

LATVIJAS UNIVERSITĀTES
RAKSTI

789. SĒJUMS

Zemes un vides
zinātnes

SCIENTIFIC PAPERS
UNIVERSITY OF LATVIA

VOLUME 789

Earth and
Environmental Sciences

SCIENTIFIC PAPERS
UNIVERSITY OF LATVIA

VOLUME 789

Earth and
Environmental Sciences

UNIVERSITY OF LATVIA

LATVIJAS UNIVERSITĀTES
RAKSTI

789. SĒJUMS

Zemes un vides zinātnes

LATVIJAS UNIVERSITĀTE

UDK 567(082)+554
Ze 556

Izdevums sagatavots un izdots ar Valsts pētījumu programmas Nr.2010.10-4/VPP-5 NatRes projekta "Zemes dzīļu resursi" atbalstu.

Galvenais redaktors (Editor-in-Chief):

Prof. Dr. geol. **Vitalijs ZELČS**

Izpildredaktore (Executive editor):

Dr. geogr. **Zanda PENĒZE**

Zinātniskais redaktors

Prof. Dr. geol. **Valdis SEGLIŅŠ**

Redaktora vietnieki (Associate Editors):

Prof. Dr. geogr. **Agrita BRIEDE** (klimatoloģija un hidroloģija)

Prof. Dr. habil. chem. **Māris KĻAVIŅŠ** (vides zinātne)

Prof. Dr. geogr. **Zaiga KRIŠJĀNE** (cilvēka ģeogrāfija)

Prof. Dr. geol. **Ervīns LUKŠEVIČS** (pamatiežu ģeoloģija)

Prof. Dr. biol. **Viesturs MELECIS** (vides bioloģija)

Prof. Dr. geogr. **Oļģerts NIKODEMUS** (ainavu un augsnes ģeogrāfija)

Dr. geol. **Juris SOMS** (kvartāra ģeoloģija un ģeomorfoloģija)

Prof. Dr. geol. **Valdis SEGLIŅŠ** (lietišķā ģeoloģija un ģeofizika)

Dr. habil. phys. **Juris ŽAGARS** (ģeomātika)

Asoc. prof. Dr. geogr. **Pēteris ŠKINĶIS** (telpiskā plānošana)

Redakcijas padomes locekļi:

Prof. Emeritus, Dr. habil. geol. **Ojārs ĀBOLTIŅŠ** (Latvijas Universitāte)

Prof. Ph. D. **Lars Bengt Ake BERGMAN** (Stokholmas Universitāte)

Dr. geol. **Albertas BITINAS** (Klaipēdas Universitāte)

Ph. D. **Edmunds BUNKŠE** (Delavēras Universitāte)

Dr. geogr. **Anita DRAVENIECE** (Latvijas Zinātņu akadēmija)

Prof. Emeritus, Dr. habil. geogr. **Guntis EBERHARDS** (Latvijas Universitāte)

Dr. geogr. **Zenonas GULBINAS** (Viļņas Ģeogrāfijas institūts)

Ph.D. **Peter JOHANSSON** (Somijas Ģeoloģijas dienests)

Dr. habil. agr. **Aldis KĀRKLIŅŠ** (Latvijas Lauksaimniecības universitāte)

Prof. Dr. geogr. **Maija ROZĪTE** (Biznesa augstskola Turība)

Latviešu teksta korektore **Anna Šmite**

Maketu un vāka noformējumu veidojusi **Andra Liepiņa**

Visi krājumā ievietotie raksti ir recenzēti.

Pārpublicēšanas gadījumā nepieciešama Latvijas Universitātes atļauja.

Citējot atsauce uz izdevumu obligāta.

© Latvijas Universitāte, 2012

ISBN 978-9984-45-595-2

Saturs

Daiga Pipira

Juras mālaino nogulumu sastāvs un slāņkopu uzbūve *Strēļu* un *Pulvernieku* apkārtnē un *Zaņas* upes ielejā

Composition and Structure of the Jurassic Clayey Deposits in the Vicinities of Strēļi and Pulvernieki and in the River Zaņa Valley 6

Jānis Karušs, Valdis Segliņš

Kēmu terases smilts iegulu pētījumi ar ģeoradaru *Taurenes* apkaimē, Vidzemes augstienē

Studies of the Kame Terrace Sand Deposits Using Ground Penetrating Radar in the Vicinity of the Taurene Village, Vidzeme Upland 19

Līga Zariņa, Valdis Segliņš

Drupu graudu noapaļotības novērtēšana

Clastic Particle Surface Rounding Evaluation Studies 30

Līga Rūtiņa, Jānis Šīre, Māris Kļaviņš

Modificētas humusvielas saturošu kompozīciju izmantošanas iespēju izpēte koksnes apstrādei

Modified Humic Substances Containing Compositions for Wood Treatment 40

Kristaps Lamsters, Reinis Ošs

Zemgales rievoto morēnu izplatība, morfoloģija un iekšējā uzbūve Viduslatvijas zemienē

The Distribution, Morphology and Internal Structure of the Zemgale Ribbed Moraines, Central Latvian Lowland 52

Kristīne Tovmasjana, Ģirts Stinkulis

Klastisko un karbonātisko plūdmaiņu nogulumu sedimentācija Austrumlatvijā: vidusdevona Rēzeknes un Pērnavas svītas

Siliciclastic and Carbonate Tidal Sedimentation: Middle Devonian Rēzekne and Pärnu Formations, Eastern Latvia 66

Jeļena Vasilkova

Bruņuzivs *Bothriolepis maxima* bruņu plātņu hidrodinamika viļņu un straumju ietekmē: aktuopaleontoloģiskā pieeja un modelēšana

The Hydrodynamics of Bothriolepis maxima Armour Plates Under the Influence of Waves and Streams: Actuopaleontological Approach and Modelling 87

Agnese Kukela, Valdis Segliņš

Džosera piramīdas akmens materiāla dēdēšanas nedestruktīva novērtēšana

Non-Destructive Assessment of Stone Material Weathering at the Pyramid of Djoser 105

Eleonora Pērkone, Ilze Klints, Tomas Saks,

Aija Dēliņa, Jānis Bikše, Jānis Jātnieks

Augšējā devona *Gaujas* ūdens horizonta filtrācijas koeficientu novērtējums

Estimation of Hydraulic Conductivity of Upper Devonian Gauja Aquifer 117

Māris Krievāns, Agnis Rečs

Miegupes ielejas morfoloģija un veidošanās leduslaikmeta beigu posmā

Morphology and Development of the River Miegupe Valley During Late-glacial 127

**Juras mālaino nogulumu sastāvs un slāņkopu uzbūve
Strēļu un Pulvernieku apkārtnē un Zaņas upes ielejā
*Composition and Structure of the Jurassic Clayey
Deposits in the Vicinities of Strēļi and Pulvernieki and
in the River Zaņa Valley***

Daiga Pipira

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte
Alberta iela 10, Rīga, LV-1010
E-pasts: *daiga_pipira@inbox.lv*

Kopsavilkums

Pētījuma mērķis ir raksturot Latvijas juras mālaino nogulumu uzbūvi, litoloģisko un minerālo sastāvu. Šie nogulumi pētīti gan atsegumos, gan pēc veikto zondējumu datiem, un analizēts to granulometriskais sastāvs un māla frakcijas minerālais sastāvs, kā arī mikrofosiliju klātbūtne šajos nogulumos. Atradņu Pulvernieki un Strēļi teritorijā juras sistēmu pārstāv Papīles svītas kontinentālie nogulumi: pelēki smilšaini mālainie nogulumi ar pārskalotu triasa nogulumu piejaukumu griezuma apakšējā daļā un melni kvartāra glaciālajos procesos ietekmēti mālainie nogulumi griezuma augšējā daļā. Zaņas upes krastos atsedzas nedaudz jaunākās Zaņas svītas jūras apstākļos veidojušies mālainie nogulumi – tie ir deformēti un vietām arī glaciодislocēti.

Raksturvārdi: juras māli, Latvija, litoloģija, māla minerāli, mezozojs, slāņkopas uzbūve.

Summary

The aim of the study is to characterize structure, lithological and mineral composition of the Jurassic clayey deposits of Latvia. In the paper these deposits are described in outcrops and drill-holes and mineral composition of clay fraction, grain-size and presence of microfossils within deposits are discussed. In the Pulvernieki and Strēļi deposit terrestrial siliciclastics of the Papīle Formation are present: in its lower part gray sandy-clayey deposits with admixture of reworked Triassic deposits; in the upper part black clayey deposits, which are affected by the Quaternary glacial processes. Deformed and in some places glaciодislocated marine clayey deposits of the Zaņa Formation are present by the River Zaņa.

Keywords: clay minerals, Jurassic clays, Latvia, lithology, Mesozoic, structure of strata.

Ievads

Juras sistēmu Latvijas teritorijā pārstāv vidusjuras Kelovejas stāva klastiskie nogulumi. Papīles svītā apvienoti kontinentālie nogulumi bez faunas atliekām, bet ar pārroglotu koksni, sporām un putekšņiem. Kontinentālajiem nogulumiem uzguļ vidējam un augšējam Kelovejas pastāvam atbilstošie Zaņas svītas jūras nogulumi ar bagātīgu jūras organismu pārakmeņojumu kompleksu (Brangulis u.c. 1998).

Juras nogulumi Latvijā izplatīti teritorijas dienvidrietumu daļā atsevišķu nelielu laukumu veidā, kas atsedzas Ventas upes baseina nelielo upju gultnē un krastos (Brangulis u.c. 1998). Papīles svītas melnie māli pērti ugunturīgu materiālu ražošanai kā Latvijā vienīgie zemkvartāra virsmā atsegte kaolinīta māli. Zaņas svītas māli plaši pērti tajos sastopamo jūras bezmugurkaulnieku atlieku dēļ (Brangulis u.c. 1998).

Kopš pagājušā gadsimta vidū pavisam apsīkuši šo nogulumu kā derīgo izrakteņu pētījumi, arī interese par to veidošanās apstākļiem mazinājusies. Turklāt sarežģīto saguluma apstākļu dēļ nedaudzie agrākos gados veiktie Latvijas juras mālaino nogulumu slāņkopas uzbūves un sastāva pētījumi nesniedz pietiekami pamatotas atbildes par to veidošanās apstākļiem.

Pētījuma mērķis ir raksturot juras mālaino nogulumu litoloģisko un minerālo sastāvu, slāņkopu uzbūvi un saguluma apstākļus ģeoloģiskajos griezumos atradņu *Pulvernieki* un *Strēļi* teritorijā un Zaņas upes ielejā.

Pētījumu teritoriju raksturojums

Juras mālainie nogulumi raksturoti Latvijā plašākajās to atsegšanās vietās: juras māla atradņu *Pulvernieki* (Lētīzas upes krastos) un *Strēļi* (Ventas upes kreisajā krastā netālu no Loses upes grīvas) teritorijā un Zaņas upes ielejā (1. att., 1. tabula).

Pulvernieku atradnē (1. att.) zem juras nogulumiem iegul perma kaļķakmeņi. Kopējais juras nogulumu biezums *Pulvernieku* atradnē sasniedz 16,6 m. Juras nogulumu pamatnē iegul kvarca smilts. To klāj pelēku līdz melnu mālu slāņi, vietām tie ir ogļaini, vietām – ar kvarca smilts starpkārtām. Māli pakāpeniski pāriet blīvā vai irdenā brūnoglē. Pelēko mālu slānis Lētīzas upes tecējuma virzienā kļūst nedaudz biezāks, bet austrumu un dienvidu virzienā tas vai nu izķīlējās, vai iegul zem pārsedzošajiem kvartāra nogulumiem, kā arī pieaug pelēki melnās smilts un brūnogļu slāņu biezums un vienlaikus māli kļūst smilšaināki (Rinks 1947).

Zaņas upes lejteces posma apkārtnē pirmskvartāra virsmā atsedzas gan perma kaļķakmeņi, gan arī juras klastiskie nogulumi (Juškevičs u.c. 1997), starp kuriem arī melni, ar jūras bezmugurkaulnieku fosilijām bagāti juras māli (Rinks 1947).

Pamatiežus Zaņas upes ielejas apkārtnē un arī Lētīzas ielejā *Pulvernieku* atradnes teritorijā sedz galvenokārt kvartāra glaciģēnie nogulumi, pašā ielejā arī aluviālie nogulumi (Juškevičs u.c. 1997). Šīm ielejām raksturīgi arī augsti stāvkrasti, kur atsedzas morēnas nogulumi.

Strēļu atradnē (1. att.) zem juras nogulumiem iegul triasa zaļi un zili pelēkie māli. Juras slāņkopas pamatnē iegul smalkgraudaina smilts vai pelēki ar zaļu nokrāsu mālainie nogulumi – to biezums ir 1–5 m un palielinās virzienā uz atradnes perifēro daļu. Augstāk iegul melni ogļaini māli 0,2–3,1 m biezumā, tie mijas ar mālaines brūnogles vai smilšu slāņiem. Atradnes centrālajā daļā virs melno mālu slāņa atrodas iegarena ziemeļu–dienvidu virzienā vērsta muldveida juras brūnogļu iegula. Atsevišķu brūnogļu slāņu biezums ir 1,7–2,6 m. Atradnes centrālajā daļā brūnogļu un melno mālu slāņa biezums ir lielāks, virzienā uz atradnes perifēro daļu tas izķīlējās (Berzinsh 1956).

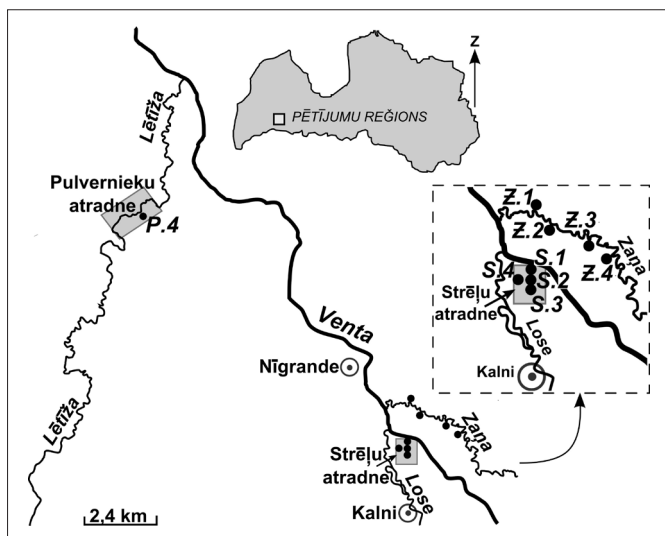
Kvartāra nogulumu segkārtu *Strēļu* atradnes centrālajā daļā galvenokārt veido glaciģēnie nogulumi, bet tuvāk Ventas upes ielejai tos vai nu sedz, vai arī pilnībā

kvartārsegu veido aluviālie nogulumi. Pie tam lauka pētījumos noskaidrots, ka urbumu ierīkošanas vietās kvartāra nogulumu pamatnē iegulī laukakmeņu bruģis. Tam seko grants ar lielu oļu saturu, kas virzienā uz augšu pāriet granšainos, smilšaini granšainos un smilšainos nogulumos.

Materiāls un metodes

Lauka pētījumi

Juras mālainie nogulumi dokumentēti gan urbumos Strēļu atradnē, gan pēc atsegumu-zondējumu datiem Pulvernieku atradnē un Zaņas krastos (1. att., 1. tabula).



1. attēls. Pētījumu objektu atrašanās vietas Zaņas upes krastos un juras mālu griezumos pie Pulverniekiem un Strēļiem.

P. 4 – Pulvernieku 4. griezumus; S. 1 – Strēļu 1. griezumus; S. 2 – Strēļu 2. griezumus; S. 3 – Strēļu 3. griezumus; S. 4 – Strēļu 4. griezumus; Z. 1 – Zaņas 1. griezumus; Z. 2 – Zaņas 2. griezumus; Z. 4 – Zaņas 4. griezumus; Z. 5 – Zaņas 5. griezumus.

Figure 1. Location of the studied objects along the River Zaņa and in Jurassic clay sections at Pulvernieki and Strēļi.

P. 4 – section 4 of the Pulvernieki; S. 1 – section 1 of the Strēļi; S. 2 – section 2 of the Strēļi; S. 3 – section 3 of the Strēļi; S. 4 – section 4 of the Strēļi; Z. 1 – section 1 of the Zaņa; Z. 2 – section 2 of the Zaņa; Z. 4 – section 4 of the Zaņa; Z. 5 – section 5 of the Zaņa.

1. tabula. Dokumentēto griezumų koordinātas (LKS-92).

Table 1. Coordinates of described geological sections.

Griezums	Z pl.	A gar.	Griezums	Z pl.	A gar.
P. 4	56°31'46	21°58'23	Z. 1	56°28'36	22°07'26
S. 1	56°27'59	22°07'30	Z. 2	56°28'28	22°07'26
S. 2	56°27'56	22°07'28	Z. 4	56°28'19	22°08'52
S. 3	56°27'53	22°07'24	Z. 5	56°28'07	22°09'03
S. 4	56°27'56	22°07'20			

Griezumų apzīmējumi sniegti 1. att.; symbols of the geological sections given in Fig. 1.

Pulvernieku atradnes teritorijā visai biežā kvartārsega apgrūtina rokas urbumu ierīkošanu juras nogulumos, tāpēc apsekoti Lētīžas upes krasti apmēram 1,5 km garā posmā. Atsegti juras mālainie nogulumi šajā teritorijā dokumentēti tikai Pulvernieku 4. griezumā atradnes perifērajā daļā Lētīžas lejteces virzienā tās labajā krastā (1. att.).

Juras mālaino nogulumu slāņkopas Lētīžas un Zaņas ielejā atrodas stāvkrastu apakšējā daļā nelielā augstumā virs upju ūdens līmeņa, un atsegto juras nogulumu biežumi ir nelieli, bieži vien ap metru, tāpēc šo atsegumu dokumentācija kombinēta ar griezumu aprakstu pēc zondējumu datiem upju gultnē pie atsegumu pamatnes.

Zaņas upes krasti (1. att.) apsekoti apmēram 4 km garā posmā no Dadzu strauta līdz Krastiņu mājām. Tur atfīrīti un dokumentēti četri atsegumi, no kuriem divos (1. un 5. atsegumā) atsegto griezumu dokumentācija kombinēta ar griezumu aprakstu pēc zondējumu datiem zem Zaņas upes ūdens līmeņa un vienā (4. atsegumā), kas ietverts morēnas nogulumu slāņkopā, atseguma atfīrīšana kombinēta ar zondējumu morēnas nogulumos pie atseguma pamatnes.

Strēļu atradnes teritorijā juras nogulumi dokumentēti četros urbumos (1. att.) divu līdz sešu metru biežumā.

Tāpēc urbumi ierīkoti meliorācijas grāvju malās aptuveni metru dziļāk par juras nogulumus pārsedzošā slāņa virsu, kur kvartāra nogulumu segkārtā, t. sk. grants slānis un laukakmeņu bruģis, norakta.

Nogulumu paraugi laboratorijas analīzēm no atsegumiem un urbumu serdēm noņemti pēc vadziņas metodes no litoloģiski atšķirīgiem slāņiem. Vienīgi no 6 m garā Strēļu atradnes 4. urbuma nevienmērīgās mālaino-smilšaino nogulumu nomaiņas dēļ paraugi noņemti ~0,5–1 m garos intervālos. Laboratorijā analizēti tie juras nogulumu paraugi, kas nesatur kvartāra materiāla piejaukumu.

Laboratorijas analīzes un datu apstrāde

Strēļu un Pulvernieku atradnes un Zaņas ielejas mālaino nogulumu litoloģiskai raksturošanai veikta 21 parauga granulometriskā analīze. Tā veikta LU Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes Iežu pētījumu laboratorijā, pielietojot kombinēto sietu-pipetes metodi un izmantojot sausās sijāšanas iekārtu *Retsch AS 200* un elektronisko pipeti *EDP3-Plus*. Tā kā juras mālainie nogulumi satur lielu daudzumu organiskās vielas, pirms granulometriskās analīzes tā oksidēta, paraugus apstrādājot ar 30% H₂O₂ šķīdumu (Poppe *et al.* 2003).

Lai nošķirtu dažādos juras laikposmos veidojušos nogulumus, ar reaģentiem neapstrādātā 21 parauga >0,063 mm frakcijā veikta Baltijas juras nogulumiem raksturīgo organismu (Grigelis and Norling 1999) mikroatlieku meklēšana, izmantojot binokulāro mikroskopu *Micros*. Vienlaikus šajos paraugos raksturota arī nogulumu smilts frakcija.

Juras nogulumu raksturošanai paraugiem, kas noņemti no biežākajiem dokumentētajiem griezumiem Strēļu un Pulvernieku atradnē, veikta arī XRD analīze. Rentgendifraktogrammas uzņemtas 16 pulverizētiem māla frakcijas paraugiem LU Ķīmijas fakultātes Fizikālās ķīmijas katedras laboratorijā, izmantojot rentgenstaru difrakcijas iekārtu *Bruker D8 ADVANCE*. Māla minerālu identifikācija un kvalitatīvā

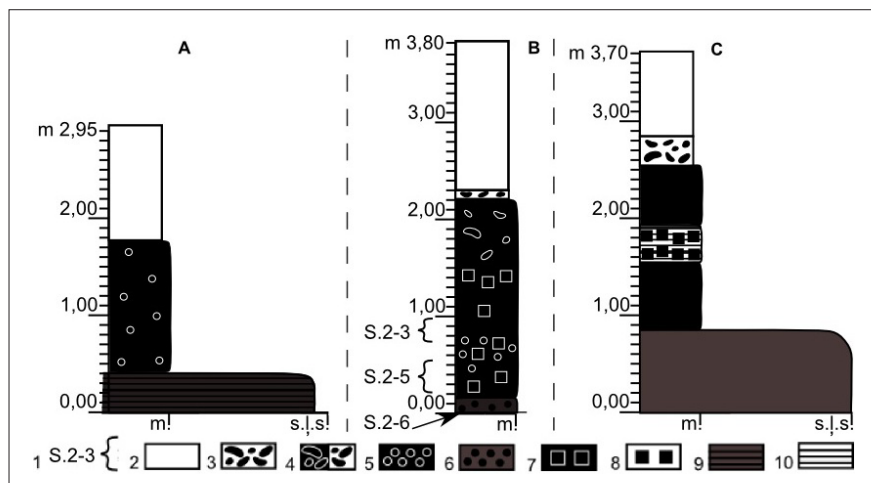
analīze veikta pēc raksturīgo fāžu refleksu salīdzināšanas rentgendifraktogrammās, kas uzņemtas pirms paraugu apstrādes un pēc to apstrādes ar etilēnglikolu un karsēšanas 350 un 550° C temperatūrā (Revees 2006). Rentgendifraktogrammu apstrāde un minerālu analīze veikta, izmantojot datorprogrammu *EVA*. Relatīvs minerālu īpatsvara novērtējums analizētajos paraugos veikts, salīdzinot dažādu fāžu refleksu intensitātes rentgendifraktogrammās un ņemot vērā smektīta saturu paraugos (Kostjukovs *et al.* 2012).

Rezultāti

Juras mālainie nogulumi Strēļu un Pulvernieku atradnes teritorijā

Strēļu atradnes teritorijā veikto urbumu griezumā raksturo divus juras mālaino nogulumu paveidus: 1) melnus mālainos nogulumus ar smilts un brūnoglek piejaukumu un 2) pelēkus smilšainus līdz sīkdispersus mālainos nogulumus, kas satur arī vāji sadalītas koksnes atliekas. Taču dzīvnieku fosilijas Strēļu atradnes nogulumos nav sastopamas.

Strēļu atradnes ziemeļu–centrālajā daļā trīs dokumentētajos urbumu griezumos – **Strēļu 1., 2., 3. griezumā** (1. att.) – iegūļ *blīvi, melni oļļaini mālainie nogulumi* biezumā līdz diviem metriem (2. att.).



2. attēls. Juras nogulumu griezumā Strēļu urbumos virzienā no atradnes centrālās (A) uz ziemeļu (C) daļu: A – 1. griezumā S. 1, B – 2. griezumā S. 2, C – 3. griezumā S. 3.

1 – paraugu ņemšanas intervāli (S. 2–3 – Strēļu 2. griezuma 3. paraugs), 2 – noraktās juras nogulumus pārsejošās kvartārsēgas intervāli, 3, 4 – kvartāra grants ar oļļiem, 5, 6 – smilts piejaukums mālos, 7, 8 – brūnoglek, 9, 10 – māla starpkārtas, m – māls, s.l.s. – ļoti smalkgraudaina smilts.

Figure 2. Geological sections of the Jurassic deposits in the Strēļi drill-holes from central to northern part of the deposit: A – section 1, S. 1, B – section 2, S. 2, C – section 3, S. 3. 1 – intervals of samples (S. 2–3 – sample 3 of the Strēļi section 2), 2 – excavated intervals of the overlying Quaternary deposits, 3, 4 – Quaternary gravel with pebbles, 5, 6 – sand admixture within clays, 7, 8 – brown-coal, 9, 10 – clay interlayers, m – clay, s.l.s. – very fine sand.

Ogļaini mālainie nogulumi šajā atradnes daļā uzguļ gaišākai, ļoti smalkgraudainai, ar ūdeni piesātinātai smiltij. Pie kontakta ar smilšainajiem nogulumiem nogulumos ir lielāks smilts piejaukuma saturs un tikai vietām griezumā melnie māli ir sīkdispersi. Viscaur mālos nevienmērīgi izplatīti arī brūnogļu ieslēgumi, vietām mālainās slāņkopas augšējā daļā sastopami arī atsevišķi brūnogļu starpslāņi (2. att.).

Melnajos mālos no māla minerāliem dominē kaolinīts, mazākā daudzumā sastopams illīts un piejaukuma veidā arī smektīts (S. 2–3, 2–5; 3. att.). Smilts frakciju veido kvarcs, vizla, dzelzs sulfīdu agregāti un liels daudzums ogļainu augu atlieku.

Melnajos mālos un brūnoglēs dažviet konstatēti arī smilts izmēra magmatisko un metamorfo iežu un karbonātu graudiņi. Slāņkopas augšējā daļā ogļaini mālainajos nogulumos ietverts smilšaini granšainais materiāls (2. att.), kas pēc sastāva atbilst juras nogulumus pārsedzošajiem kvartāra nogulumiem ar juras mālu piejaukumu un liecina par kvartāra glaciālo procesu ietekmi uz juras slāņkopu.

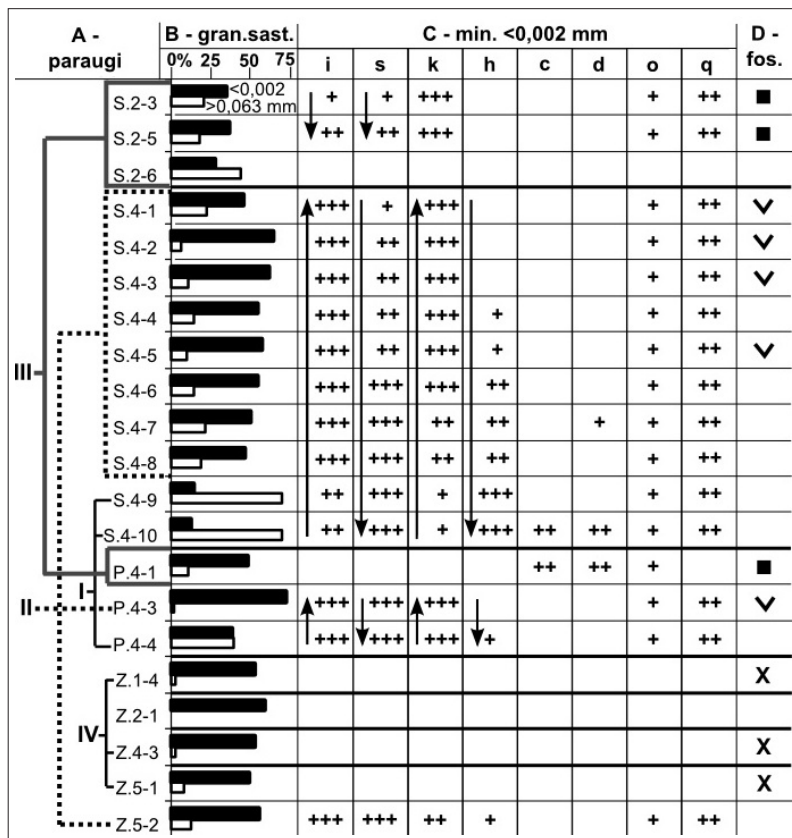
Strēļu atradnes ziemeļrietumu daļā dokumentēto juras slāņkopu **Strēļu 4. griezumā** (1. att.) sešu metru biezumā lielākoties veido *pelēki smilšaini mālainie nogulumi*, ko tikai augšdaļā ar krasu robežu *sedz plāns melnu, blīvu, sīkdispersu ogļainu mālu slānītis*, – litoloģiski tie *atbilst augstāk minētajiem nogulumiem Strēļu 1–3. griezumā*, kas ieguļ tuvāk atradnes centrālajai daļai.

Urbumā sasniegtās nogulumu slāņkopas apakšējo daļu (paraugi S. 4–10 – 4–8; 3. att.) aptuveni divu metru intervālā veido pelēka, smalkgraudaina smilts, ar nevienmērīgi izplatītiem blīva, zaļganpelēka māla ieslēgumiem, saveltņiem un starpkārtām līdz piecu centimetru biezumā. Apakšējā daļā ap pusmetru biezā intervālā mālaino ieslēgumu ir mazāk un nogulumi ir stipri smilšaini (paraugi S. 4–10 un S. 4–9; 3. att.).

Augstāk griezumā gandrīz četru metru biezumā ieguļ smalkgraudaināki nogulumi – zilganpelēki līdz pelēki mālaini aleirīti, aleirītiski māli un sīkdispersi māli (paraugi S. 4–7 – 4–1; 3. att.). Slāņa apakšējā daļa ir kopumā smilšaināka, un novērojami gaišas smalkgraudainas smilts ieslēgumi un dažus milimetrus plānas starpkārtas.

Virzienā uz slāņkopas augšu nogulumi kļūst mālaināki un ar viendabīgāku tekstūru. Jau slāņa vidusdaļā vietām sastopamas melnas nesadalījušās koksnes atliekas, un līdz ar nogulumu graudu izmēru samazināšanos to daudzums palielinās. Slāņa augšējo daļu aptuveni metra intervālā veido sīkdispersi māli ar lielu daudzumu nesadalījušās koksnes atlieku (3. att., 4. att.).

Slāņkopas apakšējā daļā nogulumu māla frakcijā dominē smektīts, sastopams illīts, konstatēts arī hlorīts, kalcīts un dolomīts, taču ļoti vāji izteikta Latvijas juras nogulumiem raksturīgā māla minerāla kaolinīta klātbūtne. Virzienā uz slāņkopas augšu smektīta saturam nogulumos ir tendence būtiski samazināties, tāpat arī izzūd hlorīta un karbonātu minerālu pazīmes, bet lielākā daudzumā parādās kaolinīts. Slāņkopas augšējā daļā dominē kaolinīts un illīts ar nelielu smektīta piejaukumu (3. att.). Pelēko mālaino nogulumu smilts frakciju veido monominerāla kvarca smilts, sastopami arī dzelzs sulfīdu (galvenokārt pirīta) agregāti, kā arī vāji sadalītas koksnes atliekas.



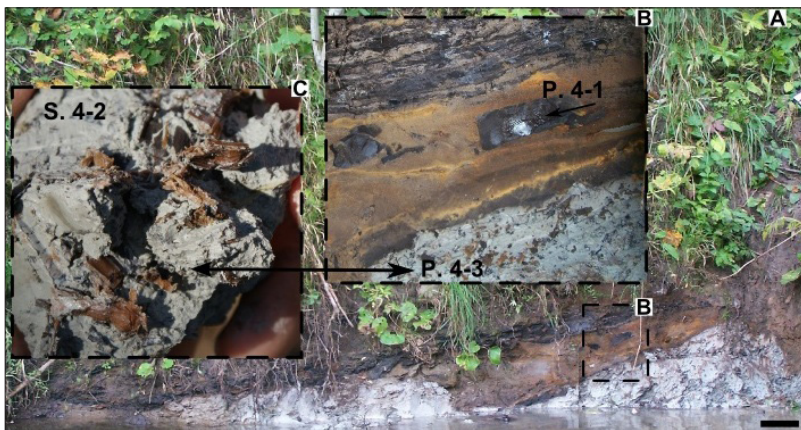
3. attēls. Granulometriskais, minerālais un fosiliju sastāvs analizētajos paraugos un izdalīto nogulumu paveidu sasaiste dažādos dokumentētajos griezumās.

Paraugu secība griezumu ietvaros atbilstoša virzienam no griezumu augšas uz apakšu, paraugu apzīmējumu atšifrējums sk. 1. un 2. att. **A** – analizētie paraugi: I – pelēki smilšaini nogulumu S. 4 un P. 4 griezuma apakšējā daļā; II – pelēki mālaini nogulumu ar vāji sadalītām koksnes atliekām S. 4 un P. 4 griezuma augšējā daļā; III – melni mālaini nogulumu ar brūnoglekļa piejaukumu S. 2 griezumā; IV – melni mālaini nogulumu ar jūras bezmugurkaulnieku atliekām Zaņas ielejā. **B** – māla (melna līnija) un smilts (balta līnija) frakcijas sadalījums paraugos. **C** – minerālu relatīvais sadalījums māla frakcijā: i – illīts, s – smektitis, k – kaolinīts, h – hlorīts, c – kalcīts, d – dolomīts, o – ortoklāzs, q – kvarcs (+++ – paraugos dominējošie minerāli, ++ – minerālu saturs būtisks, + – minerāli identificēti piejaukuma veidā; bulciņa minerāla saturs pieauguma virzienā). **D** – konstatētās fosilijas (■ – brūnoglekļa piejaukums, □ – vāji sadalītas koksnes atliekas, X – jūras periodam atbilstošās jūras bezmugurkaulnieku atliekas).

Figure 3. Grain-size, mineral and fossil composition of the analyzed samples and correlation of the deposit types among the documented sections.

Sequence of the samples within separate sections with direction from top to bottom, decoding of the symbols of the samples in Fig. 1 and Fig. 2. **A** – samples analyzed: I – gray sandy deposits in the lower part of sections S. 4 and P. 4; II – gray clayey sediments with lowly decomposed plant remains in the upper part of sections S. 4 and P. 4; III – black clayey deposits with admixture of brown coals in the section S. 2; IV – black clayey deposits with remains of marine invertebrates in the Zaņa Valley. **B** – quantity of clay (black line) and silt (white line) fraction in samples. **C** – relative quantity of minerals in clay fraction: i – illite, s – smectite, k – kaolinite, h – chlorite, c – calcite, d – dolomite, o – orthoclase, q – quartz (+++ – dominant minerals in samples, ++ – prominent quantity of minerals, + – minerals in the form of admixture identified; arrow to the increase of mineral content). **D** – fossils recognized (■ – admixture of brown coals, □ – lowly decomposed plant remains, X – remains of marine invertebrates of the Jurassic).

Arī Pulvernieku atradnes teritorijā dokumentētos juras mālainos nogulumus **Pulvernieku 4. griezumā** (1. att.) galvenokārt pārstāv *Strēļu 4. griezuma nogulumiem līdzīgi pelēki smilšaini mālainie nogulumi bez dzīvnieku atliekām* (3. att., 4. att.).



4. attēls. Juras nogulumi Pulvernieku un Strēļu atsegumos.

A – Pulvernieku 4. atsegums P. 4 (mērogs 10 cm). B – melnie māli (paraugs P. 4–1) un pelēkie māli ar vāji sadalītām augu atliekām (paraugs P. 4–3) Pulvernieku 4. atsegumā. C – pelēkie māli ar vāji sadalītām augu atliekām Strēļu 4. griezumā S. 4 (paraugs S. 4–2). Grafiskais mērogs 10 cm.

Figure 4. Jurassic deposits in Pulvernieki and Strēļu outcrops.

A – outcrop 4 in the Pulvernieki, P. 4 (scale 10 cm). B – black clays (sample P. 4–1) and gray clays with lowly decomposed plant remains in the Pulvernieki section 4 (sample P. 4–3). C – gray clays with lowly decomposed plant remains in the Strēļu section 4, S. 4 (sample S. 4–2). Graphical scale 10 cm.

Lētīžas upes gultnē pie atseguma pamatnes veiktā zondējuma apakšējā daļā iegūļ pelēki, blīvi, stipri smilšaini mālaini nogulumi gandrīz metra biezumā. Šiem nogulumiem raksturīgs bimodāls māla-smilts saturs sadalījums (paraugs P. 4–4; 3. att.), bet, atšķirībā no pelēkajiem smilšaini mālainajiem nogulumiem Strēļu atradnē, to tekstūra ir viendabīga bez atsevišķiem mālainākiem vai smilšainākiem ieslēgumiem.

Virzienā uz slāņkopas augšu smilts saturs nogulumos pakāpeniski samazinās un tie satur retas augu atliekas. Augstāk pusotra metra biezumā māli kļūst sīkdispersi ar lielu daudzumu melnu nesadalījušās koksnes atlieku (paraugs P. 4–3; 3. att., 4. att.).

Līdzīgi kā pelēko mālaino nogulumu slāņkopas apakšējā daļā Strēļu atradnē, arī Pulvernieku atradnes pelēko nogulumu māla frakcijā ir konstatētas hlorīta pazīmes un ievērojams smektīta daudzums, tomēr kā slāņkopas apakšējā – smilšainajā, tā augšējā – mālainajā daļā kaolinīta un illīta saturs ir vienlīdz liels (3. att.).

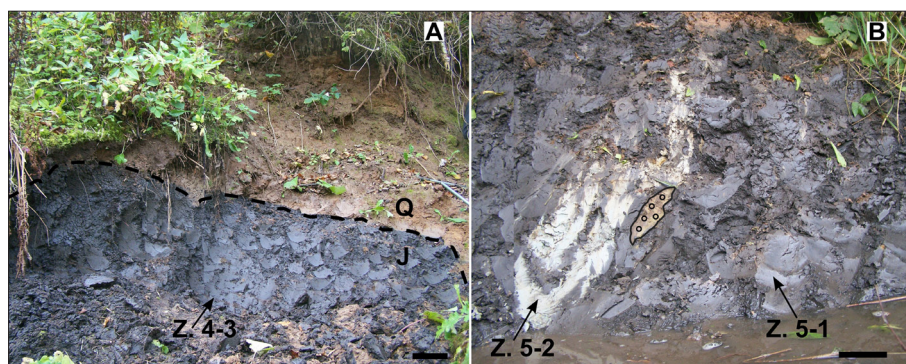
Atsegtās slāņkopas augšējā daļa, domājams, ledāja ietekmes rezultātā, ir ievērojami deformēta, un mālaino nogulumu biezums atsegumā ir neliels (4. att.).

Pelēkos mālainos nogulumus atsegumā sedz vidējgraudaina smilts. Tajā atsevišķu neizturētu, laterālā virzienā saspīestu kārtiņu veidā nevienmērīgi izplatīti melni, ogļaini māli (paraugs P. 4–1) ar biežām plānām smalkgraudainas smilts josliņām (4. att). Smiltī sastopamas arī oranžas līdz sarkanās dzelzs savienojumu konkrēcijas 5–6 cm diametrā.

Juras mālainie nogulumumi Zaņas upes krastos

Zaņas upes ielejā juras nogulumus **1., 2., 4., un 5. griezumā** (1. att.) galvenokārt pārstāv *melni sīkdispersi līdz aleirītiski māli* (3. att., 5. att.). Kopumā māli ir blīvi un viendabīgi. Lai gan tajos ir augsts organiskās vielas saturs (masas zudums pēc paraugu oksidēšanas ar ūdeņraža peroksīdu sasniedz 20%), atšķirībā no Pulvernieku un Strēļu atradnes melnajiem māliem šajos mālos augu atliekas vai brūnoglū ieslēgumi nav novērojami, tāpēc, iespējams, organiskās vielas masu veido planktona mikroorganismi. Tomēr mālu smilts frakcijā nereti atrodami sīki, iegareni zarainas formas dzelzs sulfīdu veidojumi, kas morfoloģiski atgādina piritizētas augu atliekas.

No visiem pētījumā analizētajiem nogulumiem tikai Zaņas ielejas melnajos mālos izdevies konstatēt juras periodam raksturīgo jūras bezmugurkaulnieku, galvenokārt foraminīferu, atliekas (paraugi Z. 1–4, 4–3, 5–1; 3. att.).



5. attēls. Juras mālu atsegumi pie Zaņas upes.

A – Zaņas 4. atsegums Z. 4: melnie māli (paraugs Z. 4–3) morēnas nogulumos. **B** – Zaņas 5. atsegums Z. 5: melnajos mālos (paraugs Z. 5–1) iekļauti pelēki māli (paraugs Z. 5–2) un brūna smilts. Q – kvartāra morēna; J – juras melnie māli; pārtrauktā līnija – attīrījuma robeža; punktētais laukums – brūna smilts. Grafiskais mērogs 10 cm.

Figure 5. Outcrops of the Jurassic clays by the River Zaņa.

A – outcrop 4 of the Zaņa, Z. 4: black clays (sample Z. 4–3) within till. **B** – outcrop 5 of the Zaņa, Z. 5: within black clays (sample Z. 5–1) included gray clays (sample Z. 5–2) and brown sand. Q – Quaternary till; J – black clays of the Jurassic; dashed line – border of the outcrop of the Jurassic clays; dotted area – brown sand. Graphical scale 10 cm.

Zaņas ielejā atsegto slāņkopu biezums ir neliels. Tā, piemēram, 1. griezumā mālainie nogulumumi atsedzas tikai dažu desmitu centimetru augstumā no upes līmeņa (kopā ar zondējumu upes gultnē pie atseguma pamatnes mālu slāņkopa dokumentēta aptuveni pusotra metra biezumā), bet 2. griezumā – pusmetra biezumā.

Visos Zaņas krastos atsegtajos juras mālainajos nogulumos novērojamas glacio-tektonisku deformāciju pazīmes. Vislabāk tās izpaužas 4. un 5. griezumā, kur juras mālaino nogulumu slāņkopu uzbūve un sastāvs liecina, ka tās ir glaciadislocētas.

Juras melno mālaino nogulumu 4. griezumā dokumentēts stāvkrastā, kur atsedzas vairākus metrus bieža morēnas smilšmāla slāņkopa (5. att.). Biezās un plastiskās segkārtas dēļ atseguma attīrīšana kombinēta ar zondējumu atseguma pamatnē. Pēc

zondējuma datiem aptuveni divu metru dziļumā no attīrītā atseguma augšas brūns morēnas smilšmāls veido arī juras slāņkopas pamatni, bet augstāk tas pāriet melnā morēnas smilšmālā, kas sajaukts ar juras melnajiem māliem pusmetra biezumā.

Pēc slāņkopas uzbūves un nogulumu sastāva augstāk aprakstītajam līdzīgs ir arī 5. griezumā (5. att.). Upes gultnē pie atseguma pamatnes veiktā zondējuma apakšējā daļā konstatēts ar juras melnajiem māliem sajaukts morēnas smilšmāla materiāls.

Šī slāņkopa arī ir ievērojami deformēta – melnajos mālos ietverta smalkgraudainas smilts lēca un sinklinālas krokas veidā orientēti pelēki, blīvi, sīkdispersi māli bez fosilijām (paraugs Z. 5–2; 3. att., 5. att.). Pelēko mālu minerālais sastāvs līdzīgs jau iepriekš raksturotajiem Pulvernieku un jo īpaši Strēļu atradnes pelēkajiem nogulumiem to slāņkopas pamatnē: no māla minerāliem dominē smekītis, illīta saturs ir neliels, vēl mazāks ir kaolinīta daudzums, un konstatētas arī vāji izteiktas hlorīta pazīmes (3. att.). Smilts frakcijas sastāvā bez kvarca graudiem sastopami arī mālainu karbonātu graudi.

Diskusija un interpretācija

Pētītie juras nogulumi Pulvernieku un Strēļu atradnes teritorijā attiecināmi uz senāko Latvijas juras slāņkopas daļu, kas veidojusies kontinentālos apstākļos, – Papīles svītā. To apliecina mālaino nogulumu asociācija ar Papīles svītai raksturīgajām brūnoglū iegulām, un papildus apstiprina jūras bezmugurkaulnieku atlieku trūkums šajos nogulumos (Brangulis u.c. 1998), taču tajos plaši izplatītas gan vāji sadalītas koksnes atliekas, gan arī brūnoglū ieslēgumi un starpkārtas. Kaolinīta piejaukums melnajos mālos norāda uz kontinentālu apstākļu ietekmi. Nelielo smekītā piejaukumu melnajos mālos iespējams saistīt ar to, ka smekītī mēdz veidoties arī augšņu veidošanās procesos tropiskā klimatā skābā, ar organisko vielu bagātā vidē cilmiežu ķīmiskās dēdēšanas rezultātā vājas drenāžas apstākļos vai reducējošā vidē (Reeves *et al.* 2006).

Atšķirīgas krāsas, zaļgani, māla saveltņi pelēkajos mālainajos nogulumos Strēļu 4. griezuma apakšējā daļā liecina par kāda senāka materiāla pārskalošanu, bet zaļa nokrāsa raksturīga triasa mālainajiem nogulumiem (Brangulis u.c. 1998). Arī minerālu asociācija nogulumu māla frakcijā Strēļu 4. un Pulvernieku 4. griezumā – ievērojamais smekītā saturs, kā arī hlorīta un karbonātu minerālu klātbūtne – norāda uz kontaktu ar paguļošo triasa slāņkopu, kam šie minerāli raksturīgi (Brangulis u.c. 1998). Pelēkajiem Pulvernieku 4. un Strēļu 4. griezuma nogulumiem litoloģiski un mineraloģiski līdzīgi ir arī Zaņas svītas melnajos mālos glaciotektoniski ietvertie pelēkie māli, kas arī, iespējams, pieder senākajai Papīles svītai.

Domājams, Papīles laikposma (t.i., agrā Kelovejas laikposma) sākumā pārskalots liels apjoms triasa mālaino nogulumu, bet virzienā uz pelēko mālaino nogulumu slāņkopas augšu arvien vairāk atspoguļojas juras periodā valdošie apstākļi. Tas izpaužas pakāpeniskā augu atlieku un kaolinīta satura pieaugumā, kas liecina par humīdu klimatu, kurā var attīstīties ķīmiskā dēdēšana (Nichols 2009).

Strēļu apkārtnē, domājams, uzkrājies lokāli pārskalots triasa mālu materiāls, bet Pulvernieku apkārtnē, kur pelēko smilšaini mālaino nogulumu tekstūra ir viendabīga

un juras pamatnē iegul perma kaļķakmeņi, pārskalotais triasa materiāls transportēts no attālāka reģiona.

Papiles laikposmā, iespējams, bija sedimentācijas pārtraukums vai pelēko nogulu augšējās daļas pārskalošana, jo pāreja starp Papiles svītas pelēko un melno mālu slāņiem ir nevis pakāpeniska, bet krasa. Tai sekoja kvarca smilts uzkrāšanās ar tumša mālainā un ogļainā materiāla piejaukumu, virs kuras veidojās melni māli un brūnogles. Šie juras nogulumi visticamāk ir veidojušies kontinentālos apstākļos, iespējams, ezeros, daļēji upju palieņu apstākļos.

Pētījumā dokumentētie Zaņas upes krastos atsegtie juras mālaino nogulumu griezumī pēc stratigrāfiskā iedalījuma atbilst Zaņas svītai un uzkrājušies mierīgā hidrodinamiskā režīmā transgresīvas jūras apstākļos. To apliecina tikai šajos nogulumos konstatētās jūras bezmugurkaulnieku faunas pārstāvju atliekas un apstiprina arī litoloģiskais sastāvs – melni māli (Brangulis u.c. 1998). Lielais organiskās vielas saturs un piritizētās augu atliekas liecina par organismu detrita piegādi baseinā.

Kopumā juras mālaino nogulumu saguluma apstākļi ir sarežģīti un pētījumos praktiski nav izdevies konstatēt griezumus, kur juras nogulumi iegul netraucētā sagulumā. Vairumā pētījumā dokumentēto griezumu Zaņas un Lētīzas krastos novērojams, ka juras slāņkopa ir glaciotektoniski deformēta, un vismaz dažviet arī glaciodydislocēta. Lētīzas krastā jau iepriekš zināms juras nogulumu atrautenis Lēģernieku atsegumā (Strautnieks u.c. 2006). Autorei izdevies no jauna dokumentēt arī divus citus juras nogulumu atrauteņus Zaņas krastā – jūras bezmugurkaulnieku atliekas saturošus melnus Zaņas svītas mālus 4. un 5. griezumā, kuri slāņkopu pamatnē sajaukti ar pagulošo kvartāra morēnas materiālu.

Glaciotektonisku deformāciju pazīmes lielākā vai mazākā mērā novērotas arī citos juras nogulumu giezumos. Tās izpaužas mālainajās slāņkopās gan Zaņas 2. griezumā pamatnē, gan Pulvernieku 4. griezumā un pat juras nogulumos veiktajos urbemos Strēļu atradnes teritorijā (1. līdz 3. griezumā) – gan melno mālu, gan brūnogļu slāņos sastopami magmatisko un metamorfo iežu, kā arī karbonātu graudi. Lielāks to saturs ir mālaini ogļainās slāņkopas augšējā daļā pie kontakta ar kvartāra nogulumiem, piemēram, Strēļu 2. urbema augšējā daļā ar kvartāra granšaino materiālu sajauktais melno mālu slānis sasniedz pusmetra biezumu. Acīmredzot juras nogulumus spēcīgi ietekmējuši glaciālie procesi. Par iemeslu tam varēja kalpot juras nogulumu ļoti zemā litifikācijas pakāpe, kā arī griezumā samērā bieži mainīgais litoloģiskais sastāvs.

Secinājumi

Papiles svītas pelēko mālaino nogulumu minerālais sastāvs un litoloģiskās īpatnības Strēļu atradnē liecina, ka to uzkrāšanās laikā tika ievērojami pārskaloti ar smektītu bagātie, zaļgie un karbonātiskie triasa nogulumi. Slāņkopas piederību jurai tomēr apstiprina griezumā uz augšu izsekojamā graudu izmēru samazināšanās un pakāpeniski viendabīgāka nogulumu tekstūra (no pelēkiem smilšainiem nogulumiem ar zaļganas nokrāsas māla starpkārtām un ieslēgumiem uz sīkdispersiem pelēkiem māliem), augu atlieku parādīšanās un pakāpeniskas pārejas tendence no triasam (smektīts, ir hlorīts, illīts, nav kaolinīta) uz jurai raksturīgākiem māla minerāliem (ir kaolinīts, illīts, smektīta mazāk un nav hlorīta). Līdzīgu pārgulsnetu nogulumu

materiāla klātbūtne arī Pulvernieku un Zaņas griezumos norāda, ka triasa slāņkopas pārskalošana juras periodā bijusi reģionāla.

Papiles laikposma gaitā nogulumos vairs nenonāca tik daudz pārskaloto triasa nogulumu un nogulu sedimentācijā arvien vairāk izpaudās humīda klimata un kontinentālo apstākļu ietekme – parādījās smalkgraudaināki melni māli ar augstu augu detrita saturu, tie kontaktē ar kvarca smilts un brūnogļu slāņiem, un mālu minerālajā sastāvā ir ievērojami vairāk kaolinīta nekā senākos Papiles svītas nogulumos.

Zaņas krastos sastopami nedaudz jaunākās Zaņas svītas nogulumi, kas uzkrājušies mierīgā hidrodinamiskajā režīmā jūras apstākļos, uz to norāda bagātīgās jūras bezmugurkaulnieku atliekas, kā arī mazie nogulumu graudu izmēri.

Pētījumu rezultāti liecina, ka juras mālaino nogulumu materiāls ir sajaukts gan ar pagulošajiem triasa nogulumiem, gan arī pārsedzošajiem kvartāra nogulumiem, un tīru, netraucētu juras nogulumu izplatība ir ierobežota. Juras nogulumi bieži sastopami atraucēnu veidā, un glaciadislokācijas vairāk skārušas ar jūras bezmugurkaulnieku atliekām bagātos Zaņas svītas mālus. Šī iemesla dēļ ir apgrūtināta juras slāņkopas fāciju analīze un paleoģeogrāfiskās rekonstrukcijas.

Pateicības

Pētījums izstrādāts ar VPP „Vietējo resursu (zemes dziļu, meža, pārtikas un transporta) ilgtspējīga izmantošana – jauni produkti un tehnoloģijas (NatRes)” apakšprojekta Nr.1 „Jaunu tehnoloģiju izstrādāšana inovatīvu produktu radīšanai no Latvijas zemes dziļu resursiem (ZEMES DZĪLES)” un ESF projekta „Atbalsts maģistra studiju programmu īstenošanai Latvijas Universitātē” atbalstu. Par atbalstu pētījuma realizācijā paldies Ģ. Stinkulim, J. Kostjukovam un A. Actiņam, kā arī J. Karušam un A. Ņelajevam par palīdzību lauka pētījumos. Paldies par arī Ģ. Stinkulim un V. Hodirevai par manuskripta recenzēšanu un ieteikumiem.

LITERATŪRA

- Brangulis A., Kuršs V., Misāns J., Stinkulis Ģ. 1998. *Latvijas ģeoloģiskā karte. Mērogs 1:500 000. Ģeoloģiskās uzbūves apraksts*. Valsts Ģeoloģijas dienests, Rīga. 71 lpp.
- Grigelis A., Norling E. 1999. *Jurassic geology and foraminiferal faunas in the NW part of the East European Platform*. Geological Survey of Sweden, Upsala. 101 pp.
- Juškevičs V., Kondratjeva S., Mūrnieks A., Mūrniece, S. 1997. *Latvijas ģeoloģiskā karte. Mērogs 1:200 000. 31. lapa – Liepāja. Paskaidrojuma teksts un kartes*. Valsts Ģeoloģijas dienests, Rīga. 49 lpp.
- Nichols G. 2009. *Sedimentology and Stratigraphy*. John Wiley & Sons, Chichester. 432 pp.
- Poppe L.J., Eliason A.H., Fredericks J.J., Rendigs R.R., Blackwood D., Polloni C.F. 2003. Grain-size Analysis of Marine Sediments: Methodology and Data Processing. In: Poppe L.J., Polloni C.F. (eds) *USGS East-coast sediment analysis: procedures, database, and georeferenced displays*, US Geological Survey Open-File Report 00-358, CD-ROM.
- Reeves G.M., Sims I., Cripps J.C. (eds) 2006. *Clay Materials Used in Constructions*. London, Geological Society.
- Rinks E. 1947. Pulvernieku juras formācijas māli. *Latvijas PSR Zinātņu Akadēmijas Ģeoloģijas un ģeogrāfijas institūts. Raksti I*. 235.–248.

Strautnieks I., Zelčs V., Markots A., Stinkulis Ģ. 2006. Stop 13: Glaciotectonic structures of Pleistocene and Jurassic deposits at the Lēģernieki farmhouse. In: Stinkulis Ģ., Zelčs V. (eds) *The Ninth Marine Geological Conference – The Baltic Sea Geology. Pre-Conference and Post-Conference Field Excursion Guidebook*. Riga, University of Latvia, pp. 64–67.

NEPUBLIĒTĀ LITERATŪRA

- Berzin'sh K. 1956. *Otchet o poiskovuiikh rabotakh v Skrundskom raione na ogneupornuie glini*. Latgiprogorstroī, Riga. 474 s. (krievu val., LVGMC fonda inventāra Nr. 09538)
- Kostjukovs J., Actiņš A., Sarceviča I., Karasa J. 2012. Method for obtaining smectites from clay having low levels of smectites. EP 2 465 820 A1. *European Patent Register*.

**Kēmu terases smilts iegulu pētījumi ar ģeoradaru
Taurenas apkaimē, Vidzemes augstienē**
*Studies of the Kame Terrace Sand Deposits Using Ground
Penetrating Radar in the Vicinity of the Taurene Village,
Vidzeme Upland*

Jānis Karušs

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte
Alberta iela 10, Rīga, LV-1010
e-pasts: janis.karuss@inbox.lv

Valdis Segliņš

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte
Alberta iela 10, Rīga, LV-1010
e-pasts: vs@lu.lv

Kopsavilkums

Pētījumā izmantotā metode – radiolokācijas profilēšana – ir salīdzinoši jauna, tāpēc metodes lietošanas iespējas un metodika vēl nav izstrādāta. Pētījumā tiek sniegts izpētes objektu ģeoloģiskās uzbūves raksturojums, izmantotās pētījumu metodikas apraksts, iegūtie pētījumu rezultāti, kuros ietilpst kēmu terases ģeoloģiskie griezumumi un pēfīto nogulumu granulometrisko un mitruma daudzuma analīžu rezultāti, kā arī ģeofizikālo mērījumu ieraksti, iegūto rezultātu interpretācija, diskusija par iegūtajiem rezultātiem un secinājumi par metodes izmantošanas iespējām līdzīga rakstura pētījumu veikšanai nākotnē.

Atslēgvārdi: ģeofizika, dielektriskā caurlaidība, ģeofizikālie mērījumi.

Summary

The research method applied here – profile of radiolocation – is a comparatively new, and thus its prospective application and research methodology are not elaborated in details yet. The paper presents geological structure of kame terrace, description of applied research methodology, the obtained data, which include geological cross-sections and, granular analysis and humidity analysis results of the examined deposits, as well as records of geophysical measurements, interpretation of the obtained results, discussion concerning the obtained results and the conclusion on application of this respective method to similar studies in the future.

Keywords: geophysics, dielectric permittivity, geophysical measurements.

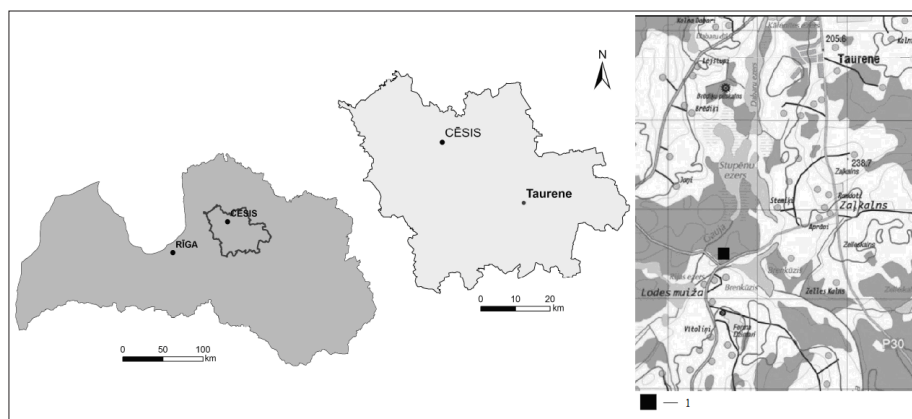
Ievads

Radiolokācijas metode ir salīdzinoši jauna un tās teorētiskais pamatojums nav pilnībā izstrādāts. Joprojām elektromagnētisko viļņu izplatīšanās likumsakarības gruntīs tiek skaidrotas ar vienkāršotiem viļņu optikas pamatprincipiem, kuri ne vienmēr sniedz skaidrojumu radiolokācijas pētījumos iegūtajiem rezultātiem

(Finkel'shtein et al. 1994). Iepriekš minētie metodes teorētiskā pamatojuma trūkumi apgrūtina standartizētas pētījumu realizācijas metodikas izstrādi. Minētais attiecas kā uz lauka pētījumiem, tā arī uz kamerālo iegūto datu apstrādi, interpretācijas paņēmieniem un procedūrām. Tādēļ joprojām radiolokācijas metodoloģija vienmēr tiek pielāgota konkrētā pētījuma vajadzībām un ir balstīta uz pētījuma autora empīriski iegūto pieredzi (Gomez-Ortiz et al. 2010; Starovoytov 2008; Neal 2004; Slater and Reeve 2002; Finkel'shtein et al. 1994). Tāpat vairāki pētnieki (Reynolds 1997; Burger et al. 2006) norāda uz visai vāji apzinātajām metodes izmantošanas iespējām ģeoloģiskajos pētījumos. Tādēļ pētījuma mērķis ir izvēlēties ģeoloģiskā griezuma izpētei piemērotu pētījumu metodiku, identificēt radiolokācijas signāla avotus terīgēna materiāla nogulumos un interpretēt iegūtās robežas radarogrammās.

Materiāli un metodes

Pētījumā tiek izmantots SIA Radar Systems Latvijā ražotais ģeoradars *Zond-12e* un antenu sistēma ar centrālo frekvenci $500\,000\text{ s}^{-1}$. Pētījuma lauka darbi tika veikti 2009. gada jūnijā un novembrī, kā arī 2012. gada jūlijā Taurenes novada Lodes muižas apkārtnē kēmu terases karjerā (1. att.). Pētījumā tika izvēlēts izmantot Lodes muižas apkārtnes teritoriju, jo šeit ģeoloģiskā uzbūve ir ļoti apzināta.



1. attēls. Pētījumu teritorijas atrašanās vieta.

Apzīmējumi: 1 – Lodes karjers.

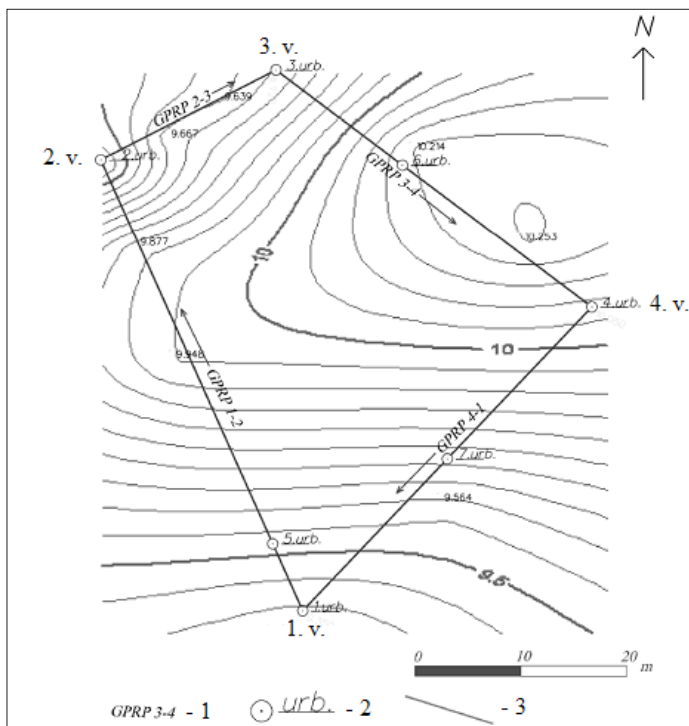
Figure 1. Location of the research area.

Legend: 1 – Lode pit.

Pētījums tika veikts Lodes muižas (Lodes) karjerā (2. att.). Pēc ģeoloģiskā griezuma precizēšanas ar kontroles urbumiem tika izvēlēts detalizētu pētījumu laukums, kas būtu piemērots pētījuma mērķa sasniegšanai. Šajā posmā tika veikta arī radiolokācijas ierakstu testēšana un pārbaudes, kas apstiprināja vairāku atstarojumu iegūšanu no nogulumu slāņiem ar atšķirīgām fizikālām īpašībām.

Detailizētiem pētījumiem tika izvēlēta radiolokācijas profilēšanas metode, kas ļauj iegūt nepārtrauktu ģeofizikālo mērījumu ierakstu. Lodes karjerā profilu galapunkti tika iezīmēti ar piketiēm, un joslas starp piketiēm attūrtas no objektiem,

kas varētu traucēt vienmērīgai antenas sistēmas pārvietošanai un rezultātā izraisīt traucējumus saņemtā signāla reģistrācijai. Piketu koordinātes tika fiksētas ar GPS iekārtu *Garmin etrex legend cx*, bet precīzai augstuma izmaiņu fiksēšanai profilos papildus tika veikta nivelēšana, izmantojot totālo staciju SOKKIA SET530RK S/N143185 un datu uzkrājēju SOKKIA SDR33 S/N (S)F197064.



2. attēls. Pētījumu teritorijas plāns.

Apzīmējumi: 1 – ģeoradara profils; 2 – urbums; 3 – poligona mala.

Figure 2. Plan of research area.

Legend: 1 – ground penetrating radar profile; 2 – drill hole; 3 – margin of the research area.

Iegūto ģeofizikālo mērījumu korelācijai ar pētījumu teritorijā sastopamajiem grunts slāņiem tika izmantoti profilu galapunktos iekārtotu kopskaitā četrus rokas urbumu ($d = 0,092$ m) dati. Iegūtie radiolokācijas signāli tika korelēti ar identificētajam grunts slāņu robežām, kas, izmantojot noteikto laika aizturi, pēc kuras signāli tika saņemti radiolokācijas zondēšanas laikā un identificēto slāņu biezumus, ļāva aprēķināt izdalīto grunts slāņu vides dielektriskās caurlaidības koeficienta vērtības. Pēc karjerā iegūto radiolokācijas profilu iepriekšējās analīzes tika veikti trīs papildu urbumi, lai precizētu eksperimentālā laukuma ģeoloģisko uzbūvi. Kopumā tika veikti septiņi urbumi ar kopgarumu 16,55 m. Urbšanas laikā tika ievākti 20 paraugi mitruma un granulometriskā sastāva laboratoriskām pārbaudēm. Paraugi tika noņemti no katra ģeoloģiskā griezumā izdalītā nogulumu slāņa. Iegūtie paraugi tika ietīti elastīgā polietilēna plēvē un ievietoti vakuuma maisiņā, lai transportēšanas laikā tie nezaudētu mitrumu.

Ģeoradara darba parametri tika iestafīti atbilstoši iepriekšēji apzinātam ģeoloģiskam griezumam – smilšainai slāņkopai. Pētāmo iežu vizuāli novērtētais granulometriskais sastāvs un mitruma daudzums noteica ievadīto vides dielektriskās caurlaidības koeficienta vērtību, kas tika novērtēta kā 16, kas atbilst mitrām smiltīm. Ieraksts tika veikts līdz 180 ns laika aizturei, kas, pieņemot, ka vide ir mitras smiltis, atbilst 6,7 m dziļumam. Saņemtais signāls tika pastiprināts proporcionāli dziļumam, vadoties pēc reģistrētā testa signāla. Ieraksts tika veikts nepārtraukti, fiksējot katru impulsu un izmantojot zemo frekvenču filtru. Veiktās distances fiksēšanai tika izmantots ar antenu sistēmu savienots odometrs. Pētījumam tika izvēlēti četri radiolokācijas profili, tie tika atkārtoti divas reizes. Kopumā pētījums Lodes karjerā ietvēra astoņus radiolokācijas profilus ar kopgarumu 284 m.

Grunts paraugu analīze

Lauka darbos ievāktajiem paraugiem mitruma daudzuma un granulometrijas analīzes tika veiktas LU Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes Iežu pētījumu laboratorijā ar sijāšanas un žāvēšanas metodi (Indāns u.c. 1986). Parauga granulometriskais sastāvs tika noteikts, izmantojot sijāšanas metodi, kā arī smalkāko frakciju atdalīšanai paraugi tika skaloti. Lai izdalītu granulometriskās frakcijas, paraugi aptuveni 15 minūtes tika sijāti ar iekārtu *Retsch AS200*, izmantojot sietus ar šādu acu izmēru – 50 μm, 63 μm, 80 μm, 100 μm, 125 μm, 160 μm, 200 μm, 250 μm, 315 μm, 400 μm, 500 μm, 630 μm, 800 μm, 1 mm, 1,25 mm, 1,6 mm, 2 mm. Paraugu mitrums tika noteikts ar žāvēšanas metodi (Indāns u.c. 1986). Granulometrisko un mitruma analīžu dati tika apkopoti īpaši izveidotā datu bāzē *Ms Excel* tabulās.

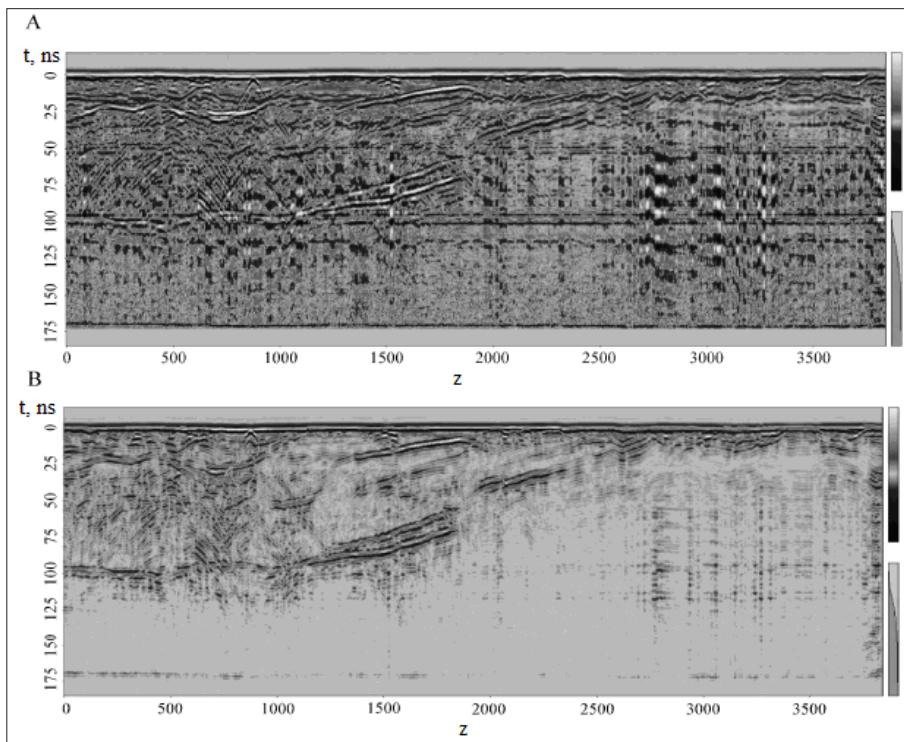
Ģeofizikālo datu analīze

Analīzes sākumposmā, vēl neveicot radiolokācijas profilu detalizētu apstrādi, profilu ierakstos identificējamajiem signāliem tika noteikta polaritāte, tā tika izmantota relatīvo vides dielektrisko caurlaidību salīdzināšanai ģeoloģiskajām vidēm virs un zem signāla analizētajā radarogrammā.

Pirms detalizētas iegūto signālu analīzes radiolokācijas profili tika apstrādāti, izmantojot vairākas metodes, ar kuru palīdzību iespējams atdalīt lietderīgos signālus no traucējumiem (3. att.). Vispirms tika izmantots filtrs fona traucējumu atdalīšanai (specializēta datorprogramma programmā *Prism 2.5*, kas iestrādāta kā izvēlne *Background removal*). Ar šo filtru tiek dzēsti horizontāli signāli, kas stiepjas visā profila garumā. Pēc fona traucējumu atdalīšanas tiek izmantots *Ormsbija* filtrs, ar kuru tiek izdalīts turpmākai analīzei izmantotais signālu frekvenču spektrs (Zolotarev 2007). Dati par pārējām iegūtajām spektra frekvencēm tiek dzēsti, kas ievērojami atvieglo datu turpmāko apstrādi un interpretāciju.

Pieredze rāda, ka, izmantojot datorprogrammas *Prism 2.5* piedāvātos matemātiskos signāla filtrus, nav iespējams pilnībā izšķirt informatīvos signālus no traucējumiem, līdz ar to, pilnībā atbrīvojoties no traucējumiem, tiek zaudēta arī daļa derīgo signālu. Tādēļ kvalitātes un ieraksta pilnīguma pārbaudes ir veicamas vairākkārtīgi, pirms tiek dzēsta kāda ieraksta frekvenču daļa. Fona trokšņu dzēšana nav jāveic pilnībā, lai informatīvo signālu zudums šādi tiktu iespējami samazināts.

Radiolokācijas profilu analīzes sākumposmā tiek veikta subhorizontālo signālu identificēšana un lokālo signālu identificēšana.



3. attēls. Radiolokācijas profila apstrādes rezultāts.

A – sākotnējais jeb neapstrādāts profils, B – apstrādāts profils.

Apzīmējumi: t – laiks; z – zondējumi.

Figure 3. Ground penetrating radar profile processing result.

A – unprocessed profile, B – processed profile.

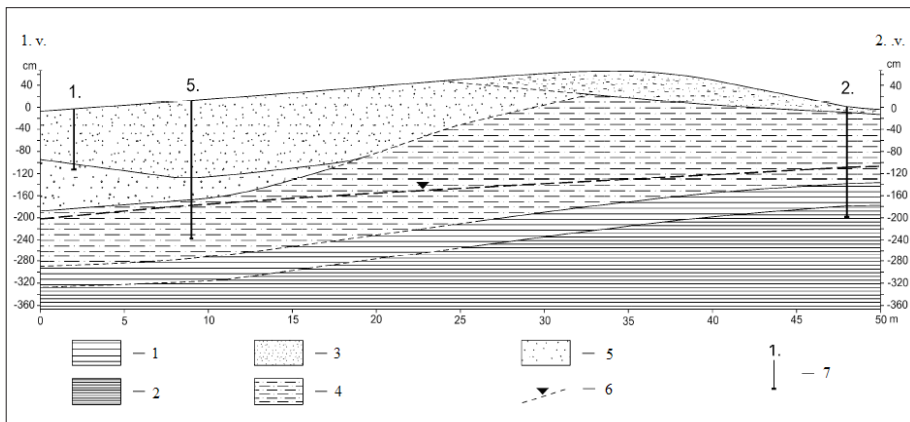
Legend: t – time; z – traces.

Subhorizontālo signālu identificēšanai tika izmantots filtrs lokālu signālu dzēšanai (Zolotarev 2007). Šāds risinājums ļāva pastiprināt un iegūt izteiktākus un vieglāk izsekojamus tieši subhorizontālos signālus, kas visbiežāk ir saistīti ar ģeoloģiskajām robežām. Savukārt lokālo signālu identificēšanai tika izmantots filtrs subhorizontālo signālu dzēšanai (Zolotarev 2007), kas rezultātā ļāva izdalīt atstarotos signālus no tādiem lokāliem objektiem kā salīdzinoši lielu izmēru oļi un akmeņi.

Rezultāti

Ģeoloģisko pētījumu rezultātā tika noteikta pētītā Lodes karjera eksperimentālā laukuma ģeoloģiskā griezuma virsējās kārtas uzbūve un, izmantojot nivelēšanas datus, tika precizēta Lodes karjera topogrāfija.

Tā griezuma 1–2 apakšējā daļā ieguļ trekni violeti māli, bet virs tiem ieguļ 0,40 m biezs sarkanbrūna māla slānis ar nelielu aleirīta piejaukumu (4. att.).

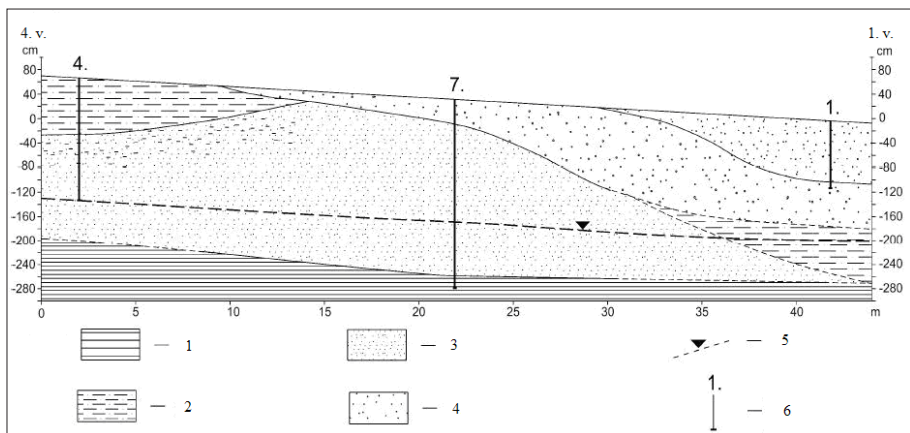


4. attēls. Ģeoloģiskais griezum 1–2.

Apzīmējumi: v. – virsotne; 1 – māls; 2 – māls, trekns; 3 – smilts, smalkgraudaina; 4 – aleirīts smilšains; 5 – grants, smilšaina; 6 – gruntsūdens līmenis (19.06.2009.); 7 – urbums un urbuma numurs.

Figure 4. Geologic section 1–2.

Legend: v. – vertex; 1 – clay; 2 – fine clay; 3 – fine sand; 4 – sandy silt; 5 – sandy gravel; 6 – groundwater level (19.06.2009.); 7 – drill hole and drill number.



5. attēls. Ģeoloģiskais griezum 4–1.

Apzīmējumi: v. – virsotne; 1 – māls; 2 – aleirīts, smilšains; 3 – smilts, smalkgraudaina; 4 – grants, smilšaina; 5 – gruntsūdens līmenis (19.06.2009.); 6 – urbums un urbuma numurs.

Figure 5. Geologic section 4–1.

Legend: v. – vertex; 1 – clay; 2 – sandy silt; 3 – fine sand; 4 – sandy gravel; 5 – groundwater level (19.06.2009.); 6 – drill hole and drill number.

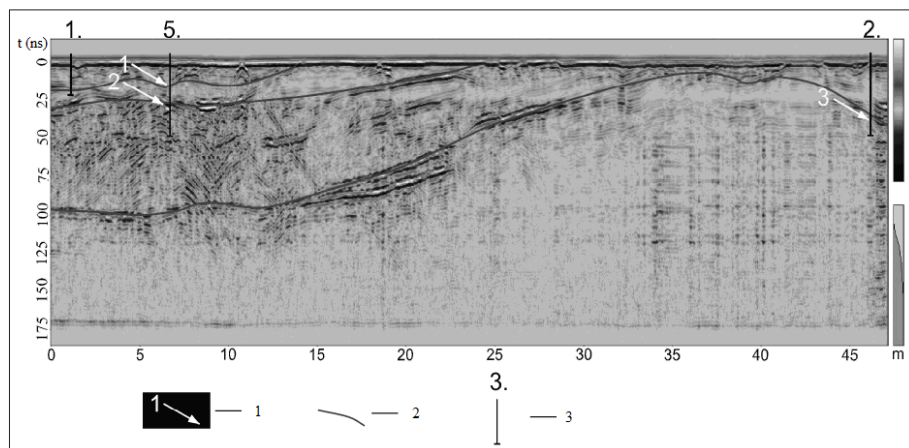
Lielāko griezuma daļu aizņem smilšains aleirīta slānis sarkanbrūnā krāsā, tas caurmērā ir vienu metru biezs, un to DA daļā pārklāj smilšainas grants slānis sarkanbrūnā krāsā. Grants slānis ir mitrs, un tajā sastopami oļi, kuru diametrs nepārsniedz četrus centimetrus. Virs tā iegūļ smalkgraudaināks sarkanbrūns smilšainas grants slānis ar retiem oļiem. Griezuma augšdaļā ZR daļā iegūļ aleirītiskas, mitras, sarkanbrūnas smilts slānis, kura biezums nepārsniedz 0,3 m biezumu.

Griezuma 4–1 apakšējā daļā iegul sarkanbrūna māla slānis ar aleirīta piejaukumu, to pārklāj sarkanbrūnas smalkgraudainas smilts slānis, bet griezuma ZA daļā smilts slāņa augšējā daļā ir vērojams aleirītiska materiāla piejaukums (5. att.).

Ģeoloģiskā griezuma vidusdaļā slānis ir aptuveni 2,6 metrus biezs, bet ZA griezuma augšdaļā iegul sarkanbrūna smilšaina aleirīta slānis. Griezuma DR daļā virs smilts slāņa iegul sarkanbrūns smilšaina aleirīta slānis, kuru pārsedz smilšainas grants slānis. Virs grants slāņa griezuma DR daļā iegul slānis, kuru veido smalkas sarkanbrūnas grants ar smilts piejaukumu slānis, tajā vietām sastopami arī nelieli oļi.

Iepriekšēji raksturotie ģeoloģiskie griezumi tika pētīti ar radiolokācijas metodi, iegūtie rezultāti ir kvalitatīvi un var tikt interpretēti.

Radiolokācijas profils 1–2. Piektajā urbumā konstatētā robeža starp granšainu smilti un smilšainu granti (sk. 4. att.) tiek saistīta ar pirmo signālu profilā 1–2 (6. att.). Pirmais signāls ir viegli izsekojams radiolokācijas profila 1–2 augšējā daļā, un tas arī tiek saistīts ar pirmajā urbumā konstatēto robežu starp granšaino smilti un smilšaino granti (sk. 4. att.). Signāls zondēšanas laikā tika saņemts pēc 17 nanosekundēm.



6. attēls. Radiolokācijas profils 1–2.

Apzīmējumi: 1 – identificētais signāls; 2 – izsekotais signāls; 3 – urbums un urbuma numurs.

Figure 6. Ground penetrating radar profile 1–2.

Legend: 1 – identified signal; 2 – traced signal; 3 – drill hole and drill number.

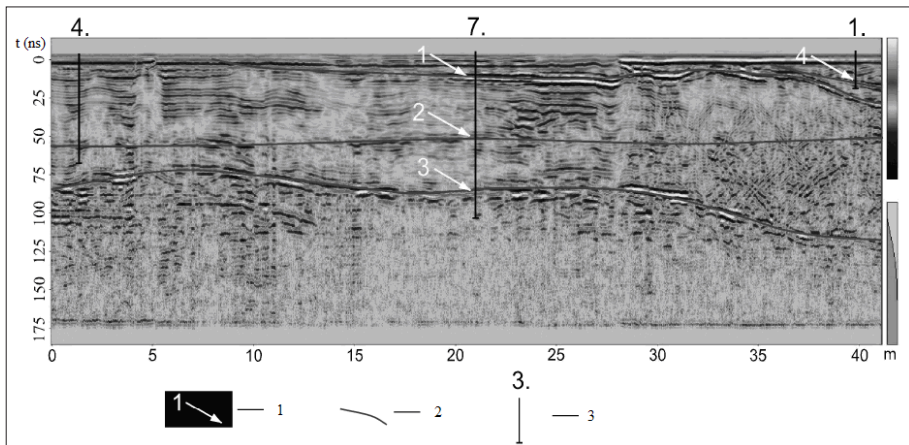
Ņemot vērā granšainas smilts slāņa biezumu (1,4 m), vides dielektriskās caurlaidības koeficients minētiem nogulumiem tika noteikts, izmantojot datorprogrammas *Prism 2.5* izvēlnes. Tas ir vienāds ar četri. Reģistrētais signāls ir pretējā fāzē raidītajam zondēšanas signālam, tāpēc vides dielektriskās caurlaidības koeficientam smilšainas grants slānim ir jābūt lielākam par četri.

Piektajā urbumā (sk. 4. att.) konstatētā robeža starp smilšainu granti un smilšainu aleirītu 1,80 m dziļumā tiek saistīta ar otro signālu profilā 1–2 (sk. 6. att.). Ņemot vērā, ka virs robežas ir 0,4 m biezs smilšainas grants slānis un to, ka signāls tika saņemts pēc 25 nanosekundēm, ir noteikts, ka vides dielektriskās caurlaidības koeficients ir vienāds ar seši. Reģistrētais signāls ir pretējā fāzē ar raidīto zondēšanas

signālu, tāpēc vides dielektriskās caurlaidības koeficientam smilšaina aleirīta slānim ir jābūt lielākam par seši. Apskatītais otrais signāls kopumā ir izsekojams profila 1–2 augšējā daļā pirmajos 25 metros.

Otrajā urbumā 1,4 m dziļumā konstatētā robeža starp smilšainu aleirītu un māla slāni (sk. 4. att.) tiek saistīta ar trešo signālu profilā 1–2 (sk. 6. att.). Signāls ir viennozīmīgi izsekojams visā profila garumā.

Radiolokācijas profils 4–1. Septītajā urbumā (sk. 5. att.) konstatētā robeža 0,37 m dziļumā starp smilšainu granti un smalkgraudainu smilti tiek saistīta ar pirmo signālu profilā 4–1 (7. att.). Atstarotais signāls tika saņemts pēc astoņām nanosekundēm, grants slānis ir 0,37 m biezs un šie lielumi, izmantojot datorprogrammas *Prism 2.5* izvēlnes, ļauj noteikt vides dielektriskās caurlaidības koeficientu grants slānim. Tas ir astoņi. Apskatītais pirmais signāls ir pretējā fāzē ar raidīto zondēšanas signālu, kas liecina par to, ka vides dielektriskās caurlaidības koeficients smalkgraudainajai smiltij ir lielāks par astoņi. Pirmais signāls ir viegli izsekojams profila daļā starp septīto un pirmo urbumu, bet tālāk tā kontrastainība zūd un tas nav viennozīmīgi atpazīstams.



7. attēls. Radiolokācijas profils 4–1.

Apzīmējumi: 1 – identificētais signāls; 2 – izsekotais signāls; 3 – urbums un urbuma numurs.

Figure 7. Ground penetrating radar profile 4–1.

Legend: 1 – identified signal; 2 – traced signal; 3 – drill hole and drill number.

Pazemes ūdens (gruntsūdens) līmenis septītajā urbumā (sk. 5. att.) tiek saistīts ar otro signālu profilā 4–1 (sk. 7. att.). Radiolokācijas zondēšanas laikā signāls tika saņemts pēc 49 nanosekundēm. Septītajā urbumā virs gruntsūdens līmeņa ir 1,63 m biezs smalkgraudainas smiltis slānis, un var noteikt, ka vides dielektriskās caurlaidības koeficientu smalkgraudainās smiltis slānim ir 14. Otrais radarogrammā reģistrētais signāls ir pretējā fāzē ar raidīto zondēšanas signālu, līdz ar to vides dielektriskās caurlaidības koeficientam zem gruntsūdens līmeņa ir jābūt lielākam par 14. Minētais otrais signāls arī tiek saistīts ar ceturtajā urbumā konstatēto gruntsūdens līmeni, jo atstarotais signāls ir viegli izsekojams profilā starp ceturto un septīto urbumu, bet

intervālā starp septīto un pirmo urbumu tas saplūst ar vairākiem lokāliem signāliem un tāpēc ir grūti izsekojams.

Septītajā urbumā 2,90 m dziļumā konstatētā robeža starp smalkgraudainu smilti un sarkanbrūnu mālu (sk. 5. att.) tiek saistīta ar trešo signālu profilā 4–1 (sk. 7. att.). Radiolokācijas zondēšanas laikā atstarotais signāls tika reģistrēts pēc 84 nanosekundēm. Virs slāņu savstarpējās robežas ir 0,90 m biezs ar ūdeni piesātināts smalkgraudainas smilts slānis. Iegūtajos ģeofizikālajos mērījumos un urbumos konstatēto slāņu robežu dziļuma mērījumi kopumā ļauj noteikt, ka vides dielektriskās caurlaidības koeficients ar ūdeni piesātinātai smalkgraudainai smiltij ir 26.

Pirmajā urbumā konstatētā robeža starp granšainu smilti un smilšainu granti (sk. 5. att.) tiek saistīta ar ceturto signālu profilā 4–1 (sk. 7. att.). Ņemot vērā to, ka signāls radiolokācijas zondēšanas laikā tika saņemts pēc 15 nanosekundēm un ka grantainas smilts slānis ir 1,10 m biezs, noteikts, ka vides dielektriskās caurlaidības koeficients šim slānim ir četri.

Diskusija

Pētījumu teritorijā ar tiešām ģeoloģiskām metodēm (urbšana, zondēšana) tika konstatēti māla, aleirīta un smilts nogulumu, kuriem (literatūrā pieejamie dati (Conyers 2004)) piemīt ievērojamas elektrisko īpašību atšķirības, tādēļ ar radiolokācijas metodi būtu iespējams iegūt izteiktu signālu no kontrastainām pēc savām īpašībām slāņu robežām. Ņemot vērā to, ka nelielas mitruma izmaiņas gruntī ietekmē tās elektriskās īpašības (Kearey and Brooks 1984), veiktā pētījuma gaitā bija svarīgi noteikt katra atsevišķā nogulumu slāņa granulometrisko sastāvu, mitruma daudzumu un gruntsūdens līmeni pētītajā teritorijā.

Vairāki pētnieki ir identificējuši salīdzinoši lielu skaitu grunts īpašības (blīvums, organiskās vielas daudzums, grunts daļiņu granulometriskais sadalījums u.c.), kas varētu ietekmēt radiolokācijas signāla izplatīšanos grunts slāņos (Conyers 2004; Kearey and Brooks 1984). Lai arī iepriekšēji minēto pētnieku viedokļi atšķiras, M. Finkelšteins (Finkel'shtein et al. 1994) savos pētījumos skaidri norāda, ka tieši mitruma daudzums ir izšķirošais radiolokācijas signālu diagnostikā, analizē un interpretācijā, bet dominējošā granulometriskā sastāva frakciju attiecību nozīme ir sekundāra. Tādēļ, tieši balstoties uz mitruma daudzumu gruntīs, būtu jāizvēlas grunts slāņiem atbilstošās vides dielektriskās caurlaidības koeficienta vērtības.

Ņemot vērā to, ka grunts mitruma daudzums ir cieši saistīts ar grunts daļiņu granulometrisko sadalījumu, korekta šo parametru ietekmes uz radiolokācijas signāla izplatīšanos gruntī analīze, izmantojot mērījumus, kas iegūti no grunts slāņiem dabiskā sagulumā, nav iespējama. Lai precīzi tiktu novērtēta grunts mitruma daudzuma un granulometriskā sastāva ietekme uz radiolokācijas signāla izplatīšanos smilšainās gruntīs, būtu jāveic laboratoriski eksperimenti slēgtā konteinerā, izmantojot smilts nogulumus ar dažādiem daļiņu granulometriskajiem sadalījumiem un mitruma daudzuma vērtībām.

Iecerētais pētījumu dziļums tika noteikts kā pieci līdz septiņi metri, kas ļautu iegūto ģeofizikālo informāciju pārbaudīt ar tiešām ģeoloģiskām metodēm. Tāpēc, balstoties uz zinātniskajā literatūrā pieejamo informāciju (Kearey et al. 2002;

Finkel'shtein et al. 1994), pētījuma realizācijai tika izmantota antenu sistēma ar centrālo frekvenci $500\ 000\ \text{s}^{-1}$, kas ļauj iegūt kvalitatīvus datus šādā dziļuma intervālā. Ģeofizikālo mērījumu atspoguļošanai tika lietota nepārtraukta datu ieraksta vizualizācija, kas specializētajā literatūrā (Milsom 2003) tiek aprakstīta kā viegli uztverama un atbilstoša pētījuma uzdevumu izpildei. Pētījumā veiktās radiolokācijas zondēšanas gaitā maksimālais dziļums, no kura tika iegūti kvalitatīvi dati, bija četri metri. Kvalitatīvu ģeofizikālo mērījumu iegūšanu no lielāka dziļuma ierobežoja mālaini nogulumi ar labu elektrovadītspēju.

Pētījumā iegūtie tiešie ģeoloģisko pētījumu dati un laboratorijas analīžu rezultāti tika izmantoti ģeofizikālo mērījumu kalibrācijai. Ģeoloģiskajos pētījumos iegūtie dati tika saistīti ar ģeofizikālajos pētījumos iegūtajiem rezultātiem un netika konstatēti mērījumi, kas būtu savstarpēji izslēdzoši. Pētījumā izmantotā ģeofizikālo mērījumu tiešā kalibrācijas metode, izmantojot ģeoloģiskos urbumus, ir pietiekami detalizēta, lai būtu iespējama korekta ģeofizikālo mērījumu interpretācija. Balstoties uz iegūtajiem pētījuma rezultātiem, konstatējams, ka kalibrācijas urbumu dziļumam ir jāpārsniedz maksimālais radiolokācijas profilēšanas dziļums pētījuma teritorijā. Līdzīgi metodiski ieteikumi izriet arī no citu pētnieku darbiem (Starovoytov 2008). Tomēr šajos darbos netiek apskatītas iespējamās kļūdas un neprecizitātes, kas izriet no metodes pieņēmumiem par vidējo pētāmo nogulumu īpašībām. Tā, piemēram, radiolokācijas datu interpretācijas kļūdas var rasties lokālu nogulumu slāņu īpašību izmaiņu rezultātā, jo salīdzinoši nelielas ģeoloģisko īpašību izmaiņas gruntī būtiski maina grunts slāņa elektriskās īpašības. Neviennozīmīga ir arī vidējotu īpašību izmantošana slāņkopām ar sarežģītu uzbūvi, kurās sastopamas lēcas ar atšķirīgu granulometrisku sastāvu. Šādos apstākļos ir iespējamas rupjas ģeofizikālo datu interpretācijas kļūdas, kas pamatoti var likt apšaubīt metodes iespējas un lietderību šo metodi izmantot ģeoloģiskos pētījumos. Pēc mūsu domām, šie jautājumi būtu detalizēti jāpēta nākotnē.

Veiktais pētījums un tā rezultāti norāda, ka līdzīgu pētījumu veikšanai jau lauka darbu sākumposmā ieteicams veikt vairākus kalibrācijas urbumus visā pētījumu teritorijā. Tad pēc sākotnējas ģeofizikālo mērījumu analīzes noteikt vietas, kurās iegūtie ģeofizikālie mērījumi ir komplicēti un neviennozīmīgi interpretējami. Šādās vietās nepieciešams veikt papildu kalibrācijas urbumus vai citus tiešos ģeoloģiskos novērojumus, kas ļautu atpazīt atstarotā signāla zuduma vai deformāciju iemeslus. Kalibrācijas urbumos ģeoloģiskos novērojumus un pētījumus nepieciešams veikt ar iespējami augstu precizitāti un detalizācijas pakāpi, jo korektai radiolokācijas datu analīzei un interpretācijai ir nepieciešami augstas precizitātes dati par pētījumu teritorijā sastopamo nogulumu īpašībām. Vēlams pētījumu teritorijā veikt arī nivelēšanu, jo teritorijas reljefa izmaiņu apzināšana atvieglo radiolokācijas zondēšanas gaitā iegūto signālu identifikāciju un interpretāciju.

Secinājumi

No pētījumu teritorijā sastopamajiem nogulumu tipiem izceļami māla un aleirītiska māla nogulumi, jo tiem piemīt augsta elektrovadītspēja un tie ekranē zem tiem paguļošos nogulumu slāņus. Tādēļ par šo ģeoloģisko griezumdaļu nav iespējams iegūt kvalitatīvus ģeofizikālos datus, ja netiek mainīta pētījumu metodika,

t.sk., izmantotā antenu sistēma. Minēto ir svarīgi ņemt vērā, plānojot līdzīgus pētījumus un sarežģītu ģeoloģisko griezumu pētījumos ir secīgi jāpiemēro vairākas metodikas.

Ģeofizikālo mērījumu kalibrācijai pētījumā tika izmantoti ģeoloģiskie urbumi. Iegūtie rezultāti ļauj secināt, ka šāda kalibrācijas metode ir sekmīgi lietojama teritorijās, kur ģeoloģiskajā griezumā ir sastopamas izturētas nogulumu slāņu robežas. Ja pētījumu teritorijas nogulumos sastopamas atšķirīga granulometriskā sastāva lēcas un ieslēgumi, kalibrācijas urbumi var sniegt nepietiekamu daudzumu informācijas veiksmīgai ģeofizikālo datu interpretācijai.

Ģeofizikālo datu apstrādes laikā fona traucējumu atdalīšanai tika lietota izvēlne *Background removal*. Veiktais pētījums norāda, ka šī izvēlne ir izmantojama ierobežoti, jo rezultātā tiek dzēsti arī informatīvie, subhorizontālie signāli.

Ar gruntsūdens līmeni saistīto signālu interpretācija nav viennozīmīga un šie signāli ne vienmēr ir atšķirami no citiem subhorizontālajiem signāliem, arī tādas pazīmes kā signāla polaritāte vai signāla amplitūdas maiņas nav uzskatāmas par drošām un indikatīvām.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- Burger H.R., Sheehan A.F., Jones C.H. 2006. *Introduction to Applied Geophysics*. [S.l.], W.W. Norton and Company, Inc. 554 pp.
- Conyers L.B. 2004. *Ground-Penetrating Radar for Archeology*. Walnut Creek California, A division of Rowman and Littlefield Publishers. 200 pp.
- Gomez-Ortiz D., Martin-Crespo T., Martin-Velazquez S., Martinez-Pagan P., Higuera, H., Manzano M. 2010. Application of ground penetrating radar (GPR) to delineate clay layers in wetlands. A case study in the Soto Grande and Soto Chico watercourses, Donana (SW Spain). *Journal of applied Geophysics*, 72, 107–113.
- Indāns A., Ošiņa J., Zobena A. 1986. *Inženierģeoloģija*. Rīga, Zvaigzne. 278 lpp.
- Kearey F., Brooks M. 1984. *An Introduction to Geophysical Exploration, second edition*. Osney Mead Oxford, Blackwell Scientific Publications. 262 pp.
- Kearey F., Brooks M., Hill I. 2002. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Garsington Road Oxford, Blackwell Science. 254 pp.
- Milsom J. 2003. *Field Geophysics, third edition*. West Sussex, John Wiley and Sons. 187 pp.
- Neal A. 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, 66, 261–330.
- Reynolds M.J. 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. West Sussex, John Wiley and Sons. 796 pp.
- Slater L.D., Reeve A. 2002. Case history: investigating peatland stratigraphy and hydrogeology using integrated electrical geophysics. *Geophysics*, 67, 365–378.
- Zolotarev V. 2007. *Georadar Zond-12e User's manual*. Rīga, Radar Systems Inc.
- Finkel'shtein M.I., Karpukhin V.I., Kutev V.A., Metelkin V.N. 1994. *Podpoverkhnostnaya radiolokatsiya*. Moskva, Radio i svyaz'. 215 s.
- Starovoytov A.V. 2008. *Interpretatsiya georadiolokatsionnuikh dannuikh*. Moskva, Iidatel'stvo MGU. 187 s.

Drupu graudu noapaļotības novērtēšana *Clastic Particle Surface Rounding Evaluation Studies*

Līga Zariņa

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte
Alberta 10, Rīga, LV-1010, Latvija
E-pasts: l_zarina@inbox.lv

Valdis Segliņš

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte
Alberta 10, Rīga, LV-1010, Latvija
E-pasts: valdis.seglins@lu.lv

Kopsavilkums

Pētījums ir veltīts oļu un laukakmeņu noapaļotības novērtēšanai, kas ir svarīgi sedimentācijas vides rādītāji un ļauj veikt augstas precizitātes paleoģeogrāfiskās rekonstrukcijas. Raksturoti līdzšinējie pētījumi un to nepilnības, kā arī piedāvāta atšķirīga pieeja noapaļotības novērtēšanai, kas balstās uz ārējās formas simetrijas analīzi. Piedāvātais nākotnē ļautu izstrādāt atbilstošas pētniecības metodikas un paaugstināt paleoģeogrāfisko rekonstrukciju ticamību.

Atslēgvārdi: drupu materiāls, noapaļotības koeficienti, simetrijas elementi un mēri.

Summary

The study is devoted to the roundness assessment of the pebbles and boulders, which is an important indicator for sedimentary environment and allows to make high precision paleogeographic reconstructions.

Results of previous studies are described and their weaknesses are characterized. Instead is offered a different approach for the roundness assessment which is based on the analysis of the symmetric features concerning to the shapes of the research material.

The proposed methodology leads to development of the applicable research methods and increase of reliability of paleogeographic reconstructions in future.

Keywords: terrigenous material, visual roundness indicators, symmetry features and measurements

Ievads

Drupu materiāla graudu sadalījums pēc izmēra, minerālu sastāva, ķīmiskām un fiziskām īpašībām, kā arī graudu ārējās formas satur svarīgu informāciju par nogulumu veidošanās apstākļiem, nogulumu izejmateriāla – atsevišķo graudu, cilmi un to pārvietošanas apstākļiem. Starp minētajiem daudzajiem rādītājiem, morfoloģiskās pazīmes (graudu formas īpatnības) raksturo kā sākotnēji dēdējušo materiālu, tā arī transportēšanas apstākļus.

No aprakstāmām par mērāmām un matemātiski raksturojamām graudu morfoloģiskās īpatnības pārvērš T. Cings (Zingg 1938), kurš piedāvā mērīt graudam x , y un z dimensijas un šo mērījumu rezultātā iegūtās vērtības izteikt dažādu koeficientu vērtību formā. Turpmāk daudzi pētnieki piedāvā aizvien jaunus līdzīgas nozīmes koeficientus, paplašina to noteikšanai nepieciešamo mērījumu skaitu, tomēr neievēro jau T. Cinga, V. Krambeina un F. Petidžona (Krumbein 1938; Krumbein, Pettijohn 1938) atzīmēto par ierobežojumiem šādus mērījumus veikt graudiem, kas smalkāki par rupjām smiltīm, un nelietderību pārāk detalizēti veikt šādus novērojumus, jo jaunas zināšanas tie sniegs tikai izņēmuma gadījumos. Tādēļ par turpmākajiem gadiem zināms vien neliels skaits sekmīgu pētījumu, aprēķinu metožu (Sneed, Folk 1958; Yang 1996) un to pārskatu (Bagnold 1966; Illenberger 1991). Mēģinājumi oļu virsmas noapaļojumu analizēt ar daudz augstāku precizitāti, izmantojot lāzerskenēšanu un veicot atbilstošus koeficientu aprēķinus oļu frakcijai nav veiksmīgi (Hayakawa, Oguchi 2005), tas pats attiecināms uz mēģinājumiem novērtēt smilšu frakcijas kvarca graudu noapaļojumu ar elektronu mikroskopijā iespējamajiem palielinājumiem (Dowdeswell 1982). Savukārt G. Domokos un G. Gibons (Domokos, Gibbons 2012), vismaz attiecībā uz oļu frakciju, faktiski noliedz iespējas pēc oļu virsmas noapaļojuma izdarīt kādus papildu secinājumus, izņemot ar citām metodēm viegli novērtējamus globālā drupu materiāla transporta virzienus un to pārvietošanas relatīvos ātrumus. Visai ierobežotas interpretācijas iespējas pēc grants un oļu virsmas noapaļotības konstatētas (Dumitriu et al. 2011) arī pēc ilggadīgas šo frakciju materiāla izpētes upes 25 km garā posmā. Šajā pētījumā tiek apskatīti arī visi plašāk sedimentoloģijā izmantotie graudu virsmas noapaļotības rādītāji un koeficienti, un šie autori izdara statistiski apliecinātu secinājumu par šo parametru izmantošanas nelietderību nākotnē vismaz attiecībā uz fluvialām sedimentācijas vidēm. Savukārt jauni priekšlikumi (piemēram, Domokos et al. 2010) ir reti un to tehniskā realizācija ir nesamērīgi sarežģīta attiecībā pret iespējami iegūstamo jauno ģeoloģisko informāciju.

Iepriekšminētais norāda uz nepieciešamību meklēt jaunas pieejas terīgēnā materiāla graudu virsmas morfoloģijas, arī noapaļotības novērtēšanā. Uzsākot pētījumu, tika pieņemts, ka dēdēšanas rezultātā izveidoto iežu un minerālu atlūzu sākotnējā forma var būt visai atšķirīga. Transporta gaitā ūdens vidē drupu graudi centīsies iegūt sfēras formu – kā visnoturīgāko un stabilāko ar vismazāko saskares virsu, bet tekoša ūdens ietekmē šī sfēra tiks nedaudz stiepta par labu plūdlīnijas formas iegūšanai (kas arī var tikt uzskatīta par tuvu minimālās saskares virsmai). Ģeometriski tās ir ļoti tuvas formas un nebūtiski atšķiras no ideālām. Novērojamās atkāpes no ideālās formas visdrīzāk būs saistītas ar pašu graudu sastāva nevienādībām, defektiem, plaisām u.tml. Vienlaikus šādu ideālo formu raksturīga pazīme ir simetriskums jeb simetrija plašā nozīmē, tāpat atkāpes no ideālās formas var tikt novērtētas kā nepilnības grauda simetriskumā.

Minētās hipotēzes pārbaudei tika veikts pētījums, kas aptvēra kā teorētisko komponentu par simetrijas pamatelementiem, tā arī mērījumus un analīzi par iespējamo risinājumu turpmāko izstrādi, izmantojot V. Krambeina (Krumbein 1941) 1. tabulu vizuālās noapaļotības novērtēšanai (3. att.).



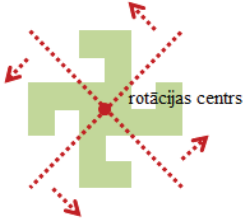

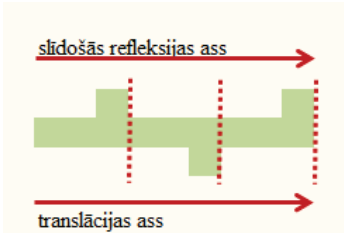
Materiāli un metodes

Teorētiskā konstrukcija un analīze

Ja objekts ir simetrisks, tad tā simetrijas noteicošie rādītāji ir simetrijas assis un rotācijas centrs, ja tāds eksistē. Tie norāda, kādas simetrijas īpašības piemīt aplūkojamam objektam, kas savukārt ļauj klasificēt objektu kā piederošu kādam no noteiktiem simetrijas grupu tipiem. Simetrijas īpašības ir atbilstošas matemātiskām izometrijām, t.i., izometriskām transformācijām, kas, pārvietojot objektu, nemaina tā izskatu – formu un izmērus. Ikvienai no tām piemīt vismaz viens no minētajiem simetrijas rādītājiem, citādi objekts nav simetrisks un vienīgā tam piemītošā izometrija ir identitāte – triviāla matemātiska transformācija, kas jebkuru objektu attēlo pašu par sevi.

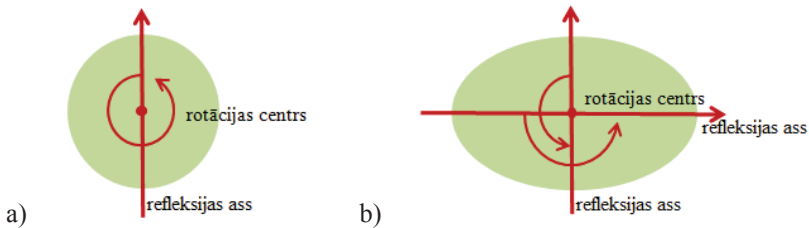
1. tabula. Izometriskas transformācijas un to raksturojošie simetrijas rādītāji.

Table 1. Isometric transformations and their symmetry characterizing parameters.

<p>Identitāte</p> 	<p>Translācija</p> 	<p>Rotācija</p> 
<p>Refleksija</p> 	<p>Slīdošā refleksija</p> 	

Pētījuma metode paredz novērtēt simetrijas raksturojošo elementu eksistenci un iespējamās pastāvošās likumsakarības attiecībā uz simetrijas īpašībām drupu materiālā, aplūkojot to dažādās morfoloģiskās formas. Pētījuma veikšanai tika izmantota V. Krambeina (1941 pp. 64–72, pl.1) tabula graudu noapaļotības vizuālai novērtēšanai, kas zinātniskos pētījumos sedimentoloģijā līdz pat mūsu dienām ir viens no galvenajiem šādu novērojumu veikšanas metodisko paņēmieni paraugiem. V. Krambeina pētījumā ievietotā iepriekš minētā tabula nepastarpināti tika izmantota, lai analizētu izmaiņas, kas radušās drupu materiāla transportēšanas procesā un kas piešķir raksturīgo oļa formu.

Ņemot vērā drupu graudu tieksmi uz ideālo sfēras formu, tiek aplūkota šīs formas simetrija, kā arī simetrija stieptām sfēras formām – elipsoīdam, ko reducē uz riņķa un elipses formu, lai to pielāgotu pētījumā izmantotajai tabulai noapaļotības novērtēšanai (1. att.).



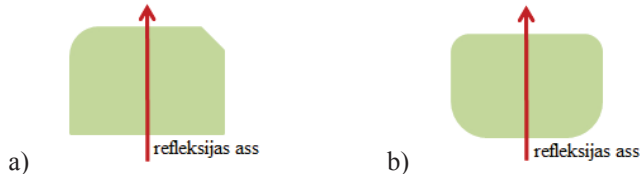
1. attēls. Riņķa simetrijas un elipse simetrijas.

Apzīmējumi; (a) riņķis – simetrijas grupa ietver bezgalīgi daudz refleksijas simetrijas un rotāciju ar kārtu ∞ ; (b) elipse – simetrijas grupa ietver refleksijas pa divām asīm un rotāciju ar kārtu 2.

Figure 1. Symmetries of the circle and symmetries of the ellipse.

Notations; (a) circle – symmetry group includes infinite reflection symmetries and rotation with order ∞ ; (b) ellipse – symmetry group includes reflections by two axes and rotation with order 2.

Pētījuma objektiem raksturīga arī bilaterālā (divpusējā, spoguļa) simetrija bez rotācijas īpašībām. Tās novērtēšanai būtiski aplūkot spoguļattēla precizitāti, ko iespējams novērtēt vizuāli (2. att.), kā arī izmantojot dažādas šādas analīzes speciālās datorprogrammas, piemēram, Flip Test (Saragusti, Sharon 1998).



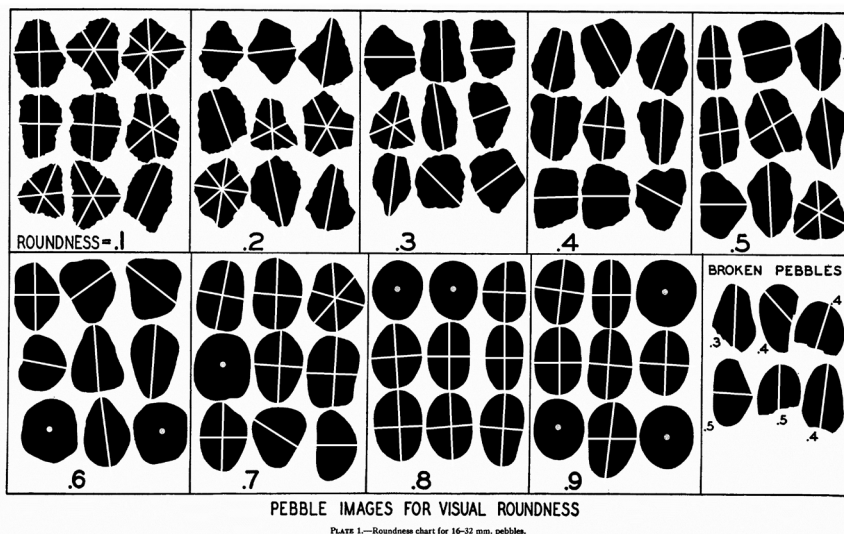
2. attēls. Neprecīza (a) un precīza (b) refleksijas simetrija.

Figure 2. Imprecise (a) and precise (b) reflection symmetry.

Pētījuma specifikas dēļ netiek aplūkotas translācijas un slīdošās refleksijas simetrijas, jo tās nav raksturīgas atsevišķiem drupu materiāla objektiem. Tomēr, turpinot pētījumu, translācijas simetriju varētu izmantot, lai, ņemot vērā iezu dažādo petrogrāfisko sastāvu, izmērus un noapaļotības pazīmes, analizētu sedimentācijas vidi un atvieglotu augstas precizitātes paleoģeogrāfiskās rekonstrukcijas.

Eksperimentāls simetrijas novērtēšanas pētījums

Pētījuma veikšanai izmantota V. Krambeina (Krumbein 1941) raksta 1. tabula (Plate I) noapaļotības vizuālai novērtēšanai, kur izdalītajās noapaļotības klasēs atzīmēti simetriju raksturojošie elementi un atbilstoši novērtētas atrodamās simetrijas (3. att.).



3. attēls. V. Krambeina (Krumbein 1938) izstrādātā tabula vizuālai graudu noapaļotības novērtēšanai ar raksta autoru attēlotiem konstatētiem simetrijas rādītājiem.

Figure 3. Table for visual roundness assessment by Krumbein (1938) with depicted symmetry elements which are detected by authors.

Attēlā norādītās simetrijas asi ir viegli pamanāmas un to noteikšana ir apgrūtināta tikai dažos gadījumos, taču tās nav viennozīmīgas šķelto oļu attēlu gadījumā. Simetrijas ass noteikšana šeit var būt kļūdaina, jo nav iespējams novērtēt citas attēlā neredzamās oļu virsmas. Šajos gadījumos būtu nepieciešams veikt atsevišķu pētījumu, kas ļautu restaurēt iespējamo šo šķelto oļu ārējo formu.

Rezultāti un analīze

Veiktā tipveida noapaļojuma attēlu analīze skaidri norāda, ka oļu forma, palielinoties to noapaļotībai, kļūst simetriskāka. Zīmīgi, ka visām pētījumā aplūkotajām formām nosakāma refleksijas simetrija, kaut arī spoguļattēli pret refleksijas asi, ko var atpazīt sākotnējai formai, ir ļoti neprecīzi, tie ir aptuveni un tikai vēl ieskicē simetriskumu. Tomēr ar katru tuvināšanos ideālai formai (pēc tabulas tā ir pieaugoša noapaļotība) var novērot, ka refleksijas kļūst precīzākas. Jāatzīmē, ka refleksijas precizitāte skaitliski ir novērtējama, piemēram, ar augšminēto Flip Test datorprogrammu. Palielinoties noapaļojumam, kļūst atpazīstama rotācijas simetrija, kas sākotnējam drupu materiālam ir nosakāma reti un neviennozīmīgi, taču noapaļošanās beigu posmam tas var tikt lietots kā drošs indikatīvs rādītājs.

Noapaļotākiem graudiem ir pareizas sfēras forma, kurai piemīt bezgalīgi daudz simetrijas, taču, ja tā ir elipsoīda forma, tai piemīt ļoti precīzs spoguļattēls pret refleksijas asi. Attēlu analīze parāda, ka noapaļotai formai noteikti piemīt izteikta dihedrāla simetrija, t.i., rotācijas simetrija ar kārtu, kas atbilst refleksiju asu skaitam, kuru krustpunkts ir rotācijas centrs, tātad šis simetrijas veids ir ļoti zīmīgs oļu novērtēšanā. Rotācijas simetrija jau norāda uz ļoti augstu noapaļotības pakāpi (pēc

3. att.). Lai to izmantotu kā rādītāju noapaļotības pakāpes noteikšanai, nepieciešams novērtēt arī rotācijas simetrijas precizitāti attiecībā pret no rotācijas centra novilkta maksimālā rādiusa riņķa līnijas perimetru. Šādām vajadzībām nākotnē būtu lietderīgi izstrādāt vienkāršotu datorprogrammu, bet pagaidām šādas analīzes dati ir apkopoti 2. tabulā.

2. tabula. V. Krambeina (Krumbein 1938) izdalītām oļu noapaļotības klasēm raksturīgās simetrijas grupas.

Table 2. The symmetry groups which are characteristic in roundness classes of pebbles created by Krumbein (1938).

		SIMETRIJAS GRUPAS				
		Bilaterālā simetrija	D2	D3	D4	Dn, n=∞
IEKLAUTĀS SIMETRIJAS		1 refleksijas ass	rotācija ar kārtu 2, 2 refleksijas asis	rotācija ar kārtu 3, 3 refleksijas asis	rotācija ar kārtu 4, 4 refleksijas asis	rotācija ar kārtu ∞, ∞ refleksijas asis
NOAPAĻOTĪBAS KLAŠE	1	1	3	4	1	
	2	6		2	1	
	3	8		1		
	4	8	1			
	5	5	3	1		
	6	6	1			2
	7	2	5	1		1
	8		7			2
	9		6			3
RAKSTURĪGĀS FORMAS AR SIMETRIJAS RĀDĪTĀJIEM						

Oļu attēli ir novērtēti attiecībā uz to formas piederību kādai no piecām 2. tabulā norādītajām simetrijas grupām, kas var tikt noteiktas, atpazīstot oļu formai piemītošos simetrijas elementus. Secīgi tos novērtējot (pēc 3. att.) ir iespējams katru

V. Krambeina izdalīto noapaļotības klasi raksturot ar to elementu piederību tai vai citai simetrijas grupai. Tā, piemēram, nenoapaļotu, pēc V. Krambeina 1. noapaļotības klasei piederīgu oļu formu, bieži var aprakstīt kā piederīgu dihedrālajām simetrijas grupām D3 vai D4. 3. un 4. noapaļotības klasei dominē tikai bilaterālā simetrija, bet 7.–9. noapaļotības klasei lielākoties raksturīgas dihedrālo simetrijas grupu Dn un D2 pazīmes.

Piederība simetrijas grupai raksturo simetrijas īpašības, taču ne objekta formu, kas jāņem vērā noapaļotības vērtēšanā. Piemēram, attiecībā uz simetrijas grupu D2 objekta forma noapaļotas formas gadījumā ir elipse un simetrijas īpašības kopā ar precizitāti attiecībā pret spoguļa līniju atbilst augstas noapaļotības rādītājiem, bet tās pašas simetrijas īpašības ir novērojamas arī zemākas oļu noapaļotības klasēs, kur forma ir atbilstoša četrstūrim.

Diskusija

Pētījuma rezultāti norāda, ka oļu (arī grants un akmeņu) ārējās formas noapaļotību ir iespējams raksturot ar simetrijas īpašībām un veikt šo drupu graudu klasifikāciju pēc piederības simetrijas grupām. Statistiski šie lielumi nav viennozīmīgi izsakāmi, jo V. Krambeina pievienoto tipisko formu attēlu skaits nav pietiekams, tomēr noteiktas likumsakarības ir viegli pamanāmas, detalizētāk apskatot 2. tabulas datus. Galvenā īpatnība ir V. Krambeina 3.–6. noapaļotības klases piemēros uzrādīto formu simetrijas elementu piederība gandrīz tikai bilaterālās simetrijas grupai. Formāli tas norāda, ka šo oļu formas simetriskums ir samazinājies attiecībā pret sākotnējā izejas materiāla formu simetriju, kaut arī sākotnējām formām ir zemāka spoguļattēlu precizitāte attiecībā pret refleksijas asīm.

Minētā nenoteiktība nav viennozīmīgi skaidrojama, jo V. Krambeina piedāvātie attēli ir savulaik pamatoti ar ļoti plašu lauka un laboratorijas pētījumu materiālu un mūsdienās tie ir tipveida attēli, pēc kuriem daudzu pētījumu autori nosaka drupu materiāla noapaļotības pakāpi. Šo attēlu korektumu un reprezentācijas izlasi nav pamats apšaubīt. Otrs iespējama skaidrojums izriet no pieļāvuma, ka noapaļošanās process norit sarežģītāk, nekā tas ir bijis domāts līdz šim (Krumbein, Pettijohn 1938) pieņemot, ka tas ir lineārs un nepārtraukts formas izlīdzināšanas un noapaļošanās process. Mūsu veiktā analīze norāda uz citu procesa gaitu – no sākotnējā izejas materiāla neatkarīgi no oļu vai citas atlūzas sākotnējās formas vispirms noapaļošanās skar un attīsta bilaterālās simetrijas elementus, kas maksimālās vērtības sasniedz 3. un 4. noapaļotības klasē. Pēc tam tiek iegūta rotācijas simetrija ar kārtu 2 un pakāpeniski palielinās to simetrijas elementu loma, kas raksturo rotāciju ar kārtu ∞ .

Ja pieņemam šādu noapaļošanās procesa gaitu, tad loģiska ir simetrijas grupu D3 un D4 simetrijas īpašību visai ierobežotā līdzdalība pēc 3. noapaļotības klases formas iegūšanas, jo šo simetrijas grupu pazīmes (tuvas trijstūra un kvadrāta formas ķermeņiem raksturīgām simetrijas īpašībām) nepiemīt noapaļotām formām.

Iepriekš raksturotais nav tieši pārbaudāms dabā, jo iegūtie oļu noapaļotības dati tiks salīdzināti ar V. Krambeina klasifikācijas standartizētiem attēliem, t.i., tiks iegūti jau iepriekšēji zināmi rezultāti, kuru atšķirības vien raksturo novērojumu izpildes akurātumu. To apliecināja arī autoru veiktie oļu noapaļotības mērījumi ar Gaujas palienē ievākti paraugiem. Iespējams, ka risinājums būtu meklējams

V. Krambeina izstrādātās klasifikācijas shēmas detalizācijā, bet arī šajā gadījumā tā kļūs sarežģītāka un papildus ģeoloģisko informāciju nesniegs. Tādējādi no šāda risinājuma būtu jāatsakās.

Tajā pašā laikā norādītā noapaļotības klašu raksturīgo formu piederība pie noteiktām simetrijas grupām ir ievērojami informatīvāka un satur sevī skaidrojumu, kādēļ mēģinājumi iegūt apstiprinājumus noapaļotības procesa gaitai sistemātiskos monitoringa pētījumos ir bijuši neveiksmīgi (Dumitriu et al. 2011). Šajā pētījumā ir ļoti skaidri redzams, ka vairums no statistiskām neatbilstībām ir saistītas ar 3.–5. noapaļotības klases oļu līdzdalību pētītajās izlasēs. To rādītāji pazemina kopējo paraugā ietvertu oļu noapaļojumu, līdz tas kļūst grūti atšķirams no piederības zemākām noapaļotības klasēm. Šajā pētījumā kā otrs diskutējamais vērtību apgabals ir pašas augstākās noapaļotības (8. un 9. klases pēc V. Krambeina) atšķirībām, kas vairumā gadījumu tomēr ir visai subjektīvi diagnosticējamās.

Ja par pamatu pieņemam noapaļotības vērtēšanu pēc piederības simetrijas grupām, tad lietderīgi atsevišķi apskatīt divas atsevišķas izlases. Vispirms jāapskata 1. un 2. noapaļotības klases – tās raksturo sākotnējo materiālu un virsmas nelīdzenumu zudumu, izmaiņas. Tas ir sākotnējais virsmas noapaļošanas process, kurā noteikta daļa oļu frakcijas materiāla arī tiek zaudēta, tiem sadrūpot un nonākot grants frakcijā. Jāņem vērā arī sākotnējā materiāla visai atšķirīgais sastāvs un plaisainība, kā rezultātā daļai formu var būt salīdzinoši augstas simetrijas pazīmes. Tādējādi, pētot šīs noapaļotības klases formas, būtu jāreķinās, ka tā ir sastāva ziņā dinamiska izlase un likumsakarības šeit būs epizodiskas, un tās var nebūt statistiski nozīmīgas.

Otro grupu raksturo V. Krambeina izdalītās 3.–9. noapaļotības klases, kas simetrijas pazīmju kontekstā iezīmē formu pakāpenisku simetrijas palielināšanos no bilaterālās simetrijas uz rotāciju ar kārtu 2 (D_2) un tad rotāciju ar kārtu ∞ (D_n , $n=\infty$). Šajā nozīmē simetrijas rādītāji (prioritāri piederība simetrijas grupai) būtu pieņemami par uzskatāmiem un efektīgiem noapaļošanās procesa rādītājiem.

Atsevišķi apskatāma pētījumu objektu formu precizitāte attiecībā pret refleksijas asīm vai rotācijas centru, kas ir ļoti svarīga morfoloģiska pazīme, jo tā faktiski norāda atlūzu noapaļotības pakāpi. Tādēļ būtu nepieciešams novērtēšanas procesa vienkāršošanai un pētnieka subjektivitātes ierobežošanai nākotnē izstrādāt datorprogrammu, ar kuru var noteikt formas precizitāti attiecībā pret simetrijas asīm un rotācijas centru. Pagaidām, kamēr programma nav izstrādāta, turpinot pētījumu, ir lietderīgi izmantot kādu grafisko datorprogrammu un izmantot matemātisku režģi formu precizitātes noteikšanai pret simetriju noteicošajiem rādītājiem. Šobrīd arī rotācijas simetriju var novērtēt ar pieejamo ArchiCAD programmu, kas tika izmantota šī pētījuma rezultātu iegūšanai. Tomēr programmu turpmākiem pētījumiem vajadzētu izstrādāt, speciāli piemērojot ideālas sfēras precizitātes noteikšanai, kas īpaši noderētu, vērtējot formas, kas ir tuvas sfērai arī zemākas noapaļotības klasēs, kā arī novērtējot noapaļotus oļus, kam nolūzusi kāda daļa.

Vizuālā novērtēšana ir ērta un jau vairāk par pusgadsimtu nostiprinājusies kā pašsaprotams analīzes veids. Tomēr šādas analīzes saturiskais piensums ir neliels, ko apstiprina zinātnieku kritiskie vērtējumi, kas tika apskatīti iepriekš. Sekojot

simetrijas un tās pazīmju novērtēšanai vienlaikus ar noapaļotības vērtējumu, ir iespējams daudz detalizētāk izvērtēt tieši transporta procesa ietekmes rezultātus.

Simetrijas analīze nav sarežģīta, tā ir makroskopiski realizējama un tā ir automatizējama ar vienkāršu datorprogrammu palīdzību. Diemžēl matemātiskās izteiksmes un apzīmējumu formas (formulas) ne vienmēr ir lietotājiem ērtas un daudziem pētniekiem emocionāli tās var būt grūti pieņemamas. Tādēļ vienkāršākais risinājums būtu saglabāt V. Krambeina savulaik piedāvātās noapaļotības klases un tipveida raksturīgos attēlus un tos papildināt ar simetrijas raksturojumiem. Tie ļautu daudz precīzāk novērtēt noapaļošanās gaitu un objektīvi grauda ārējās formas izmaiņas atspoguļot sedimentoloģiskos pētījumos.

Secinājumi

Veiktais pētījums norāda, ka oļu un laukakmeņu noapaļojuma vērtēšanā V. Krambeina (Krumbein 1941) izstrādātā vizuālās novērtēšanas sistēma ir uzskatāma un ar tās palīdzību iegūtie dati ir informatīvi arī mūsdienu zinātniskos pētījumos. Tomēr šo rādītāju precizēšana un noapaļotības ģeoloģiskā interpretācija daudzviet nav pietiekami informatīva un ir nepieciešami tās uzlabojumi.

Iegūtie rezultāti norāda, ka, aizstājot vienkāršus vizuālos salīdzinājumus ar raksturīgo formu simetrijas novērtējumu, vai iegūt nepastarpinātus lielumus, kas daudz skaidrāk norāda uz drupu materiāla noapaļošanas, virsmas izmaiņām aizvien iegūstot jaunas simetrijas īpašības. Ar šādu pieeju kļūst iespējams salīdzināt un novērtēt dažādu izmēru (grantī, oļus, akmeņus) un petrogrāfiskā sastāva atlūzas un tādējādi tiek iegūta nozīmīga papildu informācija detalizētām paleoģeogrāfiskām rekonstrukcijām.

Minētā pieeja nosaka, ka secīgi ir jānosaka refleksijas asis, ja to ir vairāk nekā viena. Tas norāda uz bilaterālo simetriju – formai piemīt rotācijas simetrija, kuras rotācijas centrs ir refleksijas asu krustpunkts, kas savukārt norāda uz piederību kādai no dihedrālas simetrijas grupu tipam atbilstošām simetrijas grupām [Gruenbaum, Shephard 1987]. Nosakot formai piemītošās simetrijas īpašības, to var klasificēt kā piederīgu kādai no simetrijas grupām, kas atbilstoši ir raksturīgas noteiktām noapaļotības klasēm. Papildus novērtējot raksturīgo formu un formas precizitāti attiecībā pret simetrijas asīm vai riņķa gadījumā pret rotācijas centru, formu var atpazīt kā piederīgu kādai no izmantotajām noapaļotības klasēm. Nozīmīga priekšrocība ir iespēja metodiku piemērot lauka pētījumos, jo tā neprasa augstas precizitātes mērījumus, bet daudz lielāka uzmanība ir pievēršama formas un tās simetrijas atpazīšanai. Piedāvātā pieeja ir detalizējama nākotnē, īpašu vērtību veltot simetrijas īpašību formas precizitātes novērtējumiem, tomēr to lielāko daļu nākotnē būtu iespējams realizēt ar salīdzinoši vienkāršu analizējamā materiāla attēlu apstrādes datorprogrammu palīdzību.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

Bagnold R. A. 1966. Sediment Transport Problem from General Physics. In: Physiographic and hydraulic studies of rivers. Geological Survey Professional Paper 422-1. US Government printing Office, Washington. 43 p.

- Dumitriu, D., Niculiță, M., Condorachi, D. 2011. Downstream Variation in the Pebble Morphometry of the Trotuș River, Eastern Carpathians (Romania). *Forum geografic. Studii și cercetări de geografie și protecția mediului*. Volume 10, Issue 1/ June 2011, pp. 78–90. DOI: 10.5775/fg.2067-4635.2011.00008.i
- Domokos, G., Gibbons, G. W. 2012. The evolution of pebble size and shape in space and time. *Proc. R. Soc. A*, Pieejams elektroniski: doi:10.1098/rspa.2011.0562 <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/early/2012/05/09/rspa.2011.0562.full.pdf>
- Domokos, G., Sipos, A., Szabó, T., Várkonyi, P. 2010. Pebbles, shapes and equilibria *Mathematical Geosciences*. Volume 42, Number 1, pp. 29–47.
- Dowdeswell, J., A. 1982. Scanning electron micrographs of quartz sand grains from cold environments examined using Fourier shape analysis. *Journal of Sedimentary Petrology*. vol. 52, no. 4, p. 1315–1323.
- Gruenbaum B., Shephard G.C. 1987. *Tilings and patterns*, W. H. Freeman and Company, New York, 700p.
- Hayakawa, Y., Oguchi, T. 2005. Evaluation of gravel sphericity and roundness based on surface-area measurement with a laser scanner. *Computers & Geosciences*, 31, 735–745.
- Illenberger, W. 1991. Pebble shape (and size!). *J. of Sedimentary Research* 61 (5), p.756.
- Krumbein, W. C. 1938. Graphic presentation and statistical analysis of sedimentary data. *Sedimentary Petrology*, v. 6, pp. 558–591.
- Krumbein, W.C., Pettijohn, F.J. 1938. *Manual of Sedimentary Petrography*. Appleton Century Crofts, New York, N.Y., 549 p.
- Saragusti, I., Sharon, I. 1998. Quantitative Analysis of the symmetry of artefacts: Lower Palaeolithic handaxes. *Journal of Archaeological Science* 25, pp. 817–825.
- Sneed, E.D., Folk, R.L. 1958. Pebbles in the lower Colorado River, Texas: A study in particle morphogenesis. *Journal of Geology* 66, pp. 114–150.
- Yang, C. T. 1996. *Sediment Transport: Theory and Practice*. McGraw-Hill Companies, New York. 412 p.

Modificētas humusvielas saturošu kompozīciju izmantošanas iespēju izpēte koksnes apstrādei *Modified Humic Substances Containing Compositions for Wood Treatment*

Līga Rūtiņa, Jānis Šīre, Māris Kļaviņš

Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte, Latvijas Universitāte
Raiņa bulv. 19, Rīga, Latvija, LV-1568
liga.rutina@inbox.lv, janis.sire@lu.lv, maris.klavins@lu.lv

Kopsavilkums

Izmantojot rūpnieciski ražotas humusvielas un modificējot tās ar amīniem un triazoliem, sintezētas koksnes krāsvielas, kurām piemīt noturība pret dažādiem kaitīgiem apkārtējās vides faktoriem. Iegūti astoņi dažādi krāsvielu sastāvi, kuriem veiktas spektroskopiskās analīzes, noteikta bioloģiskā iedarbība uz dzīvajiem organismiem, kā arī pētīta noturība pret atmazgāšanos, krāsas difūzija, un sausnas saturs. Rezultātā trīs sastāvi atzīti par perspektīviem koksnes krāsvielu paraugiem, kuriem iespējams veikt tālāku rūpnieciskās ražošanas iespēju izpēti.

Atslēgvārdi: humusvielas, krāsvielas, koksnes konservanti, koksnes aizsardzība, N-oksīdi.

Abstract

Industrially produced humic substances were modified with triazoles and amines to obtain wood colorants with significant residence to different harmful environmental factors. As a result of the experiments eight different colorant compositions were synthesized. Obtained samples were characterized by their spectra; their toxicity was determined using toxicity tests, as well as resistance against washing-out and color diffusion was studied. Three compositions were approved as perspective wood dyes.

Key words: humic substances, colorants, wood preservatives, wood protection, N-oxides.

Ievads

Mūsdienās liela nozīme tiek pievērsta dabīgu materiālu izmantošanai gan būvniecībā, gan mājāsaimniecībā (Laszlo 1977). Viens no šādiem materiāliem ir koks, kuram ir ļoti plašs lietojuma jomu loks, tomēr viens no šī materiāla trūkumiem ir tā samērā zemā noturība pret dažādu ārējo faktoru iedarbību, piemēram, mitrumu un dažādiem mikroorganismiem. Lai paildzinātu dažādu koka virsmu un materiālu mūžu, kā arī veiktu to tonēšanu, plaši tiek izmantotas dažādas koksnes krāsvielas, kurām parasti piemīt arī biocīdas īpašības. Tradicionālās koksnes krāsvielas balstās uz dažādu metālu sāļu (CuSO_4 , CrCl_3) izmantošanu, kā arī fluoru saturošu piedevu lietošanu. Ilgu laiku koksnes konservēšanai izmantoja arsēna savienojumus. Šīs

vielas ir stipri toksiskas ne tikai mikroorganismiem, bet arī augstākajiem dzīvniekiem un cilvēkam. Tās ir maz selektīvas, tās ne tikai momentāni iznīcina visus dzīvus organismus koksnē, bet arī saglabājas vidē ļoti ilgu laiku, izraisot tās piesārņojumu. Turklāt šādas krāsvielas ir sarežģīti degradēt, un ir iespējami gadījumi, kad to koncentrācijas vidē sasniedz robežas, kad tās var radīt draudus arī cilvēka veselībai un var būt nepieciešams veikt vides sanāciju. Pēc koksnes izstrādājuma ekspluatācijas pabeigšanas konservantu palieku klātbūtne kavē koksnes materiālu utilizāciju.

Koksnes konservantu ar augstu toksiskumu izmantošana faktiski ir nepieciešama samērā retos gadījumos, kad materiālu aizsardzībai pastāv ļoti specifiskas prasības. Ikdienā pieprasījums pēc šādām krāsvielām ir niecīgs, un, ņemot vērā to bīstamību un specifiskās ekspluatācijas prasības, daudz augstāks patēriņš ir videi draudzīgiem, viegli degradējamiem un mazitoksiskiem produktiem.

Literatūras analīze ir pierādījusi, ka otrējie amīni un triazoli, kā arī to N-oksīdi ir efektīvi komponenti koksnī aizsargājošu krāsvielu sastāvā (Tseng *et al.* 2002; Landsiedel *et al.* 1994; goettsche *et al.* 1999), turklāt šīs vielas raksturo zems akūtais toksiskums, un šie aminosavienojumi ir biodegradējami. Amīnus un triazolus saturošas koksnes krāsas ir noturīgas pret atmazgāšanos un gaismas iedarbību.

Humusvielām (HV) piemīt dažādu vielu toksiskumu modificējošas spējas, pašas par sevi tās ir mazitoksiskas, bez kancerogēnas iedarbības. Tajā pašā laikā ir pierādīts, ka humusvielas vai to sāļus var izmantot kā aktīvos elementus kompozīcijās augu kaitēkļu apkarošanai, kas pamato HV izmantošanas iespējas koksnes konservantu iegūšanai. Izpētīt HV saturošu kompozīciju ietekmi uz mikroorganismu, sēnīšu un insektu aktivitāti, ir pierādīta augsta šo savienojumu biocīdā aktivitāte (Buttler *et al.* 1994). Lai HV pozitīvās īpašības varētu izmantot arī jaunu koksnes konservantu izstrādāšanai, ir nepieciešams paaugstināt to dabisko toksiskumu, un par perspektīvu risinājumu var uzskatīt to modificēšanu ar slāpekļa savienojumiem.

Pētījuma mērķis bija izvērtēt iespējas iegūt humusvielas saturošas kompozīcijas koksnes apstrādei, kā arī izpētīt to pielietošanas iespējas.

Materiāli un metodes

Balstoties uz zināšanām par humusvielām un to savienojumu īpašībām un izmantojot SIA ZPRF „Intellectual Resources” humusvielas, tika sintezētas astoņas dažādas kompozīcijas.

1. *krāsviela.* 10,0 g humusvielu izšķīdina 100 ml etanola, pievieno 10 ml koncentrētas HCl un 2,6 g (0,02 mol) anilīna hidrohlorīda. Šķīdumu apaļkolbā ar atteces dzesinātāju vāra trīs stundas;

2. *krāsviela.* 100 ml 10% humusvielu šķīdumam pievieno 50 ml metanola, un 10 ml koncentrētas HCl un 2,6 g (0,02 mol) anilīna hidrohlorīda. Šķīdumu apaļkolbā ar atteces dzesinātāju vāra trīs stundas;

3. *krāsviela.* 1 litru humusvielu šķīduma (10%), izmantojot rotācijas ietvaicētāju, ietvaicē līdz 250 ml, pielej 13,0 g (0,1 mol) anilīna hidrohlorīda šķīduma 100 ml dietilēnglikola monometilēterī (monoglims). Pievieno 30 ml 30% H₂O₂. Šķīdumu apaļkolbā ar atteces dzesinātāju vāra četras stundas;

4. *krāsviela*. 100 mililitriem 10% humusvielu šķīduma pievieno 100 ml izopropilspirta, 10 ml koncentrētas H_2SO_4 un, izmantojot rotācijas ietvaicētāju, ietvaicē līdz 100 ml;

5. *krāsviela*. 500 mililitriem 10% humusvielu šķīduma pievieno 13,6 g (0,1 mol) N,N-dimetilbenzilamīna, izmantojot rotācijas ietvaicētāju, ietvaicē līdz 250 ml, tad pievieno 100 ml monoglīma;

6. *krāsviela*. 10,00 g kūdras humīnskābes izšķīdina 100 ml 0,1 N NaOH šķīdumā, pievieno 100 ml etanola, kurā izšķīdināti 10 ml koncentrētas HCl un 7,25 g (0,05 mol) naftilamīna. Šķīdumu apaļkolbā ar atteces dzesinātāju maisot vāra četras stundas;

7. *krāsviela*. 10,00 g kūdras humīnskābes izšķīdina 100 mililitros 0,1 N NaOH, un pievieno 3,45 g (0,05 mol) 1,2,4-triazola un 50 ml monoglīma;

8. *krāsviela*. 100 mililitriem 10% humusvielu šķīduma pievieno 50 ml izopropilspirta un 3,45 g (0,05 mol) 1,2,4-triazola. Šķīdumu apaļkolbā ar atteces dzesinātāju karsē divas stundas.

Iegūtajām krāsvielām ir noteikts to sausnas daudzums, paraugu liofizējot un nosverot.

Krāsošanas izmēģinājumiem izmantoti ēvelēti parastās priedes (*Pinus sylvestris* L.) koksnes fragmenti ($5 \times 5 \times 1,5$ cm). Tie ir krāsoti vienu, divas un trīs reizes. Iegūtās krāsvielas paraugiem tika uzklātas ar otu, pēc tam paraugi žāvēti istabas temperatūrā (20 °C) 24 h. Divas un trīs reizes krāsotiem paraugiem atkārtota krāsošana veikta pēc diennakts.

Krāsvielu difūzija noteikta attiecībā pret dejonizētu ūdeni, 0,3 ml dejonizēta ūdens uzpilinot uz filtrpapīra un pēc 30 min izmērot izplūdušā apļa diametru, kas pieņemts par 100%. Eksperiments atkārtots ar visiem krāsvielu sastāviem, iegūto apļu diametrus attiecinot pret dejonizētā ūdens apļa diametru.

Krāsas atmazgāšanās intensitāte noteikta, izmantojot $1 \times 5 \times 1,5$ cm lielus koksnes fragmentus, kas atzāģēti no nokrāsotajiem paraugiem. Iegūtie paraugi ievietoti 100 ml slēgtā traukā, aplieti ar 80 ml dejonizēta ūdens un 2 stundas kratīti BioSan PSU-20 kratītājā ar ātrumu 150 apgriezieni minūtē. Pēc tam četras diennaktis reizi 24 h ar UV-spektrometru Themospectronic Helios γ pie viļņa garuma 410 nm mērīta krāsas absorbcija.

Krāsvielu UV spektru uzņemšanai izmantoti krāsvielu ūdens šķīdumi ar attiecību 1:500. Mērījumi veikti ar Themospectronic Helios γ spektrometru (spektra uzņemšanas intervāls no 200 līdz 800 nm).

Furjē transformācijas infrasarkanā starojuma spektri uzņemti, izmantojot Perkin Elmer BX FT – IR system spektrometru. Parauga sausna kopā ar analītiski tīru KBr (99,999%) saberzta ahāta piestā, paraugs ievietots paraugu turētājā un ar rokas presi saspīests, veidojot caurspīdīgu tableti (Coates 2000). Saspīestie paraugi ar parauga turētāju ievietoti infrasarkanā starojuma spektrofotometrā un uzņemti to infrasarkanie spektri (IS), datu apstrādi veicot ar programmu Spectrum v 5.3.1.

Sintezētajiem krāsvielu sastāviem noteikta iedarbība uz mikroorganismiem (*Thamnocephalus platyurus*), izmantojot standarttestu THAMNOTOXKIT F (Törökne 2004). Vispirms pagatavots standartūdens, pēc tam sagatavotas cistas diedzēšanai:

17,5 ml dejonizēta ūdens pievienots 2,5 ml standartūdens un apmēram 1 ml no iegūtā šķīduma pievienots tūbai ar cistām, kuru noslēdza un 30 min vienmērīgi kratīja. 10 ml no iepriekš sagatavotā šķīduma ielēja Petri traukā, pievienoja cistas un tās vienmērīgi izvietoja. Trauku pārklāja ar parafilmu un lika inkubatorā 25 °C temperatūrā uz 20 h.

Lai noteiktu krāsvielu efektīvās koncentrācijas, testa veikšanai tika pagatavoti dažādi krāsvielu atšķaidījumi, katrai kompozīcijai izvēloties atšķirīgas koncentrācijas, vadoties pēc priekšmēģinājumu rezultātiem.

THAMNOTOXKIT F speciālajā trauka iedobēs salēja iepriekš pagatavotos dažādu koncentrāciju krāsvielu šķīdumus, pirmajā kolonnā lejot standartūdeni (kontrolē). Tālāk, skatoties mikroskopā, ar mikropipeti uz katru apakšējās rindas iedobi pārnesa 50 ± 5 organismus, katrā augšējā iedobē ievietojot 10 ± 3 organismus. Testa plātni pārklāja ar parafilmu un lika inkubatorā 25 °C uz 24 stundām. Pēc 24 stundām, skatoties mikroskopā ar 10–20 reizi palielinājumu, saskaitīja mirušos un dzīvos organismus un izveidoja interpolācijas grafikus, pēc kuriem tika noteiktas letālās koncentrācijas (LC_{50}) pēc 24 h iedarbības. Kā LC_{50} rādītāji izmantoti procentos izteikti krāsvielas atšķaidījumi, Iegūtajām katras krāsvielas LC_{50} vērtībām noteiktas standartnovirzes un drošības intervāli.

Rezultāti

Humusvielu modificēšanas koncepcijas pamatā, lai sekmētu tās izmantošanas iespējas koksnes aizsardzībai, ir to biocīdo īpašību stimulēšana, vienlaikus būtiski nepastiprinot toksiskumu. Lai nodrošinātu šādu īpašību kopumu, tika pielietota humusvielu modificēšana ar amīniem un slāpekli saturošiem heterocikliskiem savienojumiem. Humīnskābēm (HS) reaģējot ar dimetilbenzilamīnu, vispirms veidojas humīnskābju amīna sāļi, kuri apstrādes gaitā var veidot kovalenti saistītas struktūras, kas satur amīdsaiti. Tālākas apstrādes rezultātā ar oksidētājiem (H_2O_2) veidojas amīnu N-oksīdi. Līdzīgi iespējams veikt humusvielu apstrādi ar triazolīem un to oksidāciju par N-oksīdiem (Saint – Fort and Visser 1988).

Humīnskābju un amīnu sāļu veidošanās nodrošina lēnu amīnu atbrīvošanos krāsvielas eksploatācijas laikā, kā arī nodrošina vienmērīgu, stablu un ilgstošu bakteriostatisko efektu. Tādējādi tiek panākta divu efektu kombinēšanās – tiek izmantots izejas humusvielu koksni konservējošais efekts un paaugstināta biocīdā iedarbība. No otras puses, HV modificēšana ar aromātiskajiem amīniem un to N-oksīdiem nodrošina krāsvielas hidrofobuma palielināšanos un uzlabo tās sasaisti ar koksni.

Pētījuma ietvaros tika sintezēti astoņi krāsvielu sastāvi.

1. *krāsviela* ir homogēna, kaut arī šķīdumā var novērot cietu daļiņu klātbūtni, tomēr izteikti tumšā toņa dēļ vizuāla noslāņošanās nav novērojama.

2. *krāsvielu* uzglabājot, tā noslāņojas – virspusē veidojas caurspīdīga gaiši brūna, šķidra fāze. Sakratot šķīdumu, veidojas putas, kas ātri izzūd.

3. *krāsvielas* virspusē redzama eļļaina plēvīte, vizuāla noslāņošanās nav novērojama.

4. krāsvielā novērojama krāsas noslāņošanās – augšpusē veidojas pēc konsisten-
ces nedaudz eļļaina oranžas nokrāsas šķidrā fāze. Apakšā redzamas brūnas nogul-
snes. Sakratot šķidrumu, veidojas biezs putu slānis.

5. krāsvielā novērojama šķidruma noslāņošanās – virspusē sarkani oranža,
caurspīdīga šķidrā fāze, apakšā nogulsnes, kas aizņem vairāk nekā pusi no tilpuma.

6. krāsviela vizuāli izskatās homogēna, taču uz trauka sienām veidojas baltas
nogulsnes.

7. un 8. krāsvielā nav novērojama šķidruma noslāņošanās, taču apakšā
izgulsnējas nogulsnes.

Iegūto krāsvielu raksturlielumi apkopi 1. tabulā.

1. tabula. Sintezēto komponentu raksturlielumi.

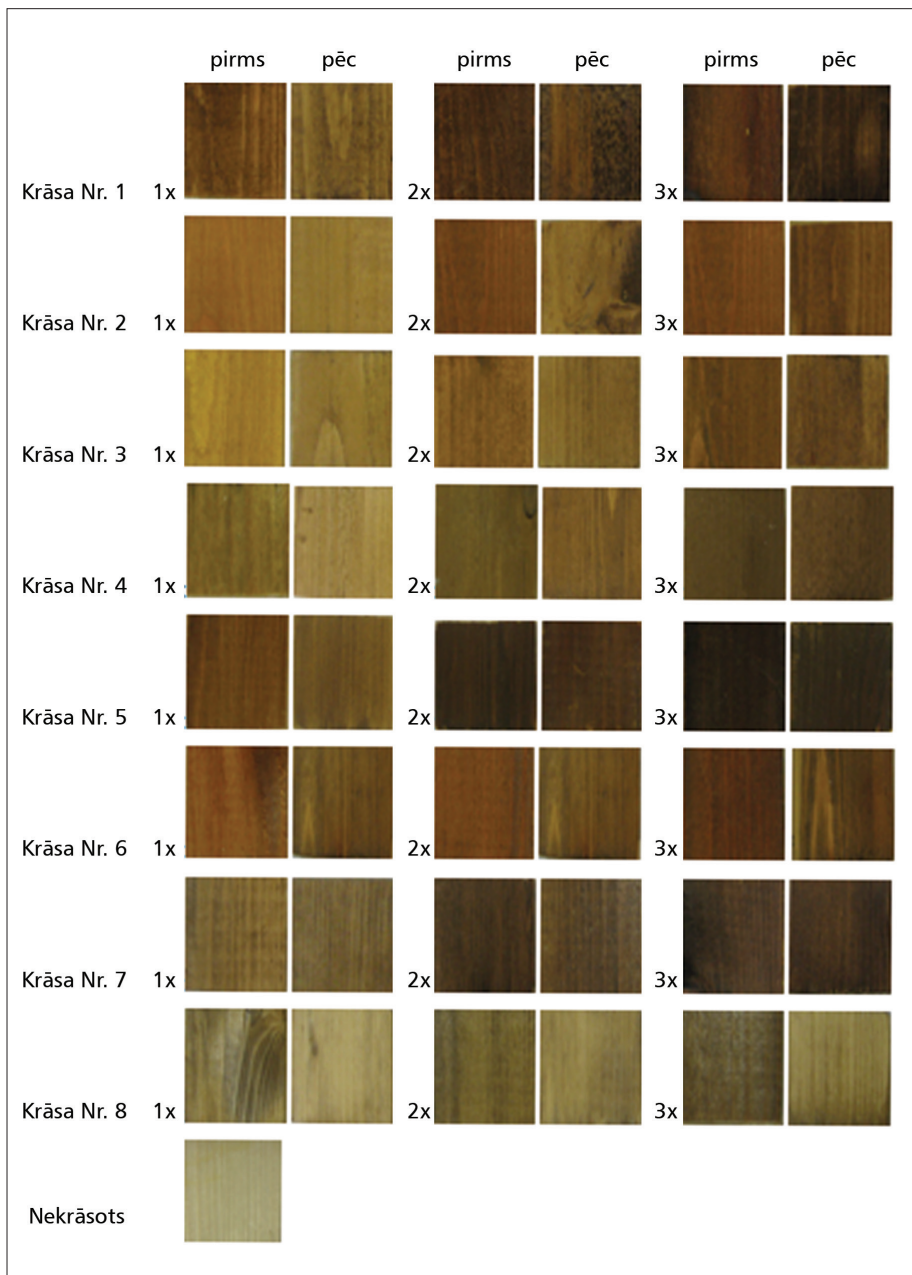
Table 1. Characteristic features of synthesized compositions.

Krāsv. nr.	Tonis	Organoleptiskais raksturojums	Sausna, %	LC ₅₀ , %	Difūzija (pret dejonizētu H ₂ O), %
1	Tumši brūns	Nav raksturīgas smakas	9,31	0,028 ±0,0091	83,08
2	Tumši brūns	Spēcīga smaka	3,64	0,033 ±0,0059	89,23
3	Tumši brūns	Smakas nav	5,97	0,035 ±0,0087	92,31
4	Brūns	Nav raksturīgas smakas	-	0,061 ±0,0059	90,77
5	Tumši brūns	Nav raksturīgas smakas	7,97	0,023 ±0,0042	72,31
6	Tumši brūns	Spēcīga smaka	6,53	0,063 ±0,0085	81,54
7	Tumši, tumši brūns	Nav raksturīgas smakas	10,45	1,462 ±0,0231	58,46
8	Tumši brūns	Ļoti spēcīga smaka	4,22	-	75,38

Iegūtie humusvielu modifikācijas produkti spēj iekrāsot koksni no gaiši dzeltenas
līdz tumši brūnai krāsai (1. att.).

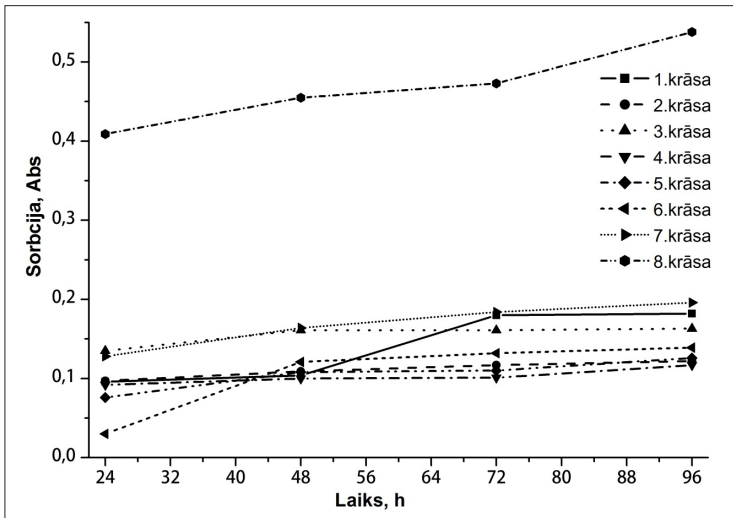
Iegūtajiem humusvielu modifikācijas produktiem raksturīga atšķirīga noturība
pret izskalošanos, respektīvi, krāsas noturība pret atmazgāšanos, atkarībā no
skalošanas ilguma (2. att.), kas novērtēts, kā krāsvielas atdalīšanās skalošanas gaitā.

Krāsvielu difūzijas tests raksturo krāsvielas uzsūkšanās spējas. Vislabākās
uzsūkšanās spējas testa apstākļos tika novērotas krāsvielai nr. 3 un nr. 4 (92,31% un
90,77%) (1. tabula).



1. attēls. Dažādu reižu skaitu krāsoti koksnes paraugi pirms un pēc atmazgāšanas.

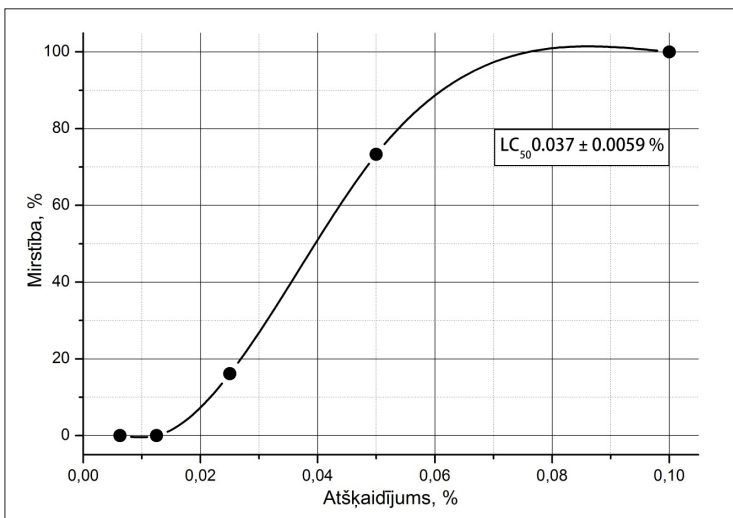
Figure 1. Several times colored wood samples before and after soaking.



2. attēls. Krāsas noturība pret atmazgāšanos, atkarībā no skalošanas ilguma.

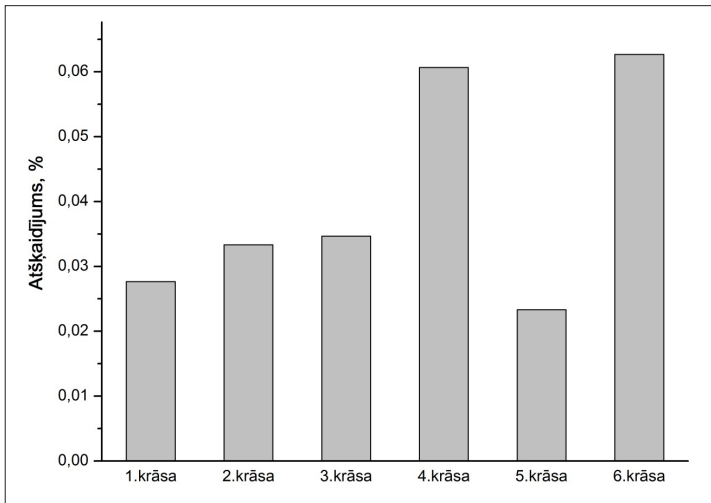
Figure 2. Resistance of the color to rinsing-off, depending on the soaking time.

Kopumā vairākumam krāsvielu LC_{50} vērtība atrodas intervālā no 0,02 līdz 1,46% atšķaidījumam (3., 4. att.). No sintezētajiem sastāviem, 5. krāsvielai raksturīgs viszemākais toksiskums (4. att.). 8. krāsvielai ar šo metodi nevarēja noteikt LC_{50} vērtību – testorganismus nebija iespējams saskaitīt atšķaidījumos, kuri bija pārāk tumši lielās krāsvielas koncentrācijas dēļ (>5%).



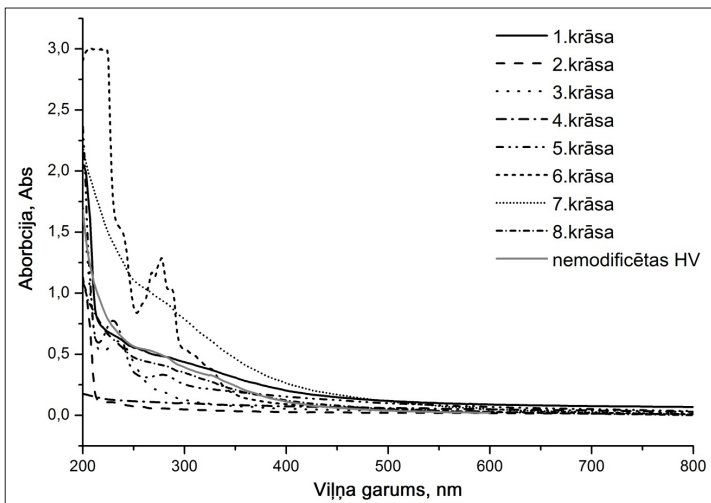
3. attēls. 2. krāsvielas ietekme uz *Thamnocephalus platyrus* mirstību un LC_{50} vērtība pēc 24 h iedarbības.

Figure 3. LC_{50} of the color sample no. 2 on *Thamnocephalus platyrus* after 24 h exposure.



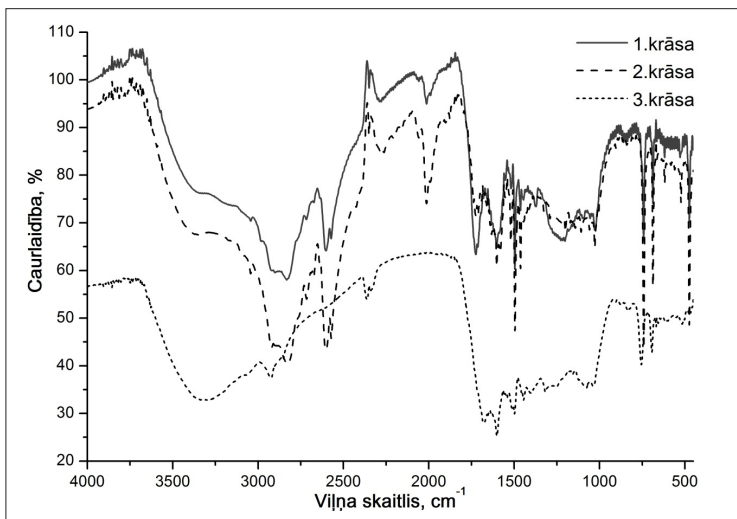
4. attēls. LC_{50} lielums pēc 24 h iedarbības uz *Thamnocephalus platyrus*.
Figure 4. LC_{50} on *Thamnocephalus platyrus* after 24 h exposure.

Viens no veidiem, kā konstatēt izmaiņas humusvielu struktūrā, kuras radušās to modifikācijas rezultātā, ir UV spektru uzņemšana. Salīdzinot humusvielas saturošu krāsvielu spektrus ar nemodificētu humusvielu spektriem (5. att.), var konstatēt krāsvielu izmaiņu raksturu (piemēram, 6. krāsvielas sastāvā pēc modifikācijas ietilpst benzola gredzens). Kopumā sintēzes procesā 6., 5. un 3. krāsvielas struktūra ir tikusi izteikti modificēta, savukārt 8. krāsvielas saglabā gandrīz pilnībā savu līdzību dabiskai izejvielai. Līdzīgas izejvielai ir arī 1. un 7. krāsvielas.



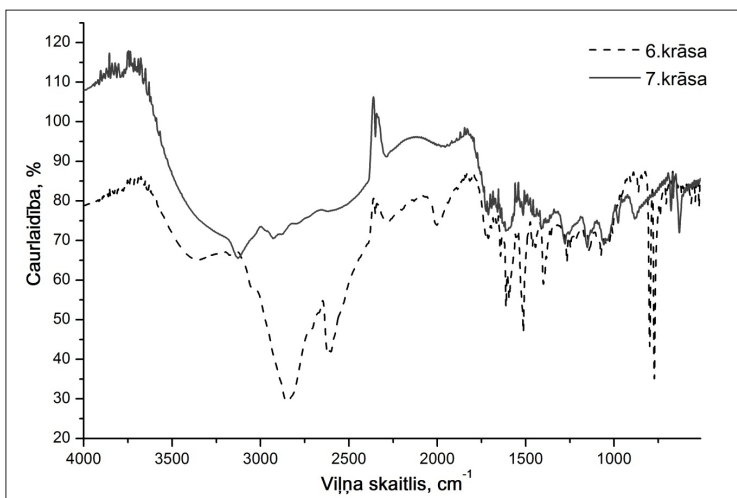
5. attēls. Krāsvielu paraugu UV-Vis spektri salīdzinājumā ar nemodificētas kūdras HV (Dižais Veikeniņš 0–25 cm).

Figure 5. UV-Vis spectra of color samples compared to unmodified peat humic substances (Dižais Veikeniņš 0–25 cm).



6. attēls. Furjē transformācijas infrasarkanā starojuma spektri 1., 2. un 3. krāsvielu paraugam.

Figure 6. Fourier transform infrared spectra of the color samples 1–3.



7. attēls. Furjē transformācijas infrasarkanā starojuma spektri 6. un 7. krāsvielu paraugam.

Figure 7. Fourier transform infrared spectra of the color samples 6 and 7.

Humusvielu Furjē transformācijas infrasarkanās gaismas spektriem ir raksturīgs intensīvas sorbcijas intervāls no 3600 cm^{-1} – 3100 cm^{-1} ar maksimumu 3400 cm^{-1} , ko nosaka hidroksilgrupu sorbcija. Sintezētajās krāsvielās šis signāls ir gandrīz zudis. Vāji tas sastopams 3. un 6. krāsvielā, pārējos gandrīz nemaz (6., 7. att.), kas varētu liecināt par humusvielu struktūrā notikušām izmaiņām modifikācijas procesā. Humusvielām ir raksturīga arī intensīva sorbcija apgabalā no 1800 cm^{-1} līdz 1700 cm^{-1}

ar maksimumu 1730 cm^{-1} , kas ir atbilst karboksilgrupām. Analizētajās krāsvielās šis signāls nav zudis. Tas liecina, ka humusvielu modifikācijas procesā karboksilgrupas procesā nav tikušas izmainītas. 1., 2., 6. krāsviela pie viļņa skaitļa 2850 cm^{-1} uzrāda spēcīgu signālu, kas atbilst metilgrupām (6., 7. att.). 2., 5. un 6. krāsviela, uzrāda intensīvu signālu no 2650 līdz 2400 cm^{-1} ar maksimumu pie 2600 cm^{-1} , kas norāda uz alifātisko savienojumu klātbūtni. 1., 2., 6., 8. (mazāk izteikti arī 3., 5., 7.) krāsvielu intervālā no 800 līdz 400 cm^{-1} ir vairāki spēcīgi signāli, kas atbilst dažādiem ogļhidrātiem. Humusvielās ietilpstošajām ketogrupām raksturīgs signāls apgabālā no 1700 cm^{-1} līdz 1550 cm^{-1} , ar maksimumu 1630 cm^{-1} (Coates 2000). Šis signāls ir izteikts visām krāsvielām, īpaši 6. krāsvielai. Salīdzinot krāsvielu infrasarkanos spektrus, var secināt, ka līdzīgs ķīmiskais sastāvs ir krāsvielām Nr. 1., 2., 6., kā arī Nr. 3., 4., 5., 8.

Novērtētas arī krāsvielu īpašības, tās uzklājot uz koksnes.

1. krāsvielas piliens strauji iesūcas koksne, taču krāsa nav homogēna – uz noklātās virsmas redzamas sīkas krāsvielas daļiņas. Koksnes tonis pēc pirmās krāsošanas oranži brūns, uzklājot krāsvielu atkārtoti otro un trešo reizi, krāsojums kļūst tumšāks. Noklātā virsma nožūst ātri. Pēc atmazgāšanas vienreiz krāsota virsma izskatās brūngani dzeltena, noklātā virsma zaudējusi oranžo nokrāsu (1. att.). Divreiz krāsota koksne ir kļuvusi gaišāka, labi redzamas neizšķīdušās krāsvielas daļiņas. Trīs reizes krāsotas koksnes virsma pēc atmazgāšanas izskatās nevienmērīgi noklāta – vietām tonis ir saglabājis sākotnējo intensitāti, citviet vērojami gaišāki plankumi.

2. krāsvielas piliens uzklājas viegli un, nonākot uz koksnes virsmas, nedaudz izplūst. Pēc krāsošanas uz koksnes redzams liels daudzums krāsvielas daļiņu. Koksnes tonis pēc pirmās krāsošanas dzeltenīgi oranžs, bet, krāsojot atkārtoti, virsma kļūst tumšāka. Pēc atmazgāšanas vienreiz krāsotā parauga virsma kļūst dzeltenīga (1. att.). Arī divreiz krāsots paraugs ir zaudējis krāsas intensitāti – izskatās viegli oranžs. Trīs reizes krāsots paraugs pēc toņa intensitātes līdzinās vienreiz krāsotam paraugam pirms atmazgāšanas.

3. krāsvielas pilienu viskozitāte ir zema, un tās sastāvā ietilpst sīku daļiņu piemaisījumi. Nonākot uz koksnes, pilieni sadalās gaišas un tumšākas krāsas fāzē, ātri iesūcas, iekrāsojot to tumši dzeltenā tonī. Veicot atkārtotu uzklāšanu, tā iegūst oranžu nokrāsu. Pēc atmazgāšanas vienreiz krāsots paraugs izskatās viegli dzeltens (1. att.), zaudējis krāsas intensitāti. Arī divreiz un trīsreiz krāsotie paraugi pēc atmazgāšanas zaudē krāsas intensitāti.

4. krāsviela slikti iesūcas koksne, to iekrāsojot brūngani pelēkā krāsā. Pilienu virspusē redzams daudz sīku daļiņu, un tās izmantošana nenodrošina viendabīgu virsmas segumu. Pēc atmazgāšanas vienreiz krāsots paraugs zaudē krāsu gandrīz pilnībā (1. att.). Divas un trīs reizes krāsoti paraugi iegūst attiecīgi gaiši un tumši brūnu nokrāsu. Pēc atkārtotas krāsošanas, paraugu virsma vairs neizskatās raiba.

5. krāsviela izplūst lēni, krāsojot koksni oranži brūnā krāsā. Novērojama krāsas sadalīšanās fāzēs. Krāsa labi klājas, tomēr redzams neliels daudzums nogulšņu. Pēc atkārtotas apstrādes klucīša virsma kļūst tumši brūna. Pēc atmazgāšanas vienreiz krāsots paraugs ir gaiši brūns (1. att.), tas ir zaudējis oranžo nokrāsu. Divas un trīs reizes krāsoti paraugi saglabā savu sākotnējo toni gandrīz pilnībā – krāsa vēl joprojām ir koša, tumša un piesātināta;

6. krāsvielas piliens labi plūst, tā viegli klājas, krāsojot koksnes virsmu intensīvi oranžā krāsā. Uz virsmas redzamas sīkas daļiņas. Veicot atkārtotu parauga apstrādi, virsma iegūst pelēcīgu nokrāsu (veidojas cieto daļiņu slānis). Pēc atmazgāšanas vienreiz krāsotais paraugs kļūst gaišāks (1. att.). Divas un trīs reizes krāsotie paraugi zaudē sākotnējo spilgti oranžo toni.

7. krāsvielas piliens izplūst nedaudz, tomēr virsmu tā noklāj vienmērīgi, ietonējot koksni viegli brūnganā krāsā. Krāsojot paraugu atkārtoti, virsma kļūst tumšāka. Pēc atmazgāšanas paraugi gandrīz pilnībā saglabā sākotnējo izskatu (1. att.).

8. krāsviela ir maz viskoza. Krāsas piliens izplūst pa koksnes virsmu, viegli klājas, labi iesūcas, iekrāsojot virsmu pelēcīgi brūnā krāsā. Atkārtoti krāsojot paraugu, tonis kļūst piesātinātāks. Pēc atmazgāšanas visi klucīši gandrīz pilnībā ir zaudējuši savu sākotnējo krāsu (1. att.). Virsmas izskatās raibas – vietām redzami pelēkbrūni plankumi. Lielas atšķirības starp vairākkārt krāsotiem paraugiem nav novērojamas. Šim krāsvielas sastāvam raksturīga visintensīvākā atmazgāšanās (2. att.).

Diskusija

Pētījuma ietvaros sintezēti 8 dažādi kompozīciju sastāvi ar atšķirīgām īpašībām. Kompozīcijas, kas ir piemērotas izmantošanai kā koksnes krāsvielas, raksturo krāsvielas stabilitāte, toņa intensitāte un noturība pret atmazgāšanos, gaismas, mikroorganismu iedarbību, kā arī citiem apkārtējās vides faktoriem. Pētījuma ietvaros sintezētajiem savienojumiem tika noteikta krāsas noturība pret atmazgāšanos, iedarbība uz mikroorganismiem, kā arī vizuāli novērtēts to tonis.

Ar 1. krāsvielu noklāta koksne pēc atmazgāšanas saglabā toni, tas ir tumšs, taču uz virsmas redzamas nogulsnes. Krāsa ātri iesūcas, tai ir izteikta iedarbība uz mikroorganismiem. Uzskatāma par perspektīvu krāsvielu, taču nepieciešams uzlabot krāsvielas homogenitāti.

Ar 2. krāsvielu noklātas koksnes krāsas tonis ir košs, pēc atmazgāšanas zaudē oranžo toni, bet tas neizskatās pilnībā zaudējis krāsu. Izteikta iedarbība uz mikroorganismiem. Uzskatāma par perspektīvu krāsvielu, tomēr paraugam raksturīga spēcīga smaka.

3. krāsviela ātri iesūcas virsmā. Raksturīgs liels daudzums nogulšņu. Ar krāsvielu noklāta koksne izskatās neizteismīgāk salīdzinājumā ar citiem paraugiem. Pēc atmazgāšanas noklātā virsma zaudē krāsas intensitāti. Izteikta iedarbība uz mikroorganismiem. Netiek uzskatīts par perspektīvu paraugu krāsas nenoturības un neizteismīguma dēļ.

4. krāsviela slikti iesūcas koksnē. Virsmai raksturīgs duļķains izskats, pēc atmazgāšanas tā izskatās viendabīgāk. Salīdzinājumā ar pārējām krāsvielām tai ir vidēji spēcīga iedarbība uz mikroorganismiem. Iztaicējot krāsviela veido amorfū masu. Netiek uzskatīta par perspektīvu krāsvielu.

5. krāsviela klājas labi, koksni iekrāso tumšā tonī, kas saglabājas arī pēc atmazgāšanas. Novērota intensīva iedarbība uz testorganismiem. Uzskatāma par perspektīvu krāsvielu, tomēr, iespējams, jāparedz metodes nogulšņu atdalīšanai. 6. krāsviela klājas labi, veido košu, izteiktu toni. Pēc atmazgāšanas zaudē spilgti oranžo toni. Salīdzinājumā ar pārējām krāsvielām tai ir vidēji spēcīga iedarbība uz

mikroorganismiem. Uzskatāma par vienu no perspektīvākajām krāsvielām, tomēr ir jāņem vērā spēcīgā smaka un baltu nogulšņu veidošanās.

7. krāsviela uzskatāma par perspektīvu. Noklāta koksnes parauga virsma ir izteikti tumši brūnā krāsā, kas saglabā intensitāti arī pēc atmazgāšanas. Krāsviela raksturojama kā mazitoksiska.

8. krāsviela uzskatāma par neefektīvu – tās krāsojums ir blāvs un tā gandrīz pilnībā atmazgājas, tai raksturīga spēcīga smaka, un ļoti zema aizsardzība pret mikroorganismu iedarbību.

Lai humusvielu saturošo krāsvielu īpašības izpētītu pilnībā, papildus būtu nepieciešams veikt arī krāsotu koksnes paraugu eksponēšanu reālos āra apstākļos, kā arī testēt krāsotas koksnes noturību pret fungicīdo iedarbību.

Secinājumi

Modificējot humusvielas ir iespējams iegūt koksnes krāsvielas. Visefektīvākā pēc pētījuma rezultātiem ir humīnskābju modificēšanas metode ar naftilamīnu. Kā perspektīvas krāsvielas tika atzītas 1., 2., 5., 6., un 7. krāsviela. Izveidotās krāsvielas ir stabilas pret atmazgāšanos un tām piemīt spēja aizsargāt koksnī.

Pateicība

Pētījums izstrādāts ar ERAF projekta „INOVĀCIJA KŪDRAS IZPĒTĒ UN JAUNU TO SATUROŠU PRODUKTU IZVEIDĒ” (2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/037; S90-ESS2010/104) atbalstu.

LITERATŪRA

- Buttler, A., Diné, H., Lévesque P.E.M. 1994. Effects of physical, chemical and botanical characteristics of peat on carbon gas fluxes. *Soil Science* 158, 365–374.
- Coates J. 2000. Interpretation of infrared spectra, a practical approach. In: Meyers R.A. Chichester (eds.), *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. John Wiley and Sons Ltd.. 10815–10837.
- Goettsche R., Kober R., Kardorff U. 1999. Wood preservative. United States patent 5880143.
- Landsiedel H., Ventur D. 1994. Use of thiazidiazoles as biocides for material protection. *United States patent* 5,344,482.
- Laszlo T. S. 1977. Brown cigarette wrappers. *United States patent* 4146041.
- Saint – Fort R., Visser S. A. 1988. Study of the interactions between atrazine, diazinon and lindane with humic acids of various molecular weights. *Journal of Environmental Science and Health*, 23 (6), 613–624.
- Tarasick D.W., Wardle D.I., McElroy . C.T., McLinden C., Brown S., Solheim B. 2009. UV spectral measurements at moderately high resolution and of OH resonance scattering resolved by polarization during the MANTRA 2002–2004 stratospheric balloon flights. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 110 (3), 205–222.
- Törökne A. 2004. Sensitivity evaluation of the Daphtoxkit and Thamnotoxkit microbiotests on blind samples. *Journal of Applied Toxicology*, 24 (5), 323–326.
- Tseng Ch., Walker L. 2002. Isothiazolone/amine wood preservatives. *United States patent* 6448279.
- Tseng Ch., Walker L. 2003. Azole/amine oxide preservatives. *United States patent* 6527981.

Zemgales rievoto morēnu izplatība, morfoloģija un iekšējā uzbūve Viduslatvijas zemienē

The Distribution, Morphology and Internal Structure of the Zemgale Ribbed Moraines, Central Latvian Lowland

Kristaps Lamsters

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte,
Alberta iela 10, Rīga, LV-1010
e-pasts: *kristaps.lamsters@gmail.com*

Reinis Ošs

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte,
Alberta iela 10, Rīga, LV-1010
e-pasts: *reinis00@inbox.lv*

Abstract

In this paper, the distribution, morphology and internal structure of the Zemgale ribbed moraines in the Central Latvian Lowland are presented. There were identified and mapped about 2000 ribbed moraines by using topographic maps at scale of 1:10 000 and the morphological classification was created. The internal structure was studied in a sand pits, and it was revealed that ribbed moraines are characterized by the sequence of glacioaquatic sediments and till units that form imbricated thrusts. The obtained results suggest that the ribbed moraines were formed by the Zemgale ice lobe during the ice retreat from the North-Lithuanian end moraine transforming a priori existing drumlinized topography and forming landforms mostly characterized by two sets of ridges that crosses each other, although simple SW-NE oriented transverse forms are found in some places. The internal structure of drumlins was changed during the final stage of the deglaciation of the Late Weichselian glaciation by the ice stress from the inter-drumlin depressions that indicate on local variations in ice-flow velocity.

Keywords: Central Latvian Lowland, North-Lithuanian end moraine, Zemgale ice lobe, Zemgale ribbed moraines, drumlins.

Kopsavilkums

Rakstā apkopoti rezultāti par Zemgales rievoto morēnu izplatību, morfoloģiju un iekšējo uzbūvi Viduslatvijas zemienē. Ir identificētas un digitizētas aptuveni 2000 rievotās morēnas, izmantojot topogrāfiskās kartes mērogā 1:10 000, un izveidota to morfoloģiskā klasifikācija. Iekšējā uzbūve tika pēfīta smilts karjeros, un novērots, ka rievotās morēnas veido glacioakvālo nogulumu un morēnas zvīņveida uzbīdījumu mija. Rievotās morēnas ir veidojušās, Zemgales ledus loba atkāpšanās laikā no Ziemeļlietuvas gala morēnas, pārveidojot agrāk eksistējošo drumlinu topogrāfiju un radot formas, kuras veido divu aptuveni perpendikulāru grēdu sistēma, lai gan dažviet ir sastopamas arī vienkāršas DR-ZA virzienā orientētas šķērseniskas formas. Drumlinu iekšējā struktūra Vēlā Vislas apledošanas noslēdzošajā posmā tika pārveidota no starpdrumlinu ieplakām vērsta ledāja stresa ietekmē, kas liecina par lokāli atšķirīgu ledus plūsmas ātruma sadalījumu.

Atslēgvārdi: Viduslatvijas zemiene, Ziemeļlietuvā gala morēna, Zemgales ledus lobs, Zemgales rievotās morēnas, drumlini.

Ievads

Rievotās morēnas ir bieži vien izliektas vai savienotas grēdas ar nelielu attālumu starp tām, kuras kopumā orientētas šķērseniski ledus plūsmas virzienam (Hambrey and Glasser, 2005). Lai raksturotu šāda tipa reljefa formas, literatūrā ir lietoti arī dažādi lokālie termini, no kuriem vispazīstamākais ir „Rogenas morēnas”, kas tiek attiecināts uz transversāli ledāja kustībai orientētām grēdām, kurām raksturīga pāreja drumlinos (Lundqvist, 1989). Jautājums, vai visas rievotās morēnas ir jāuzskata par vienu reljefa formu tipu, kuram raksturīgs līdzīgs veidošanās process, vai nē, joprojām ir neatrisināts un aktuāls.

Iespējams, rievoto morēnu izplatība ir saistīta ar auksti/silti bāzēta ledus zonas migrāciju (Hättestrand, 1997; Kleman and Hättestrand, 1999), vai arī lokālu auksti bāzēta ledus apgabalu (pielipšanas plankumu) veidošanos ledāja gultnē, kur eksistēja kompresijas plūsmas apstākļi (Stokes et al., 2006, 2008), tādēļ rievotās morēnas ir viena no būtiskākajām liecībām par pagātnes segledāju dinamiku, glacioloģisko režīmu un gultnes termālajiem apstākļiem deglaciācijas laikā.

Zemgales (agrāk arī Daugmales) rievotās morēnas ir klasificētas Latvijā kā viens no rievoto morēnu paveidiem, ko raksturo ledāja kustībai paralēlu un šķērsenisku segmentu izkārtojums (Zelčs, 1993; Zelčs and Dreimanis, 1998). Šīs rievotās morēnas liecina par glacioloģiskā režīma un gultnes termālo apstākļu maiņu Vēlā Vislas apledošanas deglaciācijas noslēguma posmā, kad ledājs atkāpās no Ziemeļlietuvā (vietējais apzīmējums – Linkuvas) gala morēnas.

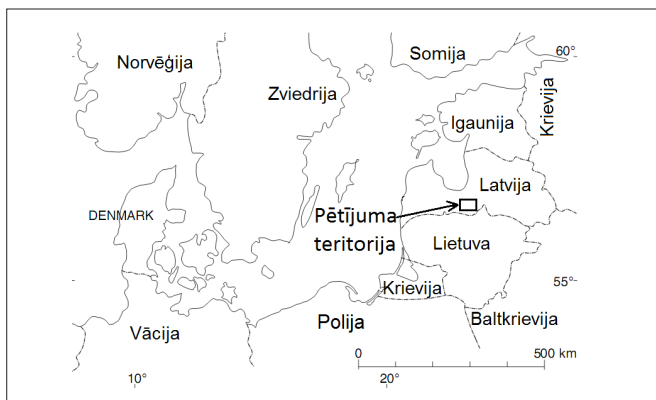
Pētījuma mērķis bija noskaidrot rievoto morēnu izplatību, morfoloģiju, iekšējo uzbūvi un veidošanās apstākļus Viduslatvijas zemiēnē. Lai to paveiktu, tika izveidota datubāze ar rievoto morēnu, drumlinu un osu kontūrām un to morfometriskajiem parametriem, kā arī veikti lauka darbi karjeros. Veiktā reljefa formu kartēšana ļāva detāli noskaidrot rievoto morēnu izplatību, to saikni ar citām reljefa formām, veidošanās secību un morfoloģiju, pamatojoties uz ko tika izstrādāta Zemgales rievoto morēnu morfoloģiskā klasifikācija. Izveidotā datubāze arī ļauj salīdzināt Zemgales rievotās morēnas ar citos pētījumos aprakstītām formām. Kopumā tām ir raksturīga lielāka morfoloģiskā daudzveidība, kā rievotajām morēnām citu autoru pētījumu teritorijās (Hättestrand, 1997; Stokes et al., 2008).

Pētījuma teritorijas raksturojums

Pētījuma teritorija ietver Viduslatvijas zemes dienvidu daļu (1. att.), kur Zemgales rievoto morēnu galvenais izplatības areāls atrodas Upmales paugurlīdzenumā. Mazāks rievoto morēnu areāls ir arī Daugavas labajā krastā Ropažu līdzenumā proksimāli no Ziemeļlietuvā gala morēnas un recesijas morēnas grēdām (Lamsters, 2011; 2012).

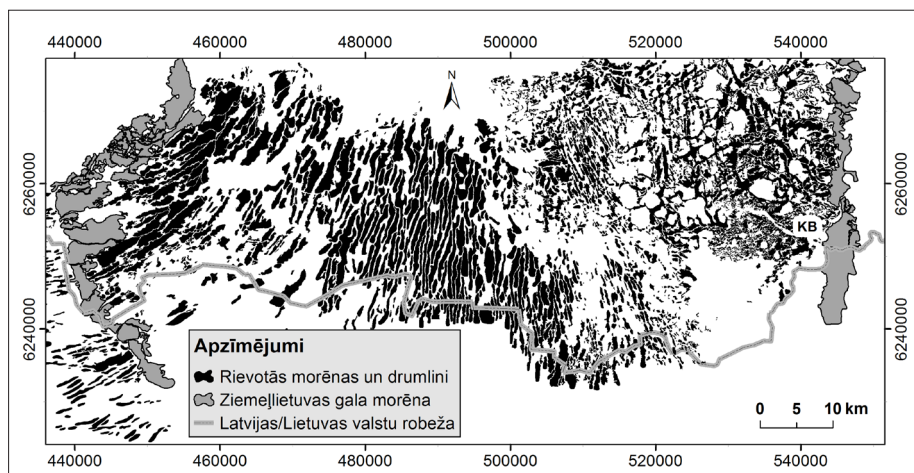
Teritorijas reljefs galvenokārt veidojās Vēlā Vislas (vietējais apzīmējums – Latvijas) apledošanas vispārējās deglaciācijas gaitā, kad Ziemeļlietuvā glaciālajā fāzē notika Rīgas ledus plūsmas Zemgales loba reaktivizācija, un izveidojās drumlinu

lauks, kurš vēlāk aktīvas frontālas ledāja malas atkāpšanās rezultātā tika pārveidots par Zemgales rievotajām morēnām. Jāatzīmē, ka ne visi drumlini tika pārveidoti, to apliecina Iecavas drumlinu lauka eksistence, kā arī ne visas rievotās morēnas asociē ar drumliniem, jo areāla A un D daļā ir sastopamas rievotās morēnas, kuras veido tikai šķērseniski segmenti (2. att.). Frontāla deglaciācija bija raksturīga Zemgales loba DA daļai Upmales paugurlīdzenumā un Madlienas nolaidenumā (Lamsters, 2012), ledājam atkāpjoties no tā maksimālās uzvirzīšanās Ziemeļlietuvās glaciālās fāzes laikā. Šīs uzvirzīšanās maksimumu Upmales paugurlīdzenumā mūsdienu reljefā atspoguļo Ziemeļlietuvās gala morēnas veidojums – Valles grēda, kas paugurlīdzenuma A daļā norobežo rievoto morēnu areālu.



1. attēls. Pētījuma teritorijas novietojums.

Figure 1. Location of the study area.



2. attēls. Zemgales rievoto morēnu un drumlinu izplatība Zemgales ledus loba dienvidu daļā.

Figure 2. The distribution of the Zemgale ribbed moraines in the south part of the Zemgale ice lobe.

Teritorijas zemkvartāra virsma kopumā pazeminās R, ZR virzienā, A daļā tā sasniedz 35 m vjl augstumu, bet ZR pazeminās līdz -5 m. Zemkvartāra virsmu saposmo lokāli paaugstinājumi. Kvartāra nogulumu biezums ir 10-20 m, vietām pat tikai daži metri, lielākais biezums ir atsevišķos pauguros. Kvartāra nogulumus galvenokārt veido morēnas mālsmilts un smilšmāls, kas satur dažāda biezuma glaciotehtoniski deformētas ledāja kušanas ūdeņu nogulumu slāņkopas. Morēnas sega gandrīz visur ir pārklāta ar Zemgales sprostezera glaciolimniskajiem nogulumiem, kuru biezums ir no 2–3 m līdz 10 m (Meirons, 2002). Dažviet, piemēram, Kalna Būbļu karjerā morēnu pārsedz aptuveni 1 m biezs sloksņu māla slānis, kas varētu būt veidojies caurkusuma vai lokālā baseinā pirms Zemgales sprostezera izveidošanās.

Sākotnēji daļa no Zemgales rievotajām morēnām tika uzskatīta par marginālajiem veidojumiem (Āboltniš, 1970). Pēc tam tās tika interpretētas, kā Labradorā tipa rievotās morēnas (Straume, 1979), pamatojoties uz Krievijā izstrādātu terminoloģiju (Lavrushin, 1976). Tikai vēlāk šīs formas tika nodēvētas par Zemgales rievotajām morēnām (Zelčs, 1993; Zelčs and Dreimanis, 1998).

Ar rievotajām morēnām teritorijā ir saistīti arī derīgie izrakteņi, tie galvenokārt tiek iegūti divās slāņkopās, no kuriem pirmā ir Zemgales sprostezera smilšainie un mālainie nogulumi, bet otrā – vecākie zemmorēnas smilšainie nogulumi, kuri nereti ir glaciotehtoniski deformēti un ar komplicētu uzbūdiņu struktūru un morēnas starpslāņiem, vismaz slāņkopas augšējā daļā.

Metodes

Zemgales rievotās morēnas, drumlini, osi un citas ledāja reljefa formas tika identificētas un digitizētas pēc PSRS armijas Ģenerālštāba topogrāfiskajām kartēm mērogā 1:10 000 (TOPO 10K PSRS). Viss kartogrāfiskais materiāls tika izstrādāts, izmantojot ESRI ArcGIS Desktop aplikāciju ArcMap 10. Fotogrāfiju digitālā pēcapstrāde un noformēšana tika veikta ar programmu CorelDRAW X4.

Lauka darbi tika veikti karjerā „Kalna Būbļi”, kas atrodas 4,5 km uz DA no Bārbeles; karjerā „Aizvējas”, kas atrodas 4 km uz ZR no Baldones; karjerā „Mašēni”, kas atrodas 3,5 km uz ZR no Baldones un 0,5 km uz RZR no bijušajām Dzeršu mājām. Lauka darbu gaitā minētajos karjeros tika attīrīti atsegumi, veikta to fotodokumentācija, izmantojot digitālo fotokameru Fujifilm FinePix S2500HD un digitālo spoguļkameru Pentax K110D. Tika fiksēti atsegumu kopskati un atsevišķas reljefa formu iekšējās uzbūves detaļas. Pētījumu vietām tika noteiktas koordinātas, izmantojot Garmin eTrex 20 GPS uztvērēju. Atsegumos tika interpretēta nogulumu ģenēze un saguluma apstākļi. Nogulumos tika veikti lineāro un plakanisko struktūrelementu, tādu kā oļu garenasu, morēnas plātņu un slāņu kontaktu, mērījumi. Mērījumu rezultāti tika vizualizēti punktveida, sektordiagrammās un kontūrdiagrammās ar programmu StereoNet.

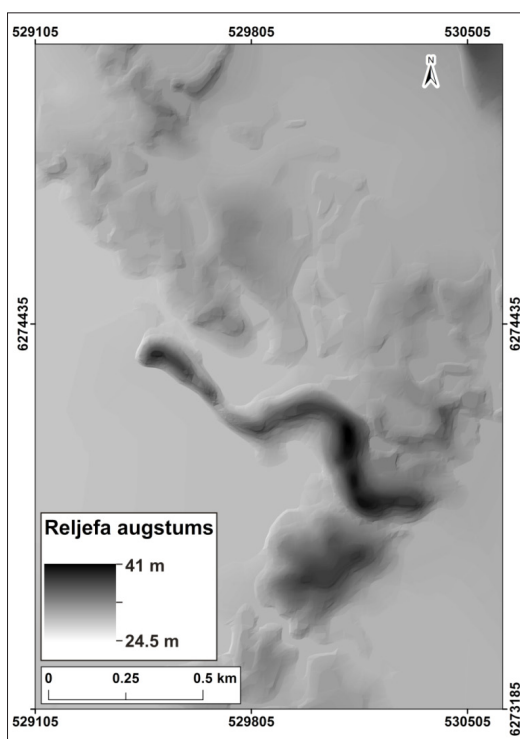
Rezultāti un interpretācija

Zemgales rievoto morēnu izplatība un morfoloģija

Zemgales rievotās morēnas Upmales paugurlīdzenumā ir daudzveidīgas un izkārtotas nevienmērīgi. Paugurlīdzenuma rietumu daļā tās norobežo Iecavas drumlinu lauks, austrumos – Ziemeļlietuvu gala morēna. Atsevišķas reljefa formas,

kuras atgādina rievotās morēnas, ir sastopamas nelielā apgabalā Iecavas drumlinu lauka rietumu daļā Garozas un Strēlnieku apkārtnē, kur tās strauji nomaina ledāja plūsmas paralēlos drumlinus (2. att.).

Kopumā rievotajām morēnām ir raksturīga liela morfoloģiskā daudzveidība (1. att.), ko sarežģīt gan to veidošanās procesā transformēto senāko drumlinu paliekas, gan vēlāk ledāja atkāpšanās laikā zemledāja tuneļos veidotie osi, no kuriem daļa ir uzguldīta virsū rievotajām morēnām, tādējādi apstiprinot rievoto morēnu zemledāja izcelsmi. Piemērs šādam gadījumam ir Kalna Pelšu oss, kurš atrodas 2 km uz AZA no Vecumniekiem (3. att.). Oss ir uzguldīts uz rievotās morēnas šķērseniskā segmenta, un tas ir paralēls radiālajam segmentam. Rievoto morēnu topogrāfija tika arī nedaudz pārveidota, kad tās klāja Zemgales sprostezera ūdeņi.



3. attēls. Kalna Pelšu osa reljefa modelis, 2 km uz AZA no Vecumniekiem.

Ievērojiet, ka oss ir uzguldīts uz rievotās morēnas šķērseniskā segmenta un paralēls radiālajam segmentam.

Figure 3. The relief model of the Kalna Pelši esker 2 km to ENE from Vecumnieki.

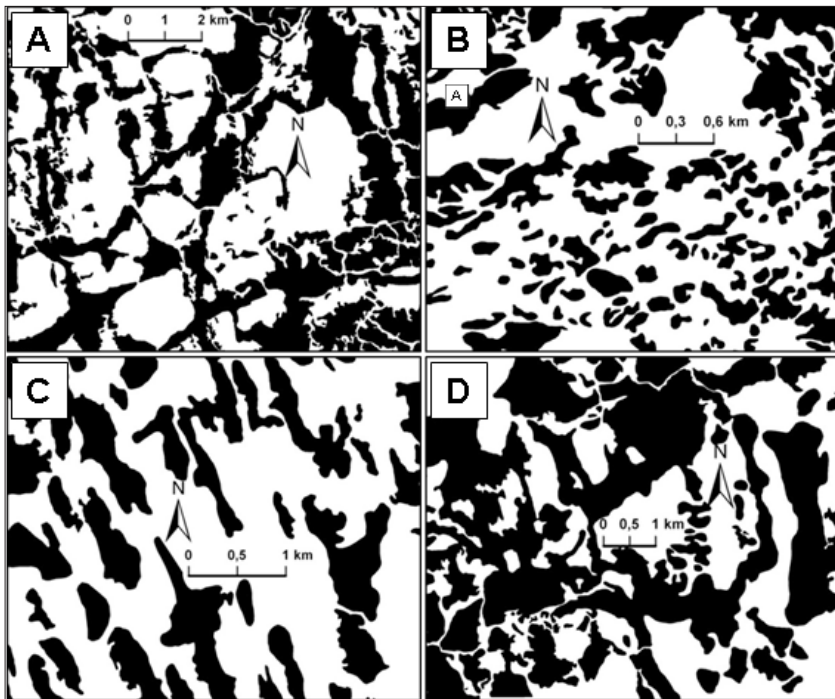
Note that the esker is superimposed on the transversal segment of the ribbed moraine and parallel to the radial segment.

Pamatojoties uz Zemgales rievoto morēnu morfoloģiskajām īpašībām un telpisko novietojumu, ir izdalīti četri to morfoloģiskie tipi: liela izmēra krusteniskās, maza izmēra šķērseniskās, uz drumliniem uzguldītās un liela izmēra komplicēto grēdu rievotās morēnas (1. tabula).

1. tabula. Zemgales rievoto morēnu morfoloģiskā klasifikācija un to morfometriskie parametri.

Table 1. The morphological classification of the Zemgale ribbed moraines and obtained morphometric parameters

Zemgales rievoto morēnu morfoloģiskais tips		Garums, m		Platums, m		Relatīvais augstums, m		Attālums starp grēdām, m
		Vid.	Min.-maks.	Vid.	Min.-maks.	Vid.	Min.-maks.	Min.-maks.
Liela izmēra krustēniskās	Radiālais segments	700-2500	250-6250	200-600	50-1400	4-12	1,5-15	
	Transversālais segments	500-2000	200-6000	200-700	100-1150	5-10	2-14	330-2000
Maza izmēra šķērseniskās		150-800	100-1170	100-400	25-550	2-6	1,5-13	120-400
Uz drumliniem uzguldītās							1-3	90-300
Liela izmēra komplicēto grēdu			800-2300		600-1150	30-50	20-56	



4. attēls. Zemgales rievoto morēnu morfoloģiskie tipi.

A: Lielizmēra krustēniskās; B: Mazizmēra šķērseniskās; C: Uz drumliniem uzguldītās; D: Lielizmēra komplicētās grēdu.

Figure 4. The morphological types of the Zemgale ribbed moraines

A: Large-scale criss-cross; B: Small-scale transversal; C: Superimposed on the drumlins; D: Large-scale complex ridges.

Liela izmēra krusteniskās rievotās morēnas (4. att. A) raksturīgas lielākajai daļai teritorijas. Tās lielākoties veido krustenisku reljefa formu sistēmu. Ledāja plūsmas paralēlās formas bieži ir līkumotas, sašķiebtas vai nolauztas (veido apgāztu „L” vai „T” burta formu), savukārt ledāja plūsmas šķērseniskās formas bieži sastāv no vairākām grēdām un korēm. Šķērseniskās formas ir gan taisnas, gan izlocītas un izliektas pusloka formā. Šādu divu pusloku formu sistēma mēdz veidot riņķveida formas, kas var būt pat pilnīgi noslēgtas. Lielākajā daļā no šīm riņķveida formām iekšpusē ir izveidojusies depresija, kurā parasti atrodas purvs, bet dažās ir sastopamas mazākas rievotās morēnas.

Maza izmēra šķērseniskās rievotās morēnas (4. att. B) atrodas galvenokārt teritorijā uz dienvidiem no līnijas Mežmuiža–Bārbele–Vecsaule, bet nelielā daudzumā tās atrodamas visā pētījuma teritorijā. Šīs rievotās morēnas atšķiras ar krietni mazākiem izmēriem un raksturīgo mazo relatīvo augstumu. Šķērseniskās rievotās morēnas nereti ir savienotas savā starpā un plānā veido dzīslotu rakstu, tuvākas grēdas mēdz būt apvienojušās, veidojot reljefa formu ar vairākām korēm.

Uz drumliniem uzguldtās rievotās morēnas (4. att. C) ir sastopamas nelielā daudzumā virs Iecavas drumliniem, kā arī vietām liela izmēra krustenisko rievoto morēnu radiālo segmentu virsma ir rievota. Dažu Iecavas drumlinu proksimālā daļa ir pārveidota par atsevišķām šķērseniskām rievotajām morēnām.

Liela izmēra komplicēto grēdu rievotajām morēnām (4. att. D) raksturīgs liels relatīvais augstums un nereti pat kantaina forma. Šīs rievotās morēnas atrodas tikai Baldones un Vecumnieku apkārtnē. Tām mēdz būt vairākas virsotnes, kā arī tās var sastāvēt no grēdām, kas ir izlocītas gan paralēli, gan perpendikulāri ledāja plūsmas virzienam.



5. attēls. Zemgales Rievotā morēna pie Bārbeles.

Fotogrāfija uzņemta no blakusesošās rievotās morēnas nogāzes.

Figure 5. Zemgale ribbed moraine near Bārbele.

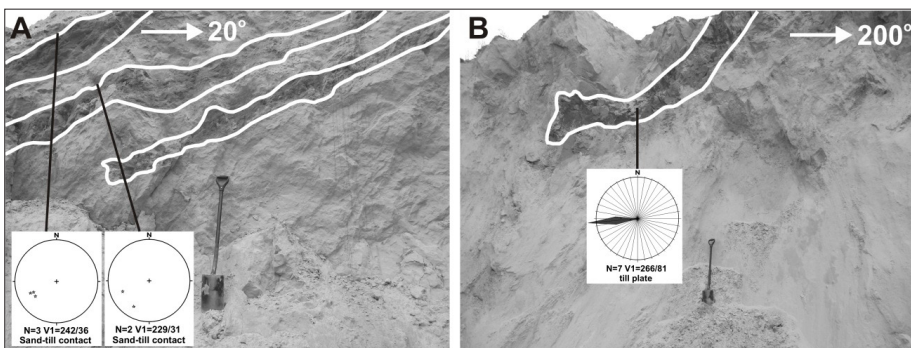
The photograph is taken out of the slope of the adjacent ribbed moraine.

Tipiska rievoto morēnu pazīme ir nogāžu stāvuma asimetrija. Lielākoties proksimālā nogāze ir lēzenāka, bet distālā stāvāka, savukārt gadījumā, ja rievotās morēnas šķērseniskais segments atrodas atrāvuma/izspieduma ieplakas distālajā (attiecībā pret ledāja plūsmu) daļā, tad stāvāka ir rievotās morēnas proksimālā nogāze. Rievoto morēnu augstākie punkti atrodas radiālo un šķērsenisko segmentu krustpunktā, bet šī pazīme nav novērojama visos gadījumos. Citi morfoloģiskie parametri (rievoto morēnu garums, platums, augstums, forma) ir līdzīgi tuvumā esošām reljefa formām.

Kopumā Zemgales rievotās morēnas, īpaši to šķērseniskie segmenti, ir komplicētas formas, atšķirīgas no citur pasaulē sastopamiem veidojumiem, kas apgrūtina to raksturošanu un klasifikāciju. Tomēr dažviet rievotās morēnas veido klasiskas savstarpēji paralēlas grēdas, kas orientētas perpendikulāri ledus plūsmas virzienam. Šādas formas īpaši sastopamas ceļa posmā Stelpe–Bārbele, kur tās ir orientētas perpendikulāri ceļam un ir viegli pamanāmas reljefā (5. att.).

Zemgales rievoto morēnu iekšējā uzbūve

Zemgales rievoto morēnu uzbūve tika pētīta divās dažādās rievotajās morēnās, no kurām viena atrodas netālu no Bārbeles rievoto morēnu izplatības pašā D daļā, kas raksturojas ar nelielām šķērseniski ledāja kustībai orientētām grēdām. Otra rievotā morēna atrodas pie Baldones, kur tās veido rievoto morēnu izplatības areālu, kam raksturīgas relatīvi lielas un komplicētas formas. Divi karjeri pie Baldones atrodas vienā reljefa formā, konkrētāk katrs savā rievotās morēnas radiālajā segmentā, kuri atgādina kādreizējo drumlinu paliekas. Abos karjeros tika konstatēti morēnas zvīņveida uzbīdījumi, kuri veidojušies ledāja stresa ietekmē, kurš bija orientēts aptuveni perpendikulāri bijušo drumlinu garenasīm, tātad arī perpendikulāri reģionālajam ledāja plūsmas virzienam (6., 7. att.).



6. attēls. Atsegumi rievotās morēnas karjerā „Aizvējas” 4 km uz ZR no Baldones.

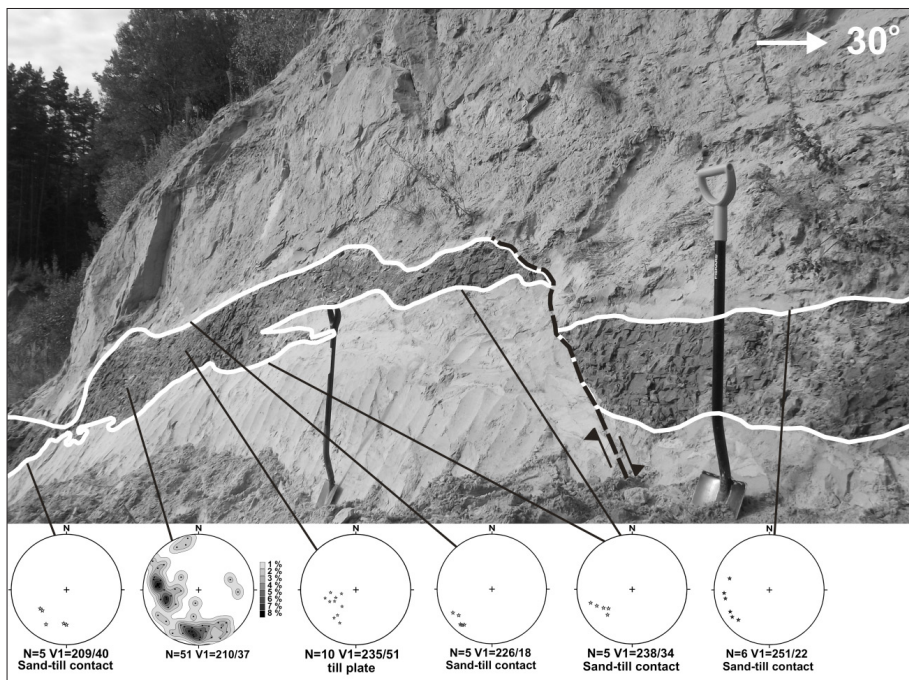
A: Secīgi morēnas zvīņveida uzbīdījumi un morēnas/smilts kontaktu krituma leņķu un azimutu vizualizācija punktveida diagrammās. B: Morēnas uzbīdījums un morēnas plātņu krituma leņķu un azimutu vizualizācija sektordiagrammā. Starp morēnas uzbīdījumiem esošie nogulumi ir deformēta aleirītiska līdz smalka smilts.

Figure 6. Exposures in the „Aizvējas” sand pit of the ribbed moraine 4 km NW from Baldone.

A: The sequence of the imbricated till thrusts and scattēlser plot of measurements of sand/till contacts. B: The imbricated till thrust and rose plot of measurements of till plate. The sediments between till thrusts are deformed silty-fine sand.

Šie uzbīdījumi veidojās drumlinu transformācijas rezultātā, kad tie tika šķērseniski saplacināti, kā to norādīja arī V. Zelčs (1993) un V. Zelčs un A. Dreimanis (1998). Karjerā „Mašēni” 3,5 km uz ZR no Baldones veiktie oļu garenasu orientācijas, morēnas plātņu vērsuma mērījumi, kā arī uzbīdījuma augšējo un apakšējo virsmu krituma azimutu mērījumi norāda uz ledāja stresa virzienu no DR (7. att.). Šo dažādo struktūrelementu orientācija ir ļoti līdzīga, kas norāda uz spēcīgu, nemainīgu lokālu ledāja stresu.

Karjerā „Aizvējas” R sienā tika konstatēti 3 morēnas zvīņveida uzbīdījumi, kas liecina par vismaz trijām uzbīdījumu veidošanās epizodēm (6. att. A). Karjerā tika atklāti arī divi devona mālu atrauteņi, kuri vēlāk diemžēl tika iznīcināti karjera izstrādes gaitā. Šādu atrauteņu esamība rievotajās morēnās apliecina to veidošanos kompresijas plūsmas apstākļos. Uzbīdījumu un atrauteņu eksistence liecina par ledus bazālu piesaļšanu gultnei, tātad par lokāliem auksti bāzētas gultnes apstākļiem laikā, kad Zemgales lobs atkāpās no Ziemeļlietuvas gala morēnas. Morēnā uzbīdījumos tika konstatēti arī oļi ar ledāja skrambām, kas pierāda šo nogulumu zemledāja izcelsmi un sākotnēju nogulsnešanos sablīvēšanās procesā.



7. attēls. Morēnas zvīņveida uzbīdījums karjerā 3.5 km uz ZR no Baldones.

Ievērojiet, ka fotogrāfija ir uzņemta slīpi, kas rada mēroga sagrozījumu.

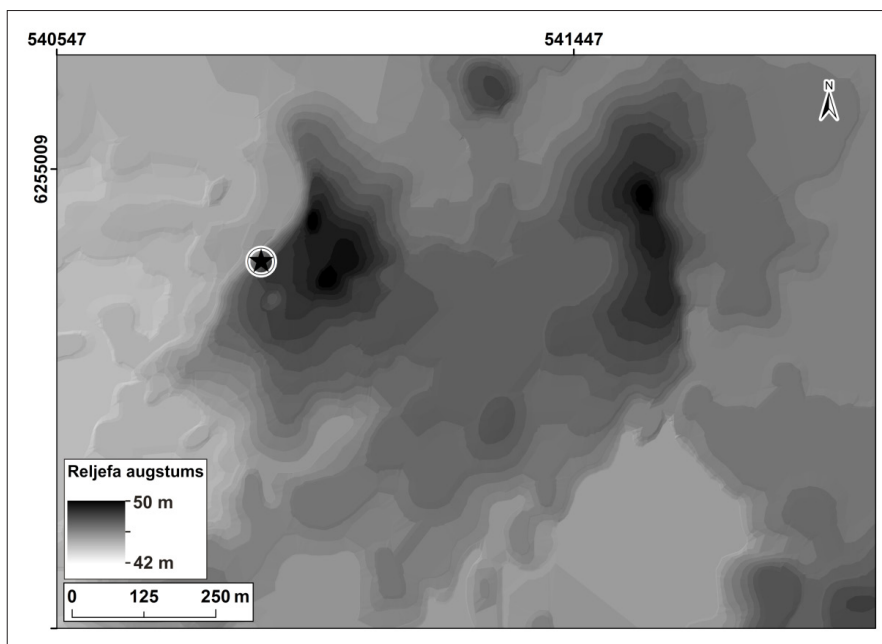
Figure 7. Exposure in the sand pit 3.5 km NW from Baldone showing imbricated till thrust.

Note that the photograph is an oblique view that causes distortion of the scale.

Kalna Būbļu karjers atrodas Zemgales rievotajā morēnā proksimālā virzienā netālu no Ziemeļlietuvas gala morēnas. Rievotās morēnas orientācija ir aptuveni

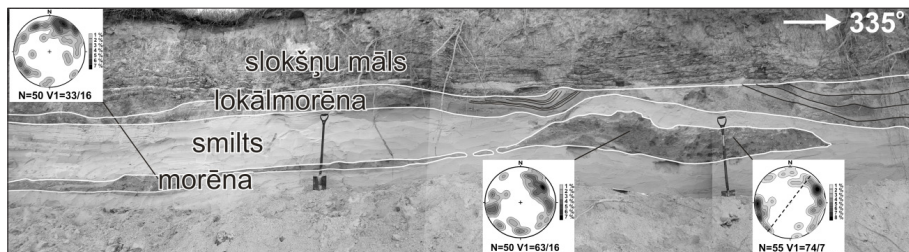
šķēršeniska pret ledāja kustības virzienu (8. att.) Karjerā tika konstatēts, ka rievotās morēnas augšējo daļu (9. att.) veido līdz 1,5 m biezi glaciolimniskie nogulumi – slokšņu māli. Tika veikti arī divi zondējumi rievotās morēnas pakājē un nogāzē. Attiecīgi pirmajā zondējumā līdz 1,2 m dziļumam tika konstatēti smalkas smilts nogulumi. Otrajā zondējumā smalka smiltis bija līdz 0,6 m, dziļāk – slokšņu māli. Pamatojoties uz šiem zondējumiem, var pieņemt, ka slokšņu māli varēja uzkrāties lokālā ledāja caurkusuma basinā, pirms Zemgales sprostezera izveidošanās, kad rievotās morēnas nogāzē un zemākā līmenī sprostezerā uzkrājās smilšainie nogulumi. Rievotā morēna, iespējams, eksistēja Zemgales sprostezerā kā neliela sala.

Zem slokšņu māliem ir sastopama sablīvējuma un lokālmorēna dažādā biezumā. Lielākoties tā ir sekli krokota lokālmorēna dažu decimetru biezumā, kas atseguma malā pāriet sablīvējuma morēnā maksimāli 1 m biezumā. Zemāk griezumu veido lielākoties smalka, deformēta smiltis, kas vietām ir saglabājusi primāro slāņojumu. Smilti pārtrauc deformētas sablīvējuma morēnas starpslānis dažādā biezumā, maksimāli 0,5 m. Morēnas starpslānis ir deformēts stiepes rezultātā, uz ko norāda budināža, kas dažviet sadala starpslāni vairākās lēcās, no kurām biežāk ir aptuveni 3 m garumā. Gan minētajā lēcā, gan dažus metrus tālāk morēnas starpslānī veiktie oļu linearitātes mērījumi norāda uz aptuveno oļu a-ass virzienu ZA–DR. Šāda orientācija ir perpendikulāra reģionālajam ledāja plūsmas virzienam un aptuveni paralēla rievotās morēnas garenasij.



8. attēls. Rievotās morēnas digitālais reljefa modelis un Kalna Būbļu karjera atrašanās vieta (norādīta ar zvaigznīti).

Figure 8. The digital relief model of the ribbed moraine and location of the Kalna Būbļi sand pit (shown by a star).



9. attēls. Atsegums rievotajā morēnā Kalna Būbļu karjerā 4.5 km uz DA no Bārbeles un morēnas makrolinearitātes mērījumu vizualizācija kontūrdiagrammās.

Figure 9. Exposure in the ribbed moraine at the Kalna Būbļu sand pit 4.5 km SE from Bārbele and contour plots of till fabric.

Pamatojoties uz līdzīgiem citu autoru mērījumiem rievotajās morēnās (Stokes et al., 2008), šādu morēnas makrolinearitāti var interpretēt kā šķērsenisko linearitāti, kas veidojusies kompresijas plūsmas apstākļos, kas ir raksturīgi rievoto morēnu izplatības areāliem arī citur pasaulē (*ibid.*).

Diskusija

Zemgales rievoto morēnu uzbūvi Latvijā ir pētījuši tikai daži autori (Zelčs, 1993; Zelčs and Dreimanis, 1998), kas ir atklājuši, ka to šķērsenisko segmentu uzbūvē dominē zvīņveida uzbīdījumu struktūras, savukārt radiālo segmentu uzbūve līdzinās drumlinu uzbūvei, kas gan ir pārveidota ledāja sāniskā spiediena rezultātā. Ir tikusi izvirzīta teorija, ka rievoto morēnu veidošanās notikusi recesijas laikā aktīvā un pasīvā ledus kontaktzonā, ledājam īslaicīgi aktivizējoties un pārveidojot drumlinu topogrāfiju (*ibid.*).

Rievoto morēnu izplatība pasaulē lielākoties ir attiecināta uz pleistocēna segledāju centrālajām daļām saistībā ar atkūstošas ledāja gultnes apstākļiem zonā starp auksti bāzētu un silti bāzētu gultni (Hättestrand, 1997; Kleman and Hättestrand, 1999). Citi autori (Dunlop and Clark, 2006), kas veikuši 33 000 rievoto morēnu kartēšanu Kanādā, Īrijā un Zviedrijā, norāda, ka rievotās morēnas var būt veidojušās dažādos glaciālā cikla laikos plašā teritorijā starp ledusšķirtni un ledāja malu. Šo apgalvojumus apstiprina arī rievoto morēnu izplatība Upmales paugurlīdzenumā, kur tās ir sastopamas nelielā attālumā no Ziemeļlietuvas gala morēnas.

Pamatojoties uz pētījumiem Zviedrijā (Hättestrand, 1997; Kleman and Hättestrand, 1999), ir aizstāvēts viedoklis, ka rievotās morēnas veidojās sākotnēji sasalušas morēnas segas saplaisāšanas, sašķelšanas un atkuššanas rezultātā stiepes plūsmas apstākļos. Šo teoriju ir kritizējuši daudzi citi autori (Dunlop and Clark, 2006; Möller, 2006). Arī Zemgales rievoto morēnu veidošanās nevarēja notikt tādā veidā, jo to uzbūvē nereti dominē glacioakvālie nogulumi, nevis morēna, kā arī vienlaidus morēnas sega vispār nevarēja eksistēt drumlinizētā reljefa dēļ. Alternatīva teorija ir saistīta ar rievoto morēnu divpakāpju (etapu) veidošanos, kas varēja notikt divās glaciālajās fāzēs vai pat apledojumos (Lundqvist, 1997). Pirmais etaps tiek saistīts tikai ar nogulumu uzkrāšanos, kam var nebūt nekāda saistība ar pašām rievotajām

morēnām, kas veidojās otrajā etapā. Arī šī teorija nav īsti piemērota Zemgales rievotajām morēnām, jo, lai gan tās veidojās, pārveidojot drumlinizēto topogrāfiju, to šķēršeniekie segmenti starp un virs drumliniem radās kā pirmreizējas formas, turklāt tas notika vienas glaciālās fāzes laikā uzreiz pēc drumlinu izveidošanās.

Arī cita autora (Möller, 2006) piedāvātais modelis par rievoto morēnu veidošanos, transformējot stagnanta ledus apstākļos veidotās morēnas (ice-cored moraines) ledāja reaktivizācijas laikā, nevar tikt piemērots Zemgales rievotajām morēnām. Tāpat to veidošanos ticamāk varēja izraisīt glacioloģiskā režīma maiņa, kā tas ir ierosināts citu autoru (Stokes et al., 2006; 2008) modelī, saskaņā ar kuru rievotās morēnas veidojās lokālos sasaldēšanas zemledāja gultnes apgabalos kompresijas plūsmas apstākļos ledus plūsmas aprimšanas laikā vai uzreiz pēc tās. Zemledāja gultnē veidojās lokāli auksti bāzēta ledus apgabali (pielipšanas plankumi), kas bremsēja ledus plūsmu, un proksimālā virzienā no šiem apgabaliem varēja notikt nogulumu sabīdīšana, zvīņveida uzbīdījumu veidošanās, un/vai ledus sakabināšanās un atkabināšanās no gultnes procesu mija (ibid.). Rievoto morēnu izplatība Upmales paugurlīdzenumā arī varētu liecināt par ledus plūsmas aprimšanu, un rievoto morēnu saistību ar auksti bāzēta ledus apgabalu izplatību. Tas varētu izskaidrot rievoto morēnu ierobežoto izplatību tikai Zemgales loba A daļā, turklāt tās veido vairākus izplatības areālus. Arī lielāko rievoto morēnu izplatības areālu Upmales paugurlīdzenumā tā R daļā pārtrauc Iecavas drumlinu lauks, no kura rievotās morēnas ir sastopamas uz R nelielā apgabalā. Izanalizējot pamatiežu virsmas topogrāfiju Viduslatvijas zemienē, tika secināts, ka tā varēja kontrolēt ledus plūsmas virzienu un ātrumu, bet netika novērota saistība starp rievoto morēnu izplatību un pamatiežu virsmas topogrāfiju un litoloģisko sastāvu. Šādas saistības neesamība ir novērota arī citur pasaulē (Stokes et al., 2006; 2008; Dunlop and Clark, 2006), un tas vēl vairāk padara ticamus minētos rievoto morēnu iespējamus veidošanās apstākļus.

Reljefa formu izplatība, telpiskais sakārtojums un uzbūve Upmales paugurlīdzenumā ļauj izdalīt vismaz trīs to veidošanās etapus, no kuriem katram bija raksturīgs atšķirīgs zemledāja gultnes termālais stāvoklis. Reljefa formas varēja arī veidoties sinhroni laikā dažādā zemledāja pozīcijā. Pirmajā etapā ledāja reaktivizācijas laikā Ziemeļlietuvā glaciālajā fāzē veidojās Ziemeļlietuvā gala morēna un drumlini. Šim etapam bija raksturīgi galvenokārt siltas-apūdeņotas ledāja gultnes apstākļi, kas gan varēja būt izplatīti ne visā ledāja gultnē, periodiski ledājs vietām varēja sakabināties ar gultni, samazinoties porūdēns spiedienam. Par to liecina drumlinos esošās trauslās deformācijas un uzbīdījumu struktūras, kas lielākoties veidojas aukstas gultnes apstākļos. Secīgā rievoto morēnu veidošanās varēja notikt, ledāja gultnei pakāpeniski vai sporādiski sasaldot, un robežā starp apūdeņotas un sasalušas gultnes apgabaliem veidojoties rievotajām morēnām raksturīgajām struktūrām. Šajā etapā varēja tikt pārveidoti arī drumlini, veidojoties uzbīdījumiem perpendikulāri drumlinu garenasīm orientēta ledāja stresa ietekmē (6., 7. att.). Nākamajam etapam bija raksturīga notece zemledāja tuneļos, kā rezultātā veidojās osi, kuri nereti stiepjas pāri ledāja gultnes pacēlumiem, tai skaitā arī rievotajām morēnām (3. att.), kas pierāda to veidošanos zemledāja tuneļos. Osu vaļņi lielākoties ir fragmentēti, kas varēja būt saistīts ar to veidošanās epizodēm, kad ledāja mala bija relatīvi stabila, un katrā šādā epizodē veidojās viens osa segments (Hooke and Fatsook, 2007).

Pētījumu teritorijā esošo reljefa formu izplatība ļauj arī noteikt ledāja plūsmas virzienus reģionālā un lokālā mērogā. Reģionālais ledāja plūsmas virziens bija no ZZR uz DDA, kā to pierāda drumlinu garenasu orientācija, kā arī tam atbilst ledāja skrambu mērījumi Iecavas un Akmenscūciņu dolomīta karjeros. Morēnas makrolinearitātes mērījumi Kalna Būbļu rievotajā morēnā norāda uz lokālām ledāja stresa variācijām no ZZR-DDA līdz RDR-AZA. Osu orientācija (3. att.) norāda, ka ledus plūsmas virziens Zemgales loba atkāpšanās laikā būtiski nemainījās kā tad, kad tas aktīvi uzvirzījās, veidojot drumlinus.

Secinājumi

Pamatojoties uz Zemgales rievoto morēnu morfoloģiskajām īpašībām un telpisko novietojumu, ir izdalīti četri to morfoloģiskie tipi: liela izmēra krusteniskās, maza izmēra šķērseniskās, uz drumliniem uzgulditās un liela izmēra komplicēto grēdu rievotās morēnas. Šāda tipa rievotās morēnas, kuras ir pārveidojušas drumlinus un ir uzgulditas uz tiem, nav bieži sastopamas pleistocēna ledāju klātajās teritorijās. Tās varētu būt raksturīgas ledus plūsmām, un nevis ledusvairogu centrālajiem apgabaliem, kur ir rievoto morēnu lielākie izplatības areāli pasaulē.

Reljefa formu veidošanās secība Upmales paugurlīdzenumā, uz ko norāda to izplatība, telpiskais sakārtojums un uzbūve, notika vismaz trīs etapos ar atšķirīgiem glacioloģiskajiem režīmiem un ledāja gultnes termālajiem apstākļiem. Pirmo etapu raksturo ledus plūsmas atkārtota uzvirzīšanās, atkūstoša gultne, ātra ledus plūsma un drumlinu veidošanās. Otrajam etapam bija raksturīga ledus plūsmas apīmšana, ledāja gultnei pakāpeniski vai sporādiski sasilstot, kā arī drumlinu pārveidošana un rievoto morēnu veidošanās. Trešajā etapā notika ledāja malas atkāpšanās ar īslaicīgām tās stabilizācijas epizodēm, bija raksturīga notece zemledāja tuneļos, kā rezultātā veidojās osi. Tas viss liecina par to, ka Vēlā Vislas apledojuma deglaciācija noslēguma posmā nebija vienmērīga, un tai bija raksturīgas vairākkārtējas ledāja gultnes termālo apstākļu izmaiņas.

Baldones apkārtnē esošo rievoto morēnu radiālajiem segmentiem raksturīgi morēnas zvīņveida uzbūvējumi, kuri veidojušies aptuveni perpendikulāri bijušo drumlinu garenasīm orientēta ledāja stresa ietekmē. Šādas struktūras ir tipiskas Zemgales rievoto morēnu radiālajiem segmentiem, un tās liecina par drumlinu saplacināšanu rievoto morēnu veidošanās etapā.

Pateicības

Šis darbs ir izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda projektu „Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē” (Nr.2009/01381DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/004), „Atbalsts maģistra studiju programmu īstenošanai Latvijas Universitātē” (Nr. 2009/0162/1DP/1.1.2.1.1/09/IPIA/VIAA/004) un ar VPP „Vietējo resursu (zemes dziļu, meža, pārtikas un transporta) ilgtspējīga izmantošana – jauni produkti un tehnoloģijas (NatRes)” apakšprojekta Nr.1 „Jaunu tehnoloģiju izstrādāšana inovatīvu produktu radīšanai no Latvijas zemes dziļu resursiem (ZEMES DZĪLES)” atbalstu. Autori izsaka pateicību profesoram Vitālijam Zelčam par atbalstu pētījuma veikšanā un Armandam Bernaus par palīdzību lauka pētījumos.

LITERATŪRA

- Āboltiņš, O. 1970. Marginal formations of Middle Latvian tilted plain and their correlation to Linkuva (North Lithuanian) end moraine. In: Danilāns, I. (ed.) *Problems of Quaternary geology*, V. Zinātne, Rīga, pp. 95-107. (In Russian with English summary).
- Dunlop, P., Clark, C.D. 2006. The morphological characteristics of ribbed moraine. *Quaternary Science Reviews* 25, 1668-1691.
- Hambrey, M.J., Glasser, N.F. 2005. Glaciers. Sedimentary processes. In: Selley, R.C., Cocks, L.R.M., Plimer, I.R. (eds) *Encyclopedia of geology*. Elsevier Academic Press, Amsterdam [etc.], First edition, Vol 4. p. 676.
- Hättestrand, C. 1997. Ribbed moraines in Sweden – distribution pattern and palaeoglaciological implications. *Sedimentary Geology* 111, 41-56.
- Hooke, R. LeB, Fastook, J. 2007. Thermal conditions at the bed of the Laurentide ice sheet in Maine during deglaciation: implications for esker formation. *Journal of Glaciology* 183 (53), 646-658.
- Kleman, J., Hättestrand, C. 1999. Frozen-bed Fennoscandian and Laurentide ice sheets during the Last Glacial Maximum. *Nature* 402, 63-66.
- Lamsters, K. 2012. Drumlins and related glaciogenic landforms of the Madliena Tilted Plain, Central Latvian Lowland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 84 (1), 45-57.
- Lamsters, K. 2011. Glaciotectionic landforms in the Madliena Tilted Plain. In: Zelčs, V. (ed.-in chief), *Acta Universitatis Latviensis. Earth and Environmental Sciences*, 767. University of Latvia, 48-61. (in Latvian with English summary)
- Lavrushin, Y.A. 1976. *Stroyenie i formirovanie osnovnykh moren materikovykh oledeneni*. Nauka, Moscow, 235 pp. (in Russian)
- Lundqvist, J., 1997. Rogen moraine – an example of two-step formation of glacial landscapes. *Sedimentary Geology* 111, 27-40.
- Lundqvist, J. 1989. Rogen (ribbed) moraine – identification and possible origin. *Sedimentary Geology* 62, 281-292.
- Meirons, Z., Misans, J., Mūrnieks, A. 2002. *Latvijas ģeoloģiskā karte, mērogs 1: 200000, 33. lapa – Ogre, paskaidrojuma teksts un kartes*. Valsts ģeoloģijas dienests, Rīga.
- Möller, P. 2006. Rogen moraine: an example of glacial reshaping of pre-existing landforms. *Quaternary Science Reviews* 25, 362-389.
- TOPO 10K PSRS. *Bijušās PSRS armijas ģenerālštāba topogrāfisko karšu mozaīka mērogā 1:10 000. LU ĢZZF WMS*. Skatīts 01.10.2012. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv>.
- Stokes, C.R., Lian, O.B., Tulaczyk, S. and Clark, C.D. 2008. Superimposition of ribbed moraines on a paleo-ice-stream bed: implications for ice stream dynamics and shutdown. *Earth Surface Processes and Landforms* 33, 593-609.
- Stokes, C.R., Clark, C.D., Lian, O.B., Tulaczyk, S. 2006. Geomorphological map of ribbed moraines on the Dubawnt Lake palaeo-ice stream bed: a signature of ice stream shut-down? *Journal of Maps*, v2006, 1-9. 10.4113/jom.2006.43.
- Straume, J. 1979. Geomorfologiya. In: Misāns, J., Brangulis, A., Danilāns, I., Kuršs, V. (eds) *Geologicheskoe stroyenie i poleznye iskopayemye Latvii*. Zinātne, Rīga, pp. 297-439. (in Russian).
- Zelčs V. 1993. Diverģentā tipa glaciodepresiju zemieņu glaciotectioniskās reljefa formas. *Disertācijas rakstu sērijas kopsavilkums*, Latvijas Universitāte, Rīga, 105 lpp.
- Zelčs, V., Dreimanis, A. 1998. Daugmale ribbed moraine: Introduction to STOP 1. Stop 1: Internal structure and morphology of glaciotectionic landforms at Daugmale. Area. In: Zelčs, V. (ed.), *The INQUA Peribaltic Group Field Symposium on Glacial Processes and Quaternary Environment in Latvia, May 25–31, 1998, Riga, Latvia. Excursion guide*. University of Latvia, pp. 3-14.

Klastisko un karbonātisko plūdmaiņu nogulumu sedimentācija Austrumlatvijā: vidusdevona Rēzeknes un Pērnavas svītas

Siliciclastic and Carbonate Tidal Sedimentation: Middle Devonian Rēzekne and Pārnu Formations, Eastern Latvia

Kristīne Tovmašjana

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte
Alberta iela 10, Rīga, LV-1010
E-pasts: *kt@lanet.lv*

Ģirts Stinkulis

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte
Alberta iela 10, Rīga, LV-1010
E-pasts: *Girts.Stinkulis@lu.lv*

Kopsavilkums

Šajā pētījumā tiek aprakstītas vidusdevona Rēzeknes un Pērnavas svītu nogulumu fācijas Austrumlatvijā, kā arī, balstoties uz urbumu datiem, tiek veikta šo nogulumu veidošanās apstākļu rekonstrukcija. Vidusdevona Rēzeknes un Pērnavas svītu nogulumu Austrumlatvijā atšķiras no pārējās šo laikposmu baseina daļas ar ievērojamu karbonātisko nogulumu īpatvaru, turklāt klastiskai sedimentācijai šeit ir pakārtota, bet ne mazāk svarīga nozīme nogulumu slāņkopu veidošanā. Pētījumā tiek uzsvērti plūdmaiņu procesa loma Rēzeknes un Pērnavas svītu nogulumu uzbūvē.

Atslēgvārdi: Baltijas devona sedimentācijas baseins, plūdmaiņu līdzenumi, estuāri, fācijas.

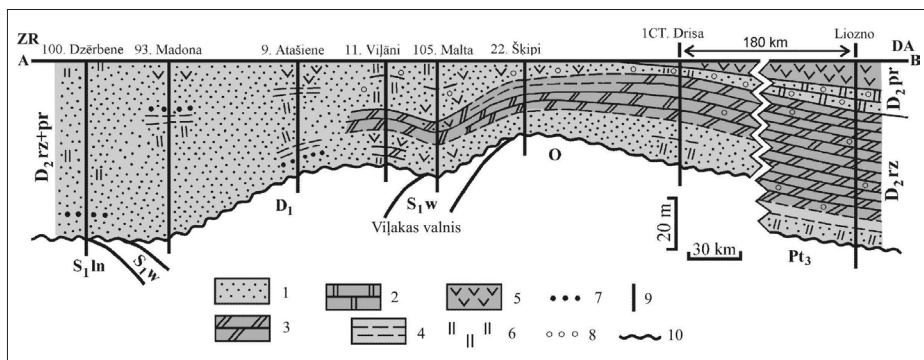
Summary

This study reveals the description of sedimentary facies of Rēzekne and Pārnu formations from Eastern Latvia, based on detailed drill core description. Sedimentary facies analysis is used and the reconstruction of sedimentary environments is made. The facies are combined into 8 facies associations, which are further grouped into carbonate-rich and siliciclastic ones. Rēzekne and Pārnu formations in the study area represent the transgressive succession of tide-dominated estuarine deposits associated with adjacent extensive tidal flat complex. Carbonate-rich sedimentation prevail almost throughout entire territory, including beds rich in dolomite ooids and peloids, unlike the rest of the basin, in which siliciclastic sedimentation is common. Tidal processes controlled the sedimentation in the basin.

Keywords: Baltic Devonian Basin, tidal flats, estuaries, facies.

Ievads

Vidusdevona Eifela laikmeta sākums – Rēzeknes un Pērnavas laikposmi – Latvijas ģeoloģiskajā vēsturē iezīmējas ar pirmo ievērojamo devona jūras transgresiju, un Baltijas devona baseins pirmoreiz šķērsoja Viļakas valni un savienojās ar Maskavas sineklīzes baseinu (Kursh 1975). Iepriekšējie pētījumi (Narbutas 1984; Kursh, 1975; 1992) liecina, ka šim sedimentācijas baseinam bija raksturīgi spilgti izteikti atšķirīgi nogulu uzkrāšanās areāli: dienvidrietumos un rietumos dominēja mālaini aleirītiskas nogulas; no ziemeļiem ieplūda smilts; austrumos un dienvidaustrumos uzkrājās mālaini karbonātiskas nogulas (Kursh 1975). Baseina ziemeļu un rietumu daļā sedimentāciju ievērojami iespaidoja no galvenā noneses apgabala (Skandināvijas) piegādātās sanešu plūsmas. Tās noteica nogulu sastāvu (smilts, aleirīts un māls), pazemināja baseina ūdens sāļumu un mazināja vides piemērotību organismu dzīvei. Baseina austrumos un dienvidaustrumos saldūdens un drupu materiāla pieplūde no ziemeļiem sedimentāciju tik daudz neietekmēja, tādēļ šeit uzkrājās galvenokārt karbonātiskas nogulas ar smilts un māla piejaukumu (t.s. smilšaino domerītu sedimentācijas areāls pēc V. Kurša 1975). Bez tam aptuveni tagadējās Latvijas austrumu robežas apkārtnē devonā atradās Viļakas valnis, uz kura veidojās seklūdens nogulumu (Kursh 1975; Stinkulis 1998).



1. attēls. Rēzeknes un Pērnavas svītu nogulumu ģeoloģiskais griezumā no Latvijas centrālās daļās uz dienvidaustrumiem (Kuršs un Stinkulis, 1998).

Urbumu atrašanās vietu skat. 2. att. pa griezuma līniju A–B. Apzīmējumi: 1 – smilšakmens; 2 – dolomīts; 3 – dolomītmerģelis; 4 – māls; 5 – ģipsis un ģipša cements smilšakmeņos; 6 – dolomīta cements smilšakmeņos; 7 – kvarca oļi; 8 – dolomīta oolīti/pseidooolīti; 9 – urbumi; 10 – erozijas virsmas.

Figure 1. Geological cross-section of the Rēzekne and Pārnu formations from the central part of Latvia to south-east (Kuršs and Stinkulis, 1998).

See location of boreholes on Fig. 2. through the cross-section A–B. The legend: 1 – sandstone; 2 – dolomite; 3 – dolomitic marl; 4 – clay; 5 – gypsum and gypsum cement in sandstones; 6 – dolomite cement in sandstones; 7 – quartz grains; 8 – dolomite ooids/peloids; 9 – boreholes; 10 – erosional surfaces.

Pateicoties daudzveidīgu iežu tipu mijai (smilšakmeņi ar atšķirīgiem graudu izmēriem, aleirolīti, dolomītmerģeļi un dažādi jaukta sastāva nogulumu), to labai saglabātībai urbumu serdēs un griezumu cikliskai uzbūvei, Austrumlatvijā Pērnavas reģionālajā stāvā ir iespējams nodalīt divas litostratigrāfiskās vienības – Rēzeknes un

Pērnavas svītas, bet pārējā Latvijas daļā tikai vienu – Pērnavas svītu (1. att.). Baltijas teritorijā Pērnavas reģionālā stāva nogulumi atsedzas ierobežotā laukumā, tikai pie Pērnavas upes Igaunijas DR daļā. Pārējā Baltijas daļā vidusdevona apakšdaļas nogulumi ir konstatēti tikai urbumos, pie tam Baltijas rietumu un centrālajā daļā to serdes ieguvums parasti ir mazs. Jāatzīmē, ka vēl aizvien ir diskutējams jautājums par apskatāmās slāņkopas apakšdaļas – Rēzeknes svītas – atbilstību agrajam devonam vai vidusdevonam Baltijas teritorijā (Paškevičius 1997; Kleesment and Mark-Kurik 1997; Savvaitova 2002, Mark-Kurik and Pöldvere 2012). Šajā darbā pieņemts viedoklis, ka Rēzeknes un Pērnavas svītas pieder vidusdevona Eifela sedimentācijas cikla transgresīvajai bazālajai daļai (Narbutas, 1984; Kursh, 1975; Kursh and Stinkulis 1998).

Pamatojoties uz augšminētajiem apstākļiem, jāsecina, ka Rēzeknes un Pērnavas svītu nogulumu detalizētiem sedimentoloģiskajiem pētījumiem Baltijas austrumu daļā ir liela nozīme, lai raksturotu sedimentācijas apstākļus vidusdevona baseinā un Baltijas devona sedimentācijas baseinos kopumā. Pētījuma mērķis ir detalizēti raksturot Rēzeknes un Pērnavas svītu nogulumu fācijas Austrumlatvijā, nodalīt fāciju asociācijas un sniegt jaunu šo nogulumu veidošanās apstākļu interpretāciju.

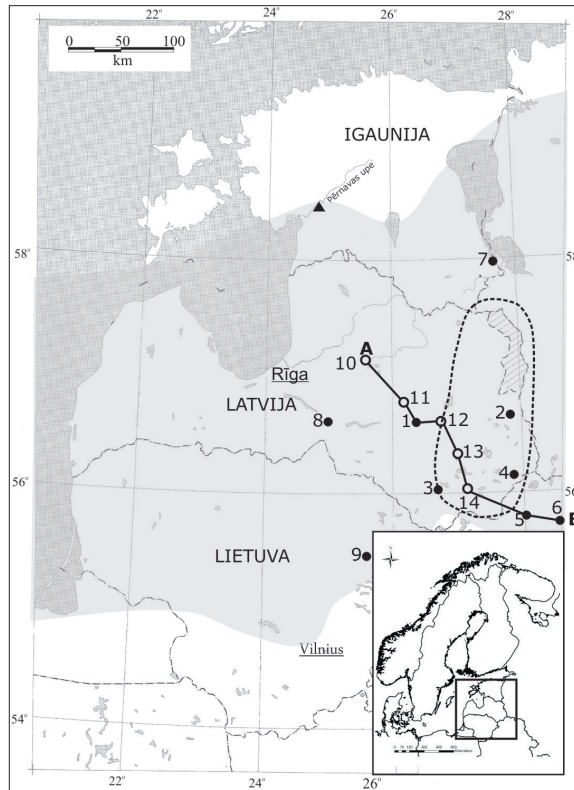
Materiāli un metodes

Latvijas austrumu daļā Rēzeknes un Pērnavas svītu nogulumi iegūti vairāku simtu metru dziļumā, nekur neatsedzas Zemes virspusē un ir konstatēti tikai dziļurbumos. Tādēļ pētījumu pamatā bija materiāls, kas iegūts no urbumu serdēm. Pētījuma pamatā tiek izmantots detalizēts nogulumu un paraugu apraksts un no četriem urbumiem Austrumlatvijā – Šķaune-103, Višķi-25, Ludza-15 un Atašiene-9 (Stinkulis 1998). Šādā secībā tie ir izvietoti no austrumiem uz rietumiem – paralēli nogulumu sastāva viskrasāko izmaiņu virzienam. Urbumu atrašanās vietas skatāmas faktiskā materiāla kartē (2. att.).

Rēzeknes un Pērnavas svītas nogulumi ir aprakstīti un zīmēti visu četru urbumu serdēs, kā rezultātā nodalīti slāņi ar atšķirīgu sastāvu, tekstūrām un karbonātu saturu, kā arī no katra urbuma serdes noņemti apmēram 10 nelieli paraudziņi plānslīpējumu izgatavošanai. (Stinkulis, 1998) Pēc Stinkuļa (1998) ir precizētas slāņu robežas, un novērtēts dažādu griezumņu intervālu dziļums pēc karotāžas līknēm.

Lai gūtu priekšstatu par nogulumu sastāvu tajā baseina daļā dienvidaustrumu virzienā no Viļakas vaļņa teritorijas, kurā Eifela laikmeta sākumā bija raksturīga vēl mazāka drupu materiāla pieplūde un augstāks baseina ūdens sāļums, tiek izmantoti dati no 10 plānslīpējumi no V. Kurša kolekcijas, kuri izgatavoti no Drissa-1ST un Liozno urbumu (Baltkrievijas ziemeļu daļa) seržu paraugiem (Stinkulis, 1998). Savukārt, lai salīdzinātu fāciju izmaiņas nogulumos uz ziemeļiem un rietumiem no pētījumu areāla, tiek izmantoti K. Tovmasjanas dati ar nogulumu aprakstiem no sekojošiem urbumiem: Verska-6 (Vārska-6), Taurkalne-1 un Svedasai-252 (Svédasai-252) (skat. 2. att.).

Pēc nogulumu fāciju analīzes pētītajos urbumu greizumos tik iedalītas fācijas (Collinson, 1996; Miall, 1996). Fācijas tiek iedalītas pēc nogulumu sastāva, tekstūras un struktūras īpatnībām. Pētītās fācija tiek apvienotas fāciju asociācijās, kuras atspoguļo nogulumu sedimentācijas vides, un kuras ļauj spriest par veidošanās apstākļu īpatnībām plašākā teritorijā.



2. attēls. Pētījumu teritorija un Rēzeknes/Pērnavas svītu mūsdienu izplatības karte.

Ar trīsstūri apzīmēta Pērnavas svītas atsegumu atrašanās vieta. Ar melniem aplīšiem apzīmēti pētītie urbumi: 1 – Atašiene-9; 2 – Ludza-15; 3 – Višķi-25; 4 – Šķaune-103; 5 – Drissa-1ST; 6 – Liozno; 7 – Verska-6 (Vārška-6); 8 – Taurkalne-1; 9 – Svēdasai-252 (Svēdasai-252) – (6. urbums ir ārpus kartes mēroga, tas atrodas 180 km uz DA no 5. urbuma). Ar tukšiem aplīšiem apzīmēti ģeoloģiskā griezuma A–B urbumi (skat. 1. att): 10 – Dzērbene-100; 11 – Madona-93; 12 – Viļāni-11; 13 – Malta-105; 14 – Šķīpi-22. Pelēkā krāsā iekrāsotais laukums apzīmē Rēzeknes un Pērnavas svītu mūsdienu izplatības areālu. Laukums ar svītrotu līniju iezīmē iespējamās Viļakas valņa robežas.

Figure 2. Geographical location of the study area and present distribution of Rēzekne and Pärnu formations.

Black triangle marks location of outcrops of the Pärnu Formation. Black circles mark studied drill cores: 1 – Atašiene-9; 2 – Ludza-15; 3 – Višķi-25; 4 – Šķaune-103; 5 – Drissa-1ST; 6 – Liozno; 7 – Verska-6 (Vārška-6); 8 – Taurkalne-1; 9 – Svēdasai-252 (Svēdasai-252). Note, that the location of borehole 6 is out of scale, it is located 180 km to SE from borehole 5. Empty circles mark location of the boreholes of the cross-section A–B (see Fig. 1). Light shaded area marks the present distribution of the Rēzekne and Pärnu formations. Dashed area marks possible boundaries of the Viļaka Ridge.

Rezultāti un interpretācija

1. Nogulumu fācijas

Pēc nogulumu struktūrām, tekstūrām un minerālā sastāva ir nodalītas deviņas fācijas (3. att.). Rēzeknes un Pērnavas svītu fācijas tiek apskatītas kopā, jo lielākā daļa no tām ir izplatītas abās svītās.

1.1 Bezkarbonātiskās nogulumu fācijas

Fācija 1.1.1: Vidēj-rupjgraudains labi šķirotis smilšakmens

Šis labi šķirotais smilšakmeņu paveids izceļas ar labu un pat izcili labu graudu noapaļotību, pie tam, jo rupjāki ir smilts graudi, jo labāk tie ir noapaļoti. Smilšakmeņos ir maz vizlas un tumšo minerālu, tikai ļoti retos gadījumos tajos konstatēti karbonātu oolīti un pseidoolīti.

Nogulumi ir pelēki un gaiši brūnganpelēki, slīpslāņoti, ar sēriju biezumu vismaz 7 cm (domājams, ka slīpslāņotās sērijas ir ievērojami biežākas, jo novērojumi izdarīti samērā nelielajos urbumu seržu gabaliņos), retāk dzīslveidīgi slāņoti (angļu valodā – *flaser bedding*). Vietām tajos ir zaļganpelēku mālainu un mālaini karbonātisku iežu oļīši ar izmēriem no milimetra daļām līdz 2×4 cm.

Interpretācija. Šīs fācijas struktūra, slīpslāņotā tekstūra un labais šķirojums liecina, ka nogulumi ir veidojušies vilkmes straumēs (angļu valodā – *traction currents*), zemūdens grēdām migrējot pa gultni (Collinson 1996). Labā graudu noapaļotība un šķirojums liecina par, visticamāk, marīnu ģenēzi un nogulumu pārskalošanu plūdmaiņu straumju darbības rezultātā. Mālaini karbonātisku iežu oļīši liecina par smalkgraudaināko Rēzeknes-Pērnavas svītu nogulu pārskalošanu vidēj-rupjgraudainā drupu materiāla uzkrāšanās laikā. Savukārt, Rēzeknes un Pērnavas svītu nogulumiem tipisko dolomīta oolītu un pseidoolītu trūkums šajos smiltsiežos norāda uz pazeminātu ūdens sāļumu to nogulsnešanās laikā.

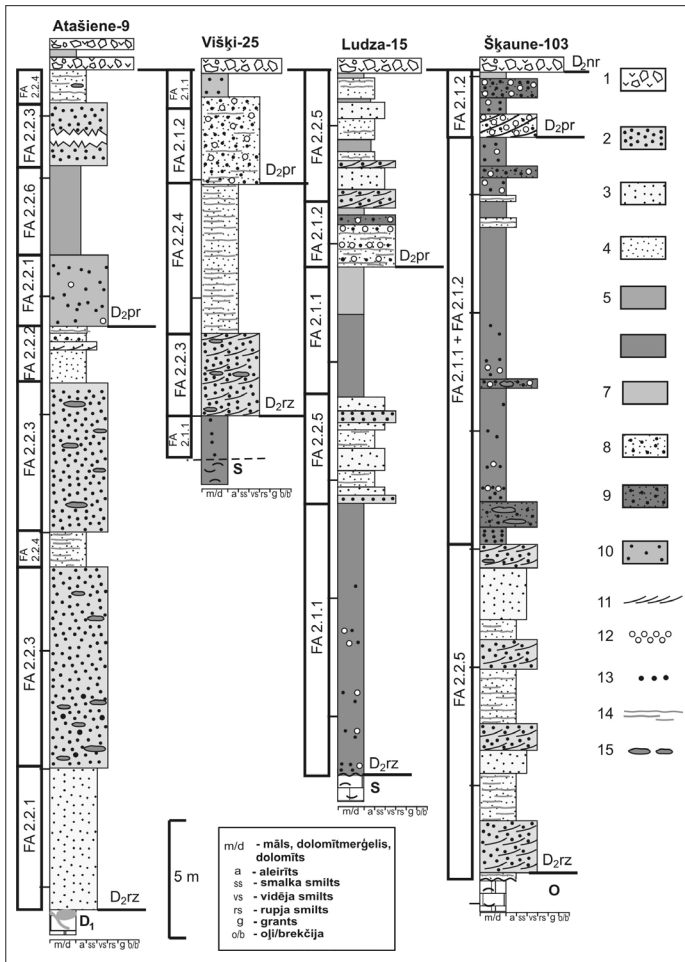
Fācija 1.1.2: Smalk-vidējgraudains vāji šķirotis smilšakmens

Graudu diametrs šajos smilšakmeņos pēc mērījumiem plānslīpējumos ir 0,06–0,4 mm (vidēji 0,2 mm). Drupu materiāls ir samērā vāji šķirotis, bet tā noapaļojuma pakāpe pārsvarā ir zema un vidēja. Smalk-vidējgraudainie smilšakmeņi, atšķirībā no rupjākajiem paveidiem, bieži vien ir stipri vizlaini. Smilšakmeņi ir pelēki, gaiši brūnganpelēki, retāk zaļganpelēki. Tiem raksturīgs sīks dzīslveidīgs un horizontāls slāņojums, retāk slīpslāņojums un viendabīga tekstūra. Parasti tajos nesastop ne karbonātu oolītus un pseidoolītus, ne arī karbonātu cementu.

Interpretācija. Šīs fācijas sastāvs, graudu samērā vājā šķirotība un zemā noapaļojuma pakāpe liecina par šo nogulumu veidošanos, visticamāk, fluviālās straumēs. To apliecina arī slīpslāņojums un viendabīgā tekstūra, kas ļauj secināt par šo nogulu veidošanos vilkmes straumēs. Smilšakmeņu viendabīgā tekstūra liecina par ļoti aktīvu sedimentācijas režīmu, nogulām strauji izgulsnējoties (Miall 1996). Karbonātu oolītu un pseidoolītu trūkums smalk-vidējgraudainajos nogulumos liek secināt, ka tie izgulsnējušies no ūdens ar pazeminātu sāļumu.

Fācija 1.1.3: Aleirītisks smilšakmens

Parasti tas ir brūnganpelēks, gaišpelēks, pelēks un gaiši oranžpelēks, bet, pieaugot māla un karbonātu saturam, iegūst zaļganpelēku krāsu. Šis smilšakmens pārsvarā ir dzīslveidīgi slāņots, retāk viļņoti (angļu valodā – *wavy bedding*) un horizontāli slāņots ar kārtiņu biezumu no milimetra daļām līdz 1 cm, reti līdz 3 cm. Ļoti reti konstatēts slīpslāņojums ar sēriju biezumu līdz dažiem centimetriem. Dažkārt var novērot slāņojuma deformācijas un nogulu pārskalošanas pazīmes. Karbonātu oolīti



3. attēls. Rēzeknes un Pērnavas svītu ģeoloģiskais griezum, fācijas un fāciju asociācijas Austrumlatvijā.

Ar FA apzīmētas fāciju asociācijas: FA 2.1.1 – vidējais-augšējais plūdmaiņu līdzenums ar karbonātu sedimentāciju; FA 2.1.2 – vidējais-augšējais plūdmaiņu sēklis ar karbonātu sedimentāciju; FA 2.2.1 – estuāra iekšējās daļas fluviālie nogulumi; FA 2.2.2 – estuāra centrālās daļas nogulumi; FA 2.2.3 – plūdmaiņu kanāli un sēres; FA 2.2.4 – apakšējais plūdmaiņu līdzenums ar smilts sedimentāciju; FA 2.2.5 – vidējais-apakšējais plūdmaiņu līdzenums un kanāli ar smilts sedimentāciju; FA 2.2.6 – augšējais plūdmaiņu līdzenums ar māla sedimentāciju. 1 – brekcija ar ģipša starpkārtām un ieslēgumiem; 2 – 1. Fācija; 3 – 2. Fācija; 4 – 3. Fācija; 5 – 4. Fācija; 6 – 5. Fācija; 7 – 6. Fācija; 8 – 7. Fācija; 9 – 8. Fācija; 10 – 9. Fācija; 11 – slīpslāņojums; 12 – dolomīta oolīti un pseidooolīti; 13 – kvarca oļi; 14 – mālainas starpkārtas; 15 – dolomītmerģeļa un māla oļi.

Figure 3. Geological section, facies and facies associations of the Rēzekne and Pärnu formations in Eastern Latvia.

FA 2.1.1 – intertidal to supratidal carbonate mudflats; FA 2.1.2 – intertidal to supratidal carbonate shoals; FA 2.2.1 – fluvial deposits of inner estuary; FA 2.2.2 – central estuary deposits; FA 2.2.3 – tidal channels and bars; FA 2.2.4 – subtidal sandflats; FA 2.2.5 – intertidal to subtidal channels and sandflats; FA 2.2.6 – supratidal mudflats. 1 – breccia with gypsum layers; 2 – facies 1; 3 – facies 2; 4 – facies 3; 5 – facies 4; 6 – facies 5; 7 – facies 6; 8 – facies 7; 9 – facies 8; 10 – cross-beds; 11 – dolomite ooids and peloids; 13 – quartz grains; 14 – clayey interlamination; 15 – dolomitic marl and claystone pebbles.

un pseidoolīti nav raksturīgi aleirītiskajiem smilšakmeņiem pat tad, ja šie drupieži tieši kontaktē ar dažādgraudainu smilšakmeņu slāņiem, kuros ieapaļo karbonātu veidojumu saturs sasniedz 50%.

Interpretācija. Viļņots un dzīslveidīgs slāņojums var veidoties dažādās vidēs ar mainīgu hidrodinamisko režīmu vai drupu materiāla pieplūdi, taču biezas slāņkopas ar minēto tekstūru ir raksturīgas vidēs ar plūdmaiņu režīmu (Nio and Yang 1991; Dalrymple 1992). Šīs fācijas sastāvs – heterolītiski nogulumi (smilšaino un aleirītisko nogulumu slāņmija) – un tās ciešā asociācija ar 1.1.1 fāciju (vidēj-rupjgraudains labi šķirots smilšakmens), ļauj secināt par šo nogulu uzkrāšanos lēnās plūdmaiņu straumēs (Nio and Yang 1991). Reti konstatētais slīpslāņojums, savukārt, norāda uz periodisku plūdmaiņu straumju aktivizēšanos. Aleirītiskā smilts, līdzīgi rupj-vidējgraudainajam un smalk-vidējgraudainajam smilšainajam materiālam, ir veidojusies ūdenī ar pazeminātu sāļumu. To apstiprina karbonātu oolītu un pseidoolītu trūkums, kā arī kopumā niecīgais karbonātu saturs aleirītiski smilšainajos nogulumos.

Fācija 1.1.4: Aleirolīts

Pelnaini pelēkajam, nedaudz iebrūnajam aleirolītam ir raksturīgs horizontāls un viļņots slāņojums ar biežumu no milimetra daļām līdz dažiem mm. Tekstūru nosaka vizlas orientācija paralēli slāņojumam. Vizlas saturs ir ļoti augsts un sasniedz 30% no visiem drupu graudiem. Ļoti bieži sastopami arī sulfīdu stīkdispersi sakopojumi (agregāti), kuri piešķir aleirolītiem raksturīgo pelēko krāsu. Kvarca un laukšpata drupu graudu diametrs pēc mērījumiem plānslīpējumos ir 0,015–0,08 mm, galvenokārt 0,03–0,05 mm. Nereti aleirolītos sastop melnus, ogļainus šķiedrainus un plēksnīšveida ieslēgumus ar garumu un platumu līdz 0,5 cm, kas visdrīzāk ir augu atliekas.

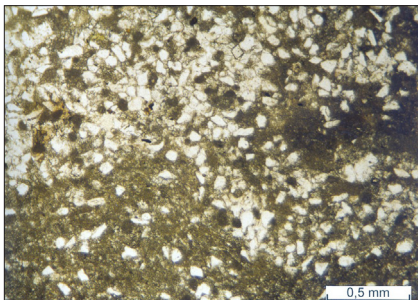
Interpretācija. Šīs fācijas nogulumu horizontāli slāņotā tekstūra liecina par to veidošanos mierīgā sedimentācijas režīmā, izgulsnējoties no suspensijas. Spriežot pēc bezkarbonātiskuma un asociācijas ģeoloģiskajā griezumā ar iepriekš raksturotajiem aleirītiskajiem, smalkgraudainiem, vidējgraudainiem un rupjgraudainiem smilšakmeņiem, vizlains aleirītiskais materiāls veidojās ar tiem līdzīgos apstākļos – ūdenī ar pazeminātu sāļumu.

1.2. Karbonātiskās fācijas

Fācija 1.2.1: Dolomītmerģelis

Dolomītmerģelis ir viens no raksturīgākajiem nogulumu paveidiem pēfītajā slāņkopā, it sevišķi Rēzeknes svītā. Tā krāsa ir izteiksmīga un neraksturīga citu Latvijas devona griezuma daļu nogulumiem – koši zaļganpelēka ar viegli zilganu nokrāsu, vietām tumšāka un ar pāreju pelēcīgā.

Vairākos intervālos šie ieži ir ļoti viendabīgi, bez redzamām slāņojuma un citu tekstūru iezīmēm, kā arī kādu komponentu piejaukuma, taču biežāk tie nav tik monotoni: raksturīgas gaišpelēkas mālaina dolomīta starpkārtnas ar biežumu milimetros un to daļās, rupja aleirīta un smalkas smilts piejaukums (4. att.), kā arī nevienmērīgi izkļiedēts vidējgraudains un rupjgraudains smilšains materiāls. Smilts graudu vidū bieži sastop dolomīta oolītus un pseidoolītus.

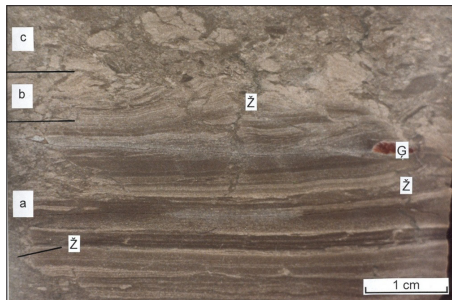


4. attēls. Dolomītmerģeļa
plānslīpējuma mikrofotogrāfija.

Dolomītmerģelis (Fācija 1.2.1) ar aleirītiskas smilts (gaišie graudiņi) un mikrītiska dolomīta piciņu (vistumsākie graudiņi) piejaukumu. Šķaune-103 urbums, 388,5 m, Rēzeknes svīta (Stinkulis, 1998).

Figure 4. Thin-section micro-photo of the dolomitic marl.

Dolomitic marl (facies 1.2.1) with silty sand (light-colored grains) and micritic dolomite (dark-colored grains) admixture. Šķaune-103 drill core, 388,5 m, Rēzekne Formation (Stinkulis, 1998).



5. attēls. Dolomītmerģelis (Fācija 1.2.1).

Tā daudzveidīgu tekstūra liecina par sedimentācijas apstākļu izmaiņām: a – horizontāls slāņojums (izgulsnēšanās no suspensijas); b – žūšanas plaisas (Ž) un sīkas vīgvama tekstūras (atsegšanās Zemes virspusē); c – kunkuļaina tekstūra (pārskalošana). Ģipša lēcas (G). Šķaune-103 urbums, 384,4 m, Pērnavas svīta (Stinkulis, 1998).

Figure 5. Dolomitic marl (facies 1.2.1).

The variable sedimentary structures indicating changes in deposition: a – plane-parallel lamination (deposition from suspension); b – desiccation cracks (Ž) and small tepee structures (subsurface exposition); c – nodular bedding (reworked by occasional storms or tides). Gypsum lenses (G). Šķaune-103 drill core, 384,4 m, Pärnu Formation (Stinkulis, 1998).

Gaišpelēkā mālainā dolomīta, aleirītiskās smilts un rupjā drupu materiāla sadalījums nosaka šīs fācijas daudzveidīgo uzbūvi: sīku horizontālu un viļņotu slāņojumu, lēcveidīgu slāņojumu (angļu valodā – *lenticular bedding*), lēcas, kunkuļus un vērpētes tekstūras. Var izsekot dažāda ranga slāņojumu – dažu milimetru un centimetru biezus slāņiņšos ir redzamas milimetra daļās mērāmas starpkārtiņas (5. att.). Atsevišķos gadījumos konstatētas ripsnojuma tekstūras, pie tam dažos gadījumos ripsnojums ir orientēts pretējā virzienā. Nereti sastop žūšanas plaisas un ar tām asociējošās “vīgvama tekstūras” – uz augšu izliektu slāņojumu gar plaisām. Kopā ar šīm tekstūrām bieži sastop brekčijas – nelielus dolomītmerģeļa gabaliņus (diametrs – daži centimetri) ar krasām robežām, kuri iekļauti līdzīgā, bet viendabīgā zaļganpelēkā mālaini karbonātiskā pamatmasā. Šajā fācijā nereti sastop arī ģipša lēcas un sulfīdu sīkdispersus agregātus. No organismu atliekām dažkārt ir atrastas lapkājvēžu (estēriju) atliekas (Stinkulis 1998), kuru daudzums vietām ir samērā augsts.

Interpretācija. Viendabīgie dolomītmerģeļi ir veidojušies mierīgā hidrodinamiskajā režīmā, izgulsnējoties no suspensijas, ko apstiprina to ļoti smalkgraudainā struktūra. Taču bieži hidrodinamiskais režīms aktivizējās, kā rezultātā tika izjaukta sākotnējā nogulumu tekstūra un tajos ieskalota gan aleirītiska smilts, gan rupji smilts graudi. Kopā ar dažāda izmēra smilts graudiņiem mālaini karbonātiskajos nogulumos iekļuva arī karbonātu oolīti un pseidoolīti. Gan smalko, gan rupjo graudu vērpēteveida sadalījums, gan arī viļņu ripsnojuma tekstūras dolomītmerģeļos liecina par to, ka smilšainā materiāla ieskalošana mālaini karbonātiskajās nogulās norisinājās, iespējams, viļņu darbības rezultātā.

Sīki horizontālais, viļņotais un lēcveidīgais slāņojums, kā arī divos pretējos virzienos vērtais ripsnojums, liecina par biežām hidrodinamiskā režīma izmaiņām, un nogulu veidošanos lēnās plūdmaiņu straumēs (Nio and Yang 1991), to skaitā divvirziena (paisuma un bēguma) straumēs. Smalkās ripsnojuma tekstūras norāda uz niecīgu baseina dziļumu to veidošanās laikā – tikai daži centimetri līdz desmitiem centimetru (Reineck and Singh 1980). Plaši sastopamās žūšanas plaisas, vigvama tekstūras un brekčijas norāda uz slāņkopu subaerālo atsegšanas.

Fācija 1.2.2: Dolomīts

Tas veido patstāvīgus slāņus, kuri ieguļ noteiktā stratigrāfiskajā līmenī – tikai pašā Pērnavas svītas augšdaļā tieši zem Narvas svītas pamatnei raksturīgās brekčijas. Vienīgi Ludza-15 urbumā dolomīti konstatēti vēl divās griezuma daļās: Pērnavas svītā, kā arī Rēzeknes svītas augšā tieši zem kontakta ar Pērnavas svītu. Nogulumu pamatmasu veido gaiši brūnganpelēks slēptkristālisks dolomīts, bet slāņojumu bieži nosaka tumšbrūnas starpkārtiņas, kuras izceļas ar augstāku māla, vizlas un ģipša saturu, bet sevišķi ar paaugstinātu aleirīta koncentrāciju. Domājams, ka tumšbrūno iežu krāsu nosaka organiskās vielas piejaukums.

Dolomītiem ir sīki horizontāli, lēcveidīgi un viļņoti slāņota tekstūra, retos gadījumos arī krokojums ar maksimālo amplitūdu 1 cm. Slāņojums ir labi izteikts, un pēc biezuma to var iedalīt dažādos rangos: 0,1–3 cm biezu slānīšu mija; ļoti plānas kārtiņas ar biezumu 0,1–0,2 mm un mazāk. Dolomītu tekstūrā redzams sedimentācijas procesu dažāda ranga periodiskums. Kā minēts iepriekš, līdzīga parādība konstatēta arī otrā smalkgraudainākajā nogulumu paveidā – dolomītmerģeļos.

Gaišpelēkajiem dolomītiem ir raksturīgas smalkas, sazarotas, izplūdušas lēcveida kārtiņas ar biezumu 0,015–0,025 mm. Dolomītos ir samērā daudz ģipša ar tumšbrūnu, retos gadījumos oranžu krāsu. Ģipsis veido daudzveidīgus agregātus: slānītus, lēcas un tievas vertikālas dzīslīņas. Vietām plānslīpējumos var novērot, ka karbonātiskās pamatmasas slāņojums apliec ģipša lēcas. Ģipša ieslēgumu malās bieži vien ir nelieli sulfīdu sīkdispersi agregāti, kā arī halīta gliptomorfozes un pseidomorfozes.

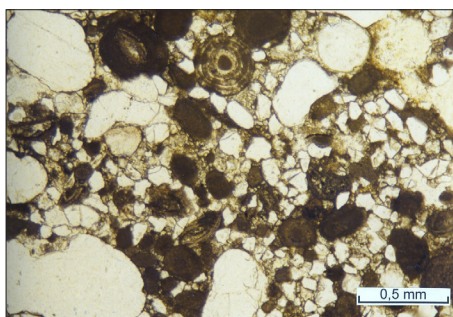
Interpretācija. Dolomīti ir veidojušies ļoti mierīgā vidē, karbonātiskām nogulām uzkrājoties no suspensijas, par ko liecina to viendabīgā slēptkristāliskā pamatmasa. Tomēr periodiski hidrodinamiskais režīms aktivizējās, kā rezultātā nogulsņējās ar aleirītu bagātīe slānīši un tika daļēji izskalotas karbonātiskās dūņas. Šādu periodisku nogulu sadalījumu noteica plūdmaiņu straumju darbība. Vietām sastopamās ripsnojuma tekstūras liecina par iespējamu viļņošanās ietekmi aleirīta piejaukuma uzkrāšanās laikā. Ģipša starpslānīši, sedimentogēnu vai agrīni diaģenētisku ģipša lēcu, halīta gliptomorfožu un pseidomorfožu klātbūtne norāda uz ļoti seklu un arīdu sedimentācijas vidi, kā arī periodiski ievērojami paaugstinātu ūdens sāļumu. Par ģipša sedimentogēnu vai agrīni diaģenētisku izcelsmi liecina vietām plānslīpējumos sastopamais karbonātiskās pamatmasas slāņojums, kas apliec ģipša lēcas. Ģipša ieslēgumu malās bieži vien ir nelieli sulfīdu sīkdispersi agregāti, kuri, iespējams, ir veidojušies sulfātreducējošu baktēriju darbības dēļ, ko sekmēja organiskās vielas klātbūtne nogulumos.

Iespējams, ka nogulas iespaidoja aļģu darbība, par ko liecina literatūras avotos (Scholle 1978; Tucker and Wright 1990) publicēto aļģu veidojumu attēliem līdzīgā lēcveida mikrotekstūra. Aļģu vai baktēriju kārtiņas (angļu valodā – *algal mats*) ir ļoti raksturīgas plūdmaiņu līdzenumiem.

Krokas slānīšos, iespējams, ir veidojušās noslīdeņu rezultātā jau sedimentācijas procesu gaitā.

Fācija 1.2.3: Dažādgraudains smilšakmens ar dolomīta oolītiem un pseidoolītiem

Dažādgraudainie smilšakmeņi bez karbonātu matricēs nav no dominējošajiem nogulumiem pētītajā griezumā intervālā. Tos var novērot tikai Pērnavas svītā, bet Rēzeknes svītā to nav. Šo nogulumu krāsa ir pelēka un gaišpelēka. Tie sastāv gan no kvarca un laukšpata drupu graudiem, gan arī karbonātu oolītiem un pseidoolītiem. Smilšakmeņiem raksturīgs bimodāls klastisko un karbonātu graudu sadalījums pēc izmēriem – bieži var nodalīt divas visai krasi atšķirīgas frakcijas – 0,3–1,0 mm un <0,3 mm (6. att.). Samērā reti pāreja starp smalko un rupjo frakciju ir pakāpeniska. Nogulumiem raksturīga dzīslveidīga un slīpslāņota tekstūra. Vietām sastop sīki viļņotas šķiedrainas (paralēli slāņojumam) dolomīta kārtiņas ar biezumu no milimetra desmitdaļām līdz aptuveni 1 mm.

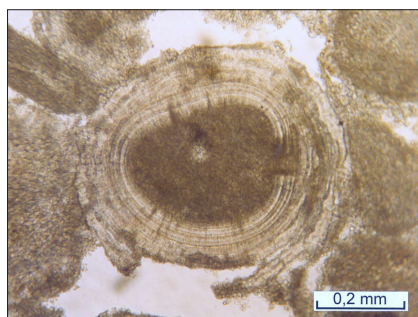


6. attēls. Dažādgraudaina smilšakmens plānslīpējuma mikrofotogrāfija.

Dažādgraudains smilšakmens (Fācija 1.2.3) ar kvarca un laukšpata graudiem (gaišie), dolomīta oolītiem un pseidoolītiem (tumšie). Gan drupu graudi, gan oolīti un pseidoolīti ir labi šķiroti. Šķaune-103 urbums, 380,2 m, Rēzeknes svīta (Stinkulis, 1998).

Figure 6. Thin-section micro-photo of the variably-grained sandstone.

Variably-grained sandstone (facies 1.2.3) with quartz and feldspar grains (light-colored), dolomite ooids and peloids (dark-colored). Both siliciclastic grains, as well as ooids and peloids are well sorted. Šķaune-103 drill core, 380,2 m, Rēzekne Formation (Stinkulis, 1998).



7. attēls. Oolīta plānslīpējuma mikrofotogrāfija.

Oolīts ar slēptkristālisku kodolu (Fācija 1.2.3). Liozno urbums (Baltkrievija), aptuveni 383 m, vidusdevona Apakšmorsovas slāņi (Pērnavas svītas analogs pēc ģeoloģiskā vecuma) (V. Kurša foto, Stinkulis, 1998).

Figure 7. Thin-section micro-photo of the ooid.

Ooid (facies 1.2.3), Liozno drill core (Belarus), around 383 m, Middle Devonian Lower Morsowo beds (analogue of the Pärnu Formation) (Photo by V. Kurshs; Stinkulis, 1998).

Tipiski dažādgraudaino smilšakmeņu komponenti ir dolomīta oolīti un pseidoolīti (7. att.), kuru saturs gandrīz visos šo nogulumu slāņos ir 10–70%. Šiem karbonātu veidojumiem, gluži tāpat kā kvarca un laukšpata graudiem, ir raksturīgs bimodāls sadalījums pēc izmēriem – var izšķirt divas tādas pašas frakcijas kā klasiskajam materiālam. Šajā fācijā sastop gan baltus, gan melnus karbonātu graudus; pēdējiem šo krāsu nosaka sulfīdu minerālu apmalītes.

Interpretācija. Šī fācija ir veidojusies, uzkrājoties kopā diviem pēc ģenēzes atšķirīgiem komponentiem – smilts un karbonātu graudiem. To sajaukšanās, visdrīzāk, notika viļņu darbības rezultātā (Reineck and Singh 1980), ko pierāda viscaur novērojamās, pārsvarā gan vāji izteiktās viļņu ripsnojuma iezīmes. Viļņu darbība noteica arī bimodālo smilts šķirojumu. Savukārt dzīslveidīgā un slīpslāņotā tekstūra ar dolomīta kārtiņām varētu liecināt par plūdmaiņu darbību.

Fācija 1.2.4: Dažādgraudains smilšakmens ar dolomīta oolītiem, pseidoolītiem un dolomītmerģeļa matrici

Šis smilšakmens sastāv no kvarca un laukšpata graudiem, kā arī karbonātu oolītiem un pseidoolītiem, kam raksturīgs bimodāls sadalījums pēc izmēriem. Iezis pēc struktūras ir līdzīgs iepriekš raksturotajam dažādgraudaino smilšakmeņu paveidam un atšķiras no tā tikai ar zaļganpelēkas dolomītmerģeļa matrici klātbūtni (8. att.). Šī fācija visbiežāk ir sastopama Pērnavas svītā, taču nereti novērojama arī Rēzeknes svītas griezumā. Šo smilšakmeņu krāsa ir zaļganpelēka un pelēka.



8. attēls. Dolomītmerģeļa plānslīpējuma mikrofotogrāfija.

Dolomītmerģelis (Fācija 1.2.1) ar aleirītiska smilšakmens starpkārtām (apakšā), kuru pārsedz dažādgraudains smilšakmens (Fācija 1.2.4) ar dolomīta oolītiem un pseidoolītiem un dolomītmerģeļa matrici (augšā). Tumšpelēko krāsu piešķir dolomīta oolīti un pseidoolīti ar bagātīgu sulfīdu piejaukumu. Krasais kontakts starp abām fācijām liecina par dolomītmerģeļa izskalošanu dažādgraudainās smilts uzkrāšanās laikā. Ludza-15 urbums, 425,0 m dziļums, Pērnavas svīta (Stinkulis, 1998).

Figure 8. Thin-section micro-photo of the dolomitic marl.

Dolomitic marl (facies 1.2.1) with thin silty sandstone laminae (below), overlain by variably-grained sandstone (facies 1.2.4) with dolomite ooids and peloids with dolomitic marl matrix (above). Darker color is stressed by dolomite ooids and peloids, rich in sulphides. Distinct boundary between two facies indicates erosion of the dolomitic marl. Ludza-15 drill core, 425,0 m, Pärnu Formation (Stinkulis, 1998).

Smilšakmeņiem ar dolomītmerģeļa matrici ir dzīslveidīga un lēcveidīgi slāņota tekstūra, ko nosaka divu dažādu frakciju (0,05–0,2 un 0,3–1,5 mm) drupu graudu, kā arī tādu pašu frakciju karbonātu oolītu un pseidooolītu sadalījums. Tāpat kā 7. fācijai, arī šiem nogulumiem ir visai raksturīgs dolomīta oolītu un pseidooolītu piejaukums. Karbonātu veidojumu saturs drupu graudu vidū ir atšķirīgs: pārsvarā gadījumu tas svārstās no 10 līdz 50%, retāk karbonātu nav vispār. Sastop gan baltus, gan melnus oolītus un pseidooolītus; pēdējiem krāsu nosaka sulfīdu minerālu apmalītes. Vietām šajā nogulumu paveidā var novērot nelielas ģipša lēcas, bet rupjgraudainākajos un mazāk mālainajos iecirkņos – poikilotopisku ģipša cementu.

No organismu atliekām smilšakmeņu mālainākajās kārtiņās retos gadījumos sastop estēriju atliekas.

Interpretācija. Šīs fācijas smilšakmeņi veidojušies, uzkrājoties kopā trim dažādiem komponentiem ar atšķirīgu ģenēzi. Zaļganpelēkais mālains karbonātiskais materiāls veidojies mierīgā hidrodinamiskā režīmā, nogulām uzkrājoties no suspensijas. Savukārt kvarca un laukšpata graudi, kā arī dolomīta oolīti un pseidooolīti ir veidojušies aktīvā hidrodinamiskā režīmā. Domājams, ka relatīvi ilgus laika intervālos mierīgā vidē veidojās zaļganpelēkie dolomītmerģeļi, bet smilts un karbonātu graudi tika tajos ieskaloti epizodēs, kad aktivizējās hidrodinamiskais režīms. Vienlaikus ar drupu materiāla pieplūdi tika izjaukta dolomītmerģeļu viendabīgā tekstūra. Šādu periodiski mainīgu sedimentācijas režīmu noteica plūdmaiņu straumes: zaļganpelēkais mālains karbonātiskais materiāls uzkrājās no suspensijas, laikā starp paisuma un bēguma straumēm (angļu valodā – *slack water period*), kas, savukart, aktīvi transportēja un izgulsnēja rupjgraudaināko materiālu (Dalrymple 1992).

Fācija 1.2.5: Dažādgraudains smilšakmens ar retiem dolomīta pseidooolītiem

Smilšakmeņi ar dolomīta piejaukumu bez mālainā materiāla klātbūtnes pētītajā slāņkopā ir retums. Smilšaini dolomītisko nogulumu fāciju zonā tīrs slīpslāņots smilšakmens ar dolomīta cementu atrasts tikai Višķi-25 urbumā 362,1 m dziļumā. Uz rietumiem no šīs zonas (Atašiene-9 urbumā), kur ievērojami pieaug smilšaino nogulumu īpatsvars, smilšakmeņi ar dolomīta piejaukumu veido slāni 393,5–397,5 m dziļumā. Tas šeit ir vienīgais griezuma intervāls ar augstu karbonātu saturu. Kvarca un laukšpata drupu graudiem raksturīgs bimodāls sadalījums pēc izmēriem – sastop divas frakcijas ar graudu diametru attiecīgi 0,05–0,2 mm un 0,3–0,8 mm. Smilšakmeņos ir konstatētas mikrītiska dolomīta apmalītes ar biezumu 0,03–0,06 mm, kuras bieži apņem gan smalkos, gan rupjos kvarca un laukšpata graudus. Dažviet apskatāmajā slānī ir ļoti daudz dažādos virzienos orientētu racējorganismu eju.

Atašiene-9 urbumā, kas pētījumu laukumā atrodas vistālāk uz rietumiem, dolomīta pseidooolīti un piciņas konstatētas tikai apskatītajā smilšakmeņu slānītī ar dolomīta cementu (393,5–397,5 m dziļumā). To saturs ir neliels – mazāk nekā 1%, tomēr tie ir daudzveidīgi. Vietām konstatētas slēpt- un mikrokristāliska dolomīta piciņas ar diametru 0,2–0,5 mm. Var novērot arī ieapaļus dolomīta pseidooolītus ar pilnkristālisku kodolu un slēpt-mikrokristālisku apmalīti. Šo veidojumu diametrs svārstās no 0,4 līdz 0,6 mm. Kāds kompleksas uzbūves pseidooolīts sastāv no diviem aleirīta graudiņiem un viena pilnkristāliska dolomīta agregāta, katru no kuriem apņem slēpt- un mikrokristāliskā apmalīte, bez tam šāda pat apmalīte apņem visu agregātu. Oolītu Rēzeknes un Pērnavas svītās Atašiene-9 urbumā nav.

Interpretācija. Smilšakmeņu slīpslāņotā tekstūra liecina, ka tie ir veidojušies vilkmes straumēs, zemūdens grēdām migrējot pa baseina gultni (Collinson 1996). Nogulās, domājams, ir arī zilaļģu jeb ciānbaktēriju veidojumi: mikrītiska dolomīta apmalītes ap drupu graudiem. Periodiski nogulas skāra arī intensīva racējorganismu darbība, pārstrādājot aptuveni pusi to apjoma.

2. Nogulumu fāciju asociācijas

Nogulumu fācijas pētījumu teritorijā tika apvienotas astoņās fāciju asociācijās, balstoties uz nogulumu ģenēzi un to attiecībām griezumā. Tika nošķirtas karbonātiskās nogulumu fāciju asociācijas, kurām raksturīgs paaugstināts karbonātu saturs – ar mālaini dolomītisku materiālu, vai dolomīta oolītiem un pseidoolītiem (fācijas 1.2.1–1.2.5), kā arī bezkarbonātiskās fāciju asociācijas, kuras apvieno tikai klastiskos nogulumus (fācijas 1.1.1–1.1.4, skat. 3. att.).

2.1. Karbonātiskās nogulumu fāciju asociācijas (angļu valodā – *carbonate-rich facies associations*):

Fāciju asociācija 2.1.1: Vidējais-augšējais plūdmaiņu līdzenums ar karbonātu sedimentāciju (angļu valodā – *intertidal to supratidal carbonate mudflats*)

Šī fāciju asociācija, kas sastāv no dolomītmergēļa (fācija 1.2.1) un dolomīta (fācija 1.2.2, ir izplatīta visā pētījumu teritorijā, izņemot tās ZR daļu (Atašiene-9 urbums). Tā dolomītmergēļa saturs un slāņu biezums griezumā pieaug pētījumu teritorijas austrumu un dienvidaustrumu daļā. Domājams, ka šīs zaļganpelēkās mālaini karbonātiskās nogulas uzkrājas arī nedaudz tālāk uz rietumiem no Viļakas vaļņa, bet vēlāk tās izskaloas plūdmaiņu straumju darbības rezultātā. To apstiprina zaļganpelēku māla oļiņu (diametrs līdz 1 cm) atradumi rupjgraudainu smilšakmeņu slāņos 9. Atašienes urbumā. Tomēr Latvijas centrālajā daļā (Taurkalne-1 urbums) nedz zaļganpelēkais mālaini karbonātiskais materiāls, nedz arī to oļi griezumā nav sastopami.

Dolomītmergēļi ar viendabīgu tekstūru izgulsnējās seklūdens apstākļos izgulsnējoties no suspensijas mierīgos hidrodinamiskos apstākļos, vidējā-augšējā plūdmaiņu līdzenumā ar karbonātu sedimentāciju (Dalrymple 1992). Šie nogulumi bieži satur vīgvama tekstūras, žūšanas plaisas, pārskalotus žūšanas produktus un brekčijas, kas koncentrējas noteiktos griezuma intervālos, kuri aizņem aptuveni 20–30% no dolomītmergēļu kopējā slāņu biezuma pētītajos urbumos. Papildus tam arī citās griezuma daļās sastop izplūdušas, neregulāras formas dzīslas, kuras izceļas ar paaugstinātu aleirītiskas un rupjgraudainas smilts saturu un tāpat, iespējams, ir žūšanas plaisas, taču kļuvušas vāji izteiktas pēsedimentācijas procesos. Visas šīs tekstūras norāda uz to, ka mālaini karbonātiskā materiāla uzkrāšanās periodiski mijās ar slāņkopu atsegšanas Zemes virspusē un žūšanas procesiem, kas papildus apstiprina to veidošanos augšējā plūdmaiņu līdzenumā.

Otrs izplatītākais nogulumu tips šajā fāciju asociācijā ir dolomīts. Bieži sastopamās ģipša lēcas, kā arī halīta gliptomorfozes, pseidomorfozes un žūšanas plaisas tajā liecina par nogulu uzkrāšanos ļoti seklā vidē ar paaugstinātu sāļumu, kā arī par biežu atsegšanas Zemes virspusē. No urbumu datiem var secināt, ka Pērnavas laikposma beigās gaišpelēkie dolomīti ir uzkrājušies gandrīz visā pētījumu

teritorijā, jo to slāņš var korelēt ievērojamā attālumā. Viss augšminētais pierāda, ka karbonātiskais materiāls ir nogulsējies augšējā plūdmaiņu līdzenumā (Elrick 1995; Lehrmann *et al.* 2001).

Gan dolomītmerģeļi, gan dolomīti uzkrājās mierīgos sedimentācijas apstākļos, taču ne vienmēr hidrodinamiskais režīms bija tik mazaktīvs. Par to liecina nogulumos bieži izkliedētā aleirītiskā smilts un rupjie drupu graudi. Gan smalko, gan rupjo graudu vidū bieži ir sastopami dolomīta oolīti un pseidoolīti. Nav izslēgts, ka klastiskais materiāls ir ieskalots nogulās viļņu darbības rezultātā, uz ko norāda tā īpatnējais vērpetveida sadalījums un izplūdušas ripsnojuma iezīmes. Taču visbiežāk rupjdrupu graudi tika izgulsnēti plūdmaiņu strauvēs. Par to liecina aleirītiskās smilts, rupjo kvarca, laukšpata un karbonātu graudu saturs, kas dolomītmerģeļos parasti mainās neatkarīgi no žūšanas plaisu un vīgvama tekstūru daudzuma. Tas liek secināt, ka smilts piejaukums mālaini karbonātiskajās nogulās nebija saistīts ne ar noteiktu ūdens dziļumu, ne nonākšanu sauszemes apstākļos, un klastiskā materiāla pieplūdi regulēja plūdmaiņu procesi. Bieži dolomītmerģeļu slāņkopās var novērot, ka drupu graudu piejaukums pakāpeniski samazinās uz augšu, un vienā slāņkopā eksistē vairāki šādi cikli (Middleton 1991; Nio and Yang 1991).

Fāciju asociācija 2.1.2: Vidējais-augšējais plūdmaiņu sēklis ar karbonātu sedimentāciju (angļu valodā – *intertidal to supratidal carbonate shoals*)

Šī fāciju asociācija apvieno dažādgraudainu smilšakmeni ar dolomīta oolītiem un pseidoolītiem (fācija 1.2.3), kā arī dažādgraudainu smilšakmeni ar dolomīta oolītiem, pseidoolītiem un dolomītmerģeļa matrici (fācija 1.2.4). Tā ir izplatīta visā pētījumu teritorijā, izņemot Atašiene-9 urbumu un atrodas galvenokārt griezuma augšdaļā, turklāt tā labi iezīmē Pērnavas svītas pamatni pārējos urbumos. Šķaune-103 urbumā, kas atrodas vistālāk uz DA, fāciju asociācija 2, vairāk kā 15 m biezumā griezumā mijās ar 1. fācijas asociāciju.

Dažādgraudainie nogulumu atspoguļo vairākus atšķirīgas izcelsmes komponentu sajaukšanās rezultātu. Bimodālais drupu graudu izmēru sadalījums, kas nosaka dzīslveidīgo un viļņoto tekstūru, norāda uz šo nogulumu uzkrāšanos plūdmaiņu apstākļos (Dalrymple 1992). Dažkārt sastopamās viļņu ripsnojuma tekstūras norāda uz viļņu darbības ietekmi uz nogulu uzkrāšanos. Tomēr viļņu procesiem bija pakārtota loma šo nogulumu sedimentācijā. Vēl retāk dažādgraudainais smilšainais materiāls ir uzkrājies plūdmaiņu strauvēs nelielos sazarotos kanālos un attekās (angļu valodā – *tidal gullies*), par ko liecina slīpslāņojums.

Oolītus un pseidoolītus, kas ir ļoti tipiski šai fāciju asociācijai, sastop tikai Pērnavas svītas austrumdaļas izplatības areālā, un to saturs pieaug virzienā no rietumiem uz austrumiem. Liozno urbumā (Baltkrievija) konstatēti pat tādi nogulumu, kas gandrīz pilnībā, izņemot pašu griezuma apakšdaļu, sastāv no oolītiem un pseidoolītiem (Kursh 1975; Sorokin 1981). Šajā pat virzienā parādās aizvien vairāk tādu oolītu, kam piemīt labi izveidota smalka koncentriska un radiāla tekstūra. Tas parāda, ka tieši Baltijas devona paleobaseina austrumos un dienvidaustrumos eksistēja apaļo karbonātu graudu augšanu sekmējoši faktori. Pēc oolītu iekšējās uzbūves īpatnībām, sulfīdu izplatības koncentriskās josliņās, kā arī asociācijas ar dažādgraudainiem nogulumiem, secināts, ka apaļie karbonātu graudi

veidojušies periodiski mainīga mierīga un aktīva hidrodinamiskā režīma mijā (Stinkulis 1999). Par mainīgas vides aktivitātes vadošo lomu oolītu ģenēzē liecina vairāku autoru darbi (Tucker and Wright 1990; Davies *et al.* 1978). Šādus mainīgus sedimentācijas apstākļus, visdrīzāk, noteica plūdmaiņu kontrolētais sedimentācijas režīms. Tā, piemēram, Liozno urbumā oolīti cikliski mijās ar mierīga režīma mālaini karbonātiskām nogulām vairāk nekā 35 m urbuma serdes garumā.

Dzīslveidīgā, viļņotā, kā arī slīpslāņotā nogulumu tekstūra, kā arī dolomīta kārtiņu klātbūtne šajos nogulumos un to ciešā asociācija ar mālaini karbonātiskām nogulām liecina par to veidošanos vidējā un augšējā plūdmaiņu līdzenuma apstākļos (Lehrmann *et al.* 2001). Turklāt smilšaino nogulumu dominance un rupjdrupu graudu, tai skaitā oolītu klātbūtne, salīdzinājumā ar daudz smalkākiem, 2.1.1. fāciju asociācijas nogulumiem, liecina par to uzkrāšanos aktīvākā hidrodinamiskā režīmā plūdmaiņu veidotajos sēkļos plūdmaiņu līdzenumā (Brooks *et al.* 2003; Rankey *et al.* 2006).

2.2. Bezkarbonātiskās nogulumu fāciju asociācijas (angļu valodā – *non-carbonate facies associations*)

Fāciju asociācija 2.2.1: Estuāra iekšējās daļas fluviālie nogulumi (angļu valodā – *fluvial deposits of inner estuary*)

Šī fāciju asociācija ir izplatīta tikai Atašiene-9 urbumā Rēzeknes un Pērnavas svītu pamatnē. To veido smalk-vidējgraudains vāji šķirots smilšakmens (fācija 1.1.2) un dažādgraudains smilšakmens ar retiem dolomīta pseidoolītiem (fācija 1.2.5). Nogulumu vājā šķirotības un noapaļotības pakāpe liecina par to transportēšanu fluviālās straumēs, ne pārāk tālu no noneses apgabala. To apstiprina arī smilšakmeņu slīpslāņotās un viendabīgās tekstūras, kas liecina par nogulumu veidošanos aktīvā hidrodinamiskā režīmā zemūdens grēdu migrācijas rezultātā vai arī fluviālās sērēs. Tomēr lielais vizlu kārtiņu saturs, kā arī raksturīgais dzīslveidīgais un horizontālais slāņojums liecina par hidrodinamiskā režīma mierīgākām fāzēm. Tādējādi nav izslēgta plūdmaiņu procesu ietekme šo nogulumu veidošanā, kas domājams, notika fluviālos kanālos un piegultnes sērēs (angļu valodā – *point bars*), kuros plūdmaiņu straumes iesniedzās tikai īpaši spēcīgu paisumu/bēgumu laikā (angļu valodā – *spring tides*, Nio and Yang 1991). Diemžēl, nav izdevies identificēt plaši sastopamās racējorganismu pēdas.

Fāciju asociācija 2.2.2: Estuāra centrālās daļas nogulumi (angļu valodā – *central estuary deposits*)

Šī fāciju asociācija ir izplatīta tikai Atašiene-9 urbumā Rēzeknes svītas pašā augšdaļā. To veido divas fācijas : smalk-vidējgraudains vāji šķirots smilšakmens (fācija 1.1.2), kā arī aleirītisks smilšakmens (fācija 1.1.3). Smilšakmeņiem raksturīgā slīpslāņotā tekstūra, to vājais šķirojums un zemā noapaļojuma pakāpe liecina par to veidošanos zemūdens grēdu migrācijas rezultātā vai arī uzkrājoties sērēs fluviālos kanālos. Savukārt aleirītiskajā smilšakmenī sastopamās mālaini aleirītiskās kārtiņas, kā arī rupjdrupu graudi norāda uz mainīgu sedimentācijas režīmu plūdmaiņu straumēs: smalkākās daļiņas izgulsnējās no suspensijas mierīgajā laikposmā starp paisuma un bēguma straumēm, savukārt rupjāko graudu uzkrāšanās

notika hidrodinamisko procesu aktivizēšanās laikposmos, paisuma un bēguma straumēs. Šo nogulumu pārsvarā smalkgraudainais sastāvs, divu ģenētiski atšķirīgu drupu materiāla klātbūtne griezumā (fluviāls un plūdmaiņu), kā arī to asociācija ar rupjākiem fluviāliem un plūdmaiņu nogulumiem griezumā, ļauj secināt par šīs fāciju asociācijas veidošanos estuāra centrālajā daļā, kur uzkrājas visvairāk smalkgraudainā materiāla (angļu valodā – *bedload convergence zone*, Dalrymple *et. al.* 1992; Dalrymple 2007).

Fāciju asociācija 2.2.3: Plūdmaiņu kanāli un sēres (angļu valodā – *tidal channels and bars*)

Šī fāciju asociācija ir izplatīta visā pētījumu teritorijā un veido dažāda biezuma slāņus. Tā sastāv no vidēj-rupjgraudaina labi šķirotā smilšakmens (fācija 1.1.1). Visizturētakos slāņus šie nogulumi veido Atašiene-9 urbumā, kur tos sastop gandrīz nepārtraukti vairāk kā 15 m biezumā, un tie veido Rēzeknes svītas lielāko daļu. Pārējos urbumos šīs fāciju asociācijas biežumi ir mazāki, un šie nogulumi ir bieži sastopami kopā ar smalk-vidējgraudainajiem vāji šķirotiem fluviāliem smilšakmeņiem, kā arī aleirītiskajiem smilšakmeņiem.

Šīs fāciju asociācijas smilšakmeņu izcilā noapaļotība un labā šķirotība, kā arī slīpslāņojums, liecina par to veidošanos plūdmaiņu straumēs. Salīdzinoši lielie graudu izmēri, pavisam necīgais vizlu un tumšo minerālu piejaukums, kā arī salīdzinoši biežās slīpslāņotās sērijas liecina par šo nogulumu veidošanos plūdmaiņu kanālos un sērēs estuāra ārējā daļā (angļu valodā – *outer estuary*, Dalrymple *et al.* 1992; Dalrymple 2007). Plaši sastopamie zaļganpelēku mālainu un mālaini karbonātisku iezu olīši liecina par plūdmaiņu straumju erodējošo darbību, kuras rezultātā, iespējams, tika noskaloti smalkgraudainie plūdmaiņu līdzenuma, vai arī estuāra centrālās daļas nogulumi. Šī ir ļoti raksturīga iezīme Rēzeknes un Pērnavas svītas nogulumu izplatības areāla ziemeļu daļā, kur sedimentācija notika galvenokārt fluviālos kanālos un estuāros.

Fāciju asociācija 2.2.4: Apakšējais plūdmaiņu līdzenums ar smilts sedimentāciju (angļu valodā – *subtidal sandflats*)

Šīs fāciju asociācijas nogulumi ir izplatīti visā pētījumu areālā, izņemot tā ZA daļu (Ludza-15 urbums). To veido samērā biezi un izturēti aleirītiskā smilšakmens slāņi (fācija 1.1.3). Atašiene-9 un Višķi-25 urbumos šie nogulumi veido ciešas asociācijas ar plūdmaiņu kanāliem un sērēm (fāciju asociācija 2.2.3).

Smilšakmeņu sastāvs, to dzīslveidīgās, retāk viļņoti un horizontāli slāņotās tekstūras, kā arī šo nogulumu ciešā asociācija ar fāciju asociācijas 2.2.3 nogulumiem, ļauj secināt par to veidošanos apakšējā plūdmaiņu līdzenumā ar smilts sedimentāciju (Dalrymple 1992).

Fāciju asociācija 2.2.5: Vidējais-apakšējais plūdmaiņu līdzenums un kanāli ar smilts sedimentāciju (angļu valodā – *intertidal to subtidal channels and sandflats*)

Šo fāciju asociāciju veido vairākas fācijas : vidēj-rupjgraudains labi šķirotā smilšakmens (fācija 1.1.1), smalk-vidējgraudains vāji šķirotā smilšakmens (fācija 1.1.2), aleirītisks smilšakmens (fācija 1.1.3), aleirolīts (fācija 1.1.4) un dolomīts

(fācija 1.2.2). Tā ir sastopama pētījumu teritorijas austrumu daļā, Ludza-15 un Šķaune-103 urbemos, respektīvi. Pie tam Šķaune-103 urbumā šī asociācija veido Rēzeknes svītas pamatnes lielāko daļu aptuveni 15 m biezumā. Savukārt Ludza-15 urbumā to sastop Rēzeknes svītā, bet Pērnavas svītā tā veido griezuma lielāko daļu. Daudzveidīgā pēc sastāva nogulumu slāņmija, atsevišķu fāciju cikliskās izplatības tendence (Šķaunes-103 urbuma pamatne), kā arī divu pēc ģenēzes atšķirīgu materiālu slāņmija (fluviāla un plūdmaiņu), lauj secināt par šo nogulumu veidošanos vidējā un apakšējā plūdmaiņu līdzenumā (Dalrymple 1992). Fācijas 1.1.1 slīpslāņotie smilšakmeņi uzkrājas apakšējā līdzenuma plūdmaiņu kanālos, savukārt 1.1.2. fācijas vāji šķīrotie smilšakmeņi, visticamāk, veidojās vidējā plūdmaiņu līdzenuma kanālos un attekās, kur periodiski nokļuva fluviālās straumes. Aleirītiskais smilšakmens, kā liecina tā heterolītiskais sastāvs un lēcveidīgā tekstūra, savukārt, uzkrājas plūdmaiņu līdzenumā mierīgākos hidrodinamiskos apstākļos paisuma un/vai beguma straumēs galvenokārt apakšējā plūdmaiņu līdzenumā. Smalkgraudainās viendabīgās fācijas (1.1.4 un 1.2.2) veidojās, visticamāk, kanālu aizpildīšanās rezultātā vidējā plūdmaiņu līdzenumā (Dalrymple 1992).

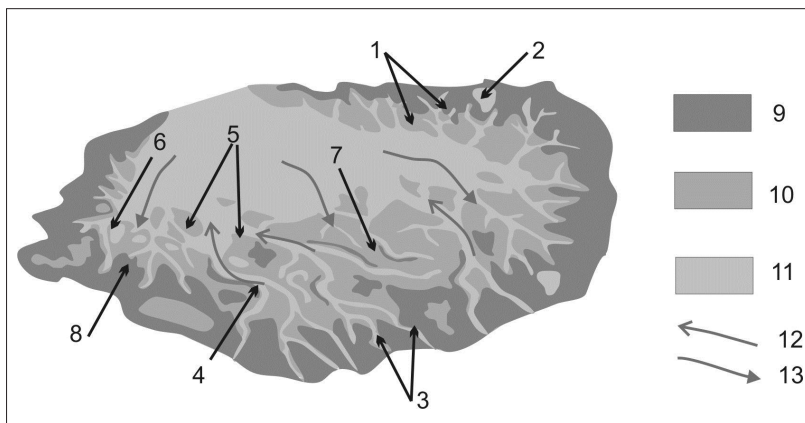
Fāciju asociācija 2.2.6: Augšējais plūdmaiņu līdzenums ar māla sedimentāciju (angļu valodā – *supratidal mudflats*)

Šīs fāciju asociācijas nogulumi ir izplatīti tikai Atašiene-9 urbumā Pērnavas svītas griezuma vidusdaļā, un to veido aleiolīts (1.1. fācija). Tomēr ir svarīgi atzīmēt, ka bezkarbonātiski aleirītiskie nogulumi ir izplatīti arī uz D no pētījumu areāla. Tā, Drissas-1ST un Liozno urbemos aleiolīts veido no 2,5 līdz 6 m biezu slāņus Rēzeknes svītas analogā pēc ģeoloģiskā vecuma Baltkrievijā augšdaļā (Kursh 1975). Bet Svedasai-252 urbumā Lietuvas teritorijā šo fāciju plaši sastop Pērnavas svītas griezumā.

Horizontālais un nedaudz viļņotais slāņojums, daudzās paralēli slāņojumam orientētās vizlu plēksnītes, kas, domājams, izgulsnējās plūdmaiņu cikla mierīgā posma hidrodinamiskā režīmā starp paisumu un bēgumu, kā arī šo nogulumu asociācija ar pagulošajiem fluviāliem nogulumiem, liecina par to veidošanos augšējā plūdmaiņu līdzenumā (Dalrymple 1992).

Diskusija

Darba rezultāti apstiprina iepriekšējo pētījumu datus par to, ka Rēzeknes un Pērnavas svītu griezumiem Austrumlatvijā ir raksturīga daudzveidīga uzbūve, kas būtiski atšķiras no pārējās baseina daļas (Kursh 1975; Stinkulis 1998). Tā, piemēram, Šķaune-103 urbumā, kur šo svītu kopējais biežums ir 34 m, konstatēti 22 atšķirīgi slāņi ar biežumu no dažiem desmitiem cm līdz 6,4 m, kuros mijas rupjgraudaini slīpslāņoti smilšakmeņi, dažādgraudaini smilšaini dolomītmerģeļi un smilšakmeņi ar karbonātu oolītiem un pseidooolītiem, zaļganpelēki dolomītmerģeļi, pelēki sīkslāņoti dolomīti u.c. Neskatoties uz daudzveidīgo slāņkopas uzbūvi, šajā areālā skaidri redzams karbonātu satura pieaugums, salīdzinot ar pārējām baseina daļām. Aprakstītās karbonātiskās nogulumu fācijas un to asociācijas (2.1.1 un 2.1.2) ir raksturīgas tikai pētītajai baseina austrumu daļai, un neveidojās citās baseina daļās (9. att.).



9. attēls. Modelis ar sedimentācijas vides rekonstrukciju pētījumu areālā.

1–8 – Fāciju asociācijas. Aapzīmējumus skat. 3. attēlā. 9 – augšējais plūdmaiņu līdzenums ar māla/karbonātu sedimentāciju; 10 – vidējais plūdmaiņu līdzenums ar jauktu smilts-māla/karbonātu sedimentāciju; 11 – apakšējais plūdmaiņu līdzenums ar smilts sedimentāciju; 12 – fluviālas straumes; 13 – plūdmaiņu straumes.

Figure 9. A model with the reconstruction of the depositional environments in the study area.

1–8 – Faies Associations, see in Fig. 3. 9 – supratidal mud/carbonate flat; 10 – intertidal mixed sand-mud/carbonate flat; 11 – subtidal sandflat; 12 – fluvial flows; 13 – tidal flows.

Taču zināmu lomu slāņkopas uzbūvē spēlē arī pilnīgi bezkarbonātiski klastiskie nogulumi – aleiītiski, smalkgraudaini, vidējgraudaini un rupjgraudaini smilšakmeņi, retāk aleirolīti (Fācijas 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3 un 1.1.4). Uz Viļakas vaļņa tie veido no dažiem milimetriem līdz vairākiem metriem biezus slāņus. Baseina centrālās daļas virzienā, t.i., uz rietumiem no Viļakas vaļņa, pieaug gan klastiskā materiāla piejaukums, gan to slāņu biezums. Smalko un rupjo kvarca un laukšpata graudu saturs, pilnīgi pretēji oolītiem un pseidoolītiem, pieaug virzienā uz baseina centrālo daļu. Pēc izmēriem un noapaļojuma pakāpes šie graudi ne ar ko neatšķiras no baseina centrālajā daļā dominējošā smilšainā materiāla, kas uzkrājies no noneses apgabala (Baltijas vairogs un Skandināvijas Kaledonīdu kalni) plūstošās fluviālās, kā arī plūdmaiņu straumēs. Dažādgraudainajos smilšakmeņos sastopamo smilts graudu cilmavots arī bija tagadējā Skandināvijas teritorija, un baseina austrumu daļā tie iekļuva galvenokārt fluviālu un plūdmaiņu straumju darbības rezultātā, retāk viļņu darbības aktivizācijas laikposmos. Jāatzīmē, ka viļņu darbībai Rēzeknes un Pērnavas laikposmu baseina austrumos un dienvidaustrumos, tāpat kā pārējā baseina daļā, ir bijusi pakārtota nozīme. Par viļņu darbību liecina tikai atsevišķas viļņu ripsnojuma pazīmes un nogulumu vērpvetveida tekstūras, tomēr dziļāka ūdens viļņu darbības pazīmes un tiem raksturīgais slāņojums (angļu valodā – *swaley, hummocky cross-stratification*) nav novēroti. Tas ļauj secināt, ka nogulumi visā baseina teritorijā ir uzrājušies ļoti seklos apstākļos, virs viļņu bāzes.

Iespējams, pateicoties Viļakas vaļņa kā barjeras eksistencei, drupu materiālu nesošās straumes parasti atvirzījās no minētā reģiona (Stinkulis 1998), taču, acīmredzot, epizodiski klastiskais materiāls šeit tika ienests. Vienlaikus pazeminājās

arī ūdens sāļums, kas izskaidro oolītu un pseidooolītu trūkumu šajos nogulumos. Nav izslēgts, ka fluviālās straumes piegādāja klastisko materiālu ne tikai no ziemeļiem, bet arī no dienvidos esošā noneses apgabala. Par to liecina dominējošie fluviālie, kā arī plūdmaiņu kanālu apstākļi (fāciju asociācijas 2.2.1 un 2.2.3) baseina pašā DA stūrī Rēzeknes laikposmā (pēcŠķaune-103, Drissa-1ST un Liozno urbumu griezumam apakšdaļas). Savukārt, attīstoties transgresijai, un sanešu plūsmām no noneses apgabala apsīkstot, šī teritorija applūda, un izveidojās plaši plūdmaiņu līdzenumi ar karbonātu sedimentāciju (skat. 9. att.).

Šajā pētījumā tiek uzsvērtā plūdmaiņu procesu loma, kas kontrolēja sedimentācijas apstākļus Rēzeknes un Pērnavas laikposmu baseina austrumos un dienvidaustrumos. Tieši plūdmaiņu straumju attīstība baseinā un to ietekme uz sedimentācijas vidi „apslāpēja” viļņu un viļņošanās procesu attīstību baseinā. Pēc plūdmaiņu pazīmēm nogulumos pētījumu areālā var secināt, ka plūdmaiņu amplitūda baseinā ir bijusi augsta (> 4 m), līdzīgi kā pārējā baseina daļā (angļu valodā – *macrotidal range*).

Secinājumi

Apkopojot iepriekš minēto, jāatzīmē vairākas galvenās sedimentācijas apstākļu īpatnības Baltijas Rēzeknes un Pērnavas laikposmu Baltijas devona baseina austrumos un dienvidaustrumos.

- Līdz ar transgresijas sākumu plaši attīstījās estuāru sistēmas un plūdmaiņu līdzenumi.
- Plašos plūdmaiņu līdzenumos ar paaugstinātu ūdens sāļumu baseina austrumu daļā uzkrājās mālaini karbonātisks materiāls ar ģipša ieslēgumiem.
- Analogiski pētījumu teritorijas rietumdaļā attīstījās bezkarbonātiskās plūdmaiņu līdzenuma fācijas.
- Tieši no sanesu avota (Baltijas vairogs un Skandināvijas Kaledonīdu kalni) vai arī no dienvidiem esošā noneses apgabala, kā arī no baseina centrālās daļas epizodiski tika ienesta dažāda rupjuma smilts, un pazeminājās ūdens sāļums.
- Daudzas nogulumu fācijas un tekstūras norāda uz ļoti sekiem apstākļiem, kā arī slāņkopas periodisku atsegšanas Zemes virspusē.
- Ik pa laikam seklajā baseinā uz Viļakas vaļņa aktivizējās viļņu darbība, kas izraisīja dažādgraudainas smilts, kā arī oolītu un pseidooolītu ieskalšanu mālaini karbonātiskajās nogulās.
- Tomēr hidrodinamiskā režīma aktivitātes regulēja plūdmaiņu procesi, kas noteica mainīgu un periodiski aktīvu režīmu. Par to liecina plaši sastopamās dzīslveidīgas, viļņotas un lēcveidīgas tekstūras aprakstītajās nogulumu fācijās; sīks ritmisks horizontāls slāņojums ar kārtiņu biežumu milimetra daļās un milimetros, kur mijas tīri mālaini karbonātiski nogulumi un aleirītiski smilšains materiāls; dažkārt divos pretējos virzienos orientēts ripsnojums; visos pētītajos urbumos plaši izplatītais dažāda ranga cikliskums, t.sk., žūšanas plaisu periodiska sastopamība.

Darbā aprakstītie rezultāti un secinājumi sniedz būtisku informāciju par plūdmaiņu attīstību senajos epikontinentālajos baseinos.

Pateicība

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē» (vienošanās Nr. 2009/0138/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/004 LU reģistrācijas Nr. ESS2009/77). Autori pateicas Dr. Piretai Plinkai-Bjorklundei par diskusijām šī darba tapšanas gaitā un recenzentiem prof. Ervīnam Lukševičam un Dr. Vijai Hodirevai par vērtīgajiem labojumiem un ierosinājumiem.

LITERATŪRA

- Brooks, G.R., Doyle, L.J., Suthard, B.C., Locker, S.D. and Hine, A.C. 2003. Facies architecture of the mixed carbonate/siliciclastic inner continental shelf of west-central Florida: implications for Holocene barrier development. *Marine Geology*, 200, 325–349.
- Collinson, J.D. 1996. Alluvial sediments. In: Reading, H.G., (eds), *Sedimentary environments and facies* 2nd edition, Blackwell Science Ltd., Oxford, pp. 20–54.
- Dalrymple, R. W. 1992. Tidal Depositional Systems. In: Walker, R. G. and James, N. P. (eds), *Facies models, response to sea level change*. Geological Association of Canada, pp. 195–218.
- Dalrymple R.W., Zaitlin B.A. and Boyd R., 1992. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62, 1130–1146.
- Dalrymple R.W. and Choi K.S. 2007. Morphologic and facies trends through the fluvial-marine transition in the tide-dominated depositional system: A schematic framework for environmental and sequence-stratigraphic interpretation. *Earth-Science Reviews*, 81, 135–174.
- Davies P. J., Bubela B., Ferguson J. 1978. The formation of ooids. *Sedimentology*, 25, 703–730.
- Elrick, M. 1995. Cyclostratigraphy of Middle Devonian carbonates of the Eastern Great basin. *Journal of Sedimentary Research*, 65, 61–79.
- Kurshs V., Stinkulis G. 1998. Middle Devonian clastic and carbonate transitional facies in the eastern Baltic. In: 15th International Sedimentological Congress, Alicante: Abstracts, pp. 488–490.
- Kursh, V. M. 1975. *Litologija i poleznie iskopaemie terrigenogo devona Glavnogo polya*. Rīga: Zinatne. 216 (krievu val.).
- Kursh, V. M. 1992. *Devonskoe terrigenoe osadkonakoplenie na Glavnom devonskom pole*. Rīga: Zinatne. 208 (krievu val.).
- Lehrmann, D.J., Wan, Y., Wei, J., Yu, Y.-Y. and Xiao, J. 2001. Lower Triassic peritidal cyclic limestone: an example of anachronistic carbonate facies from the Great Bank of Guizhou, Nanpanjiang Basin, Guizhou province, South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 173, 103–123.
- Kleesment, A. and Mark-Kurik, E. 1997. Lower Devonian. In: Raukas, A. and Teedumäe, A. (comp. and ed.), *Geology and mineral resources of Estonia*. Estonian Academy Publishers, Tallinn, pp. 107–111.
- Mark-Kurik E. and Pöldvere A. 2012. Devonian stratigraphy in Estonia: current state and problems. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. *Geology*, 61(1), pp. 33–47.
- Miall A.D., 1996. The geology of fluvial deposits, sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology. Springer Verlag Heidelberg, Berlin. 582 pp.

- Middleton G.V. 1991. A short historical review of clastic tidal sedimentology. In: Smith D.G., Reinson G.E., Zaitlin B.A and Rahmani R.A (eds), *Clastic tidal sedimentology*. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 16, pp. 9–15.
- Narbutas V. 1984. *Krasnocvetnaja formacija nizhnego devona Pribaltiki i Podoliji*. Viļņa, 136 (krievu val.).
- Nio S.D. and Yang C.S. 1991. Diagnostic attributes of clastic tidal deposits: a review. In: Smith D.G., Reinson G.E., Zaitlin B.A and Rahmani R.A (eds), *Clastic tidal sedimentology*. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 16, pp. 3–28.
- Paškevičius, J. 1997. The Geology of The Baltic Republics. Vilnius University, Geological Survey of Lithuania, Vilnius, 387 pp.
- Rankey, E.C., Riegl, B. and Steffen, K. 2006. Form, function and feedbacks in a tidally dominated ooid shoal, Bahamas. *Sedimentology*, 53, 1191–1210.
- Reineck, H.-E., Singh, I. B. 1980. Depositional Sedimentary Environments. Springer-Verlag. 551 pp.
- Savvitova L. 2002. Latvijas augšdevona stratigrāfiskā iedalījuma revīzija. Atskaite. LU Ģeoloģijas institūts. 24 lpp.
- Scholle P. A. 1978. A Color Illustrated Guide To Carbonate Rock Constituents, Textures, Cements and Porosities. AAPG Memoir 27. Tulsa, Oklahoma. 241 pp.
- Stinkulis Ģ. 1998. Latvijas devona klastisko-karbonātiežu un kaļķakmeņu-dolomītu pārejas zonu sedimentoloģija un mineraloģija. Doktora darbs. 228 lpp.
- Stinkulis Ģ. 1999. Dolomīta oolīti un pseidooolīti devona Rēzeknes un Pērnavas svītu nogulumos. *Latvijas Ģeoloģijas Vēstis*, Nr. 6, Rīga: Valsts ģeoloģijas dienests, lpp. 18–30.
- Sorokin V. 1981. *Devon i kabon Pribaltiki*. Riga: Zinatne. 502 (krievu val.).
- Tovmasyan K. 2004. Tidal signatures in deposits of Pärnu Formation (Middle Devonian) in Estonia. In: Tidalites-2004, 6-th International Conference on Tidal Sedimentology. Copenhagen: Abstracts, pp. 183–185.
- Tucker M. E., Wright V. P. 1990. Carbonate Sedimentology. Blackwell Scientific Publications. 482 pp.

**Bruņuzivs *Bothriolepis maxima* bruņu plātņu
hidrodinamika viļņu un straumju ietekmē:
aktuopaleontoloģiskā pieeja un modelēšana**
*The Hydrodynamics of Bothriolepis maxima Armour
Plates Under the Influence of Waves and Streams:
Actuopalaentological Approach and Modelling*

Jeļena Vasiļkova

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte,
Ģeoloģijas nodaļa, Pamatiežu ģeoloģijas katedra,
Raiņa bulv. 19, Rīga LV-1586, Latvia
E-mail: jelena.vasilkova@lu.lv

Kopsavilkums

Lai atbildētu uz jautājumiem par botriolepīdu bruņuzivju skeleta plātņu apglabāšanas un transportēšanas īpatnībām, kas ir radušies Baltijas devona mugurkaulnieku atradņu tafonomiskajā izpētē, ir veikta eksperimentu sērija ar mākslīgi izgatavotiem atbilstoša blīvuma un formas plātņu modeļiem, laboratorijas apstākļos un dabā, pakļaujot modeļus viļņu un straumju ietekmei. Ir noteikts minimālais straumes ātrums, kas ir nepieciešams bruņuzivju bruņu plātņu transportēšanai, kā arī gultnes reljefa ietekme uz plātņu pārvietošanu un apglabāšanu. Noskaidrots, ka hidrodinamiski stabila pozīcija izliektām plātnēm gan viļņu, gan straumju ietekmē ir ar izliekumu uz augšu. Pēc transportēšanas potenciāla botriolepīdu bruņu plātnes ir iedalītas trijās grupās atbilstoši M. Vorhisa klasifikācijai.

Atslēgvārdi: Bothriolepididae, devona mugurkaulnieki, eksperimentālā tafonomija, skeleta elementu apglabāšana.

Abstract

To answer the questions about transportation and burial peculiarities of bothriolepid fish armour, which arised during the taphonomical research of Baltic Devonian vertebrate assemblages, a series of experiments with artificially made plates of appropriate mean density and shape have been conducted in laboratory and awild under the influence of waves and water streams. Minimum stream velocity is determined prerequisite to placoderm plate transportation, as well as the influence of the bedforms on the plate transportation and burial. It has been found out, that, under the influence of waves, as well as water streams, for the convex bones the hydrodynamically stable is convex-up position. By the transportation potential the studied skeletal elements are assigned to the three groups according to M. Voorhies classification.

Keywords: Bothriolepididae, burial of skeletal elements, devonian vertebrates, experimental taphonomy.

Ievads

Pēdējos gadu desmitos arvien interesantāki pētījumi top aktuopaleontoloģijas un eksperimentālas tafonomijas jomās (piemēram, Clifton 1971, Behrensmeyer 1990, Nichols 1999), ir daudz pētījumu, kas apskata dažādus mugurkaulnieku aktuopaleontoloģijas un eksperimentālās tafonomijas aspektus. Tiem pamatā ir klasiskie Šotvela (Shotwell 1955), Tūsa (Toots 1965) un Vorhīsa (Voorhies 1969) darbi, kuros apskatīti tādi svarīgi aspekti kā kaulu noārdīšanās dēdēšanas rezultātā, skeletu izjukšanas secība, dažādi faktori, kas nosaka skeleta elementu atšķirīgu reprezentativitāti. Starp jaunākiem pētījumiem sevišķi interesanti ir tie, kas veltīti dažādas formas un izmēra mugurkaulnieku atlieku saglabāšanās pakāpei un transportam upju straumju ietekmē (Behrensmeyer 1975, 1988; Aslan and Behrensmeyer 1996). Tomēr, pētījumu rezultātus par nesen dzīvojošo mugurkaulnieku atlieku saglabāšanos un pārvietošanos upju straumēs ir grūti ekstrapolēt uz devona mugurkaulnieku (zivju un tetrapodu) fosilijām, jo to forma un, domājams, arī blīvums, ir atšķirīgi no neseno formu analogiskajiem parametriem. Runājot par bruņuzivju izliekto plātņu orientāciju ar izliekumu uz augšu vai uz leju, analogijas ir jāmeklē pavisam citā grupā, piemēram, jāpievēršas gliemeņu čaulu orientācijas pētījumiem (Clifton 1971). Arī citu kaulu forma (piemēram, bruņuzivju spuras kauli vai atsevišķi galvas vairoga kauli) mūsdienu mugurkaulnieku kauliem nav raksturīga. Jau 20. gada septiņdesmitajos gados ir sākušies Baltijas devona mugurkaulnieku sakopojumu pētījumi, kas turpinās arī pašlaik (Lyarskaya 1972; Kuršs *et al.* 1998, 1999; Upeniece 1999, 2011; Lukševičs and Zupiņš 2004; Lukševičs *et al.* 2012; Vasiļkova *et al.* 2012). Šo pētījumu gaitā ir iegūts bagātīgs materiāls, kura interpretācijā ir lietotas tafonomijas metodes. Ir pētītas fosiliju saguluma likumsakarības, atlieku šķirotība pēc izmēra un formas, skeletu disartikulācija, kaulu saglabātība, orientācija un izvietojums plānā, kā arī citi parametri. Iegūto datu analīzes gaitā ir radušies jautājumi, kas skar devona mugurkaulnieku, it īpaši skaitliskā pārsvarā esošu bruņuzivju atlieku transportēšanas un apglabāšanas potences, kā arī nepieciešamība pētīt šos aspektus eksperimentāli.

Viens no galvenajiem jautājumiem, kas apgrūtina bruņuzivju kaulu modeļu izveidošanu, ir jautājums par devona mugurkaulnieku kaulu blīvumu. Nav iespējams eksperimentāli izmantot kaulus, kas ir fosilizējušies, jo to struktūra, sastāvs un līdz ar to arī blīvums ir būtiski mainījušies fosilizācijas procesā. Sen mirušo dzīvnieku (sumbru un briežu) kaulu blīvumu ir pētījusi Kreicere (Kreutzer 1988), tomēr šo pētījumu ir grūti attiecināt uz senajām zivīm to kaulu īpatnējās uzbūves dēļ. Zināma līdzība bruņuzivju pārkaulošanās mehānismā varētu būt ar mūsdienās dzīvojošo bruņurupuci *Trionyx* (Ivanov *et al.* 1995), tomēr šīs divas grupas ir visai tālu radniecīgas, tāpēc kaulu uzbūve, kaula vielas un poru attiecība tām ir dažāda.

Pētījuma mērķis ir noskaidrot bruņuzivs *Bothriolepis maxima* bruņu plātņu hidrodinamiskās īpatnības, izmantojot no sintētiskā materiāla (poliestera) izgatavotus plātņu modeļus ar precīzi definētu blīvumu. Bruņuzivju kaulu blīvums ir novērtēts, izmantojot ziņas par dažādu grupu organismu porainā un blīvā kaula blīvumu, kā arī bruņuzivs *Bothriolepis maxima* kaula vielas un poru tilpuma attiecību.

Saīsinājumi

- AMD – priekšējā vidējā muguras plātne,
 ADL – priekšējā muguras sānu plātne,
 AVL – priekšējā vēdera sānu plātne,
 Cd – spuras centrālā dorsālā plātne,
 Cv – spuras centrālā ventrālā plātne,
 MxL – sānu jauktā plātne,
 PMD – aizmugurējā vidējā muguras plātne,
 PVL – aizmugurējā vēdera sānu plātne,
 LU ĢZZF – Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte.

Materiāls un metodes

Lai izgatavotu atbilstoša blīvuma modeļus, ir noteikts *Bothriolepis maxima* dermālo kaulu īpatnējais blīvums. Autore ir pieņēmusi, ka bruņuzivju poraino blīvo kaulaudu uzbūve un sastāvs, organiskās vielas daudzums tajos, asinsvadu izvietojums un citas īpatnības nav bijušas principiāli atšķirīgas no tām, kas piemīt mūsdienās dzīvojošo organismu kaulaudiem.

Aprēķinot masas un tilpuma attiecību, noteikts fosilizējušos *Bothriolepis maxima* kaulu blīvums ($\rho = 2,35 \text{ g cm}^{-3}$, 1. tabula). Ir pieņemts, ka a) svaigs, nefosilizējies kauls, kuram porās ir gaiss, nebija blīvāks par mineralizējušos kaulu, kuram poras ir aizpildītas ar kalcīta kristāliem, b) *Bothriolepis maxima* dermālo kaulu, kuru veido bazālais, spongiozais jeb porainais un blīvais trabekulārais kaulaudu slānis (Gross 1931), kopējais blīvums nebija mazāks par mūsdienās dzīvojošo organismu poraino kaulaudu blīvumu (skat. 1. tabulu) un nebija lielāks par šo organismu blīvo kaulaudu blīvumu. Izejot no šiem pieņēmumiem, *Bothriolepis maxima* dermālo kaulu blīvums atradās intervālā starp 1,2 un 1,8 g cm^{-3} . Pieņemot, ka bruņuzivju spongiozie kaulaudi pēc blīvuma atbilst mūsdienu organismu porainajiem kauliem, bet bazālo un trabekulāro kaulaudu blīvums ir attiecīgi bijis tuvs blīvo kaulaudu blīvumam, var izvēlēties šaurāku intervālu – starp 1,25 un 1,5 g cm^{-3} .

1. tabula. Izejas dati *Bothriolepis maxima* dermālo kaulu blīvuma noteikšanai

Table 1. Data used for determining of the dermal bone density of *Bothriolepis maxima*

Kaula tips/viela	Blīvums, ρ (g cm^{-3})	Avots
Hidroksilapatīts $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})$	3,16	Anthony et al., 2000
Pilnīgi mineralizējies kauls	2,35	Robinson, 1960; Parfitt, 1998.
Porainais kauls dažādu grupu organismiem	1,08–1,2	Parfitt, 1998; Junqueira, Carneiro, 2003; Blanton, Biggs, 2005.
Blīvais kauls dažādu grupu organismiem	1,6–2,1	Junqueira, Carneiro, 2003; Blanton, Biggs, 2005; Stevens et al., 2005.
Fosilizējies <i>Bothriolepis maxima</i> kauls	2,35–2,45	Masas un tilpuma attiecības aprēķins
Svaigs, nefosilizējies <i>Bothriolepis maxima</i> kauls	1,51	Kaula vielas un poru tilpuma attiecības aprēķins

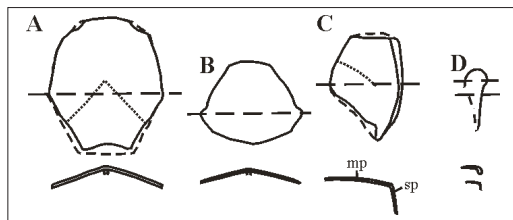
Ir izveidoti *Bothriolepis maxima* bruņu plātņu fragmentu plānslīpējumi, kuros noteiktas kaulu un poru tilpuma attiecības. Šiem kaulu fragmentiem čaganais kauls veido ap 2/3 no kaula plātnes biezuma. Aprēķinātais svaiga kaula blīvums ir $1,51 \text{ g cm}^{-3}$, bet reālajam blīvumam vajadzētu būt mazākam, jo, pirmkārt, kaulaudu sastāvā bez hidroksilapāfīta ietilpst organiskās vielas, otrkārt, pastāv mikroskopiskās poras, kuru kopējo tilpumu ar šādas metodes palīdzību nevar novērtēt, tāpēc tās netika ņemtas vērā, šo aprēķinu veicot.

Ņemot vērā iepriekš aprakstītus nosacījumus, no sintētiskajiem materiāliem ar atšķirīgu blīvumu robežās starp $1,25$ un $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ tika izveidoti bruņuzivju un psammosteīdu atsevišķu bruņu plātņu modeļi, kā arī daivspurzivju kaulu atveidojumi.

Poliestera plātņu izgatavošanas tehnoloģija ir šāda. Muzeja paraugi (attiecīgas bruņu plātnes) tika ietīti polietilēna plēvē, pārklāti ar foliju un tiem apkārt ir aplikts ar ģipsi piesūcināts audums, tādējādi iegūstot plātnes atlējuma formu. Aizpildot šo formu ar ģipsi, ir iegūts plātnes ģipša atveidojums. Plātnes atveidojumam ir uzklāti vairāki silikona slāņi un iegūta plātnes silikona forma. Pēc tam tika iegūts plātņu nospiedums ģipsī, kas kalpo par cietu pamatni silikona formai. Lai iegūtu plātnes poliesteru modeļi, silikona formu ievietoja cietajā ģipša formā. Stikla šķiedras strēmeles piesūcinātas ar poliesteru sveķiem, kuriem ir pievienots cietinātājs, un ieklātas silikona formā.

No poliesteru sveķiem ar stikla šķiedras karkasu tika izveidoti vairāki *Bothriolepis maxima* AMD plātņu modeļi ar nedaudz atšķirīgu blīvumu. Atšķirīgs blīvums ir panākts, mainot stikla šķiedras un poliesteru sveķu proporcijas. Eksperimentos no šiem plātņu modeļiem ir izmantoti trīs – ar blīvumu $\rho = 1,23 \text{ g cm}^{-3}$, $\rho = 1,34 \text{ g cm}^{-3}$ un $\rho = 1,5 \text{ g cm}^{-3}$. Visas šīs plātnes ir izveidotas pēc viena parauga – *Bothriolepis maxima* AMD plātnes, kas atrodas Krievijas Zinātņu akadēmijas Paleontoloģijas institūta kolekcijā (PIN 1737/64).

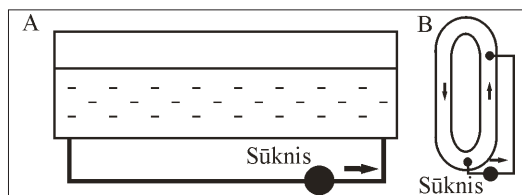
No poliesteru sveķiem ir izveidoti arī *Bothriolepis maxima* PMD, MxL, Cd/Cv kaulu modeļi. PMD, MxL un Cd/Cv plātņu (1. att.) modeļu izveidošanai ir izmantotas LDM kolekcijā esošās *B. maxima* plātnes (LDM Ģ 99/28, 99/74, 99/69), kas ir iegūtas 1981. gadā Langsēdes atsegumā. PMD plātnes poliesteru modeļa eksperimentāli noteiktais blīvums ir $\rho = 1,35 \text{ g cm}^{-3}$, bet MxL un Cd/Cv plātnēm tas ir $1,3 \text{ g cm}^{-3}$.



1. attēls. *Bothriolepis maxima* AMD (A), PMD (B), MxL (C) un Cd/Cv (D) plātnes plānā un šķērsgriezumā.
mp – muguras plakne, sp – sānu plakne.

Figure 1. AMD (A), PMD (B), MxL (C) un Cd/Cv (D) plates of *Bothriolepis maxima*, plan view and cross-section.
mp – dorsal plane, sp – side plane.

Devona mugurkaulnieku bruņu plātņu transportēšanas un apglabāšanas īpatnības ir pētītas, izmantojot izgatavotus poliestera modeļus un LU ĢZZF Iežu pētījumu laboratorijas rīcībā esošu iekārtu, kas ir paredzēta sedimentācijas procesu modelēšanai jeb sedimentācijas procesu fizikālo modeli. Modelis (2. att.) ir noslēgts baseins – caurule ar ārējo perimetru 2,6 m, platumu 0,12 m un dziļumu 0,4 m, taisnas malas (stikla sienas) garumu 0,75 m. Ūdens kustība tiek nodrošināta ar sūkni. Iekārta ļauj regulēt ūdens plūsmas ātrumu un dziļumu, novērot zemūdens reljefa formu veidošanos. Eksperimenta gaitā ir noteikts straumes ātrums, kas ir vajadzīgs konkrēta blīvuma un formas objektu pārvietošanai, kā arī tā atkarība no kaula pozīcijas (ar izliekumu uz augšu vai uz leju).



2. attēls. Sedimentācijas procesu modelēšanai paredzēta iekārta (shēma), kas ir izmantota poliestera modeļu hidrodinamisko īpatnību noskaidrošanā.

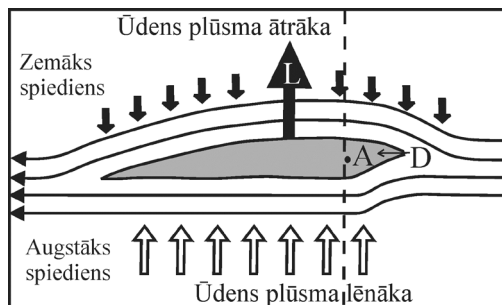
A – skats no sāniem; B – plānā.

Figure 2. Physical model of sedimentation processes (scheme), which is used to determine the hydrodynamic peculiarities of polyester models of *Bothriolepis maxima* armour plates.

A – side view; B – plan view.

Bothriolepis maxima dažu plātņu hidrodinamisko īpatnību noskaidrošana LU ĢZZF Iežu pētījumu laboratorijā ir norisinājusies sekojoši. Iekārtā ir iepildīts ūdens līdz atzīmei 0,1 un 0,2 m. Eksperimentā izmantots 20–25 °C silts saldūdens (sāļu koncentrācija <500 mg/l), kura blīvums ir 0,997 g cm⁻³. Plātņu modeļi ūdenī ir ievietoti ar izliekumu uz augšu un uz leju gludas (bez nogulām) un smilšainas gultnes apstākļos. Par gludu gultni nosacīti ir pieņemta iekārtas līdzena metāla pamatne, bet smilšainas gultnes atveidošanai izmantota vidējgraudaina smiltis, kura straumes ietekmē ar laiku izveidoja raksturīgas reljefa formas – ripsnojuma grēdiņus un grēdas. Iekārtas konstrukcijas īpatnības, domājams, būtiski ietekmēja rezultātu. Plātnei piespiežoties iekārtas sieniņām, tās kustība tika bremsēta, līdz ar to bija nepieciešams lielāks straumes ātrums, lai to izkustinātu no vietas, nekā tas būtu bijis ar vertikālām sienām neierobežotā baseinā. Parasti sedimentācijas procesu modelēšanai izmantojamo analogisko baseinu garums ir 10 m, platums 0,3 m, dziļums 0,5 m (skat. Nichols 1999). Baseinā, kura malas garums ir tikai 0,75 m un platums 0,12 m, turbulences ietekme uz plātnēm ir ievērojama. Ja iekārta ir piepildīta ar ūdeni līdz 0,1 m atzīmei, turbulence apgrūtina straumes ātruma noteikšanu.

Lai raksturotu spēkus, kas iedarbojas uz gultnē novietoto plātņi ūdens plūsmā, izmantojot klasiskās aerodinamikas un šķidrums dinamikas pamatus (skat., piemēram, Milne-Thomson 1968; Smith 1992), jāapskata *B. maxima* AMD plātnes piemērs. Ja plātne gultnē ir novietota ar izliekumu uz augšu (3. att.), līdz punktam A ūdens plūsmas šķērsgriezums samazinās, palielinās ātrums un, saskaņā ar Bernulli likumu, statiskais spiediens samazinās. Savukārt pēc punkta A plūsmas šķērsgriezums palielinās, samazinās ātrums un statiskais spiediens palielinās.



3. attēls. Hidrodinamisko spēku iedarbība uz *Bothriolepis maxima* AMD plātnei, kas gultnē novietota ar izliekumu uz augšu, vienmērīgajā ūdens plūsmā. Izstrādājis autore, izmantojot: Smith 1992.

A – plātnes spiediena centrs; L – cēlējspēks; D – pieres pretestība.

Figure 3. Hydrodynamic forces acting on *Bothriolepis maxima* AMD plate, placed on substrate convex side up, in a laminar flow. Created by author, using: Smith 1992.

A – hydrodynamic force center of a plate; L – lift; D – drag.

Pateicoties tās izliektajai formai (skat. 1. att.), plātne nepieguļ gultnei pilnībā. Uz plātnes augšējās virsmas spiediens attiecībā pret spiedienu plūsmā ir pazemināts, bet spiediens plātnes apakšā attiecībā pret spiedienu plūsmā ir lielāks. Rezultātā rodas pretestības spēks R, kas pielikts plātnes spiediena centrā un vērsts pazeminātā spiediena virzienā. Cēlējspēks L (skat. 3. attēlu) vienmēr ir perpendikulārs plūsmas ātruma vektoram un vērsts uz pazeminātā spiediena pusi. Tas rodas tāpēc, ka pastāv starpība starp spiedienu zem un spiedienu virs plātnes. Pieres pretestība D vērsta paralēli plūsmas ātruma vektoram, bet uz pretējo pusi (skat. 3. attēlu). Lai raksturotu pieres pretestību, un līdz ar to arī spēku, kas ir nepieciešams, lai noteiktas formas ķermeņi izkustinātu no vietas, operē ar pretestības koeficientiem. Plātnes pieres pretestības koeficients ir atkarīgs no plātnes profila relatīvā biezuma, kas ir maksimālais profila biezums attiecībā pret hordu (līniju, kas savieno plātnes profila priekšējo un aizmugurējo punktu).

Eksperimenta gaitā pakāpeniski palielinot straumes ātrumu, ir noteikts mazākais ātrums (v_1), kas ir nepieciešams, lai plātne izkustētos no vietas un sāktu pārvietoties. Šāds ātrums ir noteikts, pagriežot plātņi ar dažādām malām pret straumi, tādējādi mainot plātnes pieres pretestību. Straumes ātrums tika palielināts tad, ja vismaz 5 minūtes plātnes modelis nav pārvietojies vai nav sācis svārstīties. Augšējās plūsmas režīmā, kad tika novērota plātņu aprakšana, novērojumu laiks ir bijis vismaz 20 minūtes, vai arī turpinājās tik ilgi, kamēr plātne netika apglabāta pilnībā. Eksperimentāli ātrums v_1 laboratorijas apstākļos ir noteikts *Bothriolepis maxima* PMD ($\rho = 1,35 \text{ g cm}^{-3}$), MxL ($\rho = 1,3 \text{ g cm}^{-3}$) un Cd/Cv ($\rho = 1,3 \text{ g cm}^{-3}$) plātnes poliestera modeļiem, kā arī citu grupu mugurkaulnieku atsevišķu kaulu modeļiem – *Psammosteus cf. falcatus* branhiālajai plātnei, daivspurzivju zobiem un zvīņām ($\rho = 1,3 \text{ g cm}^{-3}$).

Sakarā ar to, ka laboratorijas iekārta neļauj atveidot viņu darbību un, kā jau minēts, šauras caurules malas bremzē plātņu kustību un neļauj eksperimentā izmantot plātnes, kas ir platākas par 0,12 m, eksperimenti ir veikti arī dabā – Saulkrastu

smilšainajā pludmalē Pēterupes un Ķīšupes ietekās (erozijas kanālos) un Vikmestes upē. Eksperimentos ir izmantoti *Bothriolepis maxima* AMD plātnes poliestera modeļi ar garumu $L = 196$ mm, platumu $W = 184$ mm un īpatnējo blīvumu $\rho = 1,23$ g cm⁻³, $\rho = 1,34$ g cm⁻³ un $\rho = 1,5$ g cm⁻³, kā arī citu plātņu modeļi: PMD ($\rho = 1,35$ g cm⁻³), MxL ($\rho = 1,3$ g cm⁻³), Cd/Cv ($\rho = 1,3$ g cm⁻³), galvas vairogs ($\rho = 1,28$ g cm⁻³) un tā atsevišķi kauli ($\rho = 1,28$ g cm⁻³).

Viens eksperimenta posms Saulkrastu pludmalē notika ar Pēterupi savienotā lagūnā, kuras dziļums nav pārsniedzis 0,05 m. Reģistrētais upes straumes ātrums šajā posmā ir bijis mazāks par 0,01 m s⁻¹, bet lagūnā ir izpaudusies divu veidu viļņu ietekme. Jūras viļņi periodiski ieplūda daļēji norobežotajā baseinā pāri smilšu strēlei, kas lagūnu atdala no jūras. Šai kustībai ir bijis pulsāciju raksturs, intervāli starp uzplūdiem nav bijuši vienmērīgi. Otrs viļņu veids bija saistīts ar ripsnojumu, kas parādījās lagūnas ūdens virsmā tiešā vēja ietekmē. Viļņa garums nepārsniedza 0,15 m, bet bijis lielāks par 0,05 m, tāpēc arī šie viļņi ietekmēja baseinu visā tā dziļumā.

Mugurkaulnieku bruņu plātņu hidrodinamisko īpašību noskaidrošanai straumes ietekmē ir izvēlēti divi taisni posmi Vikmestes upē, kur ūdens dziļums sasniedza 0,2–0,3 m un mērītais straumes ātrums eksperimenta laikā ir bijis 0,3–0,4 un 0,6–0,8 m s⁻¹. Pirmajā gadījumā gultni veidoja smalkgraudaina smiltis, bet gultnes reljefu straumes ripsnojums, kur grēdu augstums nav pārsniedzis 0,5–1,0 cm. Plātņu modeļi ir novietoti gultnē ar izliekumu uz augšu un uz leju upes vidusdaļā, kur straumes ātrums ir vislielākais. Eksperimentu gaita tika filmēta un straumes ātrums ir aprēķināts pēc hronometražas.

Rezultāti

Eksperimenti laboratorijā

Plātņu modeļu pārvietošanai nepieciešamo straumes ātrumu v_1 ietekmē ūdens dziļums un gultnes raksturs. Lielākā dziļumā un nelīdzenā smilšainā gultnē plātņu pārvietošanai ir vajadzīgs lielāks straumes ātrums (2. tabula). Plātņu formai, kā arī to pozīcijai attiecībā pret straumi, gultni un/vai gultnes reljefa formām arī ir liela nozīme.

2. tabula. Laboratorijas apstākļos reģistrēts straumes ātrums, kas ir nepieciešams ar izliekumu uz augšu gultnē novietoto *Bothriolepis maxima* bruņu plātņu poliestera modeļu izkustināšanai no vietas 10 un 20 cm dziļumā gludā un nelīdzenā (smilšainā) gultnē.

Table 2. Laboratory-registered stream velocity, which is capable of moving polyester models of *Bothriolepis maxima* armour plates placed on substrate convex side up, water depth 10 and 20 centimeters, substrate surface smooth and rough (sandy).

Plātne	Blīvums, ρ (g cm ⁻³)	Straumes ātrums, v_1 (m s ⁻¹)			
		0,1 m dziļumā		0,2 m dziļumā	
		gludā gultnē	nelīdzenā gultnē	gludā gultnē	nelīdzenā gultnē
MxL	1,3	0,05	0,13	0,2	1,02
Cd/Cv	1,3	0,07	0,13	0,27	0,88
PMD	1,35	0,06	0,4	1,08	2,08

Eksperimentā izmantotai absolūti līdzenai cietai un gludai metāla gultnei analogisku dabā ir grūti sameklēt, pēc savām īpašībām tai varētu līdzināties tikai klinšaina (kristālisko vai karbonātiežu) gultne. Cietas gultnes pastāvēja atsevišķās (Pļaviņu, Daugavas) karbonātu sedimentācijas epizodēs, kamēr mugurkaulnieku fosiliju sakopojumi Baltijā devonā pārsvarā ir veidojušies klastiskās sedimentācijas apstākļos. Devona klastiskajā slāņkopā cietas karbonātu gultnes nav zināmas, tāpēc plātņu pārvietošanai nepieciešama ātruma noskaidrošanai gludas metāla „gultnes” apstākļos ir tikai ilustratīva loma. Iegūtie dati izmantoti, lai ilustrētu, cik liela nozīme plātņu pārvietošanā ir gultnes raupjumam. Tā, piemēram, jauktās sānu plātnes (MxL) modelis, kas atrodas pozīcijā ar izliekumu uz augšu, 0,2 m dziļumā gludajā gultnē sāk pārvietoties tad, kad straumes ātrums sasniedz $0,2 \text{ m s}^{-1}$ (skat. 2. tabulu), bet smilšainajā gultnē tas izkustas tikai tad, ja straumes ātrums sasniedz $1,02 \text{ m s}^{-1}$, t.i., jau augšējās plūsmas režīmā ($\Delta_v=0,82$). Savukārt PMD plātnes modeļa gadījumā šis ātrums attiecīgi ir $1,08$ un $2,08 \text{ m s}^{-1}$ ($\Delta_v=1,0$), bet Cd/Cv – $0,27$ un $0,88 \text{ m s}^{-1}$ attiecīgi ($\Delta_v=0,61$). Tātad, gultnes rakstura ietekme uz dažādas formas plātņu transportēšanu ir atšķirīga. Plātnēm, kas atrodas pozīcijā ar izliekumu uz leju (3. tabula) šī atšķirība neizpaužas tik krasi, kā pozīcijā ar izliekumu uz augšu.

3. tabula. Laboratorijas apstākļos reģistrēts straumes ātrums, kas ir nepieciešams ar izliekumu uz leju gultnē novietoto *Bothriolepis maxima* bruņu plātņu poliesteru modeļu izkustināšanai no vietas 10 un 20 cm dziļumā gludā un nelīdzenā (smilšainā) gultnē.

*Table 3. Laboratory-registered stream velocity, which is capable of moving polyester models of *Bothriolepis maxima* armour plates placed on substrate convex side down, water depth 10 and 20 centimeters, substrate surface smooth and rough (sandy).*

Plātne	Blīvums, ρ (g cm^{-3})	Straumes ātrums, v_1 (m s^{-1})		
		0,1 m dziļumā *		0,2 m dziļumā
		gludā gultnē	gludā gultnē	nelīdzenā gultnē
MxL	1,3	0,02	0,1	0,39
Cd/Cv	1,3	0,04	0,08	0,61
PMD	1,35	0,05	0,39	0,45

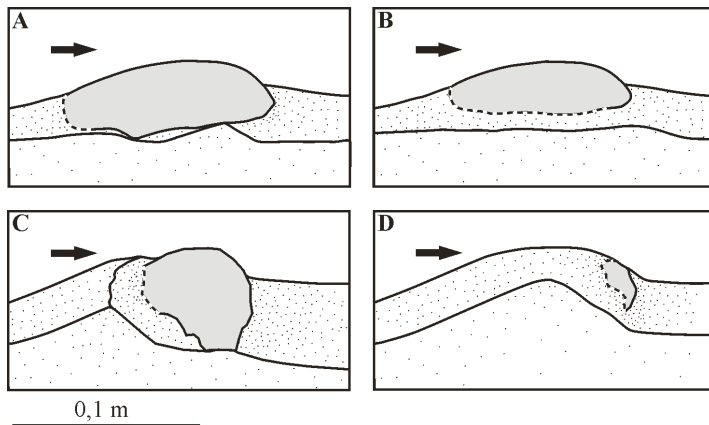
Gludā gultne kā straumju veidota reljefa forma, kas atbilst noteiktam klastiskās sedimentācijas režīmam, var veidoties gan apakšējās, gan augšējās plūsmas ietekmē (Reineck, Singh 1980). Tā, 0,2 m dziļumā apakšējās plūsmas režīmā ripsnojums sāk veidoties straumes ātrumam sasniedzot $0,25 \text{ m s}^{-1}$, bet gluda gultne atkal parādās jau augšējās plūsmas režīmā, kad straumes ātrums pārsniedz $1,3 \text{ m s}^{-1}$.

Fosiliju aprakšanā un pārvietošanā nozīme ir ne tikai gultnes raupjumam, bet arī konsistencei. Saskaņā ar sedimentogēno gultņu klasifikāciju pēc konsistences, kuru piedāvā Ekdeils (Ekdale 1985), gultnes var būt “šķidras” (*soupground*), mīkstas (*softground*), irdenas (*looseground*), stingras (*firmground*) un cietas (*hardground*). Izplatītākie klastiskās sedimentācijas veidojumi ir mīkstās un irdenās gultnes. Jo vairāk substrāts ir piesātināts ar ūdeni, jo lielāka varbūtība, ka fosilijas tiks apraktas, grimstot. Stingrās gultnes veidojas nogulu atūdeņošanas un noblīvēšanas rezultātā, bet cietās gultnes – cementam aizpildot poras.

Nosacīti var izdalīt trīs plātņu grupas, kuru hidrodinamiskās īpašības būtiski atšķiras: 1) nedaudz izliektas gandrīz izometriskas plātnes (AMD, PMD); 2) kauli, kas sastāv no divām plaknēm, kuras savā starpā veido 90–120° leņķi (AVL, ADL, PVL, MxL); 3) iegareni kauli (piemēram, Cd/Cv), kuru garums vismaz trīsreiz pārsniedz platumu. Šādas klasifikācijas pamatā ir mugurkaulnieku atlieku iedalījums grupās, kuru ir piedāvājuši Lukševičs un Zupiņš (2004).

Pirmās grupas plātnes ir noturīgākas pret izkustēšanos pozīcijā ar izliekumu uz augšu nekā pozīcijā ar izliekumu uz leju: PMD plātne ($\rho = 1,35 \text{ g cm}^{-3}$), kas novietota smilšainā gultnē 0,2 m dziļumā ar izliekumu uz augšu, sāk pārvietoties straumes ātrumam sasniedz 2,08 m s⁻¹. Ja plātne novietota hidrodinamiski nestabilā pozīcijā ar izliekumu uz leju, tās izkustināšanai no vietas pietiek ar straumi, kuras ātrums ir 0,45 m s⁻¹. Turklāt šīs grupas plātnēm pieres pretestība gandrīz nemainās atkarībā no tā, ar kuru sānu plātne ir pagriezta pret straumi.

Ja plātne atrodas gultnē ar izliekumu uz leju, tās kustība parasti sākas ar to, ka virs gultnes tiek piepacelsta pret straumi vērsta mala. Pēc tam plātne var tikt diezgan strauji apgriezta otrādi, dažreiz pēc inerces var vairākas reizes apgriezties ap savu asi, “soļojot” vai ripojot pa gultni, pirms novietoties stabilā pozīcijā – ar izliekumu uz augšu. Ja plātne sāk pārvietoties no pozīcijas ar izliekumu uz augšu, tā sākumā tiek vilkta gar gultni, pēc tam uzpeld un pārvietojas lieliem lēcieniem, atraujoties no gultnes un atkal nolaižoties, bet parasti neapgriežoties ap savu asi hidrodinamiski nestabilajā pozīcijā. Šo plātņu apglabāšanā liela nozīme ir gultnes reljefa formām un tam, kā plātne sākotnēji tiek novietota attiecībā pret tām.



4. attēls. *Bothriolepis maxima* PMD (A, B) un MxL (C, D) plātņu modeļu aprakšana augšējās plūsmas režīmā. Plūsmas virziens ir parādīts ar bultiņām.

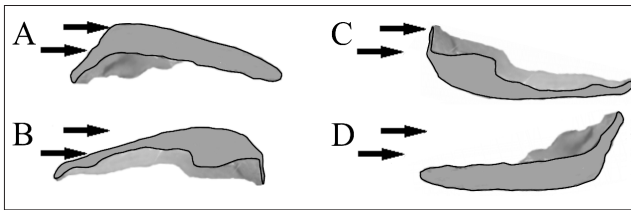
Figure 4. *Burying of Bothriolepis maxima* PMD (A, B) and MxL (C, D) plate models in an upper flow regime.

Flow direction shown with arrows.

Lai noteiktu gultnes reljefa nozīmi PMD plātnes pārvietošanas un apglabāšanas likumsakarībās, laboratorijas iekārtā zemūdens grēdas pret straumi vērstajā nogāzē

0,2 m dziļumā ar izliekumu uz augšu tika novietota PMD plātne un pakāpeniski palielināts straumes ātrums. Zemūdens grēdas profils, pieaugot straumes ātrumam un iestājoties augšējās plūsmas režīmam, tika izlīdzināts. Grēdas garums ir 0,9 m, platumā to ierobežo iekārtas sienīņas (0,12 m), augstums ir 0,06 m, bet nogāzes slīpums nepārsniedz 10° (4. att.). Straumes ātrumā $2,08 \text{ m s}^{-1}$ 5 minūšu laikā plātne netika izkustināta no vietas, bet ap to sākās smilts akumulācija (4.A att.), kas turpmāko 5 minūšu laikā sasniedza dinamiskā līdzsvara stāvokli (4.B att.). Plātnes aprakšana apstājās un 10 minūšu laikā neatjaunojās. PMD plātnes modelim bruņuzivīm raksturīgs kaula ārējās virsmas ornamentējums netika atveidots. Iespējams, dabiskam kaulam, kura virsmā ir saglabājies ornamenti, aprakšana notiktu straujāk.

Otrās grupas plātņu uzvedību ilustrē MxL plātnes piemērs. MxL plātnes modelis, kas ir novietots smilšainā gultnē ar izliekumu uz augšu ar stāvāku sānu plakni pret straumi (5.A. att.), sāk pārvietoties, straumes ātrumam sasniedzot $1,02 \text{ m s}^{-1}$.



5. attēls. *Bothriolepis maxima* MxL plātnes modeļa novietojums attiecībā pret straumi.

- A – ar izliekumu uz augšu, maksimāla pretestība; B – ar izliekumu uz augšu, minimāla pretestība;
 C – ar izliekumu uz leju, maksimāla pretestība; D – ar izliekumu uz leju, minimāla pretestība.
 Plūsmas virziens ir parādīts ar bultiņām.

Figure 5. *Bothriolepis maxima* MxL plate model position against the stream.

- A – convex side up, maximum drag; B – convex side up, minimum drag; C – convex side down, maximum drag; D – convex side down, minimum drag. Flow direction shown with arrows.

Plātne tiek vilkta gar gultni, bet, ja gultne ir nelīdzena un plātnes kustība tiek bremsēta, tā sāk rotēt, pagriežoties ar lēzenāku muguras plakni pret straumi (5.B. att.). No šādas pozīcijas plātne tiek izkustināta tikai tad, kad straumes ātrums sasniedz $1,67 \text{ m s}^{-1}$. Tā tiek lēnām vilkta gar gultni, apstājoties pie gultnes nelīdzenumiem, kur notiek pakāpeniska aprakšana. Retos gadījumos, pēkšņi strauji un īslaicīgi pieaugot turbulencei vai straumes ātrumam, plātne arī no šādas stabilas pozīcijas var tikt izkustināta un apgriezta otrādi ar stāvāko plakni pret straumi, tad cikls atkārtojas, līdz MxL plātne atkal nonāk pozīcijā ar izliekumu uz augšu un ar lēzenāku plakni pret straumi. Pretstatā PMD, augšējās plūsmas režīmā ($0,2 \text{ m}$ dziļumā, ar straumes ātrumu $1,56 \text{ m s}^{-1}$) MxL plātne 15 minūšu laikā tika pilnībā aprakta, domājams, lielā mērā pateicoties tās profilam. Ja MxL plātne atrodas pozīcijā ar izliekumu uz augšu tās lēzenākā, muguras plakne, kas vērsta pret straumi, veido ar gultni 18° leņķi, kas ir tuvs straumes ripsnojuma grēdiņu pretstraumes nogāžu slīpuma leņķim ($10\text{--}15^\circ$) (5.B. att.). Pēc tam, grēdai migrējot plūsmas virzienā, atsedzas pret straumi vērsta plātnes mala un tās pamatnē pastiprinās erozija. Eroziņas rezultātā smiltis zem plātnes atsegtās malas tiek izskalotas, starp gultni un plātņi pieaug straumes ātrums un pastiprinās turbulence. Rezultātā uz plātnes muguras plakni no apakšas

darbojas spēks, kas ir pietiekams, lai to pagrieztu vertikāli, pilnībā atbrīvojot plātņi no pārsedzošām smiltīm. Zaudējot pārsedzošo nogulu svaru un iegūstot maksimālu pretestību, plātne uzpeld, turpina rotēt un nonāk smilšu grēdas virspusē.

Ja MxL plātnes modelis tiek sākotnēji novietots smilšainā gultnē ar muguras plakni paralēli gultnei, bet sānu plakni perpendikulāri tai (nosacīti atbilst pozīcijai ar izliekumu uz leju) virzienā pret straumi (skat. 5.C. att.), tad plātnes pārvietošanai nepieciešamais straumes ātrums ir $0,39 \text{ m s}^{-1}$. Plātne vienmērīgi slīd gar gultni vai īslaicīgi uzpeld, veicot vāji izteiktas lēcienveida kustības. Rotējot tā ieņem stāvokli ar mazāku pretestību (skat. 5.D. att.), no kura tā tiek izkustināta tikai tad, ja straumes ātrums sasniedz $0,57 \text{ m s}^{-1}$. Parasti no šādas pozīcijas kustība sākas ar to, ka pret straumi vērsta mala paceļas vertikāli, un plātne tiek apgriezta otrādi, ieņemot hidrodinamiski stabilāku pozīciju (skat. 5.A. att.), no kuras var pāriet vēl stabilākā pozīcijā (skat. 5.B. att.).

Citādi uzvedas trešās grupas nosacīti iegareni kauli. Ja tās garenass ir orientēta perpendikulāri plūsmas virzienam, Cd/Cv plātne smilšainā gultnē pozīcijā ar izliekumu uz augšu izkustas no vietas, straumes ātrumam sasniedzot $0,88 \text{ m s}^{-1}$, bet pozīcijā ar izliekumu uz leju, pastāvot zemākam ātrumam – $0,61 \text{ m s}^{-1}$. Kustībai ir rotācijas raksturs: ja plātne orientēta ar izliekumu uz leju, tā tiek apgriezta otrādi, kā arī pagriezta ar distālo (smailo) galu pret straumi. Šāda pozīcija Cd/Cv plātnei hidrodinamiski ir visstabilākā: straumes ātrumam pieaugot, pret straumi vērsta distālais gals paliek uz vietas, bet proksimālais, pa straumi vērsta gals lēnām tiek pacelts virs gultnes. Pati plātne sāk slīdēt uz priekšu tikai augšējās plūsmas režīmā.

Ekspierimenti dabā

Viļņu bangu zonā *Bothriolepis maxima* AMD plātnes modeļi ar īpatnējo blīvumu $\rho = 1,23$, $\rho = 1,34$ un $\rho = 1,5 \text{ g cm}^{-3}$ tika ievietoti krasta zemūdens nogāzē, dziļumā, kas ir mazāks par plātnes garumu ($L = 196 \text{ mm}$), kā arī $0,7 \text{ m}$ dziļumā, kas pārsniedz plātnes garumu, bet nav lielāks par viļņu bāzi.

Ja plātne krasta zemūdens nogāzē dziļumā, kas ir mazāks par plātnes garumu, atrodas pozīcijā ar izliekumu uz augšu, ir novērota šāda kustība. Vilnim atkāpjoties, plātne tiek ievilkta dziļāk zemūdens nogāzē, ko nekompensē krasta virzienā vērsta kustība; viļņu apgriezta tā nonāk gultnē ar izliekumu uz augšu un tiek pārvietota arvien dziļāk, kamēr nonāk tādā dziļumā, kas ir lielāks par viļņu bāzi.

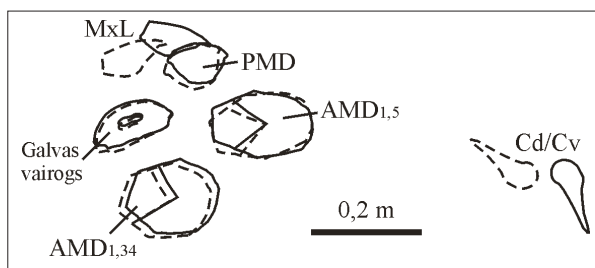
Ja plātne ir novietota krasta zemūdens nogāzē ar izliekumu uz leju $0,7 \text{ m}$ dziļumā, tā viļņu ietekmē tiek apgriezta otrādi un turpina pārvietoties. Atnākot vilnim, tā nedaudz piepaceļas, uzpeldot un lēnām pārvietojoties krasta virzienā. Ņemot vērā to, ka virzienā uz augšu pa zemūdens nogāzi plātnes kustība ir pretēja – uz jūras pusi – zemūdens nogāzē, domājams, ir pastāvējušas „dinamiskā līdzsvara” zonas, kur plātnes koncentrējās savdabīgās joslās.

Ja plātne atrodas smilšainajā pludmalē viļņu darbības zonā pozīcijā ar izliekumu uz leju, tā var tikt ieskalota zemūdens nogāzē vai tikt daļēji aprakta. Tomēr eksperimenta laikā plātne pilnībā netika aprakta. Sasniedzot aprakšanas pakāpi, kas ir tuva analogiskam stāvoklim, kas sasniegts straumes ietekmē (skat. 2.B. attēlu), ir iestājies “dinamiskais līdzsvars”, uzskalotas smiltis, ar katru nākamo vilni viegli tika noskalotas un uzskalotas atkal. Domājams, ka plātņu aprakšana ar lielāku varbūtību

var norisināties krasta akumulācijas posmos, kur nogulumus veido pārsvarā smalkgraudaina smiltis, bet ūdens ir piesātināts ar smiltis materiālu suspendētā veidā, savukārt posmos, kur notiek krasta abrāzija, šādas aprakšanas iespējamība ir neliela.

Nākamais eksperimenta posms ir norisinājies lagūnā, kuras dziļums nav pārsniedzis 0,05 m, un kas vienā daļā ir savienota ar Pēterupi. Eksperimentā izmantotas sešas poliestera plātnes: *Bothriolepis maxima* galvas vairogs, PMD, MxL, Cd/Cv, AMD_{1,34} ar īpatnējo blīvumu 1,34 g cm⁻³ un AMD_{1,5} ar īpatnējo blīvumu 1,5 g cm⁻³. Plātnes ir novietotas gultnē ar izliekumu uz augšu tā, lai tās visas tiktu pārklātas ar ūdeni.

Plātņu pārvietošanās attālums 20 minūšu laikā ir redzams 6. attēlā. Visvieglāk no vietas pavisam nelielu viļņu (ripsnojuma) ietekmē izkustas MxL un Cd/Cv plātne. MxL periodiski pietuvojas PMD plātnei, uzvirzoties tai, bet pēc tam atkāpjas. Šādas kustības notiek sakarā ar plātnes īpatnējo formu. Īsāka plakne, tā MxL plātnes daļa, kas sedza zivs sānu, tiek orientēta paralēli viļņu fronteī tā, lai tās garākā plakne būtu vērsta pret vilni, ieņemot vismazākās pretestības stāvokli, kā tas ir novērots laboratorijas apstākļos straumes ietekmē. Cd/Cv sāk rotēt un noorientējas perpendikulāri viļņu fronteī, ar šauro galu pret vēju (vilni). Pārējās plātnes – galvas vairogs, PMD, AMD_{1,34} un AMD_{1,5} pozīciju praktiski nemaina.

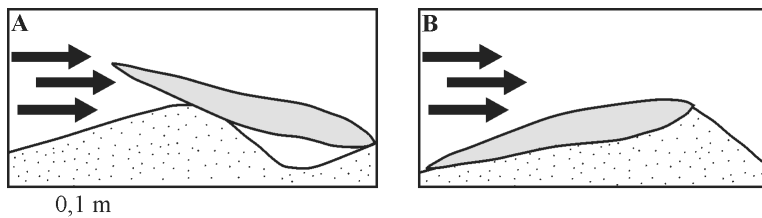


6. attēls. *Bothriolepis maxima* bruņu plātņu modeļu galvas vairogs, PMD, MxL, Cd/Cv, AMD_{1,34} un AMD_{1,5} pārvietošanās 20 minūšu laikā sekļajā baseinā viļņu ietekmē. Ar rausītu līniju apzīmēta plātņu sākotnējā pozīcija.

Figure 6. Path made by *Bothriolepis maxima* plate models head shield, PMD, MxL, Cd/Cv, AMD_{1,34} and AMD_{1,5} in 20 minutes in a shallow wave-influenced basin. Start position of the plates shown with a dashed line.

Kad šīs plātnes baseinā novietotas ar izliekumu uz leju, to pārvietošanās norisinās daudz intensīvāk. Plātnes pārvietojas, piepaceļoties un uzpeldot viļņa uzplūdu laikā. Viļņu ietekmē 3,5 minūšu laikā AMD_{1,5} plātne un galvas vairogs ir pārvietoti 0,6 m attālumā, AMD_{1,3} – 0,8 m attālumā, MxL – 1 m un PMD – 1,5 m attālumā.

Eksperimenti, kas ir veikti Vikmestēs upē, rāda, ka AMD_{1,5} plātnes poliestera modelis, kas plūsmā ir ievietots ar izliekumu uz leju, straumē ar ātrumu 0,6–0,8 m s⁻¹ uzpeld uzreiz un sāk kustēties ūdens slānī ar vidējo ātrumu 0,6 m s⁻¹. Savukārt, posmā, kur mērītais straumes ātrums ir 0,3–0,4 m s⁻¹, plātne nogrimst un pārvietošanās notiek, straumei to velkot gar gultni ar ātrumu, kas ir mazāks par 0,01 m s⁻¹. Šādā veidā pārvietojoties, plātne nonāk padziļinājumā starp zemūdens grēdām un tiek apgriezta otrādi (7.A. att.).



7. attēls. *Bothriolepis maxima* bruņu plātņu modeļa AMD_{1,5} pozīcija attiecībā pret zemūdens grēdām un plūsmas virzienu.

A – pirms apgriešanās; B – stabilā pozīcijā. Plūsmas virziens ir parādīts ar bultiņām.

Figure 7. Position of *Bothriolepis maxima* plate model AMD_{1,5} against the sand dunes and flow direction.

A – before a turn-over; B – in a stable position. Flow direction shown with arrows.

Kad *Bothriolepis maxima* AMD plātnes modelis ir novietots upes gultnē straumes ātrumā 0,6–0,8 m s⁻¹ ar izliekumu uz augšu, ir novērota šāda likumsakarība. Nonākot virs zemūdens grēdas, kā tas ir parādīts 7.B. attēlā, plātne iegūst stabilu pozīciju, jo straume to piespiež pie grēdas lēzenās nogāzes virsmas. Šādi novietota plātne var ilgstoši palikt nekustīga. Līdzīga kustība un novietošanās stabilā pozīcijā attiecībā pret zemūdens grēdām un ripsnojuma grēdiņām ir novērota *Bothriolepis maxima* PMD, MxL un galvas vairoga poliestera modeļiem. Upes gultnē novietojot atsevišķu galvas vairoga kaulu modeļus – Nu, La, Prm ar īpatnējo blīvumu $\rho = 1,25$ g cm⁻³, ir novērota šāda likumsakarība. Plātnēm nonākot nelīdzenā gultnē, straume, kuras ātrums sasniedz 0,6–0,8 m s⁻¹, tos nespēj izkustināt no vietas. Minētais varētu būt izskaidrojams ar to, ka šo plātņu relatīvais biezums (biezums attiecībā pret kaula izmēru) ir diezgan liels, izliekums pretēji tam ir neliels, bet tās ir daudzstūrains, turklāt to viscerālā virsma ir ar endokrānija nospiedumiem bedrīšu vai pauguriņu veidā.

Apkopojot novēroto, var saskatīt sekojošas *Bothriolepis maxima* bruņu plātņu hidrodinamiskās īpatnības. MxL, AMD, PMD plātnēm, galvas vairogam, daļēji arī Cd/Cv – hidrodinamiski visstabilākā pozīcija ir ar izliekumu uz augšu, MxL – ar izliekumu uz augšu un ar muguras plakni pret straumi, Cd/Cv – ar distālo galu pret straumi. AMD, PMD un MxL (AVL, PVL, ADL) plātnes var ieņemt vel stabilāku pozīciju, novietojoties zemūdens grēdu vai ripsnojuma grēdiņu pretstraumes nogāzē. Domājams, ka no šādas pozīcijas šīs plātnes var tikt izkustinātas tikai augšējās plūsmas režīmā. Tomēr, lai šo hipotēzi pārbaudītu, būtu nepieciešams veikt novērojumus dažādos dziļumos un lielākos straumes ātrumos, kas šādos dziļumos atbilstu augšējās plūsmas režīmam.

Secība, kurā notiek plātņu izkustēšanās no vietas gludajā un nelīdzenajā gultnē, vienmērīgi pieaugot straumes ātrumam, ir atšķirīga. Gludajā gultnē pirmās sāk pārvietoties *Bothriolepis maxima* Cd/Cv un MxL, pēc tam AMD un PMD plātnes, atsevišķi galvas vairoga kauli, tad *Psammosteus falcatus* branhiālās plātnes (garas sirpjveidīgas), daivspurzivju zvīņas un *Bothriolepis maxima* galvas vairogs. Savukārt smilšainajā gultnē, kurā ir ripsnojuma grēdiņas vai grēdas, visātrāk sāk kustēties *Psammosteus* branhiālās plātnes, daivspurzivju zvīņas un zobi, vēlāk izkustas atsevišķi galvas vairoga kauli, bet “visinertākie” ir *Bothriolepis maxima* AMD.

Plātņu pārvietošanās straumē norisinās dažādos veidos. *Bothriolepis maxima* MxL (tāpat kā AVL, PVL, ADL), AMD, PMD plātnes, galvas vairogs, Cd/Cv plātne, kā arī daivspurzivju zvīņas tiek pārvietotas, velkot gar gultni; MxL (AVL, PVL, ADL), Cd/Cv un galvas vairogs ieņem hidrodinamiski stabilāku pozīciju, griežoties ap vertikālo asi; MxL (AVL, PVL, ADL), AMD, PMD plātnes var arī “soļot” pa gultni, balstoties uz vienu malu un griežoties ap horizontālo asi. *Psammosteus falcatus* branhiālas plātnes un daivspurzivju zobi tiek transportēti, tiem ripojot pa gultni.

Diskusija

Tafonomiskajā analīzē plaši izmanto datus par organismu atlieku izvietojumu telpā, to saglabāšanās pakāpi, reprezentativitāti, šķirotību pēc izmēra un formas. Šie parametri tiek izmantoti, lai noskaidrotu, vai fosiliju sakopojumi ir autohtoni (veidojušies “uz vietas”) vai allohtoni (fosilijas ir pārvietotas pirms apglabāšanas vai pārgulsnētas), kā arī lai iegūtu papildus ziņas par sedimentācijas vidi un aģentiem, kas tajā darbojušies (viļņi, straumes, plūdmaiņu procesi). Divvāku gliemju čaulu orientācijas pētījumi (Seilacher 1973; Clifton 1971), kuros ir novērtēta ar izliekumu uz augšu vai uz leju novietoto čaulu savstarpējā attiecība, ir parādījuši, ka mierīgajā ūdenī dominē orientācija ar izliekumu uz leju, bet tekošajā ūdenī – ar izliekumu uz augšu. Eksperimentāli iegūtie dati par *Bothriolepis maxima* bruņu plātņu poliestera modeļu orientāciju liecina par to, ka pozīcija ar izliekumu uz augšu ir hidrodinamiski stabilāka visām izliektām plātnēm gan viļņu gan straumju ietekmē.

Jāatzīmē gan, ka sava loma noteikti ir plātnes sākotnējai pozīcijai attiecībā pret dzīvnieka ķermeni. Tā, piemēram, AMD, PMD, ADL un MxL plātnes bruņuzivīm sedza muguru un dzīves pozīcijā bija vērstas ar izliekumu uz augšu. Līdz ar to, ja dzīvnieka ķermenis pēc nāves ieņēma un gultnē tika novietots tādā pozīcijā, kā dzīves laikā, tad šo plātņu sastopamība tafocenozēs pozīcijā ar izliekumu uz augšu būtu sagaidāma ar lielāku varbūtību, nekā AVL, PVL un MV plātnēm, kas zivīm sedza vēderu un dzīves pozīcijā atradās ar izliekumu uz leju.

Lukševičs un Zupiņš (2004) norāda uz *B. ciecere* MxL, AVL, ADL un PVL labo un kreiso plātņu reprezentativitātes asimetriju Pavāru oriktocenoze. Eksperimentos gan viļņu, gan straumju ietekmē MxL un Cd/Cv plātnes rotē, ieņemot hidrodinamiski stabilāku stāvokli. Domājams, šeit varētu rast izskaidrojumu tam, kāpēc notiek labo un kreiso plātņu šķirošana. Tafonomiskā analīze Langsēdes, Klūnu, Pavāru un Ižmas oriktocenoze rāda, ka labās puses MxL plātnes mugurkaulnieku fosiliju sakopojumos dominē (Lukševičs *et al.* 2012, Vasiļkova *et al.* 2012, Lukševičs and Zupiņš 2004, Lukševičs *et al.* 2010). Šai likumsakarībai varētu būt nejaušs raksturs – apskatīts ierobežots atrodņu skaits, iespējams, ka kreiso MxL plātņu sakopojumi vienkārši netika atsegti. Cits izskaidrojums varētu būt saistīts ar Koriolisa spēkiem. Apskatītas oriktocenozes atrodas ziemeļu puslodē, kur visām straujtecēm tiek pastiprināti skalots labais krasts. Saskaņā ar novērotajām hidrodinamiskajām īpatnībām, kreiso MxL sakopojumiem erozijas kanālos vajadzētu veidoties tieši labajā pusē, kur tās ar lielāku varbūtību tiktu pārskalotas, fragmentētas un, iespējams, pat pilnībā iznīcinātas pirms galīgas apglabāšanas.

AVL, PVL un ADL plātnēm šī īpatnība, acīmredzot, neizpaužas tik krasi, vai arī šajā gadījumā darbojas citas, vēl nenoskaidrotas likumsakarības. Kaut arī asimetrija šo plātņu reprezentativitātē ir novērota visās atrodnēs, tā izpaužas dažādi, kas neļauj atklāt noteiktu tendenci. Piemēram, Ižmas oriktocenoze labāk pārstāvētas ir labās puses AVL un PVL plātnes un kreisās ADL, bet Cieceres oriktocenoze dominē kreisās puses AVL, PVL un ADL, pie tam, dažādu gadu datu variabilitāte vienas oriktocenozes ietvaros (Lukševičs and Zupiņš 2004, Lukševičs *et al.* 2010) ir lielāka, nekā dažādās oriktocenozēs, kas padara šo parametru par visai nedrošu hidrodinamiskās vides indikatoru.

M. Vorhīss (Voorhies 1969) ir veicis eksperimentu sēriju ar mērķi noskaidrot mugurkaulnieku (kojotu un aitu) pilnīgi dezintegrēto skeletu atsevišķu kaulu pārvietošanās potences straumēs ar ātrumu no 0,2 līdz 1,5 m s⁻¹. Pēc šīs pazīmes viņš ir nodalījis trīs grupas. Pirmajā (I) grupā ietilpst kauli, kas tiek pārvietoti uzreiz – saltācijas ceļā vai pilnībā uzpeldot. Šajā grupā ietilpst ribas, skriemeļi, krusta un krūšu kauli. Pārejas grupā ietilpst lāpstiņas, falangas, elkoņa kauli. Otrajā (II) grupā ietilpst kauli, kas straumes ietekmē sāk pārvietoties pakāpeniski un kuru transportēšana notiek velkot – augšstilba kauli, lielie lielakauli, pleca kauli, veseli iegurņi, spieķkauli. Pārejas grupā starp šo un nākamo ietilpst atsevišķi iegurņa kauli. Trešajā (III) grupā ietilpst galvaskausi un apakšžokļi.

Pēc eksperimenta rezultātiem gludajā gultnē I grupā būtu jāiekļauj *Bothriolepis maxima* Cd/Cv un MxL, II grupā AMD un PMD plātnes, atsevišķi galvas vairoga kauli un *Psammosteus falcatus* branhiālās plātnes, bet trešajā – daivspurzivju zvīņas un *Bothriolepis maxima* galvas vairogi. Tomēr, eksperimenti smilšainā gultnē, vidē, kas ir tuvāka devona baseinu videi, liecina par to, ka šis sadalījums ir nedaudz citādāks, un ka I grupā būtu jāiekļauj *Psammosteus falcatus* branhiālās plātnes, *Holoptychius* zvīņas, *Bothriolepis maxima* Cd/Cv plātnes, II grupā – *Bothriolepis maxima* MxL (AVL, ADL, PVL) plātnes un atsevišķus galvas vairoga kaulus. Transportēšanas attālums tādām plātnēm, kā MxL (AVL, ADL, PVL) var būt atšķirīgs atkarībā no tā, kādā vidē šis skeleta elements nonāk sākotnēji un kā tas sākotnēji tiek noorientēts attiecībā pret gultni. Tātad, MxL (AVL, ADL, PVL) plātnes var iekļaut arī III grupā, kopā ar PMD un AMD plātnēm. Lukševičs un Zupiņš (2004) izteikuši pieņēmumu, ka MxL un AMD plātnes pieder pie III grupas. Šim pieņēmumam varētu piekrist, bet tikai ar nosacījumu, ka plātnes, sevišķi MxL, jau sākotnēji nonāk gultnē hidrodinamiski stabilā pozīcijā, ar izliekumu uz augšu.

Anna Bērensmējere (Behrensmeyer 1975) ir secinājusi, ka kauli, kas pieder I grupai, var pārvietoties normālos straumes ātrumos, bet II un III grupa pieprasa plūdus, lai notiktu kaut cik būtiska pārvietošana. Eksperimenta rezultāti liecina par to, ka *Bothriolepis maxima* AMD, PMD un MxL plātņu pārvietošanās 0,2 m dziļumā sākas plūsmā, kuras ātrums ir 0,4 m s⁻¹, un praktiski uzreiz tās iegūst hidrodinamiski stabili pozīciju, tātad, transportēšanas attālums ir 0,2–0,5 m. No hidrodinamiski stabilās pozīcijas tās var tikt izkustinātas tikai augšējās plūsmas režīmā.

Sedimentoloģiskā analīze ir ļāvusi aprēķināt iespējamo baseina (erozijas kanāla) dziļumu, kurš Klūnu tafocenozes veidošanās laikā varētu sasniegt 2,5–4,0 m (Vasiļkova *et al.* 2012). Šāds dziļums ievērojami pārsniedz baseina dziļumu eksperimenta laikā, gan laboratorijā, gan dabā. Lai veiktu eksperimentu apstākļos, kas

ir maksimāli tuvināti nogulumu uzkrāšanās apstākļiem devonā attiecīgajā dziļumā, būtu nepieciešams izmantot citu laboratorijas aprīkojumu. Dabā šādu eksperimentu norisi būtu grūti novērot un dokumentēt. To, cik lielā mērā eksperimentu rezultāti var tikt attiecināti uz senās jūras apstākļiem, nosaka tādi devona baseina ūdens fizikālie parametri, kā ķīmiskais sastāvs (sāļums), temperatūra un līdz ar to arī blīvums.

Secinājumi

Pozīcija ar izliekumu uz augšu ir hidrodinamiski stabilāka visām izliektām *Bothriolepis maxima* bruņu plātnēm gan viļņu gan straumju ietekmē.

Asimetrija labās un kreisās puses botriolepīdu MxL, AVL, ADL un PVL plātņu reprezentativitātē fosiliju atrodnēs ir saistīta ar šo plātņu formu un šķirošanu pēc šīs pazīmes. Domājams, daļa plātņu (piemēram, labās puses MxL), pateicoties šādai šķirošanai, nonāk apstākļos, kas veicina ātru apglabāšanu bez atkārtotas izskalošanas.

Saskaņā ar M. Vorhisa (Voorhies 1969) piedāvāto kaulu klasifikāciju pēc pārvietošanās potenciāla ūdens straumju ietekmē I grupā jāiekļauj *Psammosteus falcatus* branhiālās plātnes, *Holoptychius* zvīņas, *Bothriolepis maxima* Cd/Cv plātnes, II grupā – *Bothriolepis maxima* atsevišķi galvas vairoga kauli, pārejas grupā – *Bothriolepis maxima* MxL (AVL, ADL, PVL) plātnes, bet III grupā – PMD un AMD plātnes.

Atsevišķu bruņu plātņu (MxL, AVL, ADL, PVL) transportēšanā sevišķi svarīga loma ir plātnes sākotnējai pozīcijai attiecībā pret gultni.

Iespējams, ka izliektās *B. maxima* bruņu plātnes no hidrodinamiski stabilās pozīcijas gultnē 0.2 m dziļumā straume var izkustināt, tikai sasniedzot augšējās plūsmas režīmam atbilstošu ātrumu.

Pateicības

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē». Gribētu pateikties Prof. E. Lukševičam par vērtīgiem padomiem, I. Zupiņam par palīdzību darbā ar LDM kolekciju materiālu, I. Drullem par konsultācijām poliestera modeļu izgatavošanā, K. Popovam un A. Kalvānam par palīdzību laboratorijas eksperimentos, konsultācijām un padomiem.

LITERATŪRA

- Anthony J. W., Bideaux R. A., Bladh K. W., Nichols M. C. 2000. *Handbook of Mineralogy. Volume IV. Arsenates, Phosphates, Vanadates*. Mineral Data Publishing, Tucson. 680 pp.
- Aslan A., Behrensmeyer A.K. 1996. Taphonomy and time resolution of bone assemblages in a contemporary fluvial system: the East Fork River, Wyoming. *Palaios*, 11 (5), 411–421.
- Behrensmeyer A.K. 1975. The taphonomy and paleoecology of Plio-Pleistocene vertebrate assemblages, Beastbof Lake Rudolf, Kenya. *Bulletin of the Museum of Comparative Zoology*, 146, 473–578.
- Behrensmeyer A.K. 1988. Vertebrate preservation in fluvial channels. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 63, 183–199.

- Behrensmeyer A.K. 1990. Transport-hydrodynamics: bones. In: *Palaeobiology: a synthesis* (Briggs D.E.G., Crowther P.R. eds.), pp. 232–235. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Blanton P. L., Biggs N. L. 2005. Density of fresh and embalmed human compact and cancellous bone. *American Journal of Physical Anthropology*, 29 (1), 39–44.
- Clifton H.E. 1971. Orientation of empty pelecypod shells and shell fragments in quiet water. *Journal of Sedimentary Research*, 41, 671–682.
- Ekdale A. A. 1985. Paleoecology of the marine benthos. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 50, 63–81.
- Gross W. 1931. *Asterolepis ornata* Eichw. und das Antiarchi-Problem. *Palaeontographica*, 75, 1–62.
- Ivanov A., Cherepanov G., Lukševičs E. 1995. Ontogenetic development of antiarch dermal ossifications. In: Lelievre H., Wenz S., Blicek A., Cloutier R. (eds.) *Premier vertébrés et vertébrés inférieurs. Geobios Memoire Special*, 19, 97–102.
- Junqueira L. C., Carneiro J. 2003. *Basic Histology, Text and Atlas* (10th ed.). McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, NY, U.S.A.. 144 pp.
- Kreutzer L.A. 1988. Megafaunal butchering at Lubbock Lake, Texas: a taphonomic reanalysis. *Quaternary Research*, 30, 221–231.
- Kuršs V., Lukševičs E., Upeniece E., Zupiņš I. 1998. Augšdevona klastiskie nogulumi un zivju atliekas Lodes mālu karjerā Latvijā (I daļa). *Latvijas ģeoloģijas vēstis*, 5, 7–19.
- Kuršs V., Lukševičs E., Upeniece E., Zupiņš I. 1999. Augšdevona klastiskie nogulumi un zivju atliekas Lodes mālu karjerā Latvijā (II daļa). *Latvijas ģeoloģijas vēstis*, 6, 10–17.
- Lukševičs E., Zupiņš I. 2004. Sedimentology, fauna, and taphonomy of the Pavari site, Late Devonian of Latvia. *Acta Universitatis Latviensis*, 679, 99–119.
- Lukševičs E., Stūris V., Lukševičs J. 2010. Vēlā devona mugurkaulnieku oritocenoze atsegumā pie Ižmas upes Sosnogorskā, Komi republika. *Latvijas Universitātes 68. zinātniskā konference. Ģeogrāfija, ģeoloģija, vides zinātne. Referātu tēzes*. LU Akadēmiskais apgāds, Rīga, lpp. 331–333.
- Lukševičs E., Ahlberg P., Stinkulis Ģ., Vasiļkova J., Zupiņš I. 2011. Frasnian vertebrate taphonomy and sedimentology of macrofossil concentrations from the Langsēde Cliff, Latvia. *Lethaia*, 45, 356–370.
- Lyarskaya L. 1972. A classification of devonian vertebrate localities of Latvia. *Eesti NSV teaduste akadeemia toimetised. Keemia. Geoloogia*, 21 (3), 259–268.
- Milne-Thomson L.M. 1968. *Theoretical Hydrodynamics*. Palgrave Macmillan. 768 pp.
- Nichols G.J. 1999. Experimental sedimentology. In: Jones T. P. and Rowe N. P. (eds) *Fossil Plants and Spores: modern techniques*. Geological Society, London, pp. 189–193.
- Parfitt A. M. 1998. A structural approach to renal bone disease. *Journal of Bone and Mineral Research*, 13 (8), 1213–1220.
- Reineck H.-E., Singh I.B. 1980. *Depositional Sedimentary Environments: With Reference to Terrigenous Clastics*. Springer Verlag, Berlin – Heidelberg – New-York, 551 pp.
- Robinson R.A. 1960. Chemical analysis and electron microscopy of bone. In: Rodahl K., Nicholson T., Brown E.M. (eds.), *Bone as a tissue*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, NY, U.S.A., pp. 186–250.
- Seilacher A. 1973. Biostratigraphy: The sedimentology of biologically standardized particles. In: Ginsburg R.N. (ed.), *Evolving Concepts in Sedimentology*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore and London, pp. 159–177.

- Shotwell J.A. 1955. An approach to the paleoecology of mammals. *Ecology*, 36, 327–337.
- Smith H.C. 1992. *The Illustrated Guide to Aerodynamics*. McGraw-Hill Professional, New York. 337 pp.
- Stevens M. M., Marini R. P., Schaefer D., Aronson J., Langer R., Shastri V. P. 2005. In vivo engineering of organs: The bone bioreactor. *PNAS*, 102 (32), 11450–11455.
- Toots H. 1965. Sequence of disarticulation in mammalian skeletons. *University of Wyoming Contributions to Geology*, 4, 37–39.
- Upeniece I. 1999. The sequence of disarticulation of *Asterolepis ornata* body and associated taphocenoses. *Ichthyolith Issues Special Publication*, 5, 48–50.
- Vasiļkova J., Lukševičs E., Stinkulis Ģ., Zupiņš I. 2012. Taphonomy of the vertebrate bone beds from the Klūnas fossil site, Upper Devonian Tērvete Formation of Latvia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 61, 2, 105–119.
- Voorhies M.R. 1969. Taphonomy and population dynamics of an early Pliocene vertebrate fauna, Knox County, Nebraska. *University of Wyoming Contributions to Geology Special Paper*, 1, 1–69.

Džosera piramīdas akmens materiāla dēdēšanas nedestruktīva novērtēšana

Non-Destructive Assessment of Stone Material Weathering at the Pyramid of Djoser

Agnese Kukela

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte
Alberta iela 10, Rīga, LV-1010
E-pasts: *agnese.kukela@lu.lv*

Valdis Segliņš

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte
Alberta iela 10, Rīga, LV-1010
E-pasts: *valdis.seglins@lu.lv*

Kopsavilkums

Seno kultūrvēstures pieminekļu aizsardzība un konservācija ir ļoti dārgi ilgtermiņa pasākumi, tādēļ konservācijas un restaurācijas stratēģijas, kā arī prioritāšu izvēle ir ļoti svarīga. Šajā pētījumā tiek piedāvāta nedestruktīva akmens materiāla dēdēšanas novērtēšanas metode, kas balstās uz augstas izšķirtspējas fotodokumentācijas analīzi. Savukārt, iegūto rezultātu interpretācija un to telpiskā vizualizācija kalpo par drošu pamatu būves saglabātības pasākumu izstrādei nepieciešamo secinājumu izdarīšanai.

Atslēgvārdi: 3D modelis, dēdēšanas veidi un intensitāte, pazīmju katalogs, piramīda, akmens būves.

Summary

The continuous deterioration of historical stone monuments mainly due to weathering is a growing concern. Precise documentation of the monument becomes very important for elaboration of sustainable monument remedy and preservation plan. This study offers non-destructive stone material weathering assessment method that is based on high resolution photo documentation analysis. The interpretation of the results obtained and their spatial visualisation forms a stable basis to make conclusions necessary for elaboration of efficient monument preservation strategy.

Keywords: 3D model, *weathering types and intensities, feature catalogue, pyramid, stone monuments.*

Ievads

No akmeņiem veidotās būves neatkarīgi no izmantotā akmens materiāla veida un tā sākotnējās kvalitātes ir pakļautas ārējo apstākļu ietekmei un zaudē savas īpašības. Šādu procesu, kurā fiziskas vai ķīmiskas iedarbības rezultātā notiek iežu īpašību

maiņa un iežu pakāpeniska sairšana, visbiežāk sauc par dēdēšanu. Mūsdienās, pētot akmens būves, galvenokārt tiek novērtēta to saglabātības pakāpe ar mērķi noteikt potenciālos draudus būves stabilitātei un izstrādāt atbilstošus būves konservācijas plānus (Grimmer 1984; Alvarez de Buergo 2002). Ir izstrādātas daudzas dēdēšanas novērtēšanas shēmas un klasifikācijas; tikai kultūrvēstures pieminekļu pētījumu vajadzībām to skaits ir mērāms daudzos desmitos (Verges-Belmin 2008; Doehne and Price 2010 u.c.). Gandrīz visas šīs dēdēšanas novērtēšanas sistēmas prasa tiešu kontaktu ar pētāmo materiālu, paraugu ņemšanu un tiešus instrumentālus pētījumus (Fitzner and Heinrichs 2002; Fitzner 2004). Tās ir arī ļoti darbietilpīgas un dārgas. Tādēļ ir nepieciešams izstrādāt akmens pieminekļu nedestruktīvas pētniecības metodes, kuras ir pieņemamas darbam kultūrvēstures pieminekļos, kuros tieši novērojumi nav iespējami. Ievērojams šādu pieminekļu skaits ir Ēģiptē, kur Gīzas un Sakāras plato atrodas vairāki desmiti pasaules nozīmes kultūrvēstures pieminekļi un to saglabāšanai ir nepieciešami pieminekļu esošā stāvokļa novērtējumi un prognozes.

Pētījuma mērķis ir izstrādāt seno pieminekļu akmens materiāla dēdēšanas atpazīšanas un novērtēšanas pazīmes, kas būtu nosakāmas ar nedestruktīvām metodēm, pārbaudāmas dabā un ļautu tās interpretēt ar mērķi atvieglot pieminekļu rekonstrukcijas stratēģiju un plānu izstrādi. Izvēlēta pētījumu teritorija ir Sakāras plato Ēģiptē, kur atrodas ļoti daudzveidīgi Senās Ēģiptes akmens pieminekļi un objektīvi ir nepieciešams atbalsts UNESCO pasaules matojuma kultūrvēstures pieminekļu saglabāšanai.

Pētījumu objekts

Galvenais pētījumu objekts ir valdnieka Džosera Pakāpju piramīda Sakārā, Ēģiptē. Tā ir būvēta aptuveni pirms 4600 gadem. Džosers (Djoser) ir Senās Ēģiptes apvienotās valsts III dinastijas pēdējais un arī mūsdienās pats zināmākais valdnieks, kurš valdīja tikai 19 gadus (2667.–2648. g. p.m.ē.) (Shaw 2003). Piramīda ir sarežģīta inženierbūve, kas savu pašreizējo izskatu ir ieguvusi pakāpenisku pārbūvju rezultātā un to nav saudzējis arī laiks – tās eksponētā virsma daudzviet ir bojāta. Piramīdas izveides gaitā senas un ļoti lielas solveida virszemes kapenes (mastaba) sākotnēji tika paplašinātas divos posmos, kurus noslēdz četrpakāpju piramīdas izbūve, vīrs kuras vēlāk tika izbūvēta vēl lielāka un plašāka sešpakāpju piramīda. Kopumā ir atpazīstamas piecas piramīdas būvniecības stadijas. Daudzas pazīmes norāda, ka vismaz daļēji Džosera piramīda no ārpuses ir tikusi apdarināta ar vietējā kaļķakmens plāksnēm.

Pakāpju piramīda ir veidota no atšķirīgu izmēru kaļķakmens blokiem, kuriem ir dažāda kvalitāte un saglabātības pakāpe. Mūsdienās ir konstatējami nozīmīgi akmens materiāla bojājumi un būve ir vairākkārtīgi remontēta un rekonstruēta kā senajos laikos, tā arī pagājušajā gadsimtā. Izceļama ir tieši fiziskās dēdēšanas nozīme un akmens materiāla masas un kvalitātes zudums. Netieši šos rādītājus var novērtēt pēc dēdēšanas veidu izpausmēm un to intensitātes.

Mūsdienās piramīda nav pieejama tiešiem pētījumiem, kas ierobežoja metožu izvēli un iespējas instrumentāli un analītiski novērtēt daudzus raksturlielumus. Tādēļ par pamata informācijas avotu pētījumam kalpoja vairākkārtīgi veiktā piramīdas fasāžu fotodokumentēšana un iegūto datu fragmentāra pārbaude dabā, neizmantojot

destruktīvas pētniecības metodes. Tādējādi tika iegūts ļoti plašs arhīvs, tomēr tā materiālu apstrāde izrādījās apgrūtināša interpretācijas subjektivisma, kā arī daudzu neviennozīmīgi interpretējamu laukumu dēļ, kas izrietēja no dažādu identifikācijas metožu (Arnold *et al.* 1980; Franke *et al.* 1998; Grassegger 1999; Verges-Belmin 2008) adaptācijas mēģinājumiem. Jāņem vērā arī Džosera piramīdas visai ievērojamie izmēri (pamatne ir 121 x 109 m un augstums sasniedz 63 m, kas kopā veido aptuveni 11 938 m² piramīdas eksponēto fasāžu virsmu laukumu), kā rezultātā ne visi iegūtie attēli ir vienkāršoti savstarpēji salīdzināmi. Tādēļ fotodokumentācijas kvalitatīvai analīzei bija nepieciešams izstrādāt atbilstošu pētniecības metodiku.

Pētījumu metodes pilnveide

Apzinoties, ka tik liela objekta detalizēta izpēte apjomīgo darbu dēļ ir visai apgrūtināša, metodiskas ievirzes pētījumi sākotnēji veikti pētījumiem vieglāk pieejamos objektos, kas atrodas netālu no Džosera piramīdas un ir veidoti no līdzīga sastāva akmens materiāla (citas Džosera piramīdas kompleksa būves, Unis piramīdas drupas Sakārā, Gīzas piramīdas, Snofru Sarkanā un „Liekta” piramīda Dašūrā). Šie pētījumi norādīja, ka dēdēšanas veidi un to identifikācijas pazīmes visos šajos objektos ir līdzīgi un vairumā gadījumu tās ir nosakāmas pietiekami precīzi arī fotodokumentācijā. Kopā tika izdalīti vairāk nekā 30 dažādi dēšanas veidi, to mijiedarbības pēdas un atbilstošas dēdēšanas intensitātes, kuras pārbaudot dabā ne vienmēr bija droši un viennozīmīgi identificējamās. It īpaši svarīgi, ja pētāmā objekta atsevišķas daļas atrodas dažādos attālumos no novērotāja, kas veic fotofiksāciju. Tādēļ bija nepieciešams veikt pazīmju klasifikācijas vienkāršošanu līdz salīdzinoši nelielam dēdēšanas veidu skaitam, kas ir atpazīstamas un kartējamās visās pētījuma objekta fasādēs, nevis tikai ierobežotā testa laukumā. Šāda pieeja ļāva ierobežot novērojumu subjektivitāti, kā arī apzināt pazīmju izpausmju daudzveidīgumu un nodalīt pētījumu objektam kopumā raksturīgās un tipiskās pazīmes.

Klasifikācijas vienkāršošanai un pārbaudēm tika veikta dēdēšanas veidu un intensitātes salīdzināšana ar citu pētnieku darbiem iepriekšēji apzinātos parauglaukumos Hufu piramīdā Gīzā un senajā mošejas akmens būvē Kairā. Šādi pētījumi tika veikti, salīdzinot mūsu pētījuma datus šajos objektos ar B. Ficnera veiktiem dēdēšanas instrumentāliem mērījumiem, laboratorijas pārbaudēm un izdalītiem dēdēšanas veidiem un to intensitātēm (Fitzner and Heinrichs 2002; Fitzner 2004). Iegūtie pētījumu rezultāti uzrādīja augstu atkārtojamību un datu korelāciju ar B. Ficnera instrumentāliem pētījumiem un atbilstību novērojumiem dabā (Kukela and Seglins 2011).

Arī turpmākie salīdzinājumi uzrādīja augstu fotodokumentācijas analīzes ticamību un interpretācijas atkārtojamību, ja tiek izdalīts mazāks skaits dēdēšanas veidu un tiek piemērota vienāda pieeja dēdēšanas intensitātes novērtēšanā. Šie pētījumi ļāva izstrādāt dēdēšanas veidu un intensitātes katalogu darba versijas pētījumu uzsākšanai Džosera piramīdā.

Dēdēšanas veidu detalizēta identifikācija tika veikta dabā pārbaudītos parauglaukumos, kā arī turpmāk manuāli interpretējot augstas izšķirtspējas fotodokumentāciju. Pētījumā tika novērtēta visās piramīdas fasādēs katra eksponētā bloka virsmas saglabātība jeb bojājumi dēdēšanas rezultātā. Papildus tika novērtēta

arī būvblokus savstarpēji saistošā cementa veidi un to saglabātība (Kukela and Seglins 2012). Analīzes gaitā papildus tika vērtēta izmantoto būvbloku kvalitāte, kā arī tās atšķirības dažādās piramīdas izveides fāzēs. Par akmens būvbloku kvalitātes novērtēšanas kritērijiem tika noteikti bloku izmēri (izmēru dažādība, variācijas) un izvēlēta materiāla vienveidīgums (viena sastāva un īpašību akmens materiāla atlase), bloku virsmas apstrāde (neapstrādāts, noskaldīts bloka šķautnes, apstrādātas visas bloka šķautnes, nogludināta bloka virsma) un bloku iepriekšēja apstrāde, paaugstinot to kvalitāti (nodalīts viegli dēdējošs mālaino iežu slānis). Noslēdzot pētījuma pirmo posmu, sākotnējais dēdēšanas pazīmju katalogs tika papildināts un visiem noteiktiem dēdēšanas veidiem to izpausmes intensitāte tika novērtēta 5 ballu (pakāpju) sistēmā, kas ļauj ievērojami vienkāršot dēdēšanas novērtēšanas procedūru.

Dēdēšanas novērtēšanas piemēru katalogs

Pēc aprobācijas un pārbaudēm dabā izveidotā dēdēšanas veidu un intensitātes sistēma tika papildināta ar Džosera piramīdas eksponēto būvbloku virsmas dēdēšanas raksturīgu piemēru katalogu. Šāda piemēru kataloga izveide ir visai sarežģīts uzdevums, jo tajā ir jāatspoguļo raksturīgais ne tikai visās četrās eksponētās fasādēs izvietotiem tūkstošiem akmens bloku, bet arī dēdēšanas pazīmju atpazīstamās iezīmes neatkarīgi no piramīdas būvniecības posma. Tādēļ dēdēšanas piemēru attēlu katalogs tika izstrādāts vairākos posmos – sākotnēji tika apzināti visi atpazīstamie dēdēšanas veidi, tad pārbaudīta to sastopamība piramīdas visās fasādēs, atpazīstamība parauglaukumos dabā un fotodokumentācijā. Noslēgumā tika veikta izdalīto dēdēšanas veidu un intensitātes pakāpju ģeneralizācija. Kopumā tas ļāva izstrādāt valdnieka Džosera piramīdas fasāžu bloku virsmas dēdēšanas piemēru katalogu, kas aptver vairākus raksturīgus dēdēšanas veidus (noapaļošanās, virsmas noslāņošanās un akmens materiāla zudums). Katram no šiem dēdēšanas veidiem tika noteiktas 5 dēdēšanas izpausmes intensitātes. Tās īsumā ir raksturotas turpmāk, un šos aprakstus papildina atbilstoši piemēru attēli (1.–3. att.).

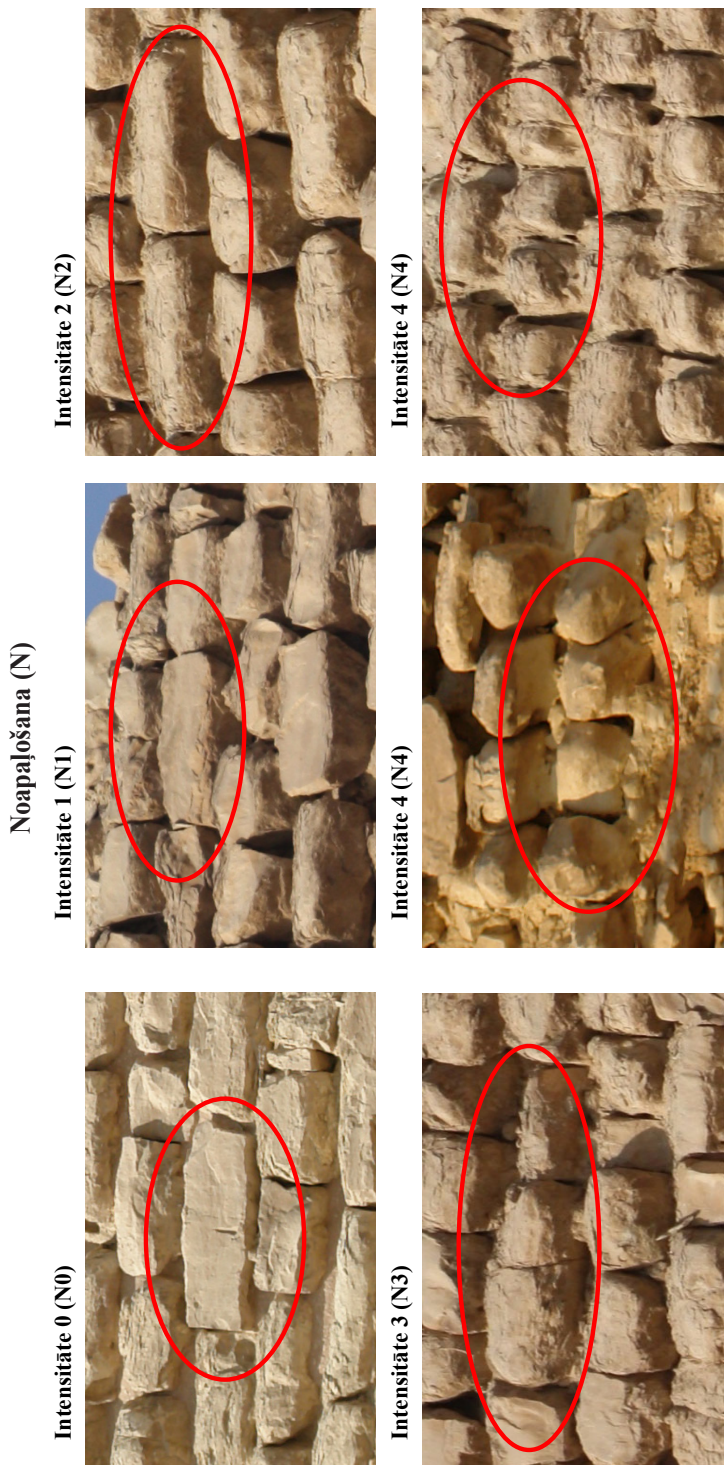
Noapaļošanās (N)

Dēdējuma formām ir raksturīgas sākotnējo taisnstūra akmens bloku virsmas stūru un skaldņu izmaiņas, materiāla viendabīguma zudums, kas ir atpazīstams kā būvbloku eksponēto virsmu stūru noapaļojumi. Šis dēdēšanas veids ir vizuāli konstatējams uz bloka eksponētās virsmas un šķautnēm (īpaši bloka stūros). Vizuāli dabā un fotodokumentācijā droši ir atpazīstamas un savstarpējos salīdzinājumos izmantojamas tikai 4 dēdēšanas intensitātes pakāpes.

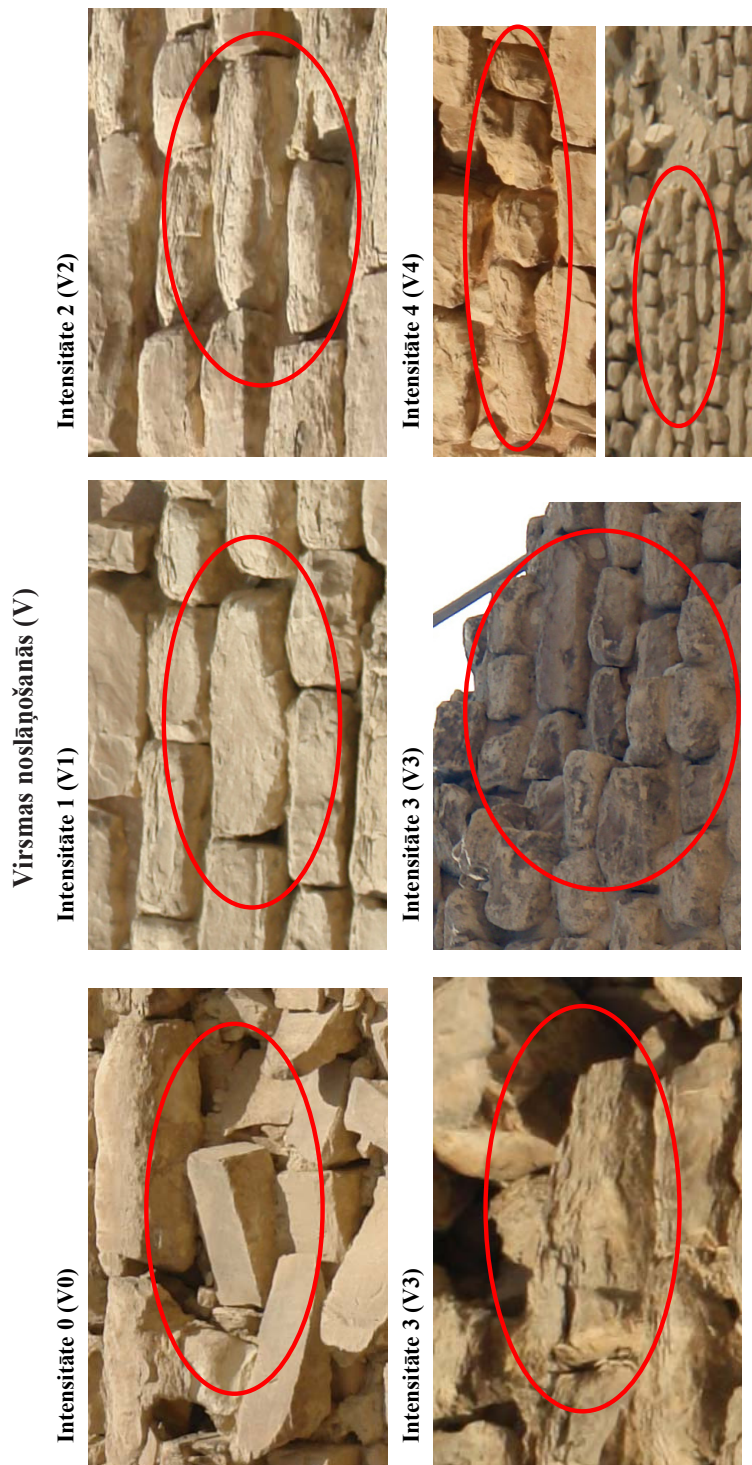
0. intensitātes pakāpe norāda uz nenozīmīgām pārmaiņām bloka virsmā, tomēr izdalītais dēdēšanas veids ir atpazīstams. Raksturīgākās pazīmes ir skaidri atšķirami bloku taisnie stūri, kas ļauj novērtēt izmantotā būvbloka sākotnējos izmērus un formu.

1. intensitātes pakāpe norāda, ka bloku eksponētā virsma un sānu šķautnes ir nedaudz noapaļotas, bet viens vai vairāki bloka stūri vēl ir atpazīstami.

2. intensitātes pakāpe apzīmē tādu bloka eksponētās virsmas dēdēšanas intensitāti, kura ir skārusi visas bloka šķautnes, visiem būvbloka stūriem ir konstatējams noapaļojums, vairs nav iespējams rekonstruēt sākotnējos bloku izmērus, bet paša bloka apjoms ir sarucis nedaudz.

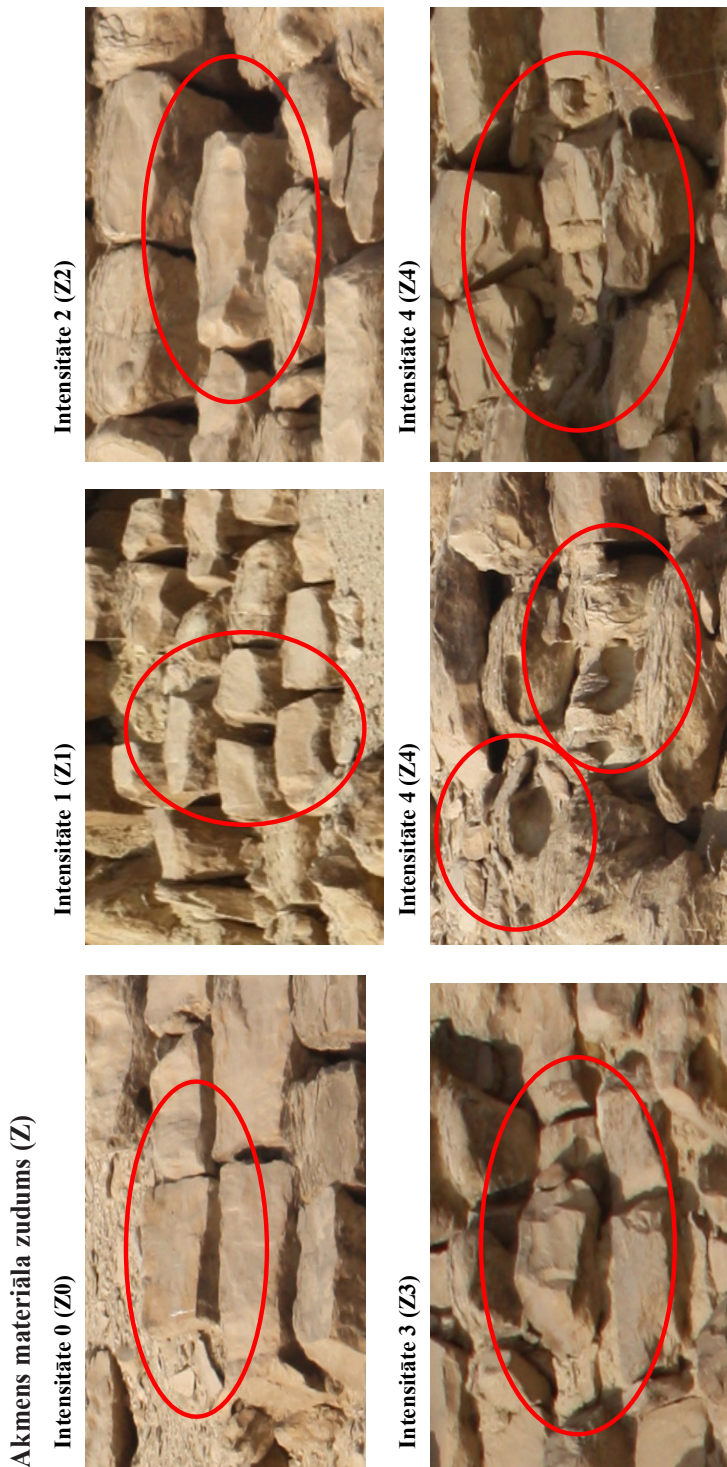


*I. attēls. A. Džosera piramīdas fasāžu bloku virsmas dēdēšanas piemēru katalogs. (Noapaļošana.)
Figure 1. A. Catalogue of samples of stone block weathering on the facades of Djoser's Pyramid (Rounding (N)), designation of intensities from 0 to 4 (N0-N4).*



2. attēls. B. Džosera piramīdas fasāžu bloku virsmas dēdēšanas piemēru katalogs. (Virsmas noslāpošanās.)

Figure 2. B. Catalogue of samples of stone block weathering on the facades of Djoser's Pyramid (Back weathering (V)), designation of intensities from 0 to 4 (V0-V4).



3. attēls. C. Džosera piramīdas fasāžu bloku virsmas dēdēšanas piemēru katalogs (Akmens materiāla zudums.)
Figure 3. C. Catalogue of samples of stone block weathering on the facades of Djoser's Pyramid (Loss of stone material (Z)), designation of intensities from 0 to 4 (Z0-Z4).

3. intensitātes pakāpe norāda, ka dēdēšana ir būtiski skārusi gan būvbloka eksponēto virsmu un stūrus, gan arī tā šķautnes; bloks ir mainījies izmērus un tā vizuāli atpazīstamā forma ir kļuvusi ovāla, ieapaļa vai apaļa un būvbloka apjoms ir ievērojami samazinājies.

4. intensitātes pakāpe norāda uz dēdēšanas būtiski skartu bloku, kuram ir būtiski skartas šķautnes un bloka stūri vairs nav atpazīstami; bloks ir ieguvis ieapaļu vai ovālu formu, un ir vērojams būtisks bloka apjoma samazinājums.

Virsmas noslāņošanās (V)

Dēdēšanas veidam ir raksturīga akmens bloka pakāpeniska sadalīšanās slāņos, kas var skart gan bloka šķautnes, gan arī bloka eksponēto virsmu, un nereti šāda dēdēšanas veida ietekme ir izsekojama arī bloka iekšienē.

0. intensitātes pakāpe norāda, ka būvbloks ir saglabājis savu sākotnējo formu un izskatu, uz tā šķautnēm un sānu skaldnēm vizuāli nav atpazīstama dēdēšanas ietekme, bet bloka eksponētā virsmā iezīmējas slāņi, kas ir paralēli zemes virsai. Šie vizuāli atpazīstamie slāņi nav saistīti ar būvbloka dabisko tekstūru un struktūru.

1. intensitātes pakāpe apzīmē bloku, kura šķautnēs un eksponētā virsmā ir vērojama slāņu veidošanās atsevišķos būvbloka laukumos, joslās, neregulāras formas fragmentos un minētās pazīmes klāj nelielu bloka daļu.

2. intensitātes pakāpe norāda, ka uz bloka eksponētās virsmas un šķautnēm ir novērojama akmens materiāla kārtu veidošanās visā bloka garumā, skarot ievērojamu bloka eksponētās virsmas daļu.

3. intensitātes pakāpe apzīmē bloku, kura eksponētā virsmā un šķautnēs novērojamā materiāla noslāņošanās veido vairākas kārtas visā bloka eksponētās virsmas garumā un šīs kārtas skar praktiski visu bloka virsmu.

4. intensitātes pakāpe norāda uz bloku, kura eksponētā virsma un šķautnes ir klātas ar noslāņotā akmens materiāla kārtām. Šis noslāņojums pilnībā sedz visu eksponēto bloka virsmu. Tāpat ir konstatējams būtisks bloka šķautņu deformējums, bloka sākotnējā forma un izmēri vairs nav atpazīstami.

Akmens materiāla zudums (Z)

Vispārīgā formā dēdēšanas veids izpaužas kā akmens materiāla virsmas un šķautņu fragmentu zudums, t.i., šādas dēdēšanas rezultātā tiek zaudēts pats bloku veidojošais akmens materiāls.

0. intensitātes pakāpe raksturo bloku ar vizuāli neatpazīstamām izmaiņām nevis bloka eksponētā virsmā, ne arī tā ar šķautnēs. Konstatētie negludumi, virsmas nelīdzenumi tiek interpretēti kā būvbloka sākotnējās apstrādes pēdas, tomēr vismaz dažas no tām norāda uz nevienmērīgas dēdēšanas intensitātes pazīmēm (sīkas plaisas, nevienādas nokrāsas veidošanās laukumos starp sīkām plaisiņām, u.tml.).

1. intensitātes pakāpe norāda uz bloku, kura eksponētā virsmā un šķautnēs ir atpazīstami nodrupuši un atlūzuši salīdzinoši nelieli būvbloka fragmenti, galvenokārt veidojot izteiktāki nelīdzenas vienu vai vairākas bloka šķautnes.

2. intensitātes pakāpe apzīmē bloka virsmu, kur konstatējami nošķelti un nodrupuši ievērojami akmens materiāla fragmenti, kas maina bloka formu un deformē tā sākotnējās šķautnes un virsmu.

3. intensitātes pakāpe norāda uz bloka ievērojama apjoma masas izmaiņām, zaudējot atsevišķus gabalus, fragmentus un tas ir konstatējams gan bloka šķautnēs, gan arī bloka eksponētās virsmās. Šāda intensitātes pakāpe norāda uz dēdēšanas procesa būtisku ietekmi uz akmens bloka izturību un nestspēju.

4. intensitātes pakāpe norāda, ka dēdēšanas rezultātā būvbloks ir zaudējis būtisku akmens materiāla apjomu, kā arī savas sākotnējās īpašības. Uz šo intensitātes pakāpi norāda arī dziļas kavernas un dobumi bloka eksponētā virsmā, šādi bojājumi var aizņemt būtisku vai pat visu akmens bloka eksponēto daļu.

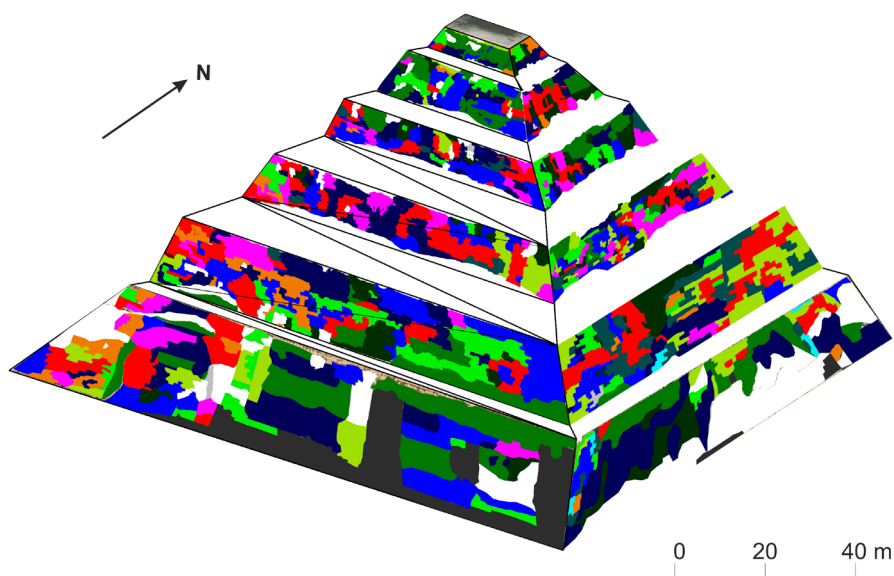
Izstrādājot klasifikatoru un dēdēšanas pazīmju piemēru katalogu tika konstatēti arī citi dēdēšanas veidi, tomēr to nozīme kopējā novērtējumā nepārsniedza 1%. Par to klātbūtni pētījuma gaitā bija iespējams pārliecināties tikai dažos gadījumos. Pēc mūsu domām, šāds citu novērtējumu skaits ir uzskatāms par maznozīmīgu un neietekmē pētījuma kvalitāti.

Rezultāti

Izstrādātais valdnieka Džosera piramīdas fasāžu bloku virsmas dēdēšanas piemēru katalogs stipri atvieglo dēdēšanas veidu un intensitātes diagnostiku, jo īpaši mūsu pētījuma gadījumā, kad analizējamo laukumu izmēri ir visai ievērojami. Pētījuma gaitā manuāli tika apstrādāti visi Džosera piramīdas fasādes raksturojošie fotodokumenti (apmēram 2,3 tūkst. uzņēmumu), tomēr to tālāka interpretācija ir visai apgrūtināta. Tādēļ piramīdas eksponētās virsmas atveidei tika izstrādāts piramīdas ģeotelpiskais modelis, izmantojot datorprogrammu MicroStation V8i. Tas ļāva ne tikai izvietot tajā interpretēto fotodokumentāciju, bet arī veikt diagnosticēto dēdēšanas veidu un intensitātes laukumu savstarpēju salīdzinājumu.

Interpretētie dati piramīdas ģeotelpiskajā modelī (4. att.) uzskatāmi liecina, ka dēdēšanas veidu sadalījumam pa piramīdas fasādēm nav kādas atpazīstamas likumsakarības. Arī dēdēšanas intensitātes kategoriju izvietojums piramīdas fasādēs veido sarežģītu attēlu un kopumā nepastāv kāds raksturīgs dēdēšanas veids vai tās intensitāte, kas būtu raksturīga tikai vienai atsevišķai fasādei vai kādai tās noteiktai daļai. Vienlaikus ļoti izteiktas ir maksimālās dēdēšanas pakāpes piramīdas fasāžu malās, stūros, kā arī būves lūzumu un plaisu zonu tuvumā ar maksimumiem šādu lūzumu krustošanās gadījumos. Šādas atkarības konstatētas visā piramīdā, tomēr tās pašlaik nevar tikt detalizētas, jo piramīdas fasādēs notiek rekonstrukcijas darbi, kuru gaitā visvairāk bojātie akmens bloki tiek aizvietoti ar jauniem.

Tomēr iegūto datu vienkāršota statistiska analīze ļauj atpazīt arī vairākas citas likumsakarības. Pat neņemot vērā visai sarežģīto dēdējuma izvietojumu uz katras no piramīdas fasādēm, to kopējā dēdēšanas skartā platība ir visai atšķirīga. Tā dienvidu fasādē būvakmens eksponētās virsmas noslāņošanās un materiāla zudums ir skāris 49,78% virsmas (1709,7 m²), bet blakus esošā austrumu fasādē – 50,36% (1213,30 m²), rietumu fasādē 39,96% (1145,74 m²) un ziemeļu fasādē 58,69% (1893,77 m²). Savukārt, visai izplatītā bloku noapaļošanās ir salīdzinoši konstants lielums, kas visā piramīdas fasāžu virsmas laukumā mainās 25–33% robežās un kā atsevišķs dēdēšanas veids nav nozīmīgs turpmākai detalizētākai analīzei.



Dēdēšanas veidi	Intensitāte 0	Intensitāte 1	Intensitāte 2	Intensitāte 3	Intensitāte 4
Noapaļošanās (N)					
Virsmas noslāņošanās (V)					
Akmens materiāla zudums (Z)					

4. attēls. Džosera piramīdas fasādēs konstatēto dēdēšanas veidu un intensitātes atspoguļojums piramīdas 3D modeli. Baltā krāsā atspoguļots nobiru slānis.

Figure 4. Visualization of weathering types and their intensities on the facades of the Djoser's Pyramid on the 3D model. The scree layers are indicated in white.

Weathering types – Rounding (N), Back weathering (V), Loss of stone material (Z); designation of intensities from 0 to 4.

Fotodokumentācijas analīze apstiprina dabā novērojamo: visvairāk bojāta (arī daudzo rekonstrukciju dēļ) ir piramīdas apakšējā jeb pirmā pakāpe, kurā virsmas noslāņošanās un materiāla zudums sasniedz 61,5% ziemeļu fasādē, bet vēl pirms dažiem gadiem daļēji ar smiltīm klātā rietumu fasādē – tikai 20,6%. Tādēļ formāli savstarpēji salīdzināt un novērtēt pirmo pakāpi nav lietderīgi, jo šāds salīdzinājums vairāk raksturo veikto rekonstrukciju kvalitāti nekā dēdēšanas procesu nozīmīgumu. Diemžēl līdz šim šādas rekonstrukcijas nekad nav tikušas dokumentētas un nav zināms, kad un kura fasādes daļa ir tikusi labota, vai arī, kad ir tikuši aizvietoti akmens bloki, kas izslēdz iespēju veikt pamatotu dēdēšanas procesu atītstības ātruma izvērtējumu.

Secinājumi

Veiktais sistemātiskais pētījums ļāva izstrādāt un aprobēt eksponēto Džosera piramīdas fasāžu akmens bloku virsmu dēdēšanas veidu un intensitātes klasifikatoru, kas balstās uz nedestruktīvu pētniecības metodi – detalizētu fotodokumentācijas analīzi. Izstrādātais klasifikators ir papildināts ar izdalīto vienību aprakstu un

raksturīgu attēlu piemēriem. Šāds novērtēšanas paņēmieni ir pamatots ar daudzām pārbaudēm dabā un ir sekmīgi izmantojams akmens būvju novērtēšanai Sakāras plato nekropolē, iespējams, ar nebūtiskām izmaiņām un papildinājumiem – arī Gīzas plato akmens būvju novērtēšanā. Savukārt, metodiskais paņēmieni līdzīgu klasifikatoru un piemēru katalogu izstrādei var tikt izmantots kultūrvēstures objektu pētījumos arī citviet pasaulē.

Pētījumā iegūtie rezultāti dažos aspektos, piemēram, dēdēšanas ātrums, vienmērība u.tml., nav interpretējami viennozīmīgi, jo faktiski ir veikta tikai metožu aprobācija un priekšizpēte, un nākotnē būtu nepieciešami papildu pētījumi pašā objektā. Pamatotākai interpretācijai papildus ir nepieciešami pētījumi arī pašā piramidā, ne tikai tās fasādēs.

Būves fasādes eksponētais akmens materiāls ir dēdējis un, izmantojot piramīdas 3D modeli, ir iespējams skaitliski novērtēt ne tikai dominējošos dēdēšanas veidus un intensitāti, bet arī to telpisko izvietojumu un saistību ar citiem vērtējamiem parametriem. Šādi izvērtējumi līdz ar nepietiekami apzinātu cementa materiālu īpašību izziņāšanu būtu veicami, pirms būvē tiek atjaunoti rekonstrukcijas darbi.

Pateicības

Pētījums veikts ar Eiropas Sociālā Fonda atbalstu projektā “Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē”.

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

- Alvarez de Buergo, M., Gonzalez, F. 2002. Characterizing the construction materials of a historic building and evaluating possible preservation treatments for restoration purposes. *Special Publication*, Geological Society of London, pp. 241–254.
- Arnold, D. 1999. When the Pyramids Were Built: Egyptian Art of the Old Kingdom. *Book. Rizzoli International Publications*, p. 144.
- Doehne, E., Price, C.A. 2010. Stone conservation. An overview of current research. *Book. The Getty Conservation Institute*, USA, p.160.
- Fitzner, B., Heinrichs, K. 2002. Damage diagnosis on stone monuments – weathering forms, damage categories and damage indices. In Prikryl, R., Viles, H.A. (ed.): *Understanding and managing stone decay*, Proceedings of the International Conference „Stone weathering and atmospheric pollution network (SWAPNET 2011)”, The Karolinum Press, Charles University, Prague, Czech Republic, pp. 11–56.
- Fitzner, B. 2004. Documentation and evaluation of stone damage on monuments. In Kwiatkowski, D., Löfvendahl, R. (ed.), *Proceedings of the 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, 27 June – 2 July 2004, Stockholm, Vol. II, ICOMOS, Sweden, pp. 677–690.
- Franke L., Schumann I., Van Hees R., Van der Klugt L., Naldini S., Binda L., Baronio G., Van Balen K., Mateus J. 1998. Damage Atlas, Classification of Damage Patterns Found in Brick Masonry. Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report European Commission, N°8, vol.2. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. 172 pp.
- Grassegger, G. 1999. Decay mechanisms of natural building stones on monuments: A review of the latest theories. In *Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen: Festschrift zum 60. Geburtstag von H.-W.Reinbard*, ed. C.U. Große, Stuttgart: IWB, pp. 54–81.

- Grimmer, A.E., (ed.) 1984. A Glossary of Historic Masonry Deterioration Problems and Preservation Treatments. *Book. National Park Service Preservation Assistance Division, Washington, DC.* 65 pp.
- Kukela, A., Seglins, V. 2011. Simplified Method of Assessment of Weathering on Historical Stone Monuments: An Example of El-Merdani Mosque, Cairo, Egypt. *Journal of Earth Sciences and Engineering*, Vol.1, Number 2, (2011), David Publishing, USA, pp. 82–90.
- Kukela, A., Seglins, V. 2012. Assessment of weathering of construction blocks and mortar in historical monuments. *Journal of Earth Sciences and Engineering*, Vol.2, Number 4, (2012), David Publishing, USA, pp. 235–240.
- Shaw, I. (ed.) 2003. The Oxford History of Ancient Egypt. *Book. Oxford University Press, Oxford.* 525 pp.
- Verges-Belmin, V., (ed.) 2008. Illustrated Glossary on Stone Deterioration Patterns. Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre. English-French version. Monuments & Sites 15. Paris: ICOMOS (International Council on Monuments and Sites) and ISCS (International Scientific Committee for Stone). 86 p.

**Augšējā devona Gaujas ūdens horizonta filtrācijas
koeficientu novērtējums**
*Estimation of Hydraulic Conductivity of Upper Devonian
Gauja Aquifer*

Eleonora Pērkone

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte
Alberta iela 10, Rīga, LV-1010
E-pasts: eleonora.perkone@lu.lv

Ilze Klints

Latvijas Universitāte, Fizikas un matemātikas fakultāte
Zeļļu iela 8, Rīga, LV-1002
E-pasts: ilzestankevica@inbox.lv

Tomas Saks

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte
Alberta iela 10, Rīga, LV-1010
E-pasts: tomas.saks@lu.lv

Aija Dēliņa

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte
Alberta iela 10, Rīga, LV-1010
E-pasts: aija.delina@lu.lv

Jānis Bikše

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte
Alberta iela 10, Rīga, LV-1010
E-pasts: bikshe.janis@gmail.com

Jānis Jātnieks

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte
Alberta iela 10, Rīga, LV-1010
E-pasts: deltazzx@gmail.com

Kopsavilkums

Pētījumā veikta augšējā devona Gaujas svītas ūdens horizonta filtrācijas koeficientu pētīšana un novērtēšana, pētot filtrācijas koeficienta un nogulumiežu granulometriskā un litoloģiskā sastāva saistību. Balstoties uz zināmām filtrācijas koeficientu un nogulumiežu litoloģiskā sastāva vērtību un datu sadalījuma likumsakarībām, Gaujas svītas izplatības laukumā tika izdalīti trīs apgabali ar atšķirīgām tos raksturojošām filtrācijas koeficientu vērtībām. Gaujas ūdens horizonta filtrācijas koeficientu vērtības un to sadalījums vērtību apgabalos tika novērtēts, izmantojot Baltijas artēziskā baseina (BAB) hidroģeoloģisko datormodeli un manuālās kalibrācijas jeb inversās modelēšanas metodi.

Atslēgvārdi: Baltijas artēziskā baseina hidroģeoloģiskais modelis, filtrācijas koeficients, Hāzena vienādojums, nogulumiežu litoloģiskais sastāvs.

Abstract

In this study correlation of hydraulic conductivity, deposit grain size distribution and lithology has been studied for the Upper Devonian Gauja aquifer in Latvia. Based on results of this study three areas with different characteristic values of hydraulic conductivity were distinguished in the distribution field of the Gauja aquifer. Estimation of characteristic hydraulic conductivity was achieved by using groundwater flow numerical model for the Baltic Artesian Basin (BAB).

Keywords: Hydrogeological model of Baltic Artesian Basin, hydraulic conductivity, Hazen equation, deposit lithology.

Ievads

Nogulumu filtrācijas īpašības ir viens no būtiskākajiem parametriem, kas raksturo nogulumu spēju laist cauri ūdeni un līdz ar to nosaka pazemes ūdeņu kustību noteiktos ģeoloģiskos apstākļos. Iežu un nogulumu filtrācijas īpašības, kas tiek izteiktas kā filtrācijas koeficients (K , m/dnn), raksturo pazemes ūdens plūsmu kapacitāti. Filtrācijas īpašības galvenokārt ietekmē dažādas nogulumu fizikālās, kā arī filtrējošā fluīda īpašības. Filtrācijas īpašību raksturojums ir priekšnoteikums veiksmīgai dažādu citu hidroģeoloģisko problēmu risināšanai.

Šajā pētījumā tika veikts Baltijas artēziskā baseina Latvijas daļas augšējā devona Gaujas svītai atbilstošā pazemes ūdeņu horizonta (turpmāk tekstā Gaujas horizonts) nogulumu ūdens filtrācijas īpašību jeb filtrācijas koeficientu novērtējums, apskatot to saistību ar nogulumu granulometrisko sastāvu un litoloģiju. Balstoties uz šo parametru saistības likumsakarībām, tika veikts mēģinājums Gaujas horizontam izdalīt vairākas raksturīgākās filtrācijas koeficienta vērtības. Filtrācijas koeficienta vērtību novērtējums tika veikts, izmantojot Baltijas artēziskā baseina (BAB) hidroģeoloģiskā datormodeļa pamatversiju (V1).

BAB hidroģeoloģiskais modelis aptver pazemes ūdens filtrācijas matemātisko modelēšanu visā artēziskā baseina tilpumā (Sennikovs et al. 2011). BAB ir komplicēta daudzslāņu hidroģeoloģiskā sistēma, kas pilnībā iekļauj Latvijas, Lietuvas, Igaunijas teritoriju, daļu Polijas, Krievijas un Baltkrievijas teritorijas, kā arī lielu daļu Baltijas jūras. To raksturo nokrišņu infiltrācija un nogulumiežu slāņu horizontālie un vertikālie filtrācijas koeficienti, kas nosaka to, kā pazemes ūdens plūsmas pārvietojas artēziskā baseina apgabalā (Sennikovs et al. 2011).

BAB modelī artēziskā baseina ģeoloģiskā struktūra izveidota izmantojot trīsdimensionālu galīgo elementu režģi, kas balstīts uz divdimensionāla trijstūru režģa (Virbulis et al. in print). Modelētā ģeoloģiskā struktūra sastāv no 42 slāņiem, sākot ar pamatklintāju līdz augšējam kvartāra nogulumu slānim.

Ir salīdzinoši daudz lauka un kamerālo metožu, ar kurām ir iespējams noteikt pazemes ūdens filtrācijas koeficientus. Lauka apstākļos iespējams izmantot traseru metodes, individuālu urbumu un urbumu grupas atsūkņēšanas metodes, kā arī ūdens iesūkņēšanu urbumos (Todd and Mays 2005; Maslov i Komov 1971), un citas metodes. Laboratorijā filtrācijas koeficientu nosaka ar dažādu filtrācijas iekārtu jeb permeamtru palīdzību, kuros principā tiek atkārtoti H. Darsī oriģinālie eksperimenti (Smith and Mullins 2000). Gadījumos, kad nav iespējams veikt iepriekšminētos lauka vai laboratorijas darbus, tiek izmantotas matemātisko aprēķinu metodes, kas

ļauj aprēķināt filtrācijas koeficientus, izmantojot datus par ieža granulometrisko sastāvu un porainību (Fetter 2001; Maldavs 1964). Kopumā pētījumu metožu izvēle lielākoties ir atkarīga no datu un resursu pieejamības. Filtrācijas īpašību pētījumu metodes iedalāmas četrās galvenajās grupās (Pliakas and Petalas 2011):

- 1) laboratorijas metodes (gan nogulumu daļiņu izmēru analīze, gan filtrācijas iekārtas testi);
- 2) maza mēroga *in situ* testi (urbumu, šurfu un citi testi);
- 3) liela mēroga *in situ* testi (ietver urbumu atsūkšanās darbus un liela mēroga traserēšanas eksperimentus);
- 4) citas metodes – ģeofizikālās, vizuālā novērtēšana, matemātiskā modelēšana.

Šajā pētījumā, lai izzinātu, raksturotu un novērtētu Latvijas devona Gaujas ūdens horizonta smilšakmeņu filtrācijas īpašības un filtrācijas koeficientus, galvenokārt tika izmantotas esošo filtrācijas koeficientu datu analīzes un matemātisko aprēķinu metodes. Datu novērtēšana tika veikta, izmantojot skaitliskās manuālās kalibrācijas jeb inversās modelēšanas (Carrera 2005) metodes. Pētījumu metožu izvēle ir pamatota ar faktu, ka pētījumi aptver visu Latvijas teritoriju un kopš teritorijas ģeoloģiskās un hidroģeoloģiskās izpētes pirmsākumiem ir uzkrāts ievērojams datu daudzums, kas iepriekš nav izmantots vienotai ūdens horizonta raksturošanai.

Pētījuma **mērķis** ir raksturot un projicēt augšējā devona Gaujas svītas smilšaino nogulumu filtrācijas koeficientu vērtību sadalījumu Latvijas teritorijā un, izmantojot Baltijas artēziskā baseina hidroģeoloģisko datormodeli, veikt šo vērtību kvalitatīvu novērtējumu.

Materiāli un metodes

Pētījuma gaitā tika veikta filtrācijas koeficienta (K) un iežu granulometriskā sastāva datu ievākšana, K analizēšana saistībā ar nogulumiežu granulometrisko un litoloģisko sastāvu, K vērtību aprēķināšana, izmantojot nogulumiežu granulometrisko sastāvu, horizonta raksturīgāko K vērtību apgabalu izdalīšana un to novērtēšana, izmantojot BAB matemātisko modeli.

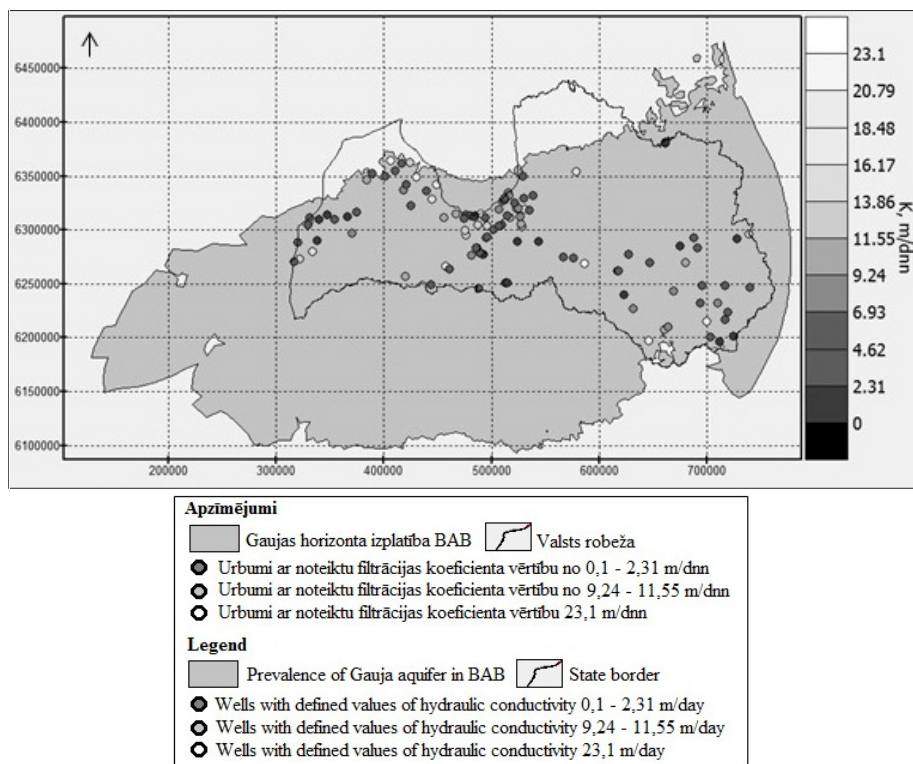
Liela daļa darbā izmantoto datu tika iegūti no Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra (LVĢMC) izveidotās urbumu datubāzes „URBUMI”, bet daļa filtrācijas koeficientu datu, kas iepriekš nebija iekļauta datubāzē, ir iegūta no LVĢMC ģeoloģijas fondu 1:200 000 un 1:50 000 mēroga kartēšanas pārskatiem un ģeoloģiskās un hidroģeoloģiskās izpētes un ūdensapgādes urbumu ierīkošanas pārskatiem. Granulometrisko analīžu dati iegūti no LVĢMC fondos esošajiem smago minerālu meklēšanas darbu pārskatiem un gāzes un naftas struktūru meklēšanas un izpētes darbu pārskatiem.

Kopumā Gaujas horizontā ierīkots nedaudz vairāk nekā 7300 urbumu, no kuriem filtrācijas koeficients ir noteikts 152 urbumos, bet granulometrisko analīžu rezultāti pieejami par 124 urbumiem. Filtrācijas koeficienta un granulometriskā sastāva sakarību novērtēšanai, tika izmantoti urbumu dati no 22 urbumiem, kuros ietilpst abu parametru vērtības.

Sākotnēji tika veikta esošo filtrācijas koeficientu vērtību kvalitatīva novērtēšana un par nederīgiem tika atzītas 6 filtrācijas koeficientu vērtības, kuras bija robežās no 23 līdz 66 m/dnn. Pie tam šīs vērtības iegūtas urbumos, kuros tika konstatēts sprostsliņa trūkums starp Gaujas horizonta smilšakmeņiem un augstāk iegulošajiem

kvartāra glaciofluviālajiem nogulumiem. Pārējās filtrācijas koeficientu vērtības 146 urbumos mainās robežās no 0,3 līdz 23 m/dnn (1. att.).

No kopējās urbumu datubāzes atlasot urbumus, kuros ir pieejami dati gan par filtrācijas koeficientiem, gan granulometrisku sastāvu, tika veikts šo abu parametru korelācijas mēģinājums, kur par korelācijas faktoru tika izvēlētas par 0,05 mm mazākas nogulumiežu daļiņas. Diemžēl jāsecina, ka urbumu skaits (22) ir nepietiekams, lai varētu runāt par pārliecinošām sakarībām starp šiem diviem parametriem, tāpēc turpmāk pētījumā tika izmantots urbumu litoloģiskais apraksts.



1. attēls. Filtrācijas koeficients (K , m/dnn) urbumos Gaujas horizontā Latvijā.
Figure 1. Hydraulic conductivity (K , m/day) in wells of the Gauja aquifer in Latvia.

Papildus jau esošajiem datiem filtrācijas koeficients tika aprēķināts, balstoties uz granulometrisku analīžu rezultātiem, tādējādi papildinot filtrācijas koeficientu datus par nedaudz vairāk nekā 70 ierakstiem (1. att.). Sākotnēji no granulometrisku analīžu datiem tika izrēķināts efektīvais daļiņu izmērs jeb d_{10} , kas norāda drupu graudu izmēru konkrētā paraugā, par kuru smalkāks materiāls sastāda 10% no visas parauga masas (Todd and Mays 2005). Bez tam efektīvais diametrs Gaujas horizonta nogulumiežiem tika aprēķināts kā $-d_{50}$ un d_{60} , kā arī tika aprēķināts grunts šķirotības koeficients (C_u). Nogulumu neviendabības koeficients ir attiecība starp d_{10} un d_{60} un to izsaka ar vienādojumu (Indāns 1986):

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1)$$

Hidroģeoloģiskajos aprēķinos visbiežāk tiek izmantots tieši d10 daļiņu izmērs (Fetter 2001), kā arī d50 un d60 (*ibid*).

Filtrācijas koeficienti no granulometriskā sastāva datiem tika aprēķināti, izmantojot Hāzena matemātisko vienādojumu:

$$K=Cd^2(0,7+0,03t) \quad (2)$$

Kur: K – filtrācijas koeficients (m/dnn);

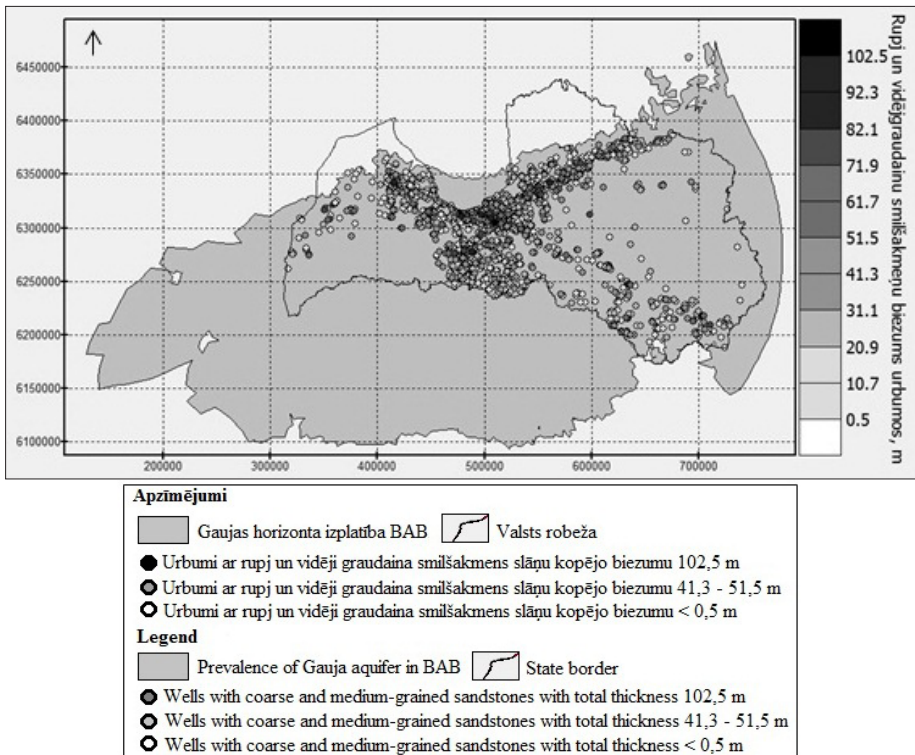
C – empīrisks koeficients, kas variē no 400 (mālos) – 1200 (labi šķīrotās smiltīs) (Fetter 2001);

d – efektīvais diametrs (mm);

t – ūdens temperatūra (°C);

$(0,7+0,03t)$ – temperatūras korekcija (Maldavs 1964).

Hāzena vienādojums tiek lietots neviendabīgu nogulumu filtrācijas koeficientu novērtēšanai un empīriskai aprēķināšanai, bet tas ir pielietojams arī gan smalkgraudainiem, gan rupjgraudainiem nogulumiem ar nosacījumu, ka nogulumu šķīrotības koeficients ir mazāks par 5 un efektīvais diametrs ir robežās no 0,1 līdz 3 mm (Vienken and Dietrich 2011; Odong 2007).

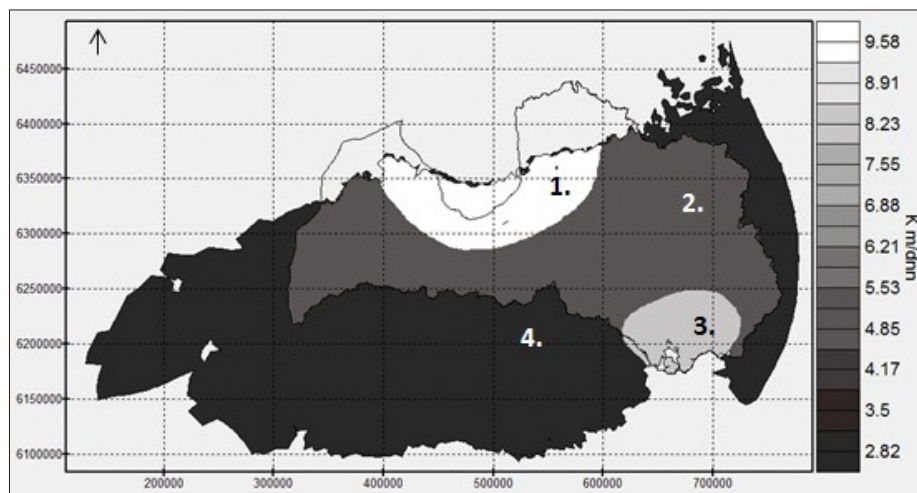


2. attēls. Rupjgraudaino un vidējgraudaino smilšakmeņu izplatība un to kopējais slāņu biezums Gaujas horizontā.

Figure 2. Distribution and thickness of coarse and medium-grained sandstones in the Gauja aquifer.

Nogulumiežu litoloģiskā sastāva un filtrācijas koeficienta saistības novērtēšana tika veikta nevis konkrētos urbumos, kur pieejami abu veidu dati, bet izdalot apgabalus jeb iecirkņus horizonta izplatības teritorijā, kur ir sastopami un izplatīti rupjgraudaini un vidējgraudaini (2. att.) smilšakmeņi un kur koncentrējas urbumi ar novērotiem augstākiem filtrācijas koeficientiem (1. att.). Tika arī apskatīts rupjgraudaino un vidējgraudaino nogulumiežu kopējais konstatētais biežums urbumos (2. attēls). Dati par rupj un vidējgraudaino smilšakmeņu biežumu tāpat, kā nogulumiežu litoloģiskie apraksti iegūti no urbumu seržu aprakstiem (LVĢMC).

Balstoties uz dabisko K vērtību un vidējgraudaino–rupjgraudaino nogulumiežu izplatības sadalījumu Latvijas teritorijā, Gaujas horizontā valsts robežās tika izdalīti trīs raksturīgo K vērtību apgabali (3. att.) – Gaujas-ziemeļu poligons ar K 9,59 m/dnn, Gaujas-Latvijas poligons ar K 5,52 m/dnn un trešais – Gaujas-Latgales poligons ar K 8,34 m/dnn. Pārējā horizonta BAB teritorijā, kas atrodas ārpus Latvijas robežām netika apskatīta datu trūkuma dēļ un veiktajos kalibrācijas aprēķinos tai tika piešķirta BAB modeļa V1 versijā definētā K vērtība – 2,82 m/dnn.



3. attēls. Izdalītie raksturīgāko filtrācijas koeficientu (K, m/dnn) vērtību apgabali Gauja horizontā.

Apzīmējumi: 1. – Gaujas-ziemeļu poligons, filtrācijas koeficients 9,59 m/dnn; 2. – Gaujas-Latvijas poligons, filtrācijas koeficients 5,52 m/dnn; 3. – Gaujas-Latgales poligons, filtrācijas koeficients 8,34 m/dnn; 4. – Gaujas horizonta izplatība Baltijas artēziskā baseina teritorijā, filtrācijas koeficients 2,82 m/dnn.

Figure 3. Divided characteristic hydraulic conductivity (K, m/day) value areas in Gauja aquifer.

Legend: 1. – Gaujas-ziemeļu area, hydraulic conductivity 9,59 m/day; 2. – Gaujas-Latvijas area, hydraulic conductivity 5,52 m/day; 3. – Gaujas-Latgales area, hydraulic conductivity 8,34 m/day; 4. – Prevalence of Gauja aquifer in territory of Baltic Artesian Basin, hydraulic conductivity 2,82 m/day.

Pētījumā iegūtās filtrācijas koeficientu vērtības tika novērtētas, izmantojot BAB matemātiskā modeļa aprēķinu rezultātus, proti, izmantojot jauno K vērtību sadalījumu, tika veikta tā atkārtota manuālā kalibrācija jeb inversā modelēšana (Carrera 2005), un tika novērtēta šo jauno vērtību ietekme uz aprēķinu rezultātiem. Inversā

modelēšana no parastas modelēšanas atšķiras ar to, ka šajā gadījumā, izmantojot iegūto modeļa atrisinājumu, tiek meklēti modeļa parametri, nevis otrādi (Carre-ra 2005). Veicot kalibrāciju, kā skaitlisks rezultāts tiek iegūta mērķa funkcija, ko veido dabā novērotās un modelī aprēķinātās pazemes ūdens līmeņu starpības (Timu-hins et al. 2011).

Zinot Gaujas horizonta ģeoloģisko uzbūvi (Kurshs 1992), kalibrācijas aprēķinos tika izmantotas filtrācijas koeficienta vērtības, kas raksturo slāņa virsmai paralēlu plūsmu jeb horizontālās filtrācijas koeficientu vērtības. Filtrācijas koeficientu vērtības, kas raksturo vertikālo nogulumu ūdenscaurlaidību jeb pret slāņa virsmu perpendikulāras plūsmas, tika pieņemtas desmit reizes mazākas par horizontālajām K vērtībām, jo dabiskā anizotropā ģeoloģiskajā vidē, šķidrums kustoties paralēli slāņa virsmai, filtrācijas koeficienta vērtības var būt 2 līdz pat 20 reizes lielākas par tām vērtībām, ko nosaka ūdens kustība perpendikulāri pret slāņa virsmu (Hua Chen 2000). Vertikālās filtrācijas koeficientu vērtības netika atsevišķi kalibrētas.

Rezultāti un diskusija

Gaujas horizonta filtrācijas koeficients, izslēdzot iespējami kļūdainās vērtības, mainās robežās no 0,3 – 23,1 m/dnn. Horizontu vidējā raksturojošā vērtība ir ~7–8 m/dnn. Zinot filtrācijas koeficienta vērtību amplitūdu izkliedi un Gaujas horizonta nogulumiežu neviendabību (Kurshs 1992), šāda vērtība ir pārāk vispārināta, lai tā tiktu izmantota modeļaprēķinos kā visu horizontu raksturojoša. Lai atainotu nogulumu reālās ūdens filtrācijas īpašības, Gaujas svītā un arī citās nogulumiežu slāņkopās nepieciešams izdalīt vairākus poligonus ar raksturīgākajiem filtrācijas koeficientiem.

Balstoties uz Gaujas horizonta filtrācijas koeficientu vērtību sadalījumu un nogulumiežu litoloģiskajām īpašībām, Gaujas horizontā izdalītajiem filtrācijas koeficientu apgabaliem iespējams piešķirt sekojošas filtrācijas koeficientu vērtības: Gaujas-ziemeļu poligonam 9,59 m/dnn, 5,52 m/dnn Gaujas-Latvijas un 8,34 m/dnn Gujas-Latgales poligonā. Veicot vairākus manuālās kalibrācijas aprēķinus ar mainīgu horizonta horizontālo filtrācijas koeficientu vērtību, tika novērotas mērķa funkcijas izmaiņas (1. tabula).

Sākotnēji, lai pārbaudītu aprēķinu jūtīgumu pret filtrācijas koeficientu vērtību maiņu, pirmais aprēķins tika veikts izmantojot tādu K vērtību, kāda tā ir definēta BAB modeļa V1 pamatversijā (1. tabula, 1. aprēķins). Nākamie aprēķini tika veikti, izmantojot krietni augstākas vērtības nekā dabā novērotās (1. tabula, 2., 3. aprēķins), neizdalot atsevišķas filtrācijas koeficientu vērtības definētajiem apgabaliem. Šajos aprēķinos iegūtie rezultāti tika salīdzināti ar pašreizējo Gaujas horizonta kalibrēto filtrācijas koeficienta vērtību (1. tabula, 1. aprēķins). Piešķirot visam Gaujas horizon-tam ievērojami augstākas K vērtības – 20 un 10 m/dnn, mērķa funkcija horizontam būtiski izmainās un pie K vērtības 20 m/dnn pasliktinās, kas liecina par ievērojamu aprēķinu jutību pret lielu amplitūdu vērtību maiņu. Bez tam pieaug nesaiste starp dabā novēroto un aprēķināto Gaujas horizonta pjezometrisko ūdens līmeni (1. tabula). Tālāk tika aprēķināta modeļa mērķa funkcija, visam Gaujas horizontam, tā izplatības robežās piešķirot horizontam aprēķināto vidējo K vērtību (1. tabula, 4. aprēķins). Pēc tam tika veikti aprēķini izmantojot horizontam noteiktās raksturīgās

K vērtības (1. tabula, 5. aprēķins), kā arī nedaudz samazinātas dabiskās horizonta filtrācijas koeficientu vērtības (1. tabula, 6., 7. aprēķins). Pēdējos aprēķinos filtrācijas koeficienta vērtības tika samazinātas par 1–2 m/dnn, lai novērtētu modeļaprēķinu jūtību pret nelielu vērtību amplitūdu maiņu.

1. tabula. Filtrācijas koeficientu apgabalos definētās filtrācijas koeficientu (K, m/dnn) vērtības un mērķa funkcijas aprēķinu rezultāti

Table 1. Values of hydraulic conductivity (K, m/day) and calculation results of target function in divided areas

Horizonts	N. p. k.	Aprēķinos izmantotās K, m/dnn vērtības izdalītajos poligonos			Kopējā modeļa MF	Horizonta MF	Pjez. līm. Nesaiste horizontā, m
		Gaujas-ziemeļu pol.	Gaujas-Latvijas pol.	Gaujas-Latgales pol.			
D ₃ gj	1.	2,82			1170,15	132,27	11,50
	2.	20			1244,44	149,0	12,20
	3.	10			1180,05	129,27	11,36
	4.	7,51			1156,06	123,29	11,10
	5.	9,59	5,52	8,34	1144,89	119,46	10,92
	6.	8,0	5,0	6,0	1139,90	118,69	10,89
	7.	5,8	3,8	4,8	1128,80	117,88	10,85

Šobrīd BAB matemātiskais modelis ir nokalibrēts, horizonta filtrācijas koeficientus definējot kā konstantus visam horizontam. Tam ir piešķirtas ļoti vidējotas K vērtības, ar nolūku, lai mērķa funkcija jeb nesaiste starp novērotajiem un aprēķinātajiem līmeņiem būtu pēc iespējas mazāka. Definējot visam horizontam vienu reālo, dabā novērotajām vērtībām pielīdzinātu vidējo filtrācijas koeficienta vērtību (1. tabula, 4. aprēķins), un veicot manuālās kalibrācijas aprēķinus, tika iegūta mazāka gan kopējā modeļa, gan konkrētā ūdens horizonta mērķa funkcija nekā esošās kalibrētās vērtības gadījumā. Šāds mērķa funkcijas vērtības izmaiņas liecina par dabiskām pietuvināto K vērtību pozitīvu ietekmi uz modeļaprēķiniem, kā arī liecina par sākotnējās modelī definētās filtrācijas koeficienta vērtības „nesaderību” ar kopējo sistēmu. Lai šo „nesaderību” risinātu, balstoties uz analizētajām sakarībām starp nogulumu litoloģisko un granulometrisko sastāvu un atsūkņēšanas darbos iegūtajām filtrācijas koeficienta vērtībām, Gaujas horizonta izplatības laukums tika sadalīts trīs apgabalos ar dažādām K vērtībām.

Lai gan pēc esošajiem filtrācijas koeficientu un litoloģijas datiem tika izdalītas augstāk minētās K vērtības un tās uzrāda salīdzinoši labus rezultātus (1. tabula, 4. un 5. aprēķins), tik un tā ir vērojama tendence, ka kopējā modeļslāņu mērķa funkcija „tiecas” uz mazākām horizonta filtrācijas koeficienta vērtībām, jo tā, samazinot K vērtības, samazinās proporcionāli vairāk nekā horizonta mērķa funkcija (1. tabula). Šāda mērķa funkcijas mainība varētu būt skaidrojama ar to, ka pārējo ūdens horizontu filtrācijas koeficientu vērtības modelī pagaidām, vairākumā gadījumu, definētas mazākas nekā dabā novērotās un ar vienu vērtību tiek raksturots viss horizonts.

Šajā pētījumā tika apskatītas un novērtētas tikai Gaujas horizonta filtrācijas īpašības raksturojošais filtrācijas koeficients, un iegūtie rezultāti uzskatāmi parāda, ka horizonta sadalīšana tam raksturīgu filtrācijas koeficientu apgabalos ir objektīva. Tomēr, lai šos rezultātus tālāk varētu praktiski izmantot, piemēram, visa BAB matemātiskā modeļa kalibrācijai, Gaujas horizonts jāapskata kā BAB sastāvdaļa, nevis atsevišķs elements. Skatoties no kopējā hidroģeoloģiskā modeļa viedokļa, lai iegūtu pēc iespējas labākus rezultātus un lai modelis atainotu situāciju, kas maksimāli pietuvināta novērojumiem dabā, filtrācijas koeficientu novērtējums un raksturīgo K vērtību apgabalu izdalīšana ir jāveic arī pārējiem ģeoloģiskās struktūras slāņiem.

Turpinot šo pētījumu un apskatot visas devona klastiskās slāņkopas ūdens horizontu filtrācijas koeficientus, lielāka uzmanība jāpievērš vertikālās plūsmas raksturojošiem filtrācijas koeficientiem, jo filtrācijas koeficienta vērtības viena ūdens horizonta ietvaros var būt ļoti mainīgas gan dažādās ūdens horizonta vietās horizontālā virzienā, gan pa vertikāli (Ritzema 1994).

Secinājumi

Pētot Gaujas horizonta filtrācijas koeficientus, to vērtību sadalījumu horizonta izplatības teritorijā un filtrācijas koeficienta saistošos faktoros – nogulumiežu litoloģisko un granulometrisko sastāvu, tika izdarīti vairāki secinājumi. Saistība starp nogulumiežu litoloģiju un nogulumiežu filtrācijas koeficienta vērtībām novērojama gan tieši, analizējot urbumu datus, kuros aprakstīti abi pētāmie parametri, gan netieši, jo par rupjgraudainu nogulumu ietekmi uz salīdzinoši augstām filtrācijas koeficienta vērtībām liecina šo parametru izplatība vienos un tajos pašos apgabalos.

Gaujas pazemes ūdens horizonta filtrācijas koeficienta vērtības Latvijas teritorijā mainās no 0,3–23,1 m/dnn ar vidējo horizonta vērtību 7,51 m/dnn. Pamatojoties uz K vērtību sadalījumu un rupjgraudainu, vidējgraudainu smilšakmeņu izplatību horizontā, Gaujas horizontu iespējams sadalīt trīs, tam raksturīgu K vērtību – 9,59; 5,52 un 8,34 m/dnn apgabalos.

Filtrācijas koeficientu novērtējums, sadalot horizonta izplatības laukumu apgabalos ar raksturīgām šī koeficienta vērtībām, kas balstītas uz nogulumiežu litoloģijas un filtrācijas īpašību datu analīzes rezultātiem, uzskatāms par objektīvu, jo, veicot manuālo Baltijas artēziskā baseina modeļa kalibrāciju izmantojot izdalītās raksturīgās filtrācijas koeficientu vērtības modeļa mērķa funkcijas rezultāts ir mazāks, ar mazāku nesaisti starp novērotajiem un aprēķinātajiem pjezometriskajiem ūdens līmeņiem, nekā piešķirot slānim vienu vidēju K vērtību.

Pazemes ūdens horizontu raksturīgo filtrācijas koeficientu novērtējums, izmantojot Baltijas artēziskā baseina matemātisko modeli, ļauj spriest ne tikai par atsevišķu horizontu filtrācijas īpašībām, bet arī par pazemes ūdens horizontu kompleksu kā vienotu sistēmu un ļauj novērtēt sadalošo sprostsāņu nozīmi.

Pateicība

Pētījums veikts ar ESF projekta (Līguma Nr. 2009/0212/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/060) „Starpnozaru zinātnieku grupas un modeļu sistēmas izveide pazemes ūdeņu pētījumiem” atbalstu.

LITERATŪRA

- Carrera, J., Alcolea, A., Medina, A., Hualgo, J., Slooten, L. J. 2005. Inverse problem in hydrogeology. *Hydrogeology journal*, N 1, p. 206–222.
- Fetter C. W. 2001. *Applied hydrogeology. Fourth Edition*. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey. 598 pp.
- Hua Chen F. 2000. *Soil Engineering. Testing, desing and remediation*. CRC Press, Florida. 288 pp.
- Indāns A., Ošiņa J., Zobena A. 1986. *Inženierģeoloģija*. Zvaigzne, Rīga. 278 lpp.
- Kuršhs V. M. 1992. *Devonskoe terigennoe osadkonakoplenie na glavnom devonskom pole [Devonian terrigenous deposition on the Main Devonian field]*. Zinatne, Rīga. 208 c. [in Russian].
- Maldavs Z. 1964. *Pazemes ūdens*. Latvijas Valsts izdevniecība, Rīga. 236 lpp.
- Maslov, N. N., Komov, M. F. 1971. *Inženernaya geologiya [Engineering geology]*. Izdatel'stvo literatury po stroitelstvu, Moskva. 246 c. [in Russian].
- Odong J. 2007. Evolution of Empirical Formulae for Determinaion of Hydraulic Conductivity basedon Grain-Size Analysis. *Journal of American Science*, 3(3), 2007.
- Pliakas F., Petalas C. 2011. Determination of Hydraulic Conductivity of Unconsolidated River Alluvium from Permeameter Tests, Empirical Formulas and Statistical Parameters Effect Analysis. *Water Resources Management*, Volume 25, Number 11, 2877–2899.
- Ritzema H. P. (Ed.). 1994. *Drainage Principles and Applications*. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Publication 16, second revised edition, Wageningen, The Netherlands. ISBN 90 70754 3 39, 1107. pp.
- Smith K. A., Mullins C. E. 2000. *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods (2nd Edition)*. Marcel Dekker Incorporated, New York. 650 pp.
- Sennikovs, J., Virbulis, J., Bethers, U. 2011. Mathematical model of the Baltic artesian basin. *EGU General Assembly, Geophysical Research Abstracts*, 2011, vol 13.
- Timuhins A., Seņņikovs J., Virbulis J. 2011. Autoklaibrācijas metožu pielietojums Baltijas Artēziskā Baseina modelim MOSYS V0. *Latvijas Universitātes 69. zinātniskā konference. Ģeoloģijas sekcijas apakšsekcija "Baltijas artēziskā baseina pazemes ūdeņi."* Referātu tēzes. Rīga, Latvijas Universitāte, 9 lpp.
- Todd D. K., Mays L. W. 2005. *Groundwater hydrology, Third edition*. Hoboken, John Wiley & Sons, Inc. 636 pp.
- Vienken T., Dietrich P. 2011. Field evolution of methods for determining hydraulic conductivity from grain size data. *Journal of Hydrology*, 400 (2011) 58–71.
- Virbulis, J., Bethers, U., Saks, T., Sennikovs, J., Timuhins, A. Hydrogeological model of the Baltic Artesian Basin. *Hydrogeology Journal*. In print.

Miegupes ielejas morfoloģija un veidošanās leduslaikmeta beigu posmā

Morphology and Development of the River Miegupe Valley During Late-glacial

Māris Krievāns

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte
Alberta iela 10, Rīga LV-1010
E-pasts: *maris.krievans@lu.lv*

Agnis Rečs

Latvijas Universitāte, Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte
Alberta iela 10, Rīga LV-1010
E-pasts: *agnis.recs@lu.lv*

Kopsavilkums

Rakstā apkopoti pētījumu rezultāti par Gaujas kreisā krasta pietekas Miegupes ielejas morfoloģiju un attīstības īpatnībām. Pētījumā izmantotas sedimentoloģiskās, litofāciju, ģeotelpiskās un morfoloģiskās analīzes metodes. Iegūti jauni, augstas precizitātes dati par Miegupes ielejas morfoloģiju un iespējamo attīstību. Miegupes ielejas un tai pieguļošās teritorijas pleistocēna un mūsdienu virsas saposmju veidošanās aizsākās Burtnieka ledusloba Linkuvas ledāja fāzes deglaciācijas posmā. Turpmākā attīstība saistāma ar Smiltenes lokālā ledus sprostezera noplūdi pa vēl neizveidoto Miegupes ieleju. Virspalu terašu veidošanās korelējama ar Gaujas ielejas attīstību, iespējams, pat sākot ar allerēda otro pusi.

Atslēgvārdi: upes garenprofils, terases, Trikātas pacēlums, Lejasbrišķu paleozers, Gauja, litofācijas.

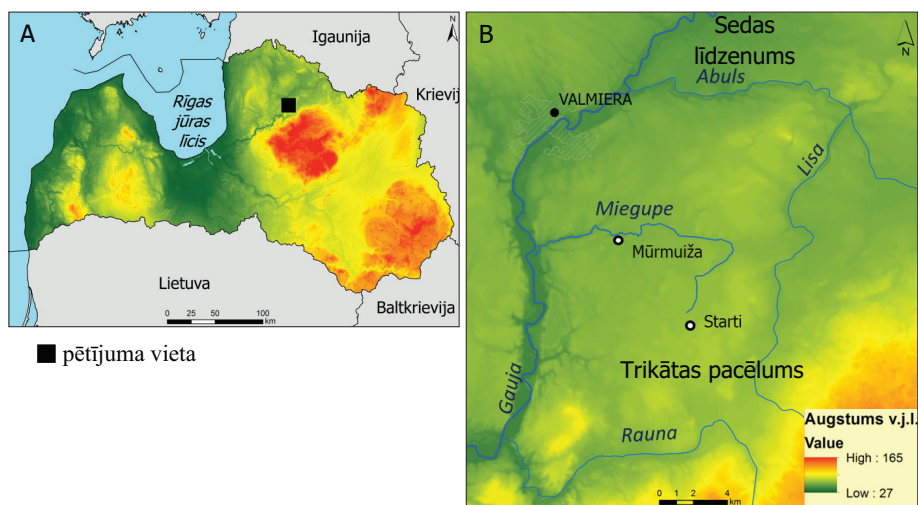
Abstract

In this paper carries out results of field survey, desk-based studies and processing of data of the River Miegupe valley – tributary of the River Gauja. Methods of sedimentology, analysis of lithofacies, geospatial analysis and morphological analysis are used. New accurate and precise data are obtained on this river valley and possible spatial transgressive formation. Formation of Pleistocene and present-day surface topography of the River Miegupe valley and its adjacent area started in the Linkuva deglaciation phase when the Burtnieks ice lobe lost activity. Further development is related to possible outbreak of the Smiltene local glacial lake through still the undeveloped valley of the River Miegupe. Formation of terraces can be correlated with development of the River Gauja valley, and presumably starting from the second part of the Allerød.

Keywords: river longitudinal profile, terraces, Trikāta uplift, Lejasbrišķi paleolake, River Gauja, lithofacies.

Ievads

Miegupe ir Gaujas kreisā krasta pieteka, kuras augštece atrodas uz ziemeļiem no Startu ciema. Pārsvārā Miegupe plūst pa Ziemeļvidzemes zemienes Trikātas pacēlumu līdz Strenču līdzenumam (1. att.), kur tā ietek Gaujā. Upes garums ir 20,5 km. Tās ūdensguves baseina platība sasniedz 84 km² (Zīverts 1995). Autoru aprēķinātais gultnes garenkritums ir 37 m, tādējādi vidējais gultnes kritums ir 1,8 m/km.



1. attēls. Pētījumu teritorijas ģeogrāfiskā lokalizācija Latvijā (A) un tās novietojums Trikātas pacēlumā (B).

Figure 1. Geographical location of the study area in Latvia (A) and within the Trikātu Rise.

Upju ieleju tīkla attīstība dienvidaustrumu Baltijā (Lietuvā, Latvijā un Igaunijā) ir cieši saistīta ar Fenoskandijas ledusvairoga deglaciācijas gaitu Vēlās Vislas laikā (Eberhards and Miidel 1984; Raukas et al. 1995). Teritorijas ģeoloģiskās uzbūves un ledāja radītās zemes virsmas topogrāfiskās atšķirības, kā arī paleoģeogrāfisko apstākļu straujas izmaiņas noteica to sarežģītu attīstību (Eberhards 1979a; Raukas and Eberhards 1986). Latvijā upju ieleju veidošanās un mūsdienu gultnes procesu pētījumi, kā arī detaļa ģeomorfoloģiskā analīze veikta pagājušā gadsimta septiņdesmito gadu sākumā (Āboltiņš 1971; Eberhards 1972), bet vēlāk veikti šo pētījumu reģionālie apkopojumi (Eberhards 1979a,b; Eberhards and Miidel 1984). Jāatzīmē, ka šādi pētījumi Latvijā veikti tikai lielo upju ielejām. Tomēr mazo upju ielejas bijušas sistemātisku pētījumu objekts, tāpēc atsevišķu mazo upju ieleju pētījumiem ir bijis gadījuma raksturs. Pēdējos gados veiktie pētījumi un to rezultāti pierāda, ka būtu nepieciešams veikt mazo upju detālus pētījumus apvidos ar vidēji saposmotu zemes virsmas topogrāfiju. Šajā kategorijā ietilpst pa augstieņu nogāzēm un pārejas zonā no augstienēm uz zemienēm plūstošās mazās upes, kuras vienlaikus ir arī Latvijas lielo upju pietekas. Tām raksturīgi komplicēti garenprofili, kas sastāv no vairākiem garenprofilu posmiem, kuri veidojušies dažādā laikā saistībā ar drenāžas apstākļu un straujām, iespējams, pat katastrofāla rakstura,

lokālās erozijas bāzes izmaiņām (Krievāns 2011). Šīs mazo upju ielejas veidojās, ledājkūšanas ūdeņiem vai nelieliem ledus sprostezeriem noplūstot distālā virzienā no ledāja vai arī paleoezeru drenāžas rezultātā, ko izraisīja no tām iztekošo upju strauja dziļumerozija, pazeminoties galveno upju erozijas bāzei.

Mūsdienās upju ģeomorfoloģiskie pētījumi ir cieši saistīti ar citām zinātnēm, piemēram, hidroloģiju, sedimentoloģiju, paleohidroloģiju un limnoloģiju, tādējādi arī pētījumu metožu attīstībā var vilkt paralēles ar citām Zemes zinātņu jomām. Pasaulē upju izpētē tiek izmantoti jaunākie sasniegumi globālās pozicionēšanas sistēmās (Higgitt and Warburton 1999), aluviālo nogulumu vecuma noteikšanā ar izotopu un luminiscences datēšanas metodēm (Rowland *et al.* 2005; Hoffmann *et al.* 2008; Rixhon *et al.* 2011), ģeofizikālo datu iegūšanā un analizē (Froese *et al.* 2005). Izmantojot mūsdienīgas pētījumu metodes fluviālajā ģeomorfoloģijā, tiktu papildināta šāda rakstura pētījumos izmantojamā metodoloģiskā bāze Latvijā un sniegts jauns skatījumu uz hidrogrāfiskā tīkla attīstību pēdējā apledojuma deglaciācijas gaitā, kā arī sniegtas atbildes uz agrākos pētījumos izvirzītajām problēmām.

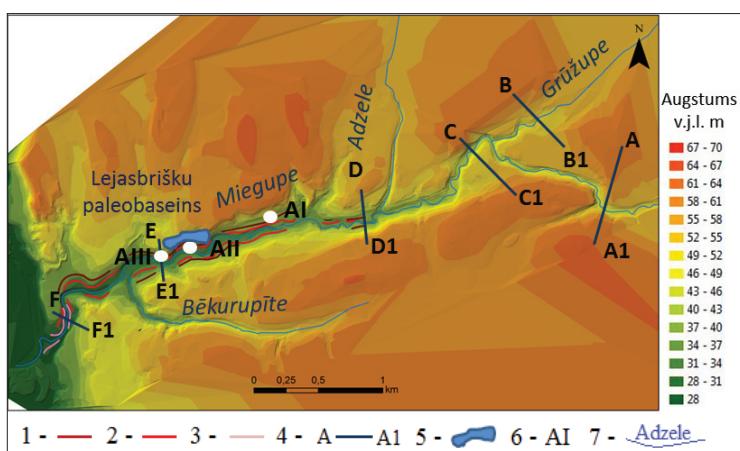
Pētījuma mērķis bija noskaidrot Miegupes ielejas morfoloģijas īpatnības un veidošanās apstākļus. Galvenie pētījumu uzdevumi bija veikt Miegupes ielejas un tai pieguļošās teritorijas kvartārģeoloģisko un ģeomorfoloģisko izpēti, eksogēno procesu un to veidoto reljefa formu kartēšanu, izstrādāt pētījumu teritorijas digitālo zemes virsmas modeli posmā no ietekas Gaujā līdz Mūrmuižas dzirnavu dīķim. Veiktie pētījumi ir nozīmīgi tāpēc, ka pētījumu gaitā tika atklāti glaciolimniskie nogulumi Miegupes labajā krastā, kas ģeoloģiskās kartēšanas M 1 : 50 000 un M 1 : 200 000 (Zīverts 1981; Brangulis 2000) laikā netika konstatēti un zem tiem tika atrastas pārgulsnētas augu makroskopiskās atliekas, kas būtiski maina priekšstatus par Miegupes ielejas veidošanos, kas aizsākās Burtņieka ledusloba Linkuvas ledāja oscilācijas fāzes deglaciācijas posmā.

Materiāli un metodes

Galvenie pētījumu dati iegūti, veicot dažāda mēroga topogrāfisko karšu (M 1 : 10 000, M 1 : 25 000 un M 1 : 50 000) ģeoloģisko kartēšanas materiālu (M 1 : 50 000 un M 1 : 200 000) analīzi un vektordatu sagatavošanu, izmantojot *ArcGIS* programmatūru, kā arī autoru veiktos lauka pētījumus Miegupes ielejā un tai pieguļošajā teritorijā.

Izmantojot GIS programmatūru *ArcMap 10* un PSRS armijas ģenerālštāba M 1 : 10 000 topogrāfisko kartes (WMS datubāzes *kartes.geo.lu.lv* slānis TOPO 10K PSRS), tika iegūta informācija par mūsdienu zemes virsmas topogrāfiju. Uz tās bāzes izveidots Miegupes ielejas un tai pieguļošās teritorijas digitālais zemes virsmas modelis ESRI TIN formātā (2. att.). Tas nodrošināja iespēju realizēt pētījumu teritorijas ģeotelpisko un ģeostatisko reljefa analīzi un analizēt upes ielejas šķērsprofilu, šķērsriezuma laukumu un gultnes garenprofila izmaiņas upes garumā. Modeļa izveides pamatā bija nepieciešamība vizualizēt teritoriju trīsdimensionālā skatā, lai atvieglotu fluviālo un nogāžu procesos radīto reljefa formu kartēšanu. Turpmākos kamerālajos pētījumos tika apstrādāti aerofoto uzņēmumi, tādējādi tika apvienota informācija, kas ir iegūta no digitālā zemes virsmas modeļa, aerofotogrāfijām un

lauka pētījumos iegūtajiem materiāliem. Rezultātā tika arī izvērtētas netiešo metožu lietošanas iespējas aluviālā reljefa formu dešifrēšanā.



2. attēls. Šķēršprofilu, virspalu terašu un atsegumu izvietojums.

Apzīmējumi: 1 – II virspalu terase; 2 – I virspalu terase; 3 – lokālā terase; 4 – šķēršprofili;
5 – Lejasbrišku paleobaseina nogulumu izplatība; 6 – atsegumi; 7 – ūdensteces.

Figure 2. Location of cross sections, fluvial terraces and outcrops.

Legend: 1 – II terrace; 2 – I terrace; 3 – local terrace; 4 – cross sections; 5 – distribution of the Lejasbriški palaeolake sediments; 6 – outcrops; 7 – watercourses.

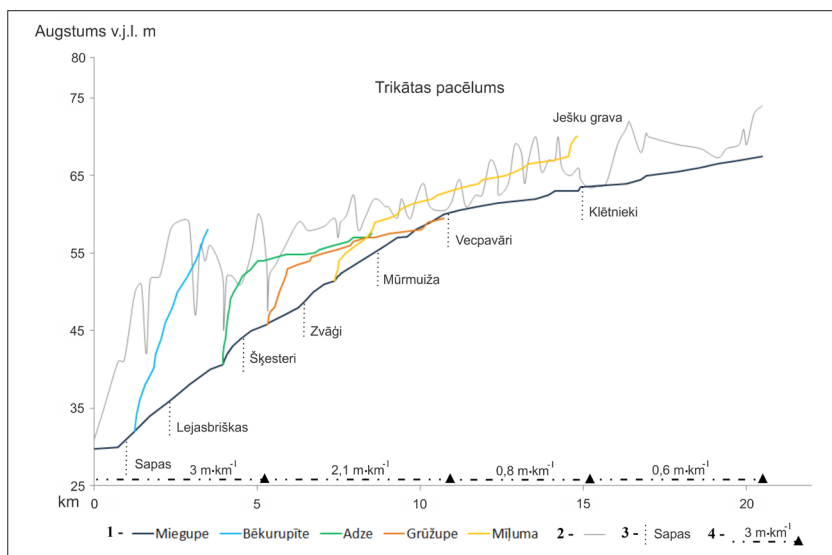
Lauka pētījumos tika realizēta Miegupes un tai pieguļošās teritorijas detāla kvartārģeoloģiskā un ģeomorfoloģiskā izpēte, kuras gaitā fiksēts virspalu terašu, gravu un pieteku izvietojums, izdarīti ģeoloģiskie urbumi ar rokas urbi, veikta urbumu un novērojumu vietu ģeotelpiskā piesaiste ar augstas precizitātes GPS uztvērēju *Magellan ProMark3*. Lai noskaidrotu virspalu terašu morfoloģiju un uzbūves īpatnības, vairākās vietās tika veikta stāvkrastu atsegumu attīrīšana un izpētīts nogulumu litoloģiskais sastāvs, kā arī fotografēti un zīmēti slāņu saguluma apstākļi. Trijos atsegumos veikta detāla nogulumu litofāciju izpēte. Litofāciju apzīmējumi lietoti, izmantojot (Miall 1978; Eyles *et al.* 1983; Wysota 2002) izstrādāto klasifikāciju. Attēlojot ģeoloģiskos griezumus, līdztekus litoloģijas, struktūras un litofāciju atainojumam, attēlam tika pievienots arī atseguma fotouzņēmums. Tādējādi ģeoloģiskais griezumam padarīts uzskatāmāks. Attēlu apvienošana labi noder, attēlojot nelielus atsegumus vai arī lielāka griezuma daļas (Kostic *et al.* 2007; Pisarska-Jamroży and Börner 2011). Pēc nogulumu struktūras un tekstūras pazīmju analīzes tika veikta nogulumu vides uzkrāšanās rekonstrukcija. Nogulumu ģenētiskā klasifikācija, slāņu kontakti starp tiem un litofācijas aprakstīšana, izmantojot pasaulē vispārārstītu metodiku (Zieliński 1995; Zieliński 1998; Jones *et al.* 2001).

Rezultāti un interpretācija

Miegupes morfoloģija

Savietojot M 1 : 10 000 topogrāfiskās kartes un lauka pētījumos iegūtos datus, izveidots Miegupes garenprofils (3. att.). Vidējais aprēķinātais upes gultnes kritums

ir $1,8 \text{ m} \times \text{km}^{-1}$, savukārt lielākais kritums, t.i., $9,9 \text{ m} \times \text{km}^{-1}$, ir 150 m garā posmā pie Adzeles ietekas. Garenprofils pēc klasifikācijas (Chebotarev 1975; Garde 2006) ir izliekts.



3. attēls. Miegupes gultnes garenprofils. Vertikālā mēroga pārspīlējums 230:1.

Apzīmējumi: 1 – upju gultņu garenprofili; 2 – zemes virsas topogrāfiskais profils gar Miegupes ielejas pamatkrasta augšējo kroti; 3 – māju nosaukumi; 4 – izdalītie upes posmi un vidējais garenprofila kritums tajos.

Figure 3. Longitudinal profile of the River Miegupe. Exaggeration of vertical scale 230:1.

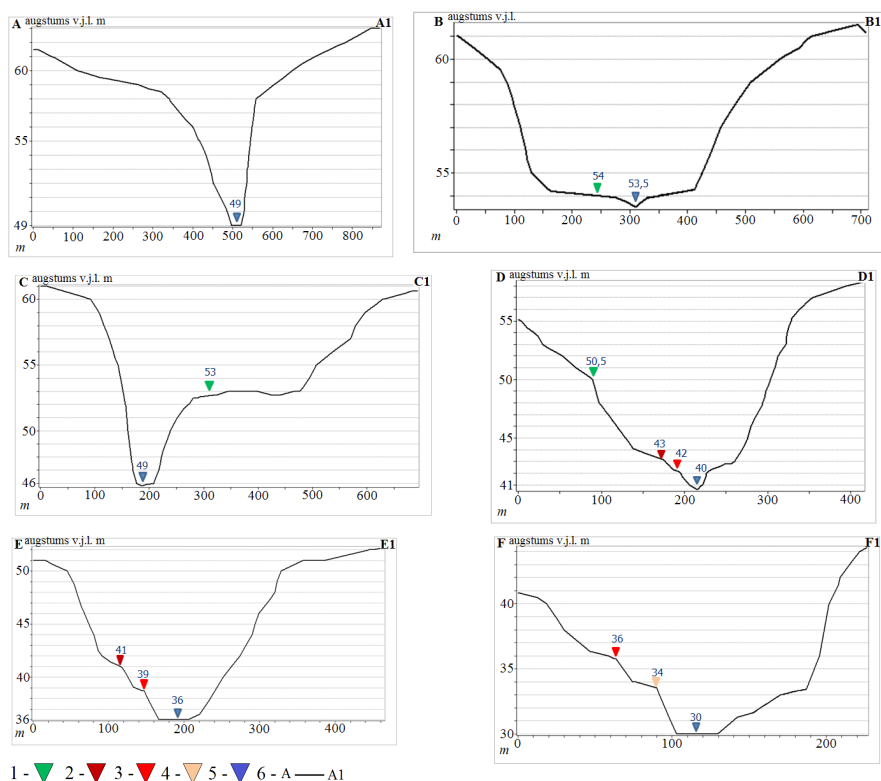
Legend: 1 – longitudinal profiles of river beds; 2 – earth surface topographical profile along the river valley bank; 3 – name of farmhouses; 4 – distinguished sections of the River Miegupe valley and average gradient of the longitudinal profile in it.

Profilā redzami vairāki posmi, kur samērā strauji mainās upes gultnes garenprofils. Visizteiktākā veidā tas redzams pie Vecpavāru mājām, kur vidējais kritums no iztekas līdz tām ir $0,7 \text{ m} \times \text{km}^{-1}$. Lejpus Vecpavāru mājām līdz ietekai Gaujā vidējais gultnes garenkritums ir $2,5 \text{ m} \times \text{km}^{-1}$. Jāatzīmē, ka lauzums garenprofilā visticamāk nav saistīts ar pamatiežiem, kas atsevišķās vietās atsedzas nelielos atsegumos Miegupes krastos. Šāds apgalvojums izriet no lauka pētījumos konstatētā fakta, ka atsevišķi nelieli smilšakmens atsegumi sastopami tikai posmā no Grūzupes ietekas Miegupē līdz Mūrmuižai.

Aprakstot Miegupi, tika izdalīti četri upes ielejas posmi (3. att.). Posmu izdalīšanai par pamatu tika ņemti vērā sekojoši morfoloģiski kritēriji: upes ielejas dziļums, platums, krituma izmaiņas upes gultnes garenprofilā un virspalu terašu izplatība. Ielejas šķērsprofili tika sastādīti, izmantojot trīsdimensionālā zemes virsmas modeļa datus, kas iegūti no topogrāfiskās kartes M 1 : 10 000, un lauka pētījumos iegūtos nivelēšanas datus.

No iztekas līdz Mūrmuižai Miegupē nav izteiktas ielejas, tā ir regulēta, iztaisnota meliorācijas grāvja veidā, kas ierīkots, lai drenētu Miegupes purvu. Posmā no

iztekas līdz Klētniekiem ieleja orientēta ziemeļaustrumu virzienā, tajā nav sastopamas virsalu terases. Nākamajā posmā no Klētniekiem līdz Vecpavāriem, upes ieleja orientēta rietumu virzienā, tāpat kā iepriekšējā posmā, arī šajā nav sastopamas virsalu terases. Posma beigās upes gultnes garenprofilā redzams lūzums, ieleja ir sekla un reljefā slikti izteikta. Tikai, sākot ar nākamo posmu Vecpavāri, Grūžupes ieteka no Mūrmužas lejteces virzienā ir labi izdalāma. Ielejas dziļums līdz Grūžupei palielinās no pāris metriem līdz 7–10 m, kur tai ir V veida forma (4. att.). Pēdējais posms izsekojams no Grūžupes ietekas Miegupē līdz ietekai Gaujā. Ieleja ir labi izteikta reljefā, tā ir orientēta dienvidrietumu virzienā, kā arī ielejas dziļums pakāpeniski palielinās, pie Sapas dzirnavām sasniedzot 20 m. Vairāki nelieli garenprofila lauzumi un gultnes krituma pieaugumi atsevišķos īsos posmos ir tieši saistīti ar pietekām, kuras ieplūst Miegupē.



4. attēls. Miegupes ielejas šķēršprofili.

Apzīmējumi: 1 – augstā terase; 2 – II virsalu terase; 3 – I virsalu terase; 4 – lokālā terase; 5 – upes gultne; 6 – šķēršprofils.

Figure 4. Cross sections of the River Miegupe valley.

Legend: 1 – high terrace; 2 – II terrace; 3 – I terrace; 4 – local terrace; 5 – river bed; 6 – cross section.

Ielejā no Šķesteriem līdz tās ietekai Gaujā izsekojamas divas virsalu terases, to relatīvais augstums virs upes līmeņa vienmērīgi paaugstinās lejteces virzienā. II virsalu terases augstums posma augštecē ir 4–5 m, bet lejtecē tas palielinās līdz

5–6 m (4. att.). I virspalu terases augstums posma augštecē ir 3–4 m, bet lejtecē palielinās līdz 4–5 m. Šī terase beidzas izstrādātā karjerā pie Miegupes ietekas Gaujā. Lejpus Cēsu–Valmieras šosejai, 550 metru garā posmā izsekojama lokālterase, kuras augstums virs ūdens līmeņa ir 3–3,5 m. Miegupes ielejā palienes platums ir 5–12 m, tā ir diezgan labi izteikta.

No Bēkurupītes līdz ietekai Gaujā dažās vietās izsekojama augstā paliene, kuras augstums virs upes līmeņa ir 1,5 m.

Miegupes labajā krastā 700 m augšpus Cēsu–Valmieras šosejas tilta zem upes II virspalu terases nogulumiem dabiskā atsegumā konstatēti glaciolimniskie nogulumi, kurus veido smalkas līdz vidēji rupjas smilts, ar aleirīta un aleirīta ar māla piejaukumu slānīšu mija. Glaciolimnisko nogulumu biezums sasniedz 3 m. Atseguma lejasdaļā 0,6 m biežā slānī tika konstatētas izkliedētas augu makroskopiskās un mikroskopiskās atliekas. Pēc datu analīzes, ko veica Aija Ceriņa (pers. komun.), tika secināts, ka nogulumu piesātinājums ar augu atliekām ir niecīgs, bet atlieku kopējā saturā izceļas *Dryas octopetala* lapiņas, atrastas arī pāris *Salix polaris* un *Salix herbacea* lapiņas, un atsevišķi *Carex* un *Betula nana* riekstiņi. Netika atrastas ūdensaugu sēklas, kas iespējams liecina, ka iepriekšminētās augu atliekas ir ieskalotas no krasta vai arī transportētas ar straumi. Spriežot pēc vairāku atsegumu izpētes, secināts, ka nogulumi, kas liecina par paleobaseina eksistenci, ir izplatīti aptuveni 400 m garā joslā, Miegupes ielejā zem I virspalu terases nogulumiem.

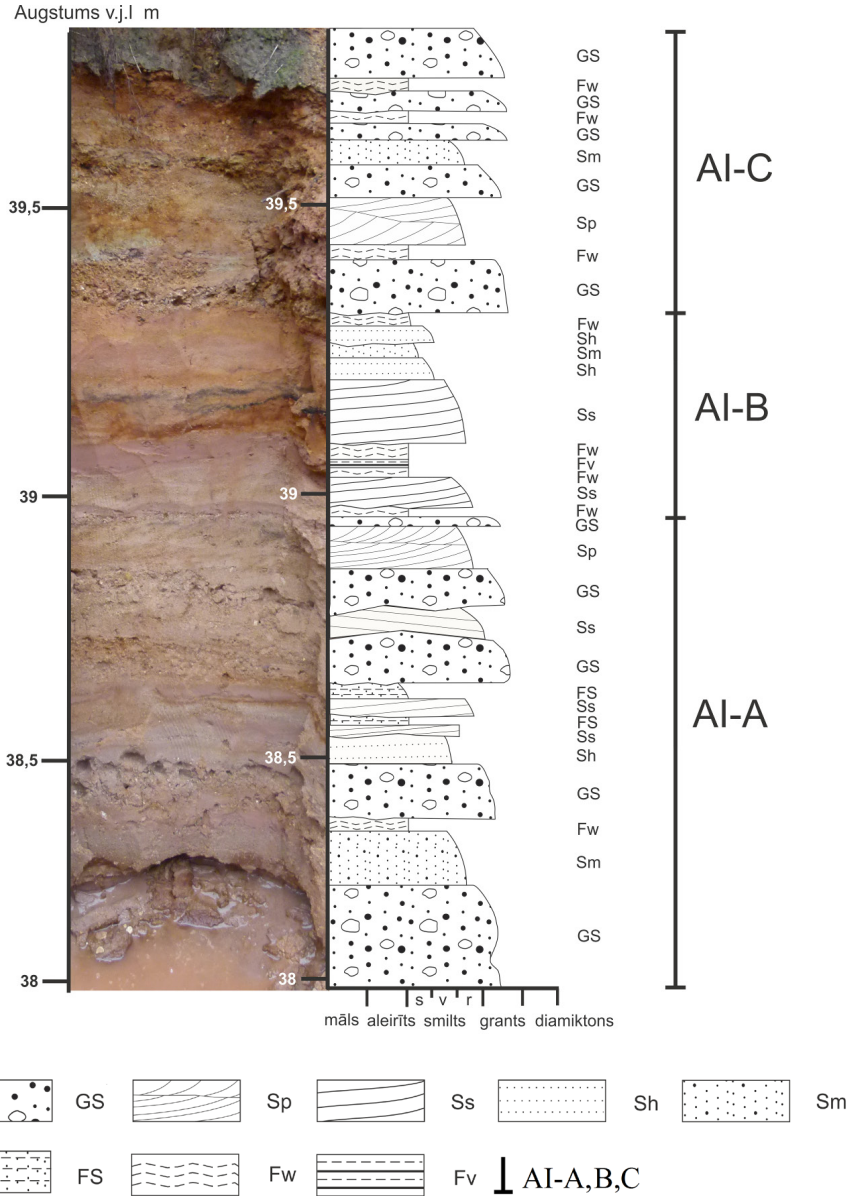
Litofāciju analīze

Atsegums AI

Ņemot vērā nogulumu litofāciju tipu, to biezuma palielināšanos vai samazināšanos augšupejošā virzienā un likumsakarības fāciju mijā vertikālā griezumā, tika izdalītas trīs fāciju asociācijas (5. att.). Apakšējā asociācija AI-A sastāv no litofācijām, kuras veido acīmredzamus sedimentācijas ritmus, t.i., virs smilšaina grants materiāla uzkrājušās smiltis un aleirīts, kuru atkal nomaina grants un smilts ar aleirītu. AI-A asociācija varēja veidoties divos sedimentācijas vides apstākļos. Pirmajā gadījumā litofāciju ritms norāda uz ledāja tuvumu un transportējošās ūdens straumes ātruma pieaugumu un samazināšanos, ko izraisījušas sezonālas izmaiņas. Tādējādi granšainais materiāls uzkrāties siltākā sezonā, kad bijis lielāks ūdens pieplūdums un smalkais materiāls uzkrāties, kad vides apstākļi bijuši aukstāki. Otrajā gadījumā asociācija AI-A veidojusies zarotā upes gultnē un ir notikusi gultnes laterāla migrācija. Otro interpretāciju labi papildina AI-B asociācija, kura norāda uz vājāku ūdens straumju darbību pat mierīgiem sedimentācijas apstākļiem, kuri izveidojās, kad galvenā upes gultne laterāli migrēja. Gultnei migrējot, uzkrājās AI-C fāciju asociācija, kurā ir saskatāms līdzīgs litofāciju ritms kā AI-A.

Atsegums AII

Atsegumā AII izdalīti septiņi litofāciju tipi (6. att.), kuri veido trīs nogulumu uzkrāšanās asociācijas. Atseguma pamatni veido pārskalota morēna. Asociāciju AII-A veido glaciolimniskie nogulumi, kuri sastāv no smalkgraudainas smilts un aleirīts ar sezonālu slāņojumu. Asociācija beidzas ar labi izteiktu erozijas virsmu, virs kuras uzguļ asociācija AII-B, kuras apakšējo daļu veido smilšaina grants ar aleirīta un smalkas smilts starpslāņiem. Nogulumi veidojušies, strauji pieaugot

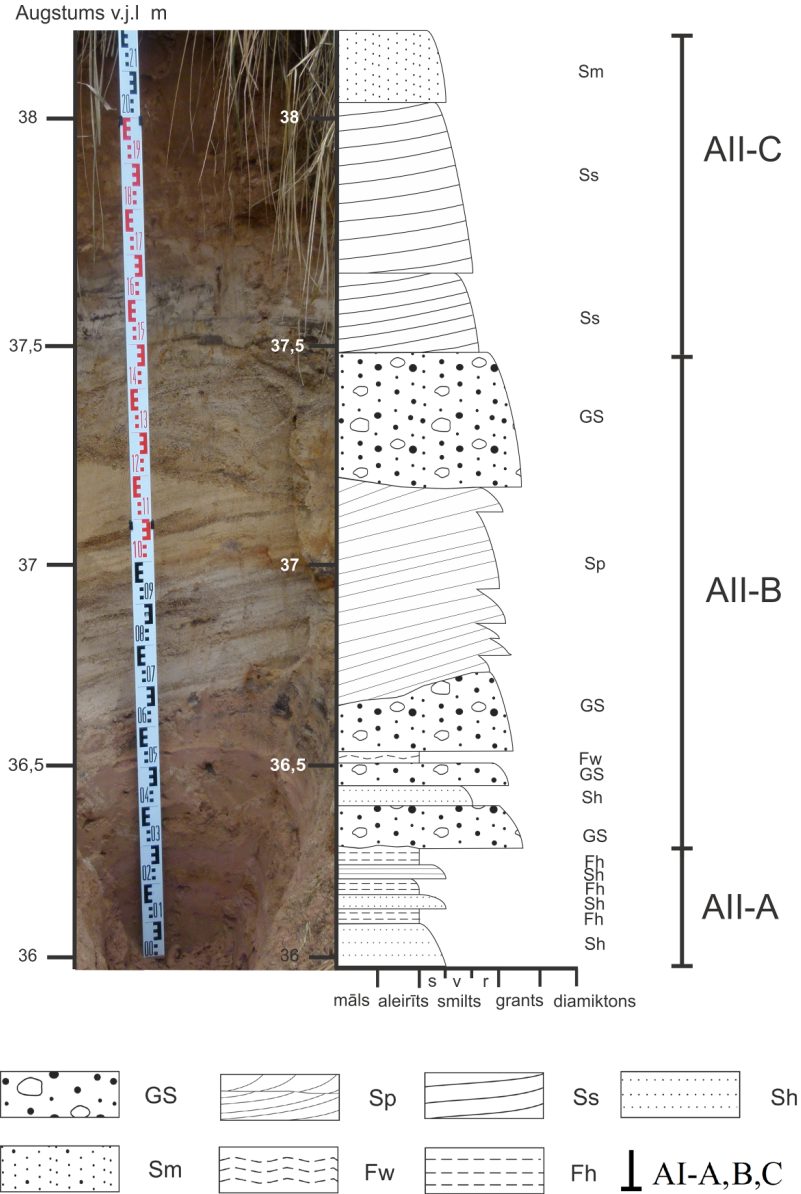


5. attēls. Atsegums AI.

Apzīmējumi: GS – grants, smilšaina; Sp – smilts, diagonāli slīpslāņota; Ss – smilts ar vāji izveidotu diagonālu slīpslāņojumu ; Sh – smilts, horizontāli slāņota; Sm – smilts, masīva; FS – aleirīts, smilšains; Fw – aleirīts, viļņoti slāņots; Fv – aleirīts, māls ar slokšņu struktūru ; AI-A, B, C – litofāciju asociācijas.

Figure 5. Autcrop AI.

Legend: GS – sandy gravel; Sp – planar cross – bedded sand; Ss – scour –fill sand; Sh – horizontally bedded sand; Sm – massive sand; FS – sandy silt; Fw – wavy laminated silt; Fv – parallel laminated silt, clay; AI-A, B, C – lithofacies associations.



6. attēls. Atsegums AII.

Apzīmējumi: GS – grants, smilšaina; Sp – smilts, diagonāli slīpslāņota; Ss – smilts ar vāji izveidotu diagonālu slīpslāņojumu; Sh – smilts, horizontāli slāņota; Sm – smilts, masīva; Fw – aleirīts, viļņoti slāņots; Fh – aleirīts, horizontāli slāņots; AI-A, B, C – litofāciju asociācijas.

Figure. 6. Autcrop AII.

Legend: GS – sandy gravel; Sp – planar cross – bedded sand; Ss – scour –fill sand; Sh – horizontally bedded sand; Sm – massive sand; Fw – wavy laminated silt; Fh – parallel laminated silt; AI-A, B, C – lithofacies associations.

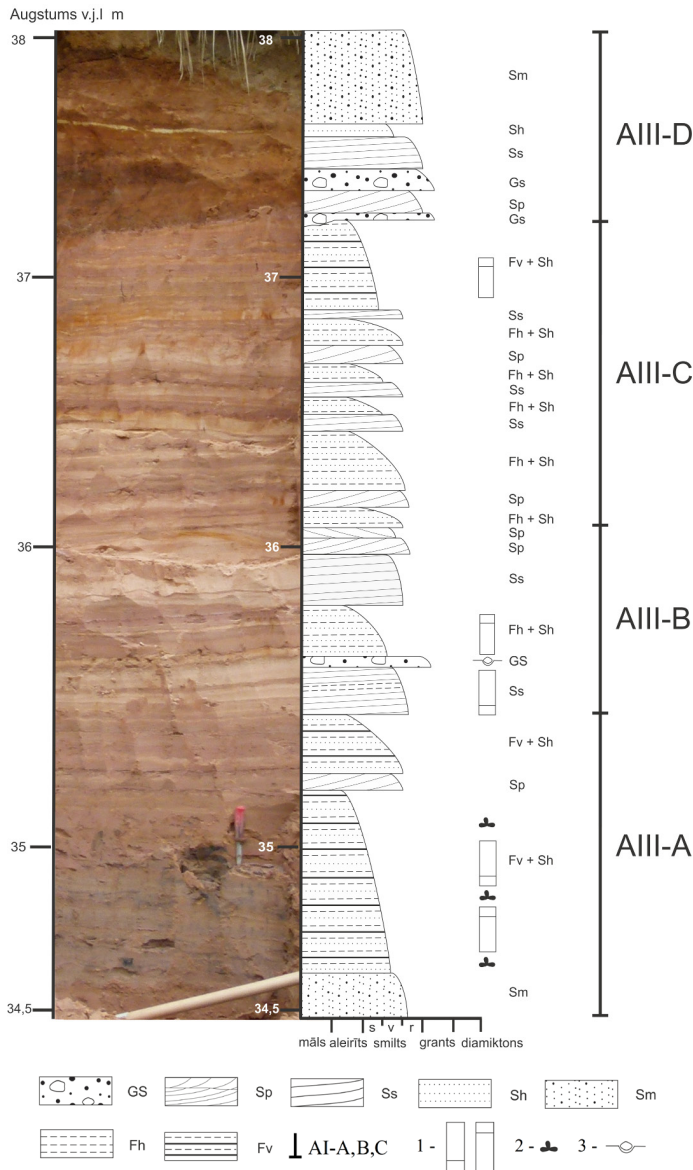
sanešu plūsmā, visdrīzāk upes gultnē, kura bijusi pietiekami spēcīga, lai izskaltu baseina nogulums. Aleirīta un smalkās smilts slānis norāda, ka ūdens plūsmas spēka pieaugums sākotnēji bijis sezonāls. Asociācijas vidusdaļu veido vidēji graudaina līdz rupjgraudaina smilts, kas uzkrājusies zemūdens grēdā, uz kuras uzguļ smilšaina grants ar neizteiktu slāņojumu. Pēdējo fāciju asociāciju AII-C veido smalkgraudaina līdz vidēji graudaina smilts, kas uzkrājusies upes palienē.

Atsegums AIII (Lejasbriškas)

Lejasbrišķu glaciolimnisko nogulumu atsegumā (7.att.), kurš sasniedz 3,5 m augstumu, izdalāmi septiņi litofāciju tipi: grants, smilšaina (GS), smilts, masīva (Sm), smilts, horizontāli slāņota (Sh), smilts ar vāji izveidotu diognālu slāņojumu (Ss), smilts, diagonāli slīpslāņota (Sp), aleirīts, horizontāli slāņots (Fh), aleirīts, māls ar slokšņu struktūru (Fv), kuri veido četras fāciju asociācijas.

Litofāciju asociācijas AIII-A apakšdaļu veido smalkgraudaina smilts, kuru 0,4 m biežumā nomaina aleirīta un māla slāņkopa ar sezonālu slāņojumu, slānīšu biežums samazinās augšupejošā virzienā. Savukārt asociācijas augšdaļā 0,5 m biežumā pieaug smilts slāņu biežums attiecībā pret māla un aleirīta slāņiem, vērojams arī kopējais slāņu biežums augšupejošā virzienā. Šī fāciju asociācija atbilst paleobaseina distālajai daļai, kurā tika izgulsnēts aleirīts ar mālu un smiltīm. Ņemot vērā, ka šajā atseguma daļā tika atrastas augu atliekas, var izvirzīt divas hipotēzes. Pirmkārt, tā kā netika atrastas ūdensaugu atliekas, tad visticamāk, ka iepriekšminētās augu makroatliekas ir ieskalotas no baseina krastam pieguļošas teritorijas. Tādējādi ir bijuši pietiekami labvēlīgi vides apstākļi floras attīstībai, kas vēlāk pasliktinājušies, par ko liecina tas, ka atsegumā augstāk nav atrodamas augu atliekas. Otrkārt pastāv varbūtība, ka atrastās augu atliekas liecina nevis par vides apstākļiem, kuri bija labvēlīgi augāja attīstībai, bet par to, ka organiskās atliekas ir pārskalotas un sekundāri nogulsnētas un tādējādi tās ir vecākas, nekā pašlaik tiek uzskatīts. Skaidrību par izklidēto augu makroskopisko un mikroskopiski atlieku vecumu sniegs dati, kas tiks saņemti no Poznaņas Datēšanas laboratorijas tuvāko mēnešu laikā.

Asociācijas AIIIB biežums ir 0,6 m, tajā pieaug smalkgraudainas un vidēji graudainas smilts īpatsvars. Aleirītiskās frakcijas daudzums salīdzinājumā ar iepriekšējo ciklu samazinās. Apakšdaļā izsekojams pāris centimetrus plāns lēcveida grants slānis, pie tam tajā tika atrasts 11 cm liels akmens. Tas liecina nevis par grants materiāla strauju un epizodisku pieplūdumu, bet gan par to, ka slānis veidojies, izkūstot peldošam ledus blāķim, kurš sevī bija iekļāvis granti ar oļiem. Vidusdaļā 0,3 m biežumā sastopama aleirīta un smilts slāņkopa ar sezonālu slāņojumu. Biezums slāņiem ir neliels – līdz 0,7 cm, un tas samazinās virzienā uz augšu. Asociācijas augšdaļu veido smilts, kurā redzams neizteikts slīpslāņojums. Aleirīta, māla un smalkas smilts slāņu biežuma pieaugums norāda uz iespējamo sedimentācijas vides apstākļu maiņu no paleobaseina distālās uz proksimālo daļu. Turklāt ir jāņem vērā arī drupu materiāla piegādes avots, kurš var tikt ietekmēts, mainoties paleobaseina platībai (Gruszka 2001). Turklāt faciālās izmaiņas var veidot arī izmaiņas pašā piegādes avotā, piemēram, ja baseinā iepļūstošā ūdens straume zaudē transportēšanas spējas, tad baseinā vairāk tiek ienests smalkāks drupu materiāls (Johnsen and Brennand 2006). Asociācija AIII-B veidojusies starp baseina distālo un proksimālo daļu, nav izslēgts, ka smilšainie slāņi ir drenāžas sloksnes, kas veidojušās, baseinam kļūstot caurtekošam.



7. attēls. Atsegums AIII.

Apzīmējumi: GS – grants, smilšaina; Sp – smilts, diagonāli slīpslāņota; Ss – smilts ar vāji izveidotu diagonālu slīpslāņojumu; Sh – smilts, horizontāli slāņota; Sm – smilts, masīva; Fh – aleirīts, horizontāli slāņots; Fv – aleirīts, māls ar slokšņu struktūru; AI-A, B, C – litofāciju asociācijas; 1 – biezuma palielināšanās un samazināšanās augšupejošā virzienā; 2 – izklīdētas augu atliekas; 3 – pilienkmeņi.

Figure. 7. Autcrop AIII.

Legend: GS – sandy gravel; Sp – planar cross – bedded sand; Ss – scour – fill sand; Sh – horizontally bedded sand; Sm – massive sand; Fh – parallel laminated silt; Fv – parallel laminated silt, clay; AI-A, B, C – lithofacies associations, 1 – thickening and thinning upward sequence; 2 – disseminated plant debris; 3 – dropstone.

Asociācijā AIII-C vērojama aleirīta un smalkas smilts slāņkopa ar sezonālu slāņojumu miju ar vidēji graudainas smilts slāņiem. Virzienā uz atseguma augšu pieaug aleirīta un māla īpatsvars attiecībā pret smilti, līdz asociācijas augšdaļā māla un aleirīta daudzums sasniedz 45–50%, turklāt strauji samazinās arī slāņu biežums, kas nepārsniedz 0,8 cm. Kopumā šajā ciklā ir izteikta likumsakarība, kurā horizontāli slāņotas vai vāji izteikta diognāla slāņojuma smilts slāņi mijas ar aleirīta un smalkas smilts slāņkopām, pie tam slāņu biežums pakāpeniski samazinās augšupejošā virzienā. Līdzīgi kā asociācija AIII-A, arī šī ir veidojusies baseina distālajā daļā, jo nav nekādu pazīmju par to, ka nogulumi veidojušies uz baseina nogāzes vai tuvu drupu materiāla pieneses avotam. Slāņu biežuma samazināšanos augšupejošā virzienā un aleirīta–māla pieaugums norāda, ka drupu materiāls nogulsņējis mierīgos apstākļos, kurus nav ietekmējušas straumes vai noplūdeņi.

Pēdējo asociāciju AIII-D veido Miegupes I virspalu terases aluviālie nogulumi. Starp aluviālajiem un glaciolimniskajiem nogulumiem ir izteikts erozijas kontakts. Asociācijas apakšējo daļu veido gultnes fācija, kura augstāk griezumā pāriet palu fācijā.

Diskusija

Miegupes ielejas un tai pieguļošās teritorijas pleistocēna nogulumu un mūsdienu virsas saposmējuma veidošanās aizsākās Burtnieka ledusloba Linkuvas ledāja oscilācijas fāzes deglaciācijas posmā (Zelčs and Markots 2004; Zelčs *et al.* 2011). Ledāja mala atradās starp Cēsīm un Raunu, kā arī, spriežot pēc morēnas vaļņu izvietojuma un orientācijas, tā turpinājās uz ziemeļaustrumiem no Mārsnēniem Vijciema virzienā. Ledāja malas priekšā atradās Smiltenes pieledāja baseins, uz kuru pa Ješku gravu notika ledājkušanas ūdeņu notece. Turpinoties deglaciācijai un ledāja malai atrodoties starp Vecpavāriem un Mūrmuižu, ledājkušanas ūdeņi pa Laužu pazeminājumu plūda Lisas virzienā, notece varēja jau veidoties arī Miegupes augštecē.

Ledāja malai frontāli atkāpjoties līdz Mūrmuižai, ledājkušanas ūdeņu drenāža turpinājusies dienvidaustrumu virzienā, kas ir pretējs mūsdienu Miegupes tecēšanas virzienam. Aprimstot ledājam virs drumlinu lauka, veidojusies spiedes plūsma un recesijas morēnas, kā rezultātā ir bijusi arī pastiprināta ledāja plaisainība. Mūrmuižas apkārtnē sastopami vairāki pauguri, piemēram, pie Briežu un Melngāršu mājām, kurus šķērso šauras ielejas, turklāt pauguru nogāzes pret ielejām ir krietni stāvākas nekā citās to pusēs. Šādas reljefa formas norāda uz to, ka notikusi virsledāja ledājkušanas ūdeņu drenāža, tādējādi, turpinot kust ledum, ūdens plūsmas sasniedza pauguru virsotnes. Turpmākās ledājkušanas ūdeņu darbības rezultātā tika „pārzāģēti” attiecīgie pauguri.

Ledāja malai nedaudz atkāpjoties ziemeļrietumu virzienā no iepriekšējās pozīcijas, ledājkušanas ūdeņi plūduši gar ledāju pa Bēkurupītes pazeminājumu uz pieledāja baseinu, iespējams, sākotnējā plūsma ir bijusi pa ledāja plaisu. Nelielais paleobaseins atradies aptuveni 1 km uz dienvidaustrumiem no šosejas Cēsis–Valmiera tilta. Spriežot pēc ģeoloģiskajiem un morfoloģiskajiem datiem, iespējams, Lejasbrišku baseins ir bijis savienots ar iepriekšējo baseinu un veidoja tā dziļāko daļu,

kurā varēja uzkrāties glaciolimniskie nogulumi. Šajā laikā mainījās arī ledājkūšanas ūdeņu noplūdes virziens pa Miegupes ieleju. Tas vairs nebija uz Smiltenes baseina pusi, bet pretējs. Ņemot vērā reljefa absolūto augstumu, kurš Ješku gravas pamatnē atbilst 64 m un 62 m v.j.l. Laužu pazeminājumā, bija iespējama arī Smiltenes baseina noplūde uz Gauju. Spriežot pēc agrāko autoru (Āboltiņš 1971) datiem, šajā laikā izveidojās arī Miegupes delta, kura atradās apvidū, kur mūsdienās ieplūst Bēkurupīte. Pašreiz saistībā ar to, ka Miegupes deltā notikusi smilts–grants ieguve, nav iespējams pārbaudīt, vai deltu veidoja noteces ūdeņi, kas plūduši tikai pa Miegupi, vai arī to veidoja arī ūdens straumes, kas plūdušas pa Bekurupīti. Šobrīd diskutabls ir arī reljefa sliekšnis Ješku gravā, pie kura vairs nebija iespējama turpmākā Smiltenes baseina drenāža. Ja mūsdienu sliekšņa virsma atrodas 64 m v.j.l., tad jāņem vērā, ka ledus laikmeta beigu posmā tas ir bijis zemāks, jo ieplaku nav aizpildījusi kūdra. Laužu pazeminājumā, norēķinot kūdras slāni, reljefa virsma vidēji pazeminās par 1,5–2 m.

Tālākā ielejas attīstībā virs drumlinu lauka ledājs bija aprimis. Sākās ledājkūšanas ūdeņu drenāža pa Grūžupi uz Lejasbrišku paleobaseinu un vēl pastāvošo piededāja baseinu Bēkurupītes lejtecē. Galvenā ledājkūšanas ūdeņu plūsma notika pa Grūžupi un Miegupi posmā Gūžupes ieteka – ieteka Gaujā. To apstiprina šķērsprofili A-A1, B-B1 un C-C1 (4. att.). Redzams, ka Grūžupes ielejas gultne ir 54 m v.j.l. un tai turpinājums ir Miegupes ieleja, kurā sastopams terasveidīgs līmenis 53 m un lejteces virzienā tas pazeminās līdz 50,5 m v.j.l. Miegupe augšpus Grūžupes ietekas ir bijusi pieteka iepriekšminētai ledājkūšanas ūdeņu plūsmai. To arī apstiprina ielejas morfoloģija (A-A1 šķērsprofils).

Pēdējā attīstības posmā Miegupes ielejā uz D no Lejasbriškām pazeminājies paleobaseina līmenis un sākas augstākās virspalu terases veidošanās. Atkāpjoties ledāja malai, apsīka arī ledājkūšanas ūdeņu plūsma pa Grūžupi. Turklāt, teritorijai atbrīvojoties no ledāja, ieplaku, kas bija izveidojusies Grūžupes augštecē, sāka drenēt Ūņņupīte, kura ieplūst Abulā. Tādējādi lielāks ūdens pieplūdums bija Miegupē augšpus Grūžupes ietekas, kā rezultātā galvenā ūdenstece izveidojās pa mūsdienu Miegupes ieleju. Šī attīstības posma laikā sāka veidoties arī Miegupes virspalu terases, kuras sastopamas tikai no Šķesteriem līdz ietekai Gaujā. Saistībā ar intensīvu gultnes iegraušanos, terašu augstumi attiecībā pret mūsdienu upes gultni vienmērīgi paaugstinās lejteces virzienā. Attiecīgi II terase paaugstinās no 4–5 m augštecē līdz 5–6 m lejtecē. Topogrāfiski šī terase korelējas ar Gaujas III virspalu terasi, kuras augstums pie Sapām ir 40–41 m v.j.l. Jāpiezīmē, ka pie sanatorijas „Līči” Gaujas trešajā virspalu terasē zem palienes alūvija uzkrājušās augu makroatliekas, kuru vecums ir $10,535 \pm 0,25$ (Ri-33) un $10,282 \pm 0,25$ (Ri33A) ^{14}C gadi p.m. (Stelle *et al.* 1975a, b). Miegupes I virspalu terases augstums palielinās no 3–4 m posma augštecē līdz 4–5 m bet lejtecē. Terase beidzas izstrādātā karjerā pie Miegupes ietekas Gaujā. Topogrāfiski šī terase korelējas ar Gaujas II virspalu terasi, kuras veidošanās ir saistāma ar Baltijas ledus ezera BgIIIb attīstības stadiju (Āboltiņš 1971). Lejus Cēsu–Valmieras šosejai izsekojamā lokāalterase, kuras augstums virs ūdens līmeņa ir 3–3,5 m, topogrāfiski korelējama ar Gaujas I virspalu terasi, kura veidojusies Litorīnas jūras transgresijas laikā.

Secinājumi

Miegupes ielejā no tās ietekas līdz Šķesteriem izsekojamas divas virspalu terases, kuru relatīvais augstums virs upes līmeņa vienmērīgi paaugstinās lejteces virzienā. Topogrāfiski II Miegupes terase korelējas ar Gaujas III virspalu terasi, kas veidojusies Baltijas ledusezera BgII stadijas laikā. I Miegupes terase korelējas ar Gaujas II virspalu terasi, kura veidojusies Baltijas ledusezera BgIII stadijas laikā. Lokālterase topogrāfiski atrodas vienā līmenī ar Gaujas I virspalu terasi, kuras veidošanās atbilst Litorīnas jūras transgresijas laikam.

Pašreiz paliek neatbildēts jautājums par augu atlieku vecumu Atsegumā AIII, kas, iespējams, ir tāds pats kā pie sanatorijas „Līči” datētajiem nogulumiem ($10,535 \pm 0,25$ (Ri-33) un $10,282 \pm 0,25$ (Ri33A) ^{14}C gadi p.m), kuri uzkrājušies augšējā driasā. Pēc agrāko pētnieku domām, iespējams to vecums varētu būt lielāks, jo Gaujas III virspalu terases uzbūve leļpus Miegupes ietekas, liecina, ka alūvija apakšējā daļa varētu atbilst allerāda otrajai pusei, bet pati Gaujas III virspalu terase ir veidojusies Baltijas ledusezera BgII stadijas laikā.

Pateicības

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē» (Nr. 2009/0138/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/004).

This work has been supported by the European Social Fund within the project «Support for Doctoral Studies at University of Latvia» (No.2009/0138/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/004).

Autori pateicas recenzentiem, docentam Dr. ģeol. Aivaram Markotam un docentam Dr. ģeol. Jurim Somam, par ieguldīto darbu recenziju sagatavošanā un ļoti noderīgiem ieteikumiem raksta kvalitātes uzlabošanai. Tāpat autori izsaka īpašu pateicību profesoram Dr. ģeol. Vitālijam Zelčam par neatsveramu atbalstu un diskusijām raksta tapšanas gaitā.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- Āboltiņš O. 1971. *Razvitie dolini reki Gauja*. Zinātne, Rīga. 105 pp. (in Russian).
- Brangulis A.J., Juškevičs V., Kondratjeva S., Gavena I., Pomeranceva R. 2000. *Latvijas ģeoloģiskā karte, mērogs 1: 200 000, 43. lapa – Rīga, 53. lapa – Ainaži, paskaidrojuma teksts un kartes*. Valsts ģeoloģijas dienests, Rīga, 68 lpp.
- Chebotaiev I.A. 1975. *Obshchaya gidrologiya (vody sushi)*. Gidrometeoizdat, Leningrad. 544 pp. (in Russian).
- Eberhards G. 1972. *Strojenije i razvitije dolin baseina reki Daugava*. Zinātne, Rīga. 131 pp. (in Russian).
- Eberhards G. 1979a. Osnovnyye zakonomernosti dolinoobrazovaniya v Pribaltike. In: *Istoriya razvitiya rechnykh dolin i problemy melioratsii zemel'*. Evropeyskaya chast' SSSR. Nauka, Novosibirsk, 55–60. (in Russian).
- Eberhards G. 1979b. Osnovnyye zakonomernosti formirovaniya dolinno-rechnoy seti oblasti poslednego Evropeyskogo oledeneniya. In: *Biske G.S. (ed.–in–chief), Paleogeografiya*

- oblasti skandinavskikh materikovykh oledeneniy. Geograficheskoye obschestvo SSSR, Leningrad, pp. 10–18. (in Russian).
- Eberhards G., Müdel A. 1984. Main features of the development of river valleys in the East Baltic. Proceedings of the Academy of Sciences of the Estonian SSR. *Geology*, 33, 136–145.
- Eyles N., Eyles C.H., Maill A.D., 1983. Lithofacies, types and vertical profile models; an alternative approach to the description and environmental interpretation of glacial diamict and diamictive sequences. *Sedimentology* 30, 393–410.
- Froese D., Smith D., Clement D. 2005. Characterizing large river history with shallow geophysics: Middle Yukon River, Yukon Territory and Alaska. *Geomorphology* 67, 391–406.
- Garde R.J. 2006. *River morphology*. New Age International Pvt Ltd Publishers, New Delhi. 502 pp.
- Higgitt L.D., Warburton J. 1999. Applications of differential GPS in upland fluvial geomorphology. *Geomorphology* 29 (1–2), 121–134.
- Hoffmann T., Lang A., Dikau R. 2008. Holocene river activity: analysing ¹⁴C-dated fluvial and colluvial sediments from Germany. *Quaternary Science Reviews* 27, 2031–2040.
- Johnsen T.F., Brennand T.A. 2006. The environment in and around ice-dammed lakes in the moderately high relief setting of the southern Canadian Cordillera. *Boreas* 35, 106–125.
- Jones S.J., Frostick L.E., Astin T.R. 2001. Braided stream and flood plain architecture: the Rio Vero Formation, Spanish Pyrenees. *Sedimentary Geology*, 139, 229–260.
- Kostic B., Suss P.M., Aigner T. 2007. Three-dimensional sedimentary architecture of Quaternary sand and gravel resources: a case study of economic sedimentology (SW Germany). *International Journal of Earth Sciences* 96 (4), 743–767.
- Krievāns M. 2011. Rauņa ielejas attīstība Leduslaikmeta beigu posmā un holocēnā. *Acta Universitatis Latviensis: Zemes un vides zinātņu sērija*. 767.sēj., 35–47 lpp.
- Miall A.D. 1978. Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: a summary. In: Miall A.D. (ed.), *Fluvial Sedimentology*. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, 5, 597–604.
- Pisarska-Jamroży M., Börner A. 2011. Is the Charlottenthal fan (marginal zone of the Pomeranian phase, NE Germany) an end moraine? *Geologos*, 17 (1), 17–28.
- Raukas A., Āboltiņš O., Gaigalas A. 1995. The Baltic States: Overview. In: Schirmer W. (eds.), *INQUA 1995. Quaternary field trips in Central Europe. C-3 Baltic Traverse*. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, Munchen, Germany, pp. 146 – 151.
- Raukas A., Eberhards G. 1986. The problems of palaeohydrological reconstructions in the area of the last glaciation on the example of the Soviet Baltic countries. In: *INQUA Eurosiberian Subcommission for the study of the Holocene. IGCP Project 158-A: abstr.* Belgium, pp. 11–12.
- Rixhon G., Braucher R., Bourles D., Siame L., Bovy B., Demoulin A. 2011. Quaternary river incision in NE Ardennes (Belgium) – Insights from ¹⁰Be/²⁶Al dating of river terraces. *Quaternary Geochronology* 6, 273–284.
- Rowland J., Kenneth L., Dietrich E.W., Wilson J.C., Sheldon R. 2005. Tie channel sedimentation rates, oxbow formation age and channel migration rate from optically stimulated luminescence (OSL) analysis of floodplain deposits. *Earth Surface Processes and Landforms* 30, 1161–1179.
- Stelle V., Savvaitov A.S., Veksler V.S. 1975a. Datirovaniye pleystotsenovyykh otlozheniy na territorii Latvii. In: Savvaitov A.S., Veksler V.S. (eds), *Opyt i metodika*

- izotopno-geokhimicheskikh issledovaniy v Pribaltike i Belorussii*, Rīga, 80–81. (in Russian).
- Stelle V., Veksler V.S., Āboltiņš O. 1975b. Radiouglerodnoye datirovanije allyuvialnykh otlozheniy srednego techeniya reki Gauyi. In: Savvaitov, A.S., Veksler, V.S. (eds), *Opyt i metodika izotopno-geokhimicheskikh issledovaniy v Pribaltike i Belorussii*, Rīga, 87–88. (in Russian).
- Wysota W., 2002. *Stratigrafia i šrodnowiska sedimentacji zlowacenia wisly w południowej części dolnego Powiśla*. Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Toruń, 144 pp. (in Polish).
- Zelčs V., Markots A. 2004. Deglaciation history of Latvia. In: Ehlers J., Gibbard P. L. (eds.) *Extent and Chronology of Glaciations, v. 1 (Europe)*. Elsevier, pp. 225–244.
- Zelčs V., Markots A., Nartišs M., Saks T. 2011. Chapter 18: Pleistocene Glaciations in Latvia. In: Ehlers J., Gibbard P.L., Hughes P.D. (eds.), *Quaternary glaciations – extent and chronology. A closer look. Developments in Quaternary Sciences* 15, Elsevier, pp. 221–229.
- Zieliński T. 1995. Kod litofacjalny i litogenetyczny — konstrukcja i zastosowanie. In: Mycielska-Dowgiałto E.Ż., Rutkowski J. (eds.), *Badania osadów czwartorzędowych. Wybrane metody i interpretacja wyników*. Wydział Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu, Warszawa, pp. 220–235. (in Polish).
- Zieliński T. 1998. Litofacjalna identyfikacja osadów rzecznych (Lithofacial identification of alluvial sediments). In: Mycielska – Dowgiałto E. (ed)., *Struktury sedymentacyjne i postsedymentacyjne w osadach czwartorzędowych i ich wartość interpretacyjna*. Wydział Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, pp. 195–257. (in Polish).
- Ziverts A.A., Arkharova T.V. 1981. Geologicheskaya karta (chetvertichnyye otlozheniya) mashtaba 1:50 000. *V: Prilozheniye k otchet o gruppovoy geologicheskoy syemke masshtaba 1:50 000 Gauyskogo natsionalnogo parka*. Ministerstvo geologii SSCR, Upravleniye geologii soveta ministrov Latviyskoy SCR geologorazvedochnaya ekspeditsiya Gauyskaya G.S.P., g. Rīga, 5–7 list. LGF nr 9855. (in Russian).
- Ziverts A. 1995. Miegupe. No: Kavacas G. (atb. red.) *Latvijas Dabas enciklopēdija*, 4. Rīga, Preses nams, 256 lpp.

LATVIJAS UNIVERSITĀTES RAKSTI
789. sējums, Zemes un vides zinātnes, 2012

LU Akadēmiskais apgāds
Baznīcas ielā 5, Rīgā, LV-1010
Tālrunis: 67034535

Iespiests SIA "Latgales druka"
Baznīcas ielā 28, Rēzeknē, LV-4601
Tālrunis/fakss: 64625938