurian-Devonian boundary and Silurian biostratigraphy* [Биостратиграфия и корреляция даунтонских отложений Прибалтики. Граница силура и девона и биостратиграфия силура]. International symposium. Vilnius: Mokslas, 1971, 3, p. 175–185.
- Perrier, V., Meidla, T., Tinn, O., & Ainsaar, L. Biotic response to explosive volcanism: Ostracod recovery after Ordovician ash-falls. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 365, p. 166–183 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.09.024>).
- Pranskevičius, A. To the Paleontological characteristic of the Lower Silurian of the southern Baltic area (data of the Ostracoda study). In A. Grigelis (Ed.) *Palaeontology and stratigraphy of the Baltic and the Byelorussia*. Vilnius: Mintis, 1971, p. 61–68.
- Pranskevičius, A. Ostracods from the Upper Silurian of the southern Baltic region. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, 1972 a, 94 (3), p. 439–447.
- Pranskevičius, A. South Baltic Silurian Ostracoda. Vilnius: Lithuanian Scientific-Research Geological Institute. Vilnius: Mintis, 1972 b, p. 1–280.
- Pranskevičius, A. Silurian Podocopida of the South Baltic area. In A. Grigelis (Ed.) *The Fauna and Stratigraphy of Paleozoic and Mesozoic of Baltic and Byelorussia*. Vilnius: Mintis, 1975, p. 85–91.
- R Core Team. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2024 (prieiga internete: <https://www.R-project.org/>).
- Radzevičius, S., Spiridonov, A., & Brazauskas, A. Integrated middle-upper Homeric (Silurian) stratigraphy of the Viduklė-61 well, Lithuania. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* (GFF), 2014 a, 136 (1), p. 218–222 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1080/11035897.2013.866976>).
- Radzevičius, S., Spiridonov, A., Brazauskas, A., Norkus, A., Meidla, T., & Ainsaar, L. Upper Wenlock $\delta^{13}\text{C}$ chemostratigraphy, conodont biostratigraphy and palaeoecological dynamics in the Ledai-179 drill core (eastern Lithuania). *Estonian Journal of Earth Sciences*, 2014 a, 63 (4), p. 293–299 (prieiga internete: <https://doi.org/10.3176/earth.2014.33>).
- Radzevičius, S., Spiridonov, A., & Brazauskas, A. Application of wavelets to the cyclostratigraphy of the Upper Homeric (Silurian) Gėluva regional stage in the Viduklė-61 deep well (western Lithuania). *First International Congress on Stratigraphy at the cutting edge of Stratigraphy (STRATI-2013)*. Cham: Springer, 2014 b, p. 437–440 (prieiga internete: https://doi.org/10.1007/978-3-319-043647_84).
- Radzevičius, S., Spiridonov, A., Brazauskas, A., Dankina, D., Rimkus, A., Bičkauskas, G., [...] & Ainsaar, L. Integrated stratigraphy, conodont turnover and paleoenvironments of the Upper Wenlock and Ludlow of the Vilkaviškis-134 drill core (Lithuania). *Newsletters on Stratigraphy*, 2016, 49 (2), p. 321–336 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1127/nos/2016/0074>).
- Radzevičius, S., Tumakovaitė, B., & Spiridonov, A. Upper Homeric (Silurian) high-resolution correlation using cyclostratigraphy: an example from western Lithuania. *Acta Geologica Polonica*, 2017, 67 (2), p. 307–322.
- Rinkevičiūtė, S., Daumantas, L., Radzevičius, S., & Spiridonov, A. Bayesian analysis of ultra-high-resolution ostracod record reveals the tempo and structure of the Late Wenlock Mulde Event. *Lethaia*, 2025, 58 (1), p. 1–11 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1144/jgs2021-039>).
- Sarv, L. Early Cavellinids in the Silurian of the East Baltic. In D. Kaljo (Ed.) *Facies and Fauna of the Baltic Silurian*. Tallinn: Academy of Science of the Estonian SSR, Institute of Geology, 1977 a, p. 259–283.
- Sarv, L. On the Upper Silurian Ostracode stratigraphy in the Middle and South-East Baltic Area. In D. Kaljo (Ed.) *Facies and Fauna of the Baltic Silurian*. Tallinn: Academy of Science of the Estonian SSR, Institute of Geology, 1977 b, p. 159–178.
- Schallreuter, R. Silurische Hornsteine und Ostrakoden von Sylt. Hamburg: Mitteilungen Geologisch-Paläontologisches Instituts Universität, 1986, 61, p. 189–233.
- Schmidt, F. Untersuchungen über die silurische formation von Ehistland, Nord-Livland und Oesel. *Archiv für die Naturkunde Liv Ehist- und Kurlands*. Erste Serie. Dorpat: Zweiter Band, 1858, 248 p.
- Siveter, D. J. Ostracods in the Palaeozoic? *Senckenbergiana lethaea*, 2008, 88 (1), p. 1–9.
- Spiridonov, A. Recurrence and cross recurrence plots reveal the onset of the Mulde event (Silurian) in the abundance data for Baltic conodonts. *The Journal of Geology*, 2017, 125 (3), p. 381–398 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1086/691184>).

- Spiridonov, A., Brazauskas, A., & Radzevičius, S. The Role of Temporal Abundance Structure and Habitat Preferences in the Survival of Conodonts during the Mid-Early Silurian Ireviken Mass Extinction Event. *PLOS ONE*, 2015, 10 (4), p. 1–24.
- Spiridonov, A., Brazauskas, A., & Radzevičius, S. Dynamics of abundance of the mid- to Late Pridoli conodonts from the eastern part of the Silurian Baltic Basin: multifractals, state shifts, and oscillations. *American Journal of Science*, 2016, 316, p. 363–400.
- Spiridonov, A., Kaminskas, D., Brazauskas, A., & Radzevičius, S. Time hierarchical analysis of the conodont paleocommunities and environmental change before and during the onset of the Lower Silurian Mulde bioevent – A preliminary report. *Global and Planetary Change*, 2017 a, 157, p. 153–164 (prieiga internete: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.09.002>).
- Spiridonov, A., Samsonė, J., Brazauskas, A., Stankevič, R., Meidla, T., Ainsaar, L., & Radzevičius, S. Quantifying the community turnover of the Uppermost Wenlock and Ludlow (Silurian) conodonts in the Baltic Basin. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 2020 a, 549, p. 109–128 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.03.029>).
- Spiridonov, A., Stankevič, R., Gečas, T., Brazauskas, A., Kaminskas, D., Musteikis, P., [...] & Radzevičius, S. Ultra-high resolution multivariate record and multiscale causal analysis of Pridoli (Late Silurian): implications for global stratigraphy, turnover events, and climate-biota interactions. *Gondwana Research*, 2020 b, 86, p. 222–249 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.05.015>).
- Spiridonov, A., Stankevič, R., Gečas, T., Šilinskas, T., Brazauskas, A., Meidla, T., [...] & Radzevičius, S. Integrated record of Ludlow (Upper Silurian) oceanic geobioevents – Coordination of changes in conodont, and brachiopod faunas, and stable isotopes. *Gondwana Research*, 2017 b, 51, p. 272–288 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.08.006>).
- Truuver, K. Ostracod associations of the Ordovician-Silurian boundary interval in Baltoscandia. *Geology*. Tartu: Tartu University, 2021, 132 p.
- Vannier, J. M. C. The composition and palaeogeographical significance of the Ordovician ostracode faunas of southern Britain, Baltoscandia, and Ibero-Armorica. *Palaeontology*, 1989, 32, p. 163–222.
- Whatley, R. C. Patterns and rates of evolution among Mesozoic Ostracoda. *Developments in Palaeontology and Stratigraphy*, 1998, 11, p. 1 021–1 040.
- Whittingham, M., Spiridonov, A., & Radzevičius, S. Dynamic ecophenotypy in the Silurian Monograptidae (Graptolithina). *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2022, 113 (1), p. 29–38.
- Wilkinson, I., Wilby, P., Williams, P., Siveter, D., & Vannier, J. Ostracod carnivory through time. In A. M. T. Elewa (Ed.) *Predation in Organisms*. Berlin: Springer, 2007, p. 39–57.
- Williams, M., Perrier, V., Bennett, C., Hearing, T., Stocker, C., & Harvey, T. Ostracods: The ultimate survivors. *Geology Today*, 2015, 31 (5), p. 193–200 (prieiga internete: <https://doi.org/10.1111/gto.12108>).

SUMMARY

The effects of the Mulde / *lundgreni* bioevent (Silurian) on the benthic fauna remain insufficiently explored; the same applies to ostracods in the context of Silurian bioevents and broader ecological trends. This study investigates palaeocommunity patterns in the Gėluva-118 drill core and provides new insights into the Middle Homeric Mulde / *lundgreni* bioevent. It presents both high-resolution (tens of thousands of years) and ultra-high-resolution (thousands of years within the extinction interval of the Mulde / *lundgreni* event) analysis of the bioevent's impact on the calcified benthic organisms.

For the first time, ostracod associations within the Mulde / *lundgreni* bioevent interval are quantitatively defined, including phases of peak

stress, reorganization, and stabilization. This study represents the highest-resolution (<10 kyr) analysis of ostracods to date and provides one of the most detailed assessments of Silurian benthic faunas. It offers comprehensive results on the impact of the Mulde / *lundgreni* bioevent on benthic communities, particularly ostracods, within the broader framework of Silurian bioevents and ecological trends.

Quantitative evidence of periodic fluctuations in ostracod abundance and their underlying patterns is presented for the time. Although previous studies suggested a minimal impact on ostracods, this high-resolution quantitative analysis demonstrates a significantly stronger and ecologically meaningful influence on benthic communities within marine ecosystem dynamics.