

Gintarė Lukoševičiūtė, Simona Rinkevičiūtė, Liudas Daumantas
Vilniaus universiteto Geomokslų instituto Geologijos ir mineralogijos katedra

GEOLOGINIAI TYRIMAI GOTLANDO SALOJE: KĄ ATSKLEIDŽIA SILŪRO NUOSĖDOS

Anotacija

Gotlando sala (Švedija) geologams gerai žinoma dėl silūro metu susidariusių uolienų ir jose gausiai išlikusių fosilijų. 2025 m. rugsėjo mėnesį Vilniaus universiteto Chemijos ir geomokslų fakulteto Geomokslų instituto Geologijos ir mineralogijos katedros (GMK) mokslo darbuotojai dr. Simona Rinkevičiūtė ir dr. Liudas Daumantas dalyvavo mokslinėje ekspedicijoje Gotlando saloje. Jos tikslas – Mulde / *lundgreni* bioįvykio priežastingumo mechanizmų tyrimai, vykdant projektą „Inovatyvi bioįvykių analizė: LIBS spektroskopijos ir Bajeso metodų integracija Mulde / *lundgreni* įvykio tyrimuose“ (Nr. MSF-JM-11/2025).

Abstract

The island of Gotland (Sweden) is well known for its well-preserved Silurian rocks. In September 2025, researchers Dr. Simona Rinkevičiūtė and Dr. Liudas Daumantas from the Department of Geology and Mineralogy at Vilnius University participated in a scientific expedition to Gotland to expand the scope of the research problem – the causal mechanisms of the Mulde / *lundgreni* bioevent for an ongoing project, “Innovative bioevent analysis: Integration of LIBS spectroscopy and Bayesian methods in the study of the Mulde / *lundgreni* Event” (No. MSF-JM-11/2025).



1 pav. Liudas Daumantas (kairėje) ir Simona Rinkevičiūtė prie Versendejoiko atodangos. Simonos Rinkevičiūtės nuotr. Fig. 1. L. Daumantas (left) and S. Rinkevičiūtė at the Varsändeojk outcrop. Photo by S. Rinkevičiūtė

ĮVADAS

Gotlando salos ekspedicijoje Vilniaus universiteto GMK mokslininkai (1 pav.) dalyvavo kartu su kolegomis iš Kembridžo (Jungtinė Karalystė) ir Erlangenio (Vokietija). Jos tikslas – pagerinti supratimą apie Mulde / *lundgreni* bioįvykį – geografiškai išplėsti aukštos rezoliucijos tyrimus ir, naudojant lazeriu indukuotos plazmos spektroskopiją (LIBS), įvertinti jo mechanizmą. Lauko darbų metu iš šiuo požiūriu dar netyrinėtų vietovių buvo surinkti uolienų pavyzdžiai, jų pagrindu sudarytos naujos ostrakodų rūšių įvairovės ir paplitimo duomenų bazės bei, pritaikius įvairius statistinius metodus, pagilintas supratimas apie šį silūro bioįvykį ir jo metu vykusią faunos pasiskirstymo ir gausos dinamiką.

GOTLANDO SALOS GEOLOGIJA

Baltikos paleokontinentas silūro periodu buvo pietų pusrutulio tropinėse–subtropinėse

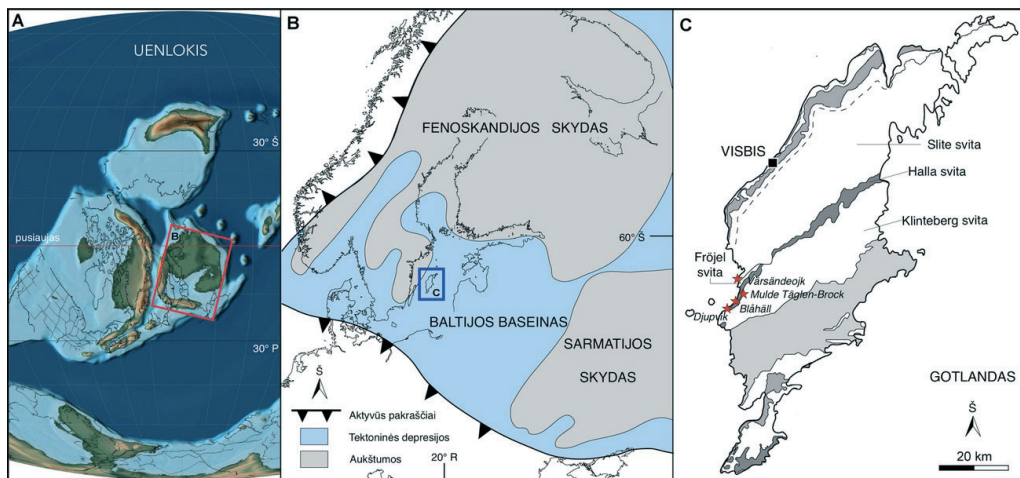
platumose. Jo vakarinėje dalyje (10–20° pietų platumoje) plytėjo Baltijos baseinas (BB) (2 pav.), užėmęs vakarinį Rytų Europos kratono pakraštį. Jis turėjo sąsają su Rėjos paleovandenynu, o jo raidą sąlygojo konvergencinė tektonika – dėl subdukcijos vyko Rytų Europos kratono plutos pietvakarinės dalies lenkimas ir jos nulemta mantijos apkrova dėl kurios BB ir išsiplėtė į dabartinius šiaurės rytus (Biebesheimer ir kt., 2021; Rinkevičiūtė, 2025).

Sedimentacinės aplinkos interpretavimui svarbus buvusio baseino tipas. Silūro BB priiskiriamas rampinės platformos baseino tipui – tai nedidelio nuolydžio (>1°) geomorfologinė sistema be ryškaus šelfo krašto lūžio. Pagal gylį ir hidrodinaminį režimą gali būti išskiriamos trys rampinės platformos dalys: 1) vidinė rampa – sekiausia, bangų mūšos veikiamą dalis; 2) vidurinė rampa – tarpinė zona tarp normalios ir audrų sukeltos bangavimo bazės; 3) išorinė rampa – gilesnė zona, kurioje nusėda smulkausios frakcijos nuosėdos (mergeliai). Šias tris dalis galima atskirti pagal skirtingus vyraujančius sedimentacijos procesus ir atitinkamai su tuo susijusią litologiją. Išanalizavus litologiją ir papildomą geologinę

informaciją uolienų sluoksnius galima priskirti tam tikroms facijų asociacijoms, nustatomas jų karbonatinės produkcijos kiekis ir atsakas į jūros lygio svyravimus (Burchette, Wright, 1992; Artursson, 2018).

Gotlando saloje silūro uolienų storumė siekia 500–750 m storį, priklausomai nuo matavimo atskaitos taško. Šios uolienos susidarė negilame (sub)tropinės platumos BB, vykstant karbonatinei sedimentacijai. Panašių uolienų šiandien galima aptikti labai sekliose tropinių platumų jūrose ir jų susidarymas siejamas su aplinka, kurioje formuojasi rifai. Storumę sudaro klintys su rifų struktūromis ir sluoksniuotos, mergeliai ir pusiau orientuoti smiltainiai (<3 %). Tirtų uolienų kompleksas gileja pietryčių kryptimi mažesniu nei 1° kampu, o erozija – PV–ŠR krypties.

Seniausios Gotlando salos uolienos iškyla jos šiaurvakarinėje dalyje ir palaipsniui jaunėja einant pietryčių kryptimi. Uolienų sudėtis susijusi su regionine charakteristika: sekliuose vandenyse susidarę uolienų kompleksai randami rytinėje dalyje, o vakarinėje pakrantėje dominuoja gilesnių vandenų karbonatinės sedimentacijos uolienos – klinčių / mergelių alteracijos.



2 pav. Geografinė situacija. A – uenlokio paleogeografinė padėtis; B – Šiaurės Europos žemėlapis: aktyvūs plokščių pakraščiai, sedimentaciniai baseinai ir skydai silūre; C – Gotlando (Švedija) geologinis žemėlapis: litostratigrafiniai (homerio) vienetai ir ekspedicijos metu aplankytos atodangos: 1 – Versendejoiko; 2 – Muldės plytinio molio; 3 – Blohelo; 4 – Djupviko (pagal Biebesheimer ir kt., 2021)

Fig. 2. Geographical situation. A – Wenlock palaeogeography; B – Northern Europe map: active margins, basins, and shields during the Silurian; C – Gotland geology map: lithostratigraphic units, locations of the outcrops: 1 – Varsändeojk; 2 – Mulde Brick Clay; 3 – Blåhäll; 4 – Djupvik (after Biebesheimer et al., 2021)

Karbonatinių uolienų seka Gotlando saloje labai gerai išlikusi globaliu mastu – čia galima rasti uolienų, susidariusių nuo pat landoverio telyčio iki ludlovio ludfordžio. Kadangi ši storumė pasižymi gausiai ir gerai išlikusiomis fosilijomis, ji tapo populiariu mokslinių tyrimų objektu. Daugumą silūro komplekso uolienų čia galima matyti paviršiuje, nes kvartero nuogulų sluoksnis labai plonas. Atodangos salos pakrantėse dažniausiai suformuotos nuolatinės bangų mūšos. Gotlando salos nuogulos yra pagrindas silūro sistemos anglies izotopų chemostratigrafijai, kuri leidžia atlikti tikslią viso regiono ar net globalią koreliaciją (Calner ir kt., 2004; Artursson, 2018; Biebesheimer ir kt., 2021).

Ekspedicijos metu aplankyta daugiau nei 20 įvairių atodangų Gotlando salos vakarinėje ir rytinėje dalyse. Šio mokslinio tyrimo tematiką ir laikotarpį geriausiai atitiko didele vyraujančių uolienų įvairove nepasižyminti „Värsändeojk“ (Versendejoiko), „Mulde Brick-clay“ (Muldės plytinio molio), „Blåhäll“ (Blahelo) ir „Djupvik“ (Djupviko) atodangos, kurias dažniausiai sudaro klintys ir mergeliai bei įvairios šių uolienų variacijos. Jose buvo paimti mėginiai (3 pav.) ir surinkta daug fosilijų, kurios šiuo metu saugomos GMK Geologijos muziejuje.

MULDE / LUNDGRENI BIOĖVYKIS

Silūras – vienas biologiskai ir geochemiskai dinamiškiausių Žemės istorijos laikotarpių, pasižymėjęs globalių biogeocheminių įvykių seka. Vienas jų – Mulde / *lundgreni*, vykęs homerio laikotarpiu. Nustatyta, kad silūro bioįvykiai teigiamai koreliuoja su Milankovičiaus ciklais, susijusiais su didelės amplitudės jūros lygio svyravimais, kurių kaita sutrikdo nusistovėjusias ekosistemas, jų produktyvumą, buveinių struktūras. Dėl šio sutapimo tiriant graptolitų, konodontų biozonas ir atkuriant paleoaplinkų sąlygas Mulde / *lundgreni* bioįvykis atpažįstamas globaliu mastu.

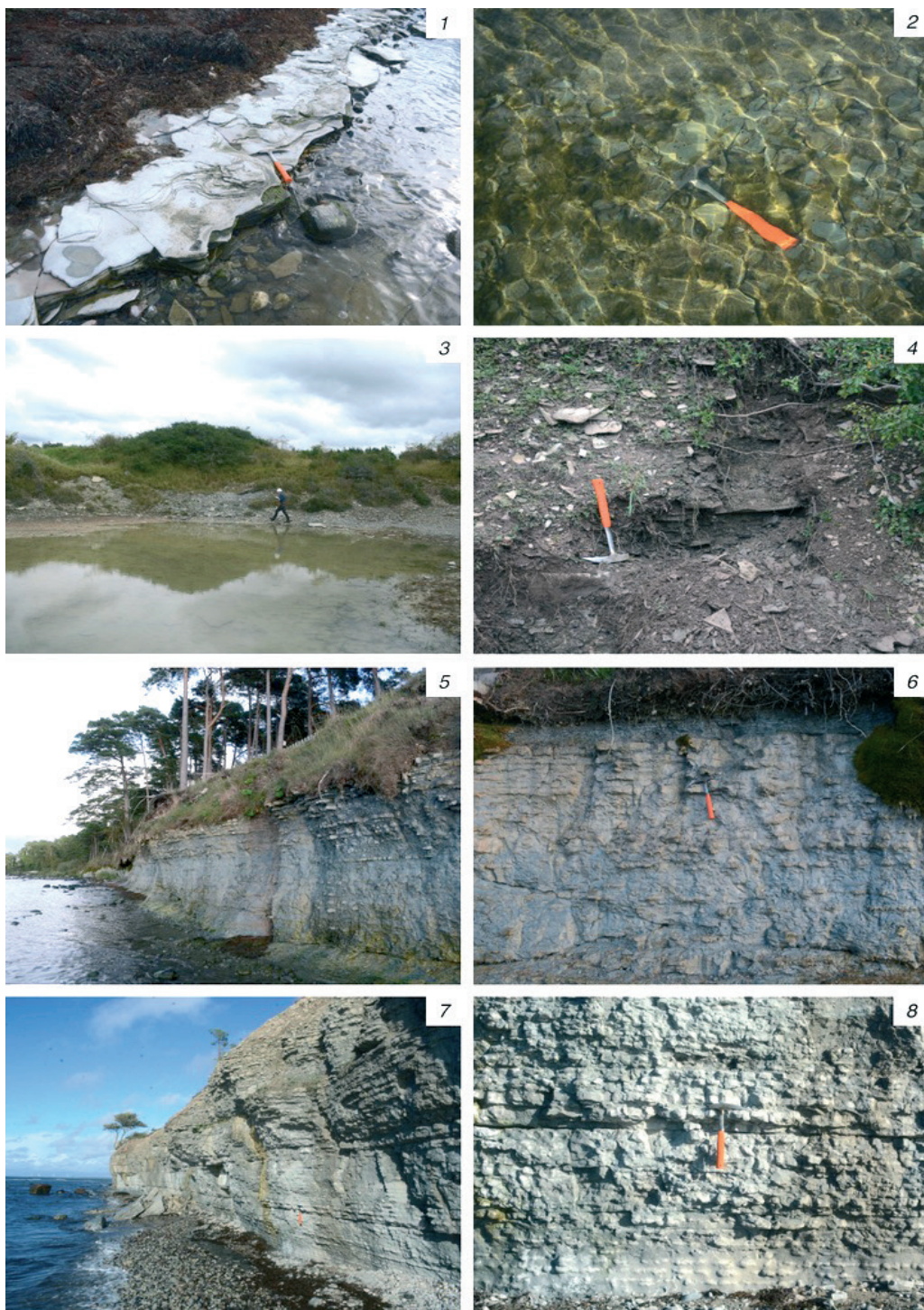
Gotlando saloje randami tipiniai šio bioįvykio nuosėdų sluoksniai, kurie priklauso Frojelio (*Fröjel*) ir Halos (*Halla*) svitoms.

Jos koreliuoja su horizontaliai sluoksniuotais BB ir gilesnių vietų (Lenkija) silūro mergeliais. Regioninė stratigrafinė pertrauka Frojelio (*Fröjel*) svitos viršuje žymi paskutinę šio bioįvykio stadiją ir žemiausią jūros lygį homeryje. Įvykio laikotarpio nuosėdose aptinkama bedeguonių sąlygų įrodymų: uenlokyje jūros regresija vyko palaipsniui – *lundgreni* graptolitų zonoje bedegonės sąlygos aptinkamos retai, tačiau pereinant į *nilssoni* ir *scanicus* / *chimaera* zonas prasidėjusi transgresija nuosėdose sukelia plačiai paplitusias bedegones sąlygas.

Mulde / *lundgreni* bioįvykis uolienose atpažįstamas ir pagal $\delta^{13}\text{C}$ duomenis: stebimas teigiamas anglies izotopų ekskursas, o duomenų kreivė turi dvi viršūnes (angl. *double peaked*). Šis ekskursas rodo ryšį tarp globalaus klimato režimo, jūros lygio pokyčių, anglies ciklo pertvarų ir anglies izotopų svyravimų karbonatinėse uolienose.

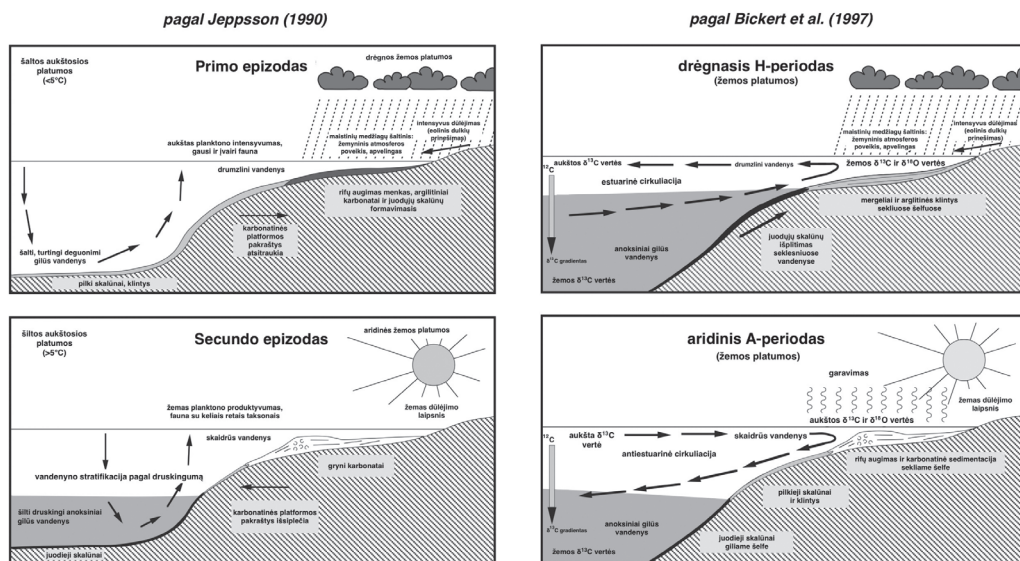
Litologiniais ir faunos pokyčiais paremtame modelyje (Jeppsson, 1990) (4 pav.) bioįvykiai skirstomi į du epizodus – *Primo* (P) ir *Secundo* (S). Šis modelis buvo išplėstas, įtraukus stabilųjų anglies izotopų duomenis ir geografinės platumos aspektą (Bickert, 1997). Nors dauguma silūro bioįvykių atitinka P–S modelį, Mulde / *lundgreni* įvykis priskiriamas S–S tipui. S epizodo pradžia siejama su vėlyvojo uenloko apledėjimu, tačiau šio proceso mechanizmas dar nėra iki galo aiškus (nepaaiškinti skirtumai tarp planktono ir bentoso organizmų skirtingų reakcijų) (Calner ir kt., 2004). S epizodas prasideda, kai į giluminius jūros sluoksnius patenka vidutinėse platumose susidarę didelio druskingumo ir tankio vandenys. Jei tokio vandens tiekimas tęsiasi ilgai, giluminiai sluoksniai tampa dar tankesni, o paviršiniai nuolat maišomi ir atnaujinami. Ilgainiui tankio kontrastas tarp sluoksnių pasiekia kritinę ribą, dėl kurios silpnėja ar visai sustoja vertikali vandens cirkuliacija ir prasideda vandens sluoksnių stratifikacija, sutrinka maistinių medžiagų tiekimas planktono organizmams.

Tuo metu sekliuose vandenyse toliau vyksta intensyvi kalcio karbonato gamyba ir atmosferos



3 pav. Gotlando salos atodangos: 1–2 – Versendejoiko; 3–4 – Muldės plytinio molio; 5–6 – Blahelo; 7–8 – Djupviko. Simonos Rinkevičiūtės nuotr.

Fig. 3. Gotland outcrops: 1–2 – Väsändejok; 3–4 – Mulde Brick Clay; 5–6 – Blåhäll; 7–8 – Djupvik. Photo by S. Rinkevičiūtė



4 pav. Paleokeanografijos ir klimato modeliai, iliustruojantys silūro drėgno ir sauso klimato periodus: pirminis – kairėje (Jeppsson, 1990); išplėstas – dešinėje (Bickert ir kt., 1997). Pirminis modelis išplėstas įtraukus geocheminius parametrus (stabiliuosius deguonies bei anglies izotopus) ir vandenyno cirkuliaciją. Antrasis modelis taikomas esant žemoms platumoms (Calner ir kt., 2004)

Fig. 4. Paleogeographic and climatic model illustrating humid and arid periods during the Silurian: simplified – on the left (Jeppsson, 1990); modified – on the right (Bickert et al., 1997). First model, modified focusing on isotope geochemistry and ocean circulation. Model for low latitudes (Calner et al., 2004)

CO₂ fiksacija, sukelianti vadinamąjį atvirkštinį šiltnamio efektą: mažėja vidutinė temperatūra, didėja drėgmė ir intensyvėja cheminis dūlėjimas sausumoje. Dėl padidėjusio terigeninių (argilitinių) nuosėdų srauto ir maistinių medžiagų patekimo į pakrančių zonas mažėja karbonatų nusėdimo greitis, o paviršiniai vandenys palaipsniui atgauna įprastą tankį. Galiausiai, veikiant geoterminei šilumai, vėl atsinaujina vertikali vandens cirkuliacija. Vis dėlto į gilu-

minus sluoksnius tiekiamas vanduo yra didelio druskingumo ir tankio, todėl S epizodo sąlygos iš esmės išlieka (Rinkevičiūtė, 2025).

Mokslinės ekspedicijos Gotlando saloje metu vykę geologiniai tyrimai praplėtė jos dalyvių žinias apie Mulde / *lundgreni* bioįvykį. Tikimasi, kad dar daug naujo atskleis atsivežtų mėginių tyrimai ir išskirtinės, salos atodangoje surinktos fosilijos, papildžiusios Geologijos muziejaus fondus.

Literatūra

- Artursson, C. Stratigraphy, sedimentology and geophysical assessment of the early Silurian Halla and Klinteberg formations, Altajme core, Gotland, Sweden. *Dissertations in Geology at Lund University*, 2018.
- Bickert, T., Pätzold, J., Samtleben, C., & Munnecke, A. Paleoenvironmental changes in the Silurian indicated by stable isotopes in brachiopod shells from Gotland, Sweden. *Geochimica et cosmochimica Acta*, 1997, 61 (13), p. 2 717–2 730.
- Biebesheimer, E. J., Cramer, B. D., Calner, M., Barnett, B. A., Oborny, S. C., & Bancroft, A. M. Asynchronous $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ records during the onset of the Mulde (Silurian) positive carbon isotope excursion from the Altajme core, Gotland, Sweden. *Chemical geology*, 2021, 576, p. 120–256.
- Burchette, T. P., & Wright, V. P. Carbonate ramp depositional systems. *Sedimentary geology*, 1992, 79 (1–4), p. 3–57.

- Calner, M., Jeppsson, L., & Munnecke, A. The Silurian of Gotland. Part I: Review of the stratigraphic framework, event stratigraphy, and stable carbon and oxygen isotope development. *Erlanger geologische Abhandlungen*, 2004, 5. Sonderband, p. 113–131.
- Jeppsson, L. An oceanic model for lithological and faunal changes tested on the Silurian record. *Journal of the Geological Society*, 1990, 147 (4), p. 663–674.
- Rinkevičiūtė, S. Mulde / lundgreni bioįvykio (silūras) įtaka ostrakodų paleoekologinei dinamikai. Vilniaus universitetas, 2025 (prieiga internete: <https://doi.org/10.15388/vu.thesis.733>).

SUMMARY

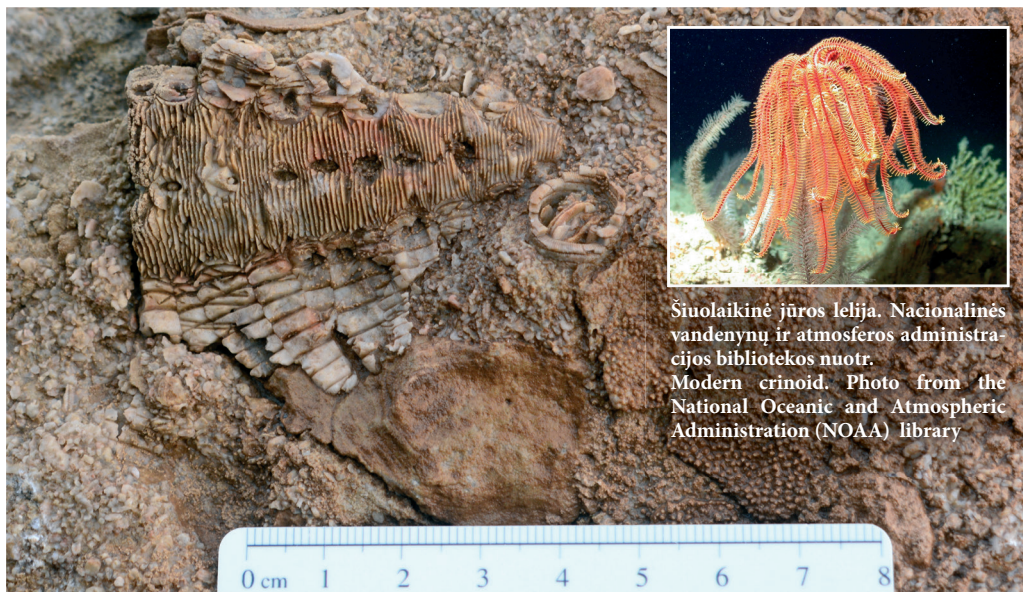
Gotland represents a key geological archive renowned for its exceptionally well-preserved Silurian carbonate successions. This study presents the framework of a scientific expedition conducted by researchers from Vilnius University in September 2025, with a focus on the Mulde / lundgreni bioevent (Homerian), an interval characterised by pronounced biotic turnover and geochemical perturbations.

The primary objective of this research is to elucidate the underlying mechanisms of the Mulde event through the application of advanced analytical approaches, including Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) and Bayesian statistical modelling. High-resolution sampling was systematically carried out at representative outcrops – Vårsändeojk, Mulde Brick Clay, Blåhäll, and Djupvik – spanning the Slite, Fröjel, and Halla formations. The resulting dataset contributes to the

expansion of ostracod diversity records and supports refined palaeoenvironmental reconstructions.

The Mulde event is characterised by a globally recognised positive carbon isotope excursion and has been traditionally interpreted with the framework of a *Primo-Secundo* (P–S) oceanic episode. This study re-examines the transition between successive oceanic states associated with the Mulde event, with particular emphasis on the interplay between S–S episode transition linked to the Mulde event, examining the interactions between Milankovitch-driven sea-level fluctuations, water-column stratification, and nutrient cycling.

By integrating lithofacies analysis, trace-element geochemistry, and stable isotope data, the study aims to advance understanding of the responses of benthic and planktonic communities during this dynamic of the Silurian.



Jūrų lelija, Gotlandas. Simonos Rinkevičiūtės nuotr.
Crinoid calyx, Gotland. Photo by S. Rinkevičiūtė

Šiuolaikinė jūros lelija. Nacionalinės vandenynų ir atmosferos administracijos bibliotekos nuotr.
Modern crinoid. Photo from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) library