

PERPETUUM MOBILE 2019

Latvijas Universitātes fonda
mecenātu atbalstīto pētnieku
zinātnisko rakstu krājums

Perpetuum mobile 2019, Latvijas Universitātes fonda
mecenātu atbalstīto pētnieku zinātnisko rakstu krājums.
Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 2019. 136 lpp.

Apstiprināts publicēšanai ar Latvijas Universitātes
Eksakto, dabas un dzīvības zinātņu padomes sēdes
lēmumu 2019. gada 24. maijā (protokols Nr. 4).

Redkolēģijas vadītājs: Ivars Ījabs

Redkolēģija: Ivars Lācis, Dainis Krieviņš,
Edvīns Danovskis, Ilze Rūmniece, Mārcis Auziņš
Redkolēģijas atbildīgā sekretāre: Laila Kundziņa

Recenzenti: Ivars Ījabs, Ivars Lācis, Dainis Krieviņš,
Edvīns Danovskis, Ilze Rūmniece, Mārcis Auziņš,
Vitālijs Zelčs, Valdis Segliņš, Andris Jakovičs.

Literārais redaktors: Oskars Lapsiņš

Pateicība LU fonda stipendiātam Mārim Seņkovam
par brīvprātīgo darbu krājuma tapšanas laikā.



SATURS

- 6 **JĀNIS CEPURĪTIS** Filantropija kā cilvēciskās esības dziļākais apliecinājums
- 12 **KRISTAPS LAMSTERS, MĀRIS KRIEVĀNS, JĀNIS KARUŠS** Argentīnas salu (Vilhelma arhipelāgs, Antarktīka) ledus kupolu ģeofizikālie pētījumi
- 22 **SERGEJS ZADOROŽNIJS** Digitālā plānošana kā palīglīdzeklis pret agrīniem mežģījumiem pēc gūžas locītavas endoprotezēšanas
- 32 **ZBIGŅEVS MARCINKEVIČS, ANDRIS GRABOVSKIS, ULDIS RUBĪNS, SIGITA KAZŪNE, KARĪNA VOLČEKA, ANASTASIJA CAICA** Sepses diagnostika, izmantojot hiperspektrālo attēlveidi un termogrāfiju
- 42 **ANDRIS BĒRZIŅŠ** Magnētiskā lauka attēlošana magnētisko īpašību pētīšanā
- 56 **KĀRLIS PLEIKO, LĪGA SAULĪTE, VADIMS PARFEJEVS, UNA RIEKSTIŅA** Aptamēru atlase pret gaišo šūnu nieru karcinomu: šūnu SELEX metodes izmantojums
- 68 **TOMS RĒĶIS** Statistiskās mehānikas un kvantu ķīmisko aprēķinu pielietojums nesakārtotu cietfāžu raksturošanā
- 78 **KALVIS SALMIŅŠ** Laika intervālu mērītāja RTS 2006 modernizācija
- 84 **DIDZIS BERENIS** Magnētiskās hidrodinamikas attīstība, rotējošu pastāvīgo magnētu ierosinātas plūsmas industrijā un pētniecībā
- 96 **AIGARS KOKINS** Dabiskie krāsu zemju minerālu pigmenti, okeri un to krāsas
- 106 **KRISTĪNE ROTBAHA** Pārdzīvojušā laulātā mantojuma tiesības latviešu tautasdziesmās
- 118 **ROBERTS RASUMS** Rietumkrievijas brīvprātīgo armijas uzbrukums Rīgai 1919. gada 8.–19. oktobrī: politiskie un militārie aspekti
- 126 LU fonda mecenātu atbalstītie stipendiāti no 2014./15. līdz 2018./19. akadēmiskajam gadam

Filantropija kā cilvēciskās esības dziļākais apliecinājums

JĀNIS CEPURĪTIS, Latvijas evaņģēliski
luteriskās Baznīcas mācītājs, LU fonda
2011./2012., 2012./2013., 2013./2014.
un 2014./2015. akadēmiskā gada
Žaņa Lapuļa piemiņas stipendiāts

Laikmetu, kurā dzīvojam, bieži mēdz dēvēt par dinamisku pārmaiņu un neierobežotu iespēju laikmetu vienlaikus. Straujā tehnoloģiju augšupeja, informācijas apjoma pieaugums, ilgas pēc sociālās vienlīdzības un globālo procesu nenoturība. Lai neapjuktu un spētu atbildēt uz mainīlno procesu dinamiku, vadītājiem visdažādākajos līmeņos ir jābūt konkurētspējīgi izglītotiem un praktiķiem kompetencēs. Mainīlilus procesus var vadīt tie, kuri spēj praksē integrēt jaunas un attīstošas kompetences.¹ Sabiedrības pārmaiņu pazinēji norāda, ka sociālo pārmaiņu temps ir palielinājies tieši 20. gadsimtā līdz ar industrializācijas tempiem, demogrāfiskajām un cilvēka izraisītām vides pārmaiņām, kas gadsimta beigās bija straujākas nekā tā sākumā.² Tomēr līdzās visiem redzamajiem pārmaiņu procesiem cilvēces vēsture nav iedomājama bez reliģiskajiem priekšstatiem un to ietekmes. Reliģija gluži kā «zelta stīga», kā iekšēja eksistenciāla atsaukšanās, būt un

dzīvot vairāk par šodienu un progresa sasniegto. Teoloģijas profesora Gerija Andersona (*Gary A. Anderson*) vārdiem sakot, tā ir cilvēka vēlme zināt un ticēt, ka pasaule ir vieta, kur dalīties ar to, kas man ir, nevis pienākuma dēļ, bet gan tāpēc, ka došana ir šīs pasaules metafiziskā struktūra.³ Lieli vārdi — došana ir daļa no šīs pasaules struktūras un vienlaikus daļa no paša cilvēka. Tam ir grūti nepiekrīst, jo ikvienas sabiedrības formēšanās un patstāvība sākas ar indivīda apziņu par sevi un procesiem, kas liek apzināties savu patieso būtību. Tā ir garīga dimensija, kas līdzdarbojas ne tikai vēstures, bet arī paša indivīda tapšanā. Došanas dziļākā būtība jeb filantropija ir viena no zemapziņas balsīm, kuru sadzirdot un uz to atsaucoties ieguvums ir abpusējs — gan devējam, gan saņēmējam.

Filantropijai kā sociālam un reizē garīgam fenomenam ir ļoti sena vēsture. Reliģijas un vēstures profesors Demetrijs Konstantelos (*Demetrios J. Constantelos*), kurš specializējies Senās Grieķijas kultūrtelpas pētniecībā, norāda, ka filantropijas jēdziens cēlies no grieķu valodas *philein ton anthropon*, kas nozīmē mīlestība uz cilvēku; šo vārdu lietojis jau grieķu traģēdiju autors Aishils.⁴ Vēstures pētniecība ļauj secināt, ka Senajā Grieķijā filantropija ir bijusi kultūras fenomens, kas caurstrāvvoja politisko un pilsonisko sabiedrību.⁵ Savukārt Platona tekstos filantropija tiek raksturota kā norāde mīlēt cilvēku, palīdzot (asistējot) viņa vajadzībās. Uz filantropijas vēstures ass būtu jāpiemin arī Bizantijas imperators Justiniāns (482–565), kura laikā filantropijas organizācijas sāka saņemt dāsnas dāvanas un mantojumus, un vienlaikus šīs organizācijas baudīja imperiālo nodokļu atlaides. Laika gaitā šīs labvēlīgās attieksmes dēļ imperatori iemantoja pat īpašu — filantropa — titulu. Šie fiskālās imunitātes vēsturiskie apstākļi bija tie, kas vēlāk definēja visas Rietumu pasaules filantropijas ētosu.⁶ Varbūt tieši tas

1 Fransworth K. A. *Leadership as Service: A New Model for Higher Education in a New Century*. 2007. Westport: ACE, Praeger Publishers.

2 Rudel T. K and Hooper L. Is the Pace of Social Change Accelerating?: Latecomers, Common Languages, and Rapid Historical Declines in Fertility. 2005. *International Journal of Comparative Sociology*, vol. 46.4, p. 275.

3 Anderson G. A. *Charity. The Place of the Poor in the Biblical Tradition*. 2013. Yale University Press, vol. 4.

4 Constantelos D. J. Origins of Christian Orthodox Diakonia: Christian Orthodox Philanthropy in Church History. 2007. Springer-Winter 1, *Greek Orthodox Theological Review*, vol. 52, pp. 1–4.

5 Robbins K. C. Historical Perspective: Traditions of Philanthropy in the West. 2006. In: *The Nonprofit Sector: A Research Handbook*, 2nd ed., ed. Walter W. Powell and Richard Steinberg, Yale University Press, vol. 15.

6 Ibid., p. 23.

palīdzēja, lai filantropijas universālo raksturu kristīgā pasaule transformētu par Rietumu sabiedrības stūrakmeni. Liela daļa no kultūras un izglītības mantojuma nebūtu iedomājama bez filantropijas, bez privātas un ļoti personīgas materiālās iesaistes.⁷ Tā, lūk, ir cilvēka līdzdaļa pasaules metafiziskajā struktūrā, kas nepakļaujas progresam vai vērtību mainībai, bet paliek uzticama zemapziņas pārspēkam. Par to viens no redzamākajiem 20. gs. starpreliģiju dialoga praktiķiem, publicists un trapistu mūks Tomass Mērtons (*Thomas Merton*) saka: «Bieži gadās, ka cilvēka patiesā esība ir apbedīta zemapziņā un tai netiek dota iespēja izpausties un dzīvot mūsos.»⁸ Lūk, filantropija visos laikos ir bijusi kā cilvēka zemapziņas klusā balss, kas vēstures mainīgumā cilvēciģo attiecību vērtību uztur nemainīgu, proti, ar savu devumu piedalīties sabiedrības tapšanas procesos. Tāpēc filantropija ir sastopama dažādu reliģiju, kultūru un politiskajos kontekstos.

Gandrīz katrā reliģiskajā sistēmā ir pārstāvēta mācība par ziedošanas praksi. Jūdaismā, islāmā un atsevišķās Austrumu reliģijās dalīšanās ar materiāliem labumiem un došana ir stingri reglamentēta. Labdarība (žēlsirdības dāvanu došana)

7 Feingold M. *Philanthropy, Pomp, and Patronage: Historical Reflections upon the Endowment of Culture*. 1987. *Daedalus*, vol. 116(1), p. 155.

8 Merton T. *No Man Is an Island*. 2005. Boston: Shambhala, p 39.

9 Gronlund H. and Pessi A. B. *The Influence of Religion on Philanthropy across Nations*. 2015. In: *The Palgrave Handbook of Global Philanthropy*, P. Wiepking and F. Handy (eds.), New York: Palgrave Macmillan, pp. 558–561.

10 Robbins K. C., op. cit., 14.

11 Constantelos D. J., op. cit., 4.

12 *Bībele*. 2012. Rīga: Latvijas Bībeles biedrība.

13 Cascione G. L. *Philanthropists in Higher Education: Institutional, Biographical, and Religious Motivations for Giving*. 2005. Taylor & Francis e-Library, p. 78.

Tuvajos Austrumos dominē kā viesmīlība, Senajā Grieķijā, jūdaisma un kristīgās pasaules kultūrtelpā kā mīlestība uz savu tuvāko. Lūk, tik daudzas reliģiskās sistēmas ietver sevī šo universālo līdzcietības principu — izturēties pret citiem tā, kā mēs gribētu, lai izturas pret mums. Islāmā kā viena no ziedošanas formām pastāv *zakat*, kas ir ziedojums no ikgadējiem ienākumiem un ko musulmaņu zemēs pārvalda vietējā varas pārvalde. Jūdaismā ziedojuma došana ir viens no reliģiskajiem imperatīviem.⁹ Šādā semītu kultūrvīdē ziedošana ir viens no reliģiskās prakses bāzes elementiem, lai apliecinātu piederību pie noteiktas reliģisko uzskatu sistēmas. Jūdaismā šis princips ir ļoti uzskatāms.¹⁰ Šajā kontekstā to varētu saukt par lietišķo tikumu¹¹, kas Vecajā derībā ir ietērpts vārdos «nenocietini savu sirdi, neaizžņaudz plaukstu skopulībā» (5. Mozus 15:7)¹².

Arī kristietības paradigmā dominē specifisku vērtību kodols, kas regulē attieksmi pret laicīgo mantu.¹³ Gan jūdaismā, gan kristietībā dominē labprātīgas došanas (mīlestības dāvanas) principi. Vecās un Jaunās derības teksti runā arī par neieinteresēto filantropiju, tādu, kas dod nevis pienākuma dēļ, bet gan mīlestības motīvu vadīta. Visos laikos, izprotot filantropiju, reliģiskie motīvi saistās ar paša devēja noteikta garīgā stāvokļa ieguvumu. Piemēram, Jaunās derības izpratne par žēlsirdības dāvanu došanu reizumis vēsturē ir interpretēta kā ieguvums debesu valstībā, tādējādi

caur došanu devējs pats samaksā par saviem grēkiem¹⁴. Jaunajā derībā Pāvila tekstus var uzskatīt par agrāko kristīgās doktrīnas un rituālās prakses avotu. Tajos atrodams ļoti uzskatāms sociālās ētikas modelis, kas mudina agrīno kristīgo kopienu praktizēt filantropiju ar ļoti skaidru garīgu motivāciju¹⁵. Viens no kristīgās teoloģijas kritērijiem filantropijas laukā ir atrodams jau pieminētajā *zelta likumā*: «Visu, ko jūs gribat, lai cilvēki jums dara, dariet tāpat arī jūs viņiem.» (Mt. 7:12, Lk. 6:31)¹⁶

Iespējams, viena no agrīnās Baznīcas filantropijas definīcijām ir datējama ar 3. gs. un piedēvēta Klementam. Tā ir vīzija par sociāli atbildīgu un inkluzīvu sabiedrības modeli:

«Filantropijas diženums atklājas kā mīlestība pret ikvienu cilvēku. Tā nešķiro pēc izskata [...] filantropija iestājas par katru, jo ikviens ir cilvēks, neatkarīgi no viņa pārliecības [...], ja nepieciešams, filantropija iestājas pat par savu ienaidnieku, jo ikviens tiek uzlūkots kā savs tuvākais. Godīgs un blēdīgs, draugs vai ienaidnieks — viņi visi ir cilvēki. Tāpēc tas, kurš praktizē filantropiju, nes sevī Dieva līdzību, darot labu tur, kur ir taisnība un netaisnība. Darot tā kā Dievs pats — dodot saules gaismu visai pasaulei.»¹⁷

Tāpat lielākā daļa no civilizācijas jau vēsturiski ir pazīstama ar filantropiju, kur tieši reliģiskie priekšstati un prakse ir vērā ņemams aspekts. Šāds došanas princips ir aktuāls arī mūsdienu pasaulē. Mēs katrs varam kļūt par daļu no lielāka eksistenciālā veseluma, kļūt par paraugu nevis vispārīgas, bet mūsu valsts un sabiedrības veidošanā. Ja var piekrist apgalvojumam, ka izglītība ir viena no cilvēka pamatvajadzībām¹⁸, tad filantropija kļūst par lietišķu tikumu, tā ir sevī uzvarēta pārliecība visu dzīvi nepaturēt tikai pie sevis. Šī ziedošanas kultūra, kas vērsta uz konkrētu sabiedrības procesu izaugsmi, ne vienmēr ir saistīta tikai ar reliģiskiem motīviem. Politiskie un sociālo pārmaiņu procesi ar mainīgiem panākumiem ir rosinājuši tuvināt vai atšķirt filantropiju no reliģiskā konteksta. Viens no pārmaiņu laikiem Rietumu pasaules kultūrtelpā ir 12. gs., kad liels skaits cilvēku migrēja no lauku reģioniem uz aizvien pieaugošajām pilsētām. Arvien mazāka sabiedrības daļa sevi asociēja ar sava laika Romas katoļu Baznīcas labdarības formām. Ierastā ziedošanas platforma bija klosteri, kas administrēja iegūtos līdzekļus. Liela daļa šo klosteru atradās lauku teritorijās, tāpēc, ņemot vērā šos migrācijas procesus, ziedošanas prakse strauji samazinājās. Savukārt aizvien pieaugošajā pilsētvidē filantropija ieguva jaunas formas, distancējot sevi no reliģiskā labdarības konteksta. Līdz pat 16. gs. Rietumeiropas sekularizācija pātrināja arī filantropijas reliģiskā rakstura maiņu.¹⁹ No tā var secināt, ka mūsdienās filantropiju motivē vismaz divu veidu mērķi: a) reliģiskais mērķis un b) sekulārais mērķis. Reliģiskais mērķis balstās konkrētos reliģiskās kopienas

14 Anderson G. A., op. cit., 3.

15 Robbins K. C., op. cit., 20.

16 Vantsos M. and Kiroudi M. An Orthodox View of Philanthropy and Church Diaconia. 2007. *Christian Bioethics: Non-ecumenical Studies in Medical Morality*, vol. 133, p. 255.

17 Krawchuk A. *Orthodox Christianity and Islam on Economic Justice: Universal Ideals and Contextual Challenges in Russia, in Poverty and Wealth in Judaism, Christianity, and Islam* ed. Nathan R. Kollar and Muhammad Shafiq. 2016, p. 130.

18 Brett N. *Teaching Class: Justice and Privatization in Education, in Engaged Philosophy: Essays in Honour of David Braybrooke*, ed. Susan Sherwin and Peter Schotch. 2006. University of Toronto Press, p. 24.

19 Robbins K. C., op. cit., 23–25.

priekšstatos par ziedojumu un žēlsirdības dāvanu nozīmi, sekulārais — ļoti noteiktā sabiedrības procesu ietekmēšanā un veidošanā. Viens no filantropijas zināmākajiem pārstāvjiem Džons Rokfellers (*John Rockefeller*) uzskatīja, ka naudas došana nabadzīgajiem sniedz īslaicīgu labumu, bet vienlaikus tas nav iemesls, lai atteiktu palīdzību. Turpinot viņš norāda, ka labdarība var paēdināt izsalkušos, parūpēties par slimajiem un apgērbt kailos. Kad notiek zemestrīce, labdarība steidzas palīgā, bet zinātniskas studijas par ģeoloģiskajiem procesiem var sekmēt preventīvas darbības katastrofu novēršanai.²⁰ Šā pasaules mēroga mecenāta pārliecība ir kalpojusi par paraugu daudziem citiem atbalstīt zinātnei, pētniecību un dažādu jomu studijas topošajiem speciālistiem.

Līdzīgu viedokli pauž arī ilggadējs ASV filantropijas procesu pazinējs Stīvs Gundersons (*Steve Gunderson*): «Labdarība ir tūlītēja rīcība, kas vērsta uz īstermiņa mērķiem, bet filantropija ir ilgtermiņā fokusēta stratēģiska atjaunošanās.» Tomēr mūsdienās robeža starp izteikti sekulāru un reliģiski motivētu filantropiju mēdz būt arī grūti nosakāma. Piemērs tam ir pāvesta Benedikta XVI enciklika *Caritas in Veritate* (Mīlestība patiesībā), kas pievēršas sabiedrības sociālajiem jautājumiem. Savā ziņā šī enciklika pārstāv sociālās ētikas aktualitātes, kas pārsniedz reliģiskās labdarības kontekstus. Viņš norāda, ka vārds «dāvana» ir kristietības sociālās vīzijas sirds. «Dāvana» nozīmē brīvi dot un dalīties ar ikvienu. «Tas ir ne tikai mikroattiecību princips (ar draugiem, ar ģimeni vai mazu kopienu), bet arī makroattiecību princips (sociālās, politiskās un ekonomiskās norises).» Vienlaikus viņš uzskata, ka sabiedrības sociālā atbildība visos varas un atbildības līmeņos ir iespējama, tikai pieņemot došanas un dalīšanās principu.²¹

Arī Latvijas Universitāte var lepoties ar mecenātiem, kuru rūpes par zinātnei ir dāvinājušas Latvijai ne mazumu pasaules līmeņa zinātnieku un jomas speciālistu. Viņu līdzdalība, kļūstot par Latvijas Universitātes mecenātiem, vistiešākajā veidā balstās makroattiecību veidošanā, iestājoties par izcilību un izglītotu sabiedrību. Latvijas Universitātei šādu piemēru netrūkst. Grāmatā par Latvijas Universitātes dāsnāko mecenātu Kristapu Morbergu (1844–1928) filozofs profesors Pēteris Zālīte raksta, ka no viņa testamentārā mantojuma «būs labus augļus, svētību nest, palīdzēt pie zināšanām tikt, zinātnē kalngalus sniegt, no turienes tad gaismas starus tumsībā raidīt, lai tumsa galīgi izkļūst, nezinašanas vietā lai zināšana nāk. Zināšana ir vara. Šī vara lai katram. Viņa ir ierocis, līdzeklis, ar ko ikviens var savu likteni labot»²². Lai arī šiem vārdiem ir savam laikam raksturīgā valodas izteiksme, būtību par ieguldījumu zinātnē un izglītībā tie joprojām nav zaudējuši. Uzrunājot akadēmisko saimi Universitātes

20 Prewitt K. *Foundations, in The Nonprofit Sector: A Research Handbook*, 2nd ed., ed. Walter W. Powell and Richard Steinberg. 2006. Yale University Press, p. 362.

21 Krier Mich M. L. *A Spirituality for Rich and Poor: Contemporary Catholic Ideals for Economic Justice*. In: *Poverty and Wealth in Judaism, Christianity, and Islam*, ed. Nathan R. Kollar and Muhammad Shafiq. 2016. New York: Palgrave Macmillan, p. 228.

22 Zālīte P. *Kristaps Morbergs un viņa lielais dāvinājums Latvijas Universitātei*. 1928. Valters un Rapa, Rīga, 40. lpp.

80. gadadienā, zināšanu svarīgo lomu sabiedrības un valsts apziņā uzsvēra arī Valsts prezidente, Latvijas Universitātes goda doktore Vaira Vīķe-Freiberga: «Mums pašiem ir jābūt spējīgiem risināt visus jautājumus, kas ar mums ir saistīti, mums pašiem ir jābūt spējīgiem spriest un domāt, mums pašiem ir jābūt intelektuāli sagatavotiem. Šo gatavību mums garantē Universitāte, kas kopj dažādus zinātņu laukus, garantē, ka cilvēks nav tikai amata pratējs, šaurs speciālists. Universitāte rada intelektuālu vidi, kurā cilvēks var intelektuāli veidoties.»²³

Jā, mums pašiem... Tie ir pienākuma vārdi, kas no mums prasa rūpīgu un atbildīgu attieksmi. Arī filantropijas vēsturi, ko ātriem soļiem pārstāigājām, joprojām veidojam... mēs paši. Un tās pamatā arī šodien daudzējādā ziņā ir reliģiskie procesi, kas mijiedarbojas ar sekulāras sabiedrības kontekstu. Mūsu patiesā esība vēlas dzīvot, tā vēlas apliecināt, Klementa vārdiem sakot, «ikvienu kā savu tuvāko». Filantropija dod iespēju atraisīt savu patieso būtību caur lietišķo tikumu — došanas prieku, ieguldot izglītotas sabiedrības nākotnē. Universitāte ar cienījamu filantropijas vēsturi aizvien ir makroattiecību paraugs. Katra mecenāta dzīvē vairāk par ārējiem resursiem ir bijuši kādi iekšēji — zemapziņas — apstākļi, kas likuši pārkāpt individuālisma sliksnim, no mikroattiecībām realizēt un atraisīt sevi daudz plašākā kontekstā. Tikai tas cilvēks, kurš piedzīvojis savas personības pārmaiņas un briedumu, kļūst patiesi atvērts un mīlošs. Zīmīgi, ka reliģiskie motīvi (arī kristietībā) runā par pārmaiņām gan sabiedrībā, gan pašā individuā, kurš veido attiecīgo sabiedrību²⁴. Šis pārmaiņas sākas cilvēka iekšējā attieksmē un uztveres laukā un pēc tam realizējas labos darbos — top redzamas uz āru. Reiz iesāktās filantropijas tradīcijas Latvijas Universitātē kļuvušas par mērķtiecīgas un kompetentas izglītības un izcilības paraugu. Universitāte var lepoties ar mecenātiem Latvijā un trimdā, bet viņi netiek dalīti tuvos un tālos, viņi visi ir cilvēki, kuriem *Alma Mater* ir tepat — sirdī. Viņu vārdi no tuvākas vai tālākas vakardienas ienāk šodienā. Arī viņu likteņos varam

atrast daudz smaga darba un grūtas pieredzes, viņos ir tik daudz no prezidentes Vairas Vīķes-Freibergas sacītajiem vārdiem «mēs paši». «Mēs paši» veidosim izglītotu sabiedrību, izcilus zinātnes pārstāvjus un viedokļu līderus. Būt par Latvijas Universitātes mecenātu nozīmē turpināt filantropijas lietišķo tikumu. Tam bija un vienmēr paliks laikā nezūdoša vērtība.

23 Vīķe-Freiberga V. Uzruna Latvijas Universitātes 80. gadadienai veltītajā pasākumā Nacionālajā operā 1999. gada 29. septembrī. Pieejams: <http://dom.lndb.lv/data/obj/1040.html> [skatīts 10.01.2018.].

24 Yarbrough C. D. Mary's Magnificat: The Anawim and Church on the Margins. In: *Poverty and Wealth in Judaism, Christianity, and Islam*, ed. Nathan R. Kollar and Muhammad Shafiq. 2016. New York: Palgrave Macmillan, p. 71.

Argentīnas salu (Vilhelma arhipelāgs, Antarktika) ledus kupolu ģeofizikālie pētījumi

KRISTAPS LAMSTERS, LU Ģeoloģijas
nodaļas vadošais pētnieks

MĀRIS KRIEVĀNS, LU Ģeoloģijas
nodaļas docents

JĀNIS KARUŠS, LU Lietišķās ģeogrāfijas
katedras docents

Projekts tapis ar SIA «Mikrotīkls» ziedojumu,
ko administrē Latvijas Universitātes fonds.

2018. gada februārī Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes pētnieki Jānis Karušs, Kristaps Lamsters un Māris Krievāns devās pirmajā Latvijas zinātnieku ekspedīcijā uz Antarktiku, kas norisinājās sadarbībā ar Ukrainas Nacionālo Antarktikas pētījumu centru, kas pārvalda akadēmiķa Vernadska polārstaciju Antarktīkā. Ekspedīcijā, izmantojot bezpilota gaisa kuģi, veikta lielāko Argentīnas salu aerofotografēšana un ledus kupolu mērījumi ar ģeoradaru. Pirmo reizi šai salu grupai izveidotas augstas izšķirtspējas ortofotokartes, digitālie virsmas modeļi, kā arī ledāju biezuma un zemledāja reljefa modeļi. Iegūti dati par ledus kupolu biezumu un iekšējo struktūru. Zem Urugvajes ledus kupola atklāts līdz šim nezināms zemledāja ezers. Ekspedīcijā ievākti augsnes, nogulumu un ledus paraugi, kas tiek analizēti sadarbībā ar vairākām zinātniskajām institūcijām Latvijā un ārzemēs. Pētījums pierāda Latvijas zinātnieku kapacitāti iesaistīties polāro reģionu pētniecībā un ir nozīmīgs solis polāro pētījumu jomas attīstībā Latvijas Universitātē un Latvijā kopumā.

Atslēgvārdi: **Antarktika, polārie apgabali, ledāji, klimata pārmaiņas**

levads

Globālās klimata izmaiņas un to izraisītās sekas ietver ne tikai vidējās temperatūras pieaugumu, dažos reģionos biežāk novērojamus ekstremālus laikapstākļus, kā arī savvaļas dzīvnieku un dzīvotņu migrāciju, Pasaules okeāna līmeņa celšanos un citas pārmaiņas. Kompleksi pētījumi par globālo klimata izmaiņu ietekmi uz ledājiem un to kušanas izraisīto Pasaules okeāna ūdens līmeņa celšanos, kas būtiski ietekmē apdzīvotās teritorijas okeānu un jūru tuvumā, tostarp Latviju, ir sevišķi būtiski, jo vairāk nekā divas trešdaļas no pasaules saldūdens resursiem ir ieslēgti ledājos, kuriem pilnībā izkūstot Pasaules okeāna līmenis celtos par aptuveni 70 metriem. Tik dramatiskas pārmaiņas nenotiek momentāni, tomēr laikposmā no 1961. līdz 2003. gadam konstatēts, ka Pasaules okeāna līmenis ceļas par $1,8 \pm 0,5$ mm gadā, un jāņem vērā, ka 150 miljoni cilvēku dzīvo sauszemes daļā, kuras augstums ir līdz vienam metram virs mūsdienu jūras līmeņa [1].

Grenlandes un Antarktīkas segledāju masas zudums ir galvenais Pasaules okeāna līmeņa izmaiņu veicinātājs 21. gadsimtā, turklāt to ietekme ir nozīmīgāka nekā ledus kupoliem, kalnu ledājiem vai tam, ka okeāni termiski izplešas [2]. Antarktīka tiek uzskatīta par unikālu reģionu, kurā iespējams veikt segledāju attīstības un dinamikas pētījumus, kas tieši saistāmi ar ilglaicīgām klimata izmaiņām. Tieši šis reģions lielākoties nosaka saldūdens līdzsvaru, Antarktīkas cirkumpolārās straumes dinamiku un ātrumu, Zemes klimatu kopumā, kā arī nodrošina unikālu bioloģisko vidi, tādējādi nepieciešams paplašināt pētījumus par ledājiem un ar tiem saistīto procesu norisi, lai varētu prognozēt un ilgtermiņā rēķināties ar to radītajām sekām.

Antarktīdas pussala un it īpaši tās rietumu daļa, pēc daudzu zinātnieku domām, ir reģions, kurā pēdējo 50 gadu laikā norisinās strauja temperatūras paaugstināšanās [3; 4]. Atmosfēras temperatūra Antarktīdas pussalā ir paaugstinājusies par gandrīz 4°C 20. gadsimta laikā [5]. Šā temperatūras kāpuma sekas ir, piemēram, ledāju atkāpšanās un ledus masas zudums, kas Antarktīdas pussalā ir pat trīskāršojies pēc 1990. gada, veidojot vidēji 24 gigatonnas gadā pēdējo 40 gadu laikā [6].

Ņemot vērā straujo ledāju kušanu Antarktīdas pussalā un polārajos apgabalos kopumā un tās globālo ietekmi uz pasaules ekosistēmām, ir vitāli nepieciešams īstenot šo pārmaiņu monitoringu un novērtēšana gan lokālā, gan pasaules līmenī. Iesaistoties šo globālo jautājumu risināšanā, Latvijas Universitātes (LU) Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes (ĢZZF) ģeologi kopš 2014. gada ir sākuši attīstīt polāro pētījumu jomu arī Latvijā. Līdzšinējās sešas ekspedīcijas uz Arktiku un Antarktiku ļāvušas uzkrāt pieredzi un attīstīt ledāju pētījumu metodiku, kas turpmāk ļauj veikt augstas detalizācijas pētījumus ledājos visā pasaulē. Pētījumu virzība ir bijusi rūpīgi pārdomāta, un iespēja veikt pētījumus Antarktīdā ir nozīmīgs sasniegums un svarīga stratēģija Eiropas zinātnes un klimata politikas kontekstā, ņemot vērā to, ka Eiropas valstīm pieder aptuveni 30 polārstacijas Antarktīkā. Tādējādi polāro pētījumu jomas attīstība LU uzskatāma par prestižu un



1. ATTĒLS. (A) Pētnieku komanda Antarktīdā. No kreisās: Jānis Karušs, Māris Krievāns, Kristaps Lamsters. (B) Akadēmiķa Vernadska polārstacija. Fonā Antarktīdas pussalas kalnu grēda un ledāji. (C) Stāva ledus kupola nogāze uz Galindesa salas. (D) Drona palaišanas misija Antarktīkā. (E) GPS bāzes stacija uz ledus kupola. (F) Mērījumu veikšana ar ģeoradaru.

valstiski nozīmīgu. Par galveno ilgtermiņa mērķi ir izvirzāma Latvijas sezonālās polārstacijas būvniecība un polāro pētījumu izvēršana Antarktīkā.

Lai īstenotu pirmo LU zinātnieku ekspedīciju uz Antarktiku, tika noslēgts sadarbības līgums ar Ukrainas Nacionālo Antarktīkas pētījumu centru, kas pārvalda akadēmiķa Vernadska polārstaciju Antarktīkā.

Ekspedīcija norisinājās no 2018. gada 10. februāra līdz 18. aprīlim, un tajā piedalījās LU ĢZSF mācībspēki un pētnieki Jānis Karušs, Kristaps Lamsters un Māris Krievāns (1. att. A). Ekspedīcijas mērķis bija izpētīt Antarktīdas pussalas un Argentīnas arhipelāga salu ledāju un pieledāja ekosistēmu izmaiņas klimata pārmaiņu ietekmē.

Teritorijas raksturojums un pētījumu vēsture

Akadēmiķa Vernadska polārstacija (1. att. B) atrodas uz Galindesa salas, kas novietota Vilhelma arhipelāga Argentīnas salu grupā 7 km uz rietumiem no

Antarktīdas pussalas Greiema krasta. Polārstacijas aizsākumi meklējami jau 1935. gadā, kad uz blakus esošās Vinterailendas salas tiek uzbūvēta ziemošanas bāze. Kad šī nometne 1946. gadā tiek neizskaidrojami iznīcināta, nākamajā gadā tā tiek uzcelta no jauna, bet jau 1954. gadā tiek uzbūvēta Bāze F uz blakusesošās Galindesa salas, kur tā atrodas joprojām. Bāze F vēlāk tiek pārdēvēta par Faradeja staciju, kas darbojas līdz 1996. gadam, kad to pārņēma Ukraina, nodēvējot par Vernadsku, godinot pazīstamo dabaszinātnieku Vladimīru Vernadski (*Владимир Вернадский*) [7].

Argentīnas salas kopumā veido vairāki desmiti lielāku un mazāku salu un klinšu. Pirmās zinātniskās ekspedīcijas uz Antarktīdas pussalas rietumu krastu tika organizētas 19. gadsimta beigās un 20. gadsimta sākumā. Beļģu Antarktiskās ekspedīcijas laikā, kuru vadīja kapteinis A. Gerlachs (*Adrien de Gerlache*), tika izveidotas pirmās Greiema Zemes ģeoloģiskās kartes [8]. Pirmās kartes, kurās iekļautas arī Argentīnas salas, tika sastādītas pirmajā franču Antarktiskajā ekspedīcijā 1903.–1905. gadā, kuru vadīja Ž. B. Šarko (*Jean-Baptiste Charcot*) [9]. Pirmā detalizētā Antarktīdas pussalas rietumkrasta izpēte un kartēšana tika veikta Britu Greiema Zemes ekspedīcijā 1934.–1937. gadā. Šajā ekspedīcijā pirmo reizi tika veikta topogrāfiskā uzmērīšana, izmantojot teodolītu, un izveidotas Argentīnas salu kartes [10]. Uz lielākajām Argentīnas salām atrodas nelieli ledus kupoli (1. att. C), kuru izpētei pievērsta neliela uzmanība. Pirmo reizi zinātniska interese par šo salu ledus kupoliem radās pagājušā gadsimta sešdesmitajos gados, kad polārpētnieki no Britu Antarktiskā dienesta norādīja, ka šie ledus kupoli ir saglabājušies no kādreizējiem šelfa ledājiem [11; 12]. Sešdesmitajos gados veikti pirmie sniega akumulācijas un ledus kustības mērījumi. Par turpmākajiem Argentīnas salu ledāju pētījumiem informācijas zinātniskajā literatūrā nav līdz pat deviņdesmitajiem gadiem, jo briti veica galvenokārt jonosfēras, atmosfēras, magnētiskā lauka, seismiskās aktivitātes un plūdmaiņu mērījumus.

20. gadsimta deviņdesmito gadu beigās un divtūkstošo gadu sākumā Ukrainas ekspedīciju laikā veikti fragmentāri atsevišķu ledus kupolu biežuma mērījumi, izmantojot radiolokācijas un elektroizpētes metodes [13]. Diemžēl informācija par mērījumu metodiku un ģeotelpisko piesaisti ir ļoti ierobežota, tāpēc mērījumi nevar tikt izmantoti salīdzināšanai ar

jaunākiem mērījumiem. Argentīnas arhipelāga salās veikti arī pētījumi par atsevišķu ledus kupolu nogāžu atkāpšanos un tilpuma izmaiņām, izmantojot lāzerskenēšanu un stereo fotogrammetriju, un tika secināts, ka ledāju mala atkāpjas aizvien ātrāk [14; 15; 16; 17]. Detalizēti ledus struktūras un biezuma mērījumi tika sākti tikai 2017. gadā, pāri Galindesa un tuvākajām salām izveidojot vairākus radiolokācijas profilus [18; 19].

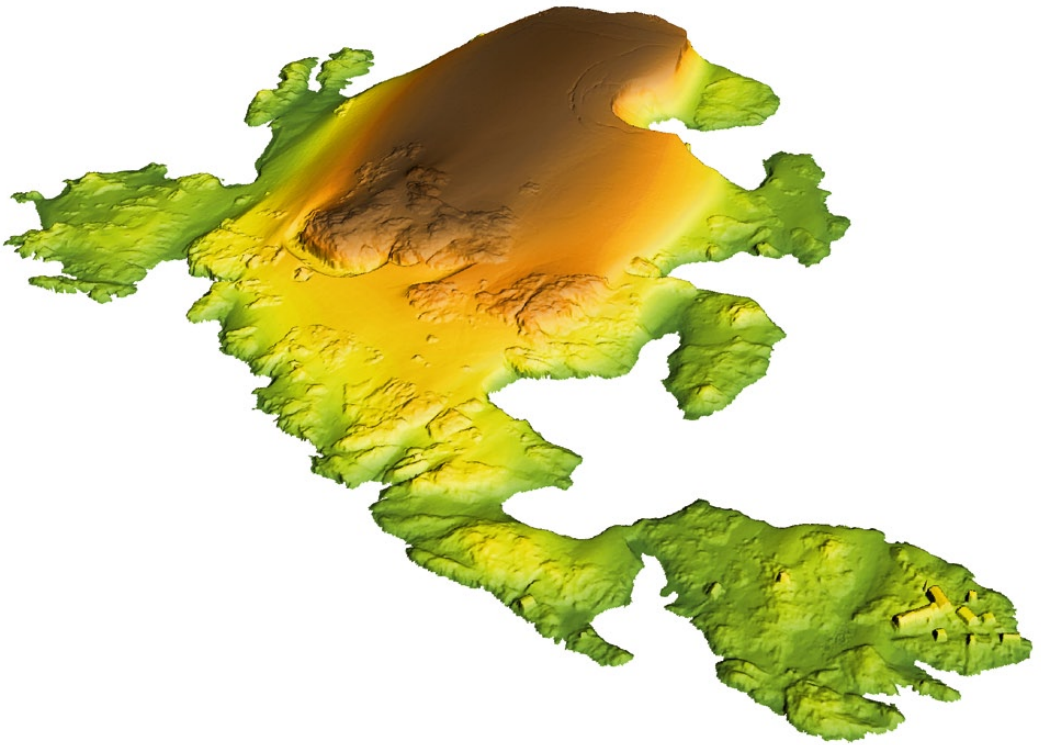
Argentīnas salu ledus kupolu pētījumu metodes

Antarktīdas ekspedīcijas laikā ar bezpilota lidaparātu jeb dronu *DJI Phantom 3 Advanced* (1. att. D) iegūts vairāk nekā 11 000 aerofotogrāfiju. Drona kontrole

un misiju vadība veikta, izmantojot lietotni *Pix4DMapper*. Precīzai aerofotogrāfiju piesaistei koordinātu tīklam izmantoti vidēji četrpadsmit zemes atbalsta punkti uz katras salas. Atbalsta punktu, kā arī ģeoradara profilu sākuma un beigu punktu koordinātas nomērītas ar GPS uztvērējiem *Magellan Promark 3* (1. att. E). Nomērīto punktu pēcapstrāde veikta *GNSS Solutions* datorprogrammā, aprēķinos izmantojot korekcijas no 50 km attālumā esošās ASV Pālmera polārbāzes GPS bāzes stacijas. No aerofotogrāfijām izveidotas ortofotokartes un digitālie virsmas modeļi, izmantojot datorprogrammu *Agisoft Photoscan Pro* [20; 21].

Ekspedīcijas laikā veikti apjomīgi pētījumi ar ģeoradaru. Pirmo reizi veikti dziļuma mērījumi ledus kupoliem, kas atrodas uz Argentīnas salu grupas salām. Ledus biezuma un struktūras mērījumi veikti ar ģeoradaru *Zond 12-e* (1. att. F), izmantojot 38 MHz antenu, un ar ģeoradaru *VIZ3-300*, izmantojot 300 MHz antenu. Ģeoradara mērījumi ierakstīti paralēlās un šķērseniskās profila līnijās ar 25 m attālumu, lai varētu pēc iespējas detalizētāk rekonstruēt zemledāja reljefa izmaiņas. Ierakstīto ģeoradara profilu kopgarums sasniedz 60 kilometru. Ģeoradaru dati apstrādāti *Prism 2.6, Planner un Synchro* datorprogrammās. Iegūtie dati izmantoti, lai izveidotu ledus biezuma un zemledāja reljefa trīsdimensionālus modeļus ar interpolācijas rīkiem *ESRI ArcMap* datorprogrammā [19].

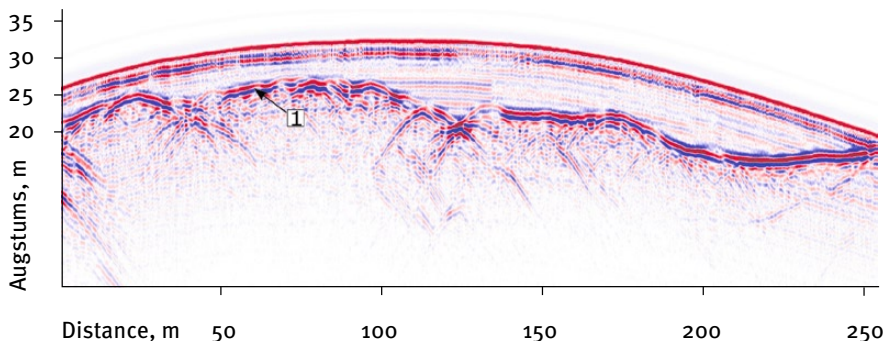
Papildus aprakstītajiem pētījumiem Argentīnas salās ievākti 30 kg augsnes paraugu turpmākām analizēm. Dzīvnieku veselības un vides zinātniskajā centrā BIOR tiek analizēts piesārņojums, kas uzkrājies Antarktīdas augsnēs. Latvijas Biomedicīnas pētījumu un studiju centrā tiek pētītas Antarktīdas augsnēs sastopamās baktērijas un bakteriofāgi. Līdz šim izolēti 5 baktēriju celmi, kas ievietoti LU Latvijas Mikroorganismu kultūru kolekcijā. Pieleidēja teritorijā ievākti vairāk nekā 2 kg nogulumu paraugu. Patlaban tiek veikti nogulumu graudu virsmas mikrostruktūru pētījumi Nikolaja Kopernika universitātē Polijā. Ekspedīcijas laikā no dažādām dzīvotnēm ievākti paraugi diatomeju jeb kramaļģu analizēm, kuri tiek analizēti Bernes universitātes Augu zinātnes institūtā. No Galindesa salas ledus kupola ievākti ledus paraugi, kuriem LU ĢZZF laboratorijās noteikts izotopu sastāvs.



2. ATTĒLS. Galindesa salas trīsdimensionāls virsmas modelis. Priekšplānā redzama akadēmiķa Vernadskā polārstacija. Reljefa amplitūda sasniedz 52 metrus.

Argentīnas salu ledus kupolu struktūra, biezums un zemledāja topogrāfija

No ekspedīcijas laikā iegūtajām aerofotogrāfijām astoņām salām (Skuas, Galindesa, Urugvajās, Kornera, Vinterailendas, Irizāras un divām Barhanu salām) ir izveidotas ortofotokartes un digitālie virsmas modeļi (2. att.), tādējādi iegūstot pirmos augstas detalizācijas datus par Argentīnas salu un to ledus kupolu virsmas artikulāciju. Ortofotokaršu vidējā izšķirtspēja ir 3 cm, digitālo virsmas modeļu izšķirtspēja – 14 centimetri. No ģeoradara mērījumiem iegūti dati par ledus biezumu, iekšējo struktūru un zemledāja reljefu. Iegūtie reljefa modeļi un kartes sniedz unikālu informāciju par salu reljefu un ledus kupolu izplatību, kā arī turpmāk var kalpot kā references materiāli, lai varētu novērtēt ledus kupolu morfoloģiskās izmaiņas. Ar ģeoradaru ierakstītajās radargrammās uzskatāmi redzama robeža starp ledāju un tā gultni (3. att.). Ledāja gultnes reljefs lielākoties ir artikulēts ar sīka izmēra klintsietņu pacēlumiem, tāpat ir iespējams nošķirt zonas, kur ledājs ir saplaisājis.



3. ATTĒLS. Uz Barhana salas ledus kupola ierakstītā radargramma. Ar ciparu «1» atzīmēts atstarojums no ledāja gultnes.

Vidēji Argentīnas salu relatīvais augstums ir 34 metri, augstākais punkts sasniedz 79,08 metrus virs elipsoīda. Lielākās — Skuas — sala platība ir 0,55 km². Lielākais ledus biežums konstatēts Galindesa salas ledus kupolā, kur tas sasniedz 35,3 metrus. Uz šīs salas ir arī lielākais vidējais ledus biežums (11,6 m). Uz pārējām salām vidējais ledus biežums ir mazāks — no 4 līdz 7 metriem, savukārt uz Kornera salas tas sasniedz tikai 1 metru. Ledus kupolu iekšējo uzbūvi raksturo nedeformēta vai vāji deformēta primārā stratifikācija, kuru kupolu malas zonās pārtrauc plaisas. Vietām ledus kupolu malās iespējams nodalīt vairākus metrus biežus sniega un firna slāņus. Zem Urugvajes salas ledus kupola atklāts līdz šim nezināms zemledāja ezers. Tas veidojies, padziļinājumā zem ledāja noplūstot un uzkrājoties ledus un sniega kušanas ūdeņiem no virszemes ezera. Šis ir pirmais ezers, kas atrasts Argentīnas salu grupā.

Secinājumi

Pirmo reizi Latvijas vēsturē noorganizēta zinātniska ekspedīcija uz Antarktiku, kurā veikti ledāju ģeofizikālie pētījumi, kā arī ievākti augsnes un nogulumu paraugi mikrobioloģiskās daudzveidības, DNS, piesārņojuma un nogulumu graudu virsmas mikrostrukturū pētījumiem.

Ekspedīcija un tās sākotnējie rezultāti parāda Latvijas zinātnieku kapacitāti iesaistīties Antarktīkas reģiona pētījumos ar ilgtermiņa mērķi — Latvijas sezonālās polārstacijas būvniecība.

Pētījumā pirmo reizi iegūtas augstas izšķirtspējas ortoftokartes laika periodā, kad salas klāj minimāls sniega daudzums. Karšu izšķirtspēja ļauj tās izmantot ne tikai ledus izplatības, bet arī putnu un airkāju populāciju, kā arī veģetācijas izmaiņu novērtējumam nākotnē. Izveidotie digitālie

virsmas modeļi izmantojami kā atskaites punkts ledāju virsmas izmaiņu monitoringam nākotnē. Pirmo reizi iegūti precīzi dati par lielāko Argentīnas salu ledus kupolu biezumu un gultnes īpatnībām. Pētījums demonstrē maza bezpilota gaisa kuģu izmantošanas iespējas attālos polārajos apgabalos, neraugoties uz lauka pētījumu sarežģītību.

Pateicības

Šā projekta pētnieku grupa izsaka pateicību par finansiālu atbalstu Latvijas Universitātei, mecenātam SIA «Mikrotīkls», Latvijas Universitātes fondam un SIA «Ceļu būvniecības sabiedrība «Igate»». Pētījumi realizēti Kristapa Lamstera pētniecības pieteikuma Nr. 1.1.1.2/VIAA/1/16/118 ietvaros, kas tiek finansēts no specifiskā atbalsta mērķa 1.1.1.2. pasākuma «Pēcdoktorantūras pētniecības atbalsts» ERAF projekta 1.1.1.2/16/I/001 un LU ĢZZF projekta «Cilvēku resursu piesaiste zinātnisko pētījumu attīstībai zemes un vides zinātnēs (Dabas resursu ilgtspējīga izmantošana klimata pārmaiņu kontekstā)» ietvaros.

Izmantotā literatūra

1. Zhang Z., Moore J. Glaciers and sea level rise. 2015. In: *Mathematical and physical fundamentals of climate change*, Elsevier, pp. 441–457.
2. Dutton A., Carlson, A. E., Long A. J., Milne G. A., Clark, P. U., DeConto R., Horton B. P., Rahmstorf S., Raymo M. E. Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods. 2015. *Science*, vol. 349 (6244), p. 4019.
3. Steig E. J., Schneider D. P., Rutherford S. D., Mann M. E., Comiso J. C. & Shindell D. T. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. 2009. *Nature*, vol. 460, pp. 766–766.
4. Turner J., Colwell S. R., Marshall G. J., Lachlan-Cope T. A., Carelton A. M., Jones P. D., Lagun V., Reid P. A. & Iagovkina S. Antarctic climate change during the last 50 years. 2005. *International Journal of Climatology*, vol. 25, pp. 279–294.
5. Vaughan D. G., Marshall G. J., Connolley W. M., Parkinson C., Mulvaney R., Hodgson D. A., King J. C., Pudsey C. J. & Turner J. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. 2003. *Climatic change*, vol. 60(3), pp. 243–274.
6. Rignot E., Mouginot J., Scheuchl B., van den Broeke M., van Wessem M. J. & Morlighem M. Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017. 2019. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116(4), pp. 1095–1103.
7. History of Faraday (Station F). Available: <https://www.bas.ac.uk/about/about-bas/history/british-research-stations-and-refuges/faraday-f/>
8. Anonymous. The Belgian Antarctic Expedition. 1899. *The Geographical Journal*, vol. 13 (6), pp. 650–654.
9. Charcot J. B. The French Antarctic Expedition. 1905. *The Geographical Journal*, vol. 26 (5), pp. 497–516.
10. Fleming W. L. S., Stephenson A., Roberts B. B. & Bertram G. C. L. Notes on the scientific work of the British Graham Land Expedition, 1934–37. 1938. *The Geographical Journal*, vol. 91(6), pp. 508–528.
11. Thomas R. H. Studies on the ice cap of Galindez Island, Argentine Islands. 1963. *British Antarctic Survey Bulletin*, vol. 2, pp. 27–43.
12. Sadler I. Observations on the Ice Caps of Galindez and Skua Islands, Argentine Islands, 1960–1966. 1968. *British Antarctic Survey Bulletin*, vol. 17, pp. 21–49.
13. Levashov S. P., Yakymchuk N. A., Usenko V. P., Korchagin I. N., Solovyov V. D., Pishchany Y. M. Determination of the Galindez island ice cap thickness by the vertical electric- resonance sounding method. 2004. *Ukrainian Antarctic Journal*, vol. 2, pp. 38–43.
14. Cisak J., Milinevsky G., Danylevsky V., Glotov, V., Chizhevsky V., Kovalenok S., Olijnyk A. & Zanimonskiy Y. Atmospheric Impact on GNSS Observations, Sea Level Change Investigations and GPS-Photogrammetry Ice Cap Survey at Vernadsky Station in Antarctic Peninsula. In: *Geodetic and Geophysical Observations in Antarctica: an overview in the IPY perspective*. 2008. A. Capra & R. Dietrich (eds.) Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 191–209.
15. Greku R., Milinevsky G., Ladanovsky Y., Bakhmach P. & Greku T. Topographic and Geodetic Research by GPS, Echosounding and ERS Altimetric, and SAR interferometric Surveys during Ukrainian Antarctic Expeditions in the West Antarctic. In: *Antarctica Contributions to Global Earth Sciences. Proceedings of the IX International Symposium of Antarctic Earth Sciences Potsdam*, 2003. 2006. Fütterer D. K., Damaske D., Kleinschmidt G., Miller H., Tessensohn F. (eds.). Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 383–390.

16. Hlotov V. Report on Photogrammetric Research Conducted at the Antarctic Station «Academician Vernadsky». In: *Geodetic and Geophysical Observations in Antarctica: an overview in the IPY perspective*. 2008. Capra A. & Dietrich R. (eds.) Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 333–345.
17. Tretyak K., Hlotov V., Holubinka Y. & Marusazh K. Complex geodetic research in Ukrainian Antarctic station «Academician Vernadsky» (years 2002–2005, 2013–2014). 2016. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, vol. 100(1), pp. 149–163.
18. Chernov A. Informativeness of ground penetrating radar method for investigations of the glaciers on Galindez, Winter and Skua Islands (The Argentine Islands, results for the period April to November 2017). 2017. *Ukrainian Antarctic Journal*, vol. 16, pp. 29–36.
19. Chernov A., Karušs J., Lamsters K., Krievāns M. & Otruba Yu. First results of glacier monitoring on Wozzle Hill (Galindez Island, the Argentine islands, Antarctica) for the period April 2017 – August 2018. 2018. In: *12th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*; doi:10.3997/2214-4609.201803152
20. Krievāns M., Lamsters K., Karušs J., Jurijs J., Burlakovs J. Remote sensing technologies and sampling methods in arctic and Antarctica. 2018. *The 11th International Conference on Establishment of Cooperation between Companies and Institutions in the Nordic Countries, the Baltic Sea Region and the World Linnaeus ECO-TECH 2018, Kalmar, Sweden*. Linnaeus University, Book of Abstracts, 125 p.
21. Lamsters K., Krievāns M., Karušs J. Studies of contemporary glaciers in Arctic and Antarctica at the University of Latvia. In: *Lateglacial–Interglacial transition: glaciotectonic, seismoactivity, catastrophic hydrographic and landscape changes. Excursion guide and Abstracts of INQUA Peribaltic Working Group Meeting and Excursion (International Scientific Conference and School for Young Scientists)*. 2018. Subetto D. A., Shelekhova T. S., Slukovskii Z. I., Druzhinina O. A. (eds.) Karelian Research Centre of Russian Academy of Science, Petrozavodsk, pp. 85–87.

Digitālā plānošana kā palīgīdzeklis pret agrīniem mežģījumiem pēc gūžas locītavas endoprotezēšanas

SERGEJS ZADOROŽNIJS, Traumatoloģijas un ortopēdijas slimnīcas traumatologs, ortopēds, endoprotezēšanas reģistra vadītājs; LU Medicīnas fakultātes pētnieks

Projekts tapis ar SIA «Mikrotīkls» ziedojumu, ko administrē Latvijas Universitātes fonds.

Locītavas endoprotezēšana ir slimas, bojātas locītavas aizvietošana ar mākslīgu. Tās mērķis ir samazināt sāpes un uzlabot slimo locītavu kustības, tomēr ar to ir saistāmi riski. Viens no tādiem riskiem ir mežģījums. Lai samazinātu mežģījuma risku, ķirurgam jāimplantē komponenti tā sauktajā drošajā zonā, kuru var laikus iepļānot digitāli uz rentgenogrammām. Ņemot vērā vairākus piedāvātos acetabulārā komponenta drošās zonas diapazonus, mēs veicām savu pētījumu ar mērķi noteikt, kurš no tiem vislabāk samazina mežģījuma risku. Mūsu retrospektīvajā pētījumā bija iekļauti visi 2014. gada plānveida gūžas locītavas totālās endoprotezēšanas gadījumi ar cementa acetabulāriem komponentiem. Acetabulārā komponenta inklinācijas un antevercijas mērījumi veikti ar mediCAD 3.0 programmatūru. Acetabulārā komponenta pozīcija vēlāk sadalīta drošajā un nedrošajā zonā pēc Levinneka un Vidmera. Pētījumā iekļauti 665 un izslēgti 42 pacienti. Agrīnie pēcoperācijas mežģījumi identificēti 11 pacientiem (1,7%). Lielākā daļa mežģījumu — 63,6 % jeb 7 no 11 gadījumiem — bijuši Levinneka (72,7% gan inklinācijas, gan antevercijas) drošajā zonā. Savukārt Vidmera drošajā zonā nav noticis neviens mežģījums. Inklinācijas drošā zona bija ievērota 556 pacientiem (83,6%) pēc Levinneka un 201 (30,2%) — pēc Vidmera. Antevercijas drošā zona — 581 (87,4%) pēc Levinneka un 185 (27,8%) pēc Vidmera. Kopumā (gan inklinācijas, gan antevercijas) drošā zona bija ievērota 499 (75,0%) pacientiem pēc Levinneka un tikai 43 (6,5%) — pēc Vidmera. Tā kā pacientiem, kuriem acetabulārais komponents bija implantēts Vidmera drošajā zonā, nav notikuši agrīnie mežģījumi, ir jāplāno acetabulārā komponenta pozīcija šajā šaurajā intervālā.

Atslēgvārdi: **digitālā plānošana, gūžas locītavas endoprotezēšana, endoprotēzes mežģījums, drošā zona**

levads

Locītavas endoprotezēšana ir slimas, bojātas locītavas aizvietošana ar mākslīgu, ko sauc par endoprotēzi. Osteoartrīts, reimatoīdais artrīts un iedzimtas locītavu patoloģijas ir galvenās slimības, kuru gadījumā pastāv varbūtība, ka pacientam būs nepieciešams veikt locītavas aizvietošanu jeb endoprotezēšanu. Šīm slimībām progresējot, rodas pastāvīgas sāpes, kustību traucējumi, turklāt nereti cilvēks ir spiests izmantot ratiņkrēslu vai pat maksimāli izvairīties no kustībām. Locītavu endoprotezēšanas mērķis ir samazināt sāpes un uzlabot slimo locītavu kustības, atjaunot agrākās ikdienas aktivitātes, ko sāpju un stīvuma dēļ nācies samazināt vai pat pārtraukt. Visbiežāk endoprotezēšanu veic gados vecākiem cilvēkiem, tomēr dažreiz tā ir nepieciešama arī jauniem pacientiem. [1]

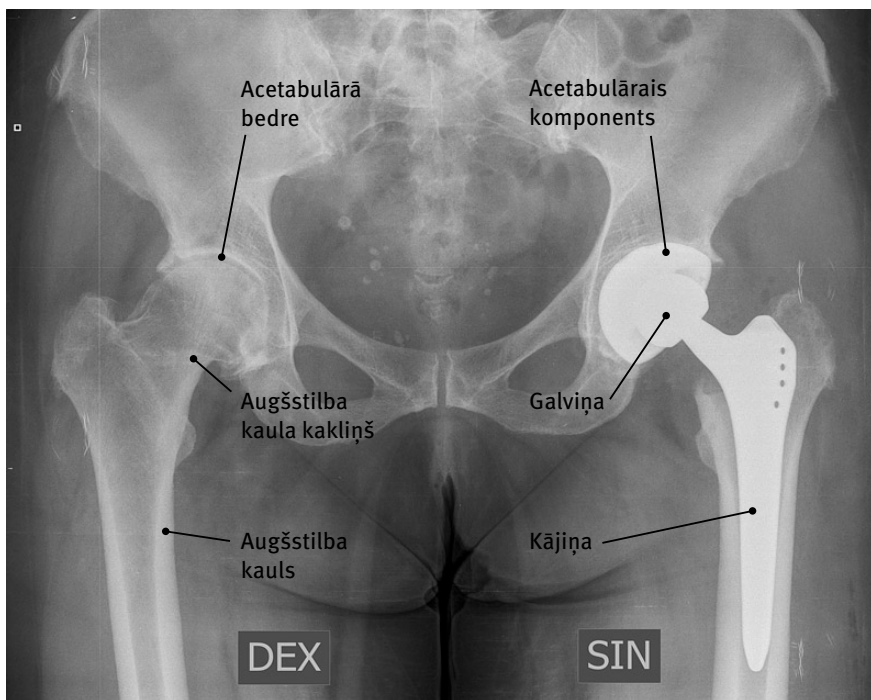
Amerikas Savienotajās Valstīs (ASV) 2005. gadā 27 miljoniem pieaugušo, kas veidoja toreiz 10% no ASV pieaugušo populācijas, bija klīniski apstiprināts osteoartrīts. Slimība negatīvi ietekmēja viņu dzīves kvalitāti ar sāpēm, kustību traucējumiem, sekojošu darba nespēju un līdz ar to ienākumu samazinājumu, hroniskām blakusslimībām vai to slimību paaugstinātu risku. 2009. gadā osteoartrīts bija iemesls 921 000 stacionēšanas gadījumu ASV, kas ir divreiz vairāk nekā 1997. gadā, kad 418 000 stacionēšanas gadījumu bija saistīti ar osteoartrītu. [2] Biežākais šo stacionēšanas gadījumu mērķis bija gūžas vai ceļa locītavas endoprotezēšana. [3; 4]

2010. gadā ASV bija veiktas 310 800 gūžas locītavas totālās endoprotezēšanas operācijas pacientiem virs 45 gadu vecuma (biežums populācijā — 257,0 : 100 000). 2000. gadā bija tikai 138 700 operāciju, t. i., 142,2 : 100 000 populācijā. [5]

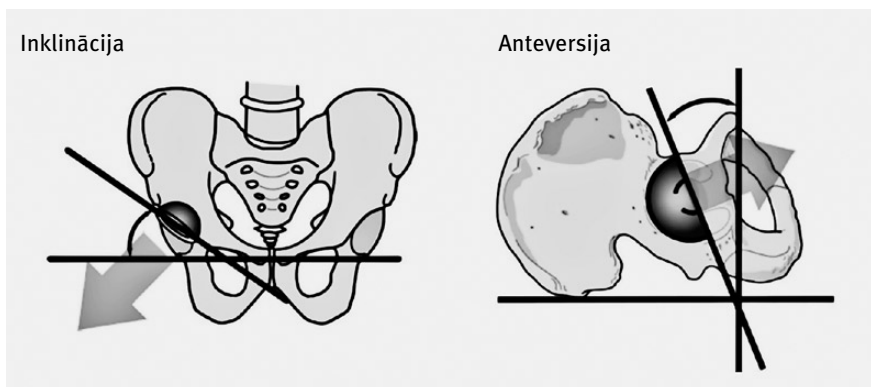
Līdzīga situācija ir arī Latvijā. Kaut arī nav precīzas statistikas, osteoartrīta prevalence būtiski pieaugusi, līdz ar to ar katru gadu pieaug arī endoprotezēšanas apjomi. Pēc Latvijas gūžas un ceļa locītavas endoprotezēšanas asociācijas datiem, 2017. gadā veiktas 2283 primāras gūžas locītavas totālās endoprotezēšanas operācijas, savukārt 2012. gadā — tikai 1586 operācijas. No 2283 operācijām 1518 izdarītas ar cementa, 434 — bezcementa, 322 — hibrīda, 9 — apgrieztā hibrīda tipa endoprotēzi. Osteoartrīts ir biežākais gūžas locītavas totālās endoprotezēšanas iemesls. Pēc VSIA «Traumatoloģijas un ortopēdijas slimnīca» endoprotezēšanas reģistra datiem, no 6220 primārām gūžas locītavas totālās endoprotezēšanas operācijām 4674 jeb 75,1% veiktas osteoartrīta dēļ.

Kaut arī endoprotezēšana samazina sāpes un uzlabo funkciju, tomēr ar to ir saistāmi riski. Kā jau jebkurai operācijai, arī pēc endoprotezēšanas iespējami sarežģījumi. Agrīnie sarežģījumi ir periprotēzes infekcija, venozā tromboembolija, mežģījums, lūzums un sāpes. Vēlīnie sarežģījumi ir infekcija un sāpes, kā arī aseptiskā komponentu izkustēšanās. [6]

Mežģījums tiek atzīts par vienu no biežākajiem agrīnajiem sarežģījumiem pēc gūžas locītavas totālās endoprotezēšanas [7], savukārt implan- tu malpoziciju jeb nepareizu pozīciju uzskata par biežāko mežģījumu



1. ATTĒLS. Iegurņa pārskata rentgenogramma pacientam pēc gūžas locītavas totālās endoprotezēšanas. Pa kreisi — gūžas locītavas anatomiskas struktūras neprotezētajā pusē. Pa labi — gūžas locītavas totālā bezcimenta endoprotēze ar tās komponentiem.



2. ATTĒLS. Acetabulārā komponenta inklinācija un anteversija. (Attēls ņemts no www.orthobullets.com)

iemeslu. [7; 8] Lai samazinātu mežģījuma risku, ķirurgam jāimplantē komponenti tā sauktajā drošajā zonā.

Pirms vairāk nekā 40 gadiem Levinneks (*Lewinnek*) demonstrēja pirmo tādu drošo zonu, kurā acetabulāro komponentu var implantēt ar zemāku mežģījuma risku. Šī zona ir $30\text{--}50^\circ$ inklinācijā un $5\text{--}25^\circ$ anteversijā. Šo zonu viņš pamatoja ar datiem no 9 pēcoperācijas mežģījumiem uz 300 endoprotezēšanas gadījumiem [9]. Šo drošo zonu Meijo (*Mayo*) klīnikas zinātnieki pārbaudīja uz 9784 primāri endoprotezētām gūžām laikposmā no 2003. līdz 2012. gadam. Pēc viņu datiem, 206 jeb 2% operācijām sekoja mežģījums. Lielākā daļa mežģījumu — 58% jeb 120 no 206 gadījumiem — bijuši Levinneka (84% — inklinācijas, 69% — anteversijas) drošajā zonā. [10]

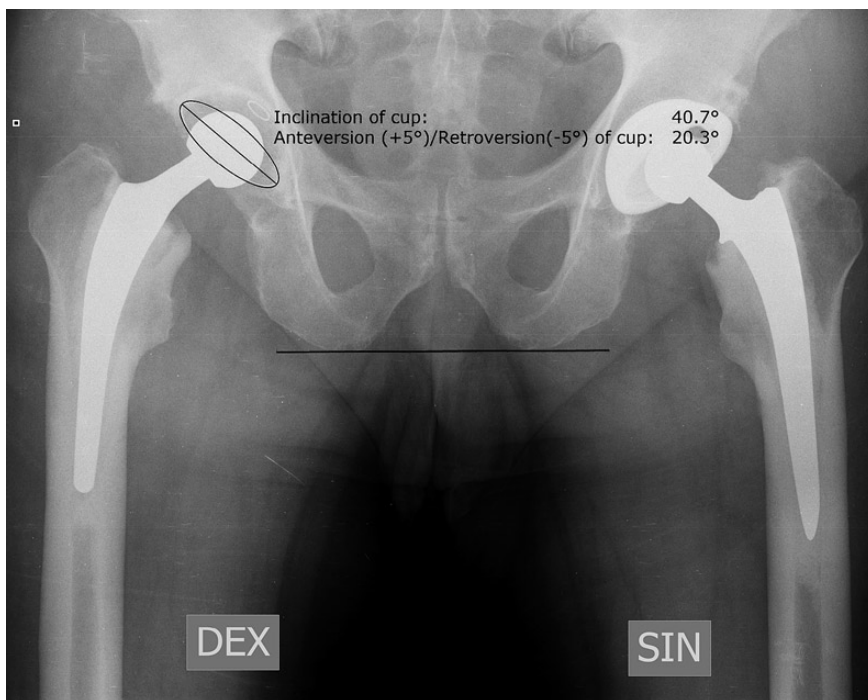
Vidmers (*Widmer*), nosimulējot gūžas locītavas totālās endoprotēzes kustības ar trīsdimensiju datormodeli, piedāvāja savu daudz šaurāku drošo zonu. Acetabulārajam komponentam, pēc viņa aprēķiniem, jābūt inklinācijā $40\text{--}45^\circ$ un anteversijā $20\text{--}28^\circ$, ja anteversijas leņķis (a) kopā ar kājiņas antetorsiju (k), reizināts ar 0,7, ir vienāds ar 37° ($a + 0,7k = 37^\circ$) [11]. Vidmers uzskatīja, ka agrīno mežģījumu galvenie faktori ir protēzes komponentu atdure un nepietiekamais mīksto audu iestiepums, līdz ar to abu komponentu implantācija drošajos intervālos ir ļoti būtiska individuālās gūžas locītavas biomehānikas atjaunošanā. Tajā pašā laikā acetabulārā komponenta anteversija un kājiņas antetorsija papildina viena otru. Vairāk nekā 10 gadus vēlāk Vidmers papildināja savas rekomendācijas ar inklinācijas diapazonu atkarībā no galviņas diametra. Viņš rekomendēja inklināciju $40\text{--}45^\circ$ pie 28 mm, $38\text{--}42^\circ$ pie 32 mm un $35\text{--}40^\circ$ pie 36 mm galviņām [12].

Rūpīga plānošana palīdz ķirurgam labāk sagatavoties operācijai. Izmantojot standartizētas digitālās rentgenogrammas un mūsdienīgo plānošanas programmatūru, ir iespējams iepilnāt optimālo komponentu pozīciju un paredzēt iespējamās grūtības operācijas laikā. Līdz ar to ķirurgam pieaug varbūtība izvairīties no potenciālajiem sarežģījumiem. Plānošanas programmatūrai attīstoties, kļūst iespējams arī kontrolēt veikto operāciju kvalitāti, precīzi izmērot kāju garumu starpību un acetabulārā komponenta pozīciju — inklināciju, anteversiju un acetabulāro ofsetu.

Nemot vērā vairākus piedāvātos acetabulārā komponenta drošās zonas diapazonus, mēs veicām savu pētījumu ar mērķi noteikt, kurš no tiem vislabāk samazina mežģījuma risku.

Metodoloģija

Retrospektīvais pētījums veikts, iekļaujot visus 2014. gada plānveida gūžas locītavas totālās endoprotezēšanas gadījumus ar cementa acetabulārajiem komponentiem. Izslēgšanas kritērijs — iegurņa pārskata rentgenogrammas trūkums vai neprecīza projekcija pēc operācijas. Precīzas iegurņa pārskata rentgenogrammas kritēriji — skaidri saskatāma bez artefaktiem un pārmērīgas rotācijas kādā no plāknēm, simetriskas noslēdzošas atveres (*foramina*



3. ATTĒLS. Acetabulārā komponenta inklinācijas un anteversijas mērījums uz iegurņa pārskata rentgenogrammas ar *Hectec GmbH mediCAD 3.0* programmatūru.

obturatoria), astes kaula novietojums centrāli virs simfīzes un augšstilba kaula kakliņa neitrālā rotācija. Acetabulārā komponenta inklinācijas un anteversijas mērījumus uz iegurņa pārskata rentgenogrammas veica viens cilvēks ar *Hectec GmbH mediCAD 3.0* programmatūru (3. att.).

Acetabulārā komponenta pozīcija vēlāk sadalīta drošajā un nedrošajā zonā pēc Levinneka un Vidmera. Visi agrīnie (pirmajos trīs mēnešos pēc operācijas) mežģījumi identificēti no stacionāra kartēm un rentģenu datubāzes. Mežģījumu biežums un procents aprēķināts visās zonās.

Rezultāti

2014. gadā veiktas 707 plānveida gūžas locītavas totālās endoprotezēšanas ar cementa acetabulārajiem komponentiem. Pētījumā iekļauti 665 un izslēgti 42 pacienti (14 — rentgenogrammas trūkuma, 28 — asimetrisku noslēdzošo atveru un līdz ar to neprecīzas projekcijas dēļ). Vidējais pacientu vecums — 70,3 gadi (starpkvartīļu izkliede 63,7–76,4; diapazons 30,3–92,3). Agrīnie pēcoperācijas mežģījumi identificēti 11 pacientiem (1,7%). Vidējais pacientu

1. TABULA. Acetabulārā komponenta inklinācija un anteversija (grādos) pētījumā iekļautajiem pacientiem

	Vidējā	Starpkvartiļu izkliede	Diapazons
Inklinācija	41,6	36,6–45,8	18,1–60,6
Anteversija	17,7	13,9–21,1	1,4–43,0

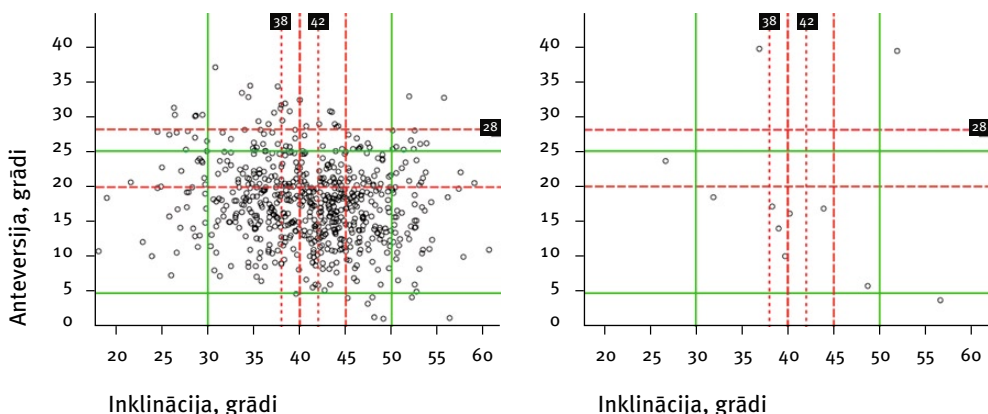
2. TABULA. Acetabulāro komponentu skaits drošajā un nedrošajā zonā pacientiem ar un bez mežģījumiem

	Levinneka			Vidmera	
	Mežģījumi			Mežģījumi	
	nav	ir		nav	ir
Inklinācija	106	3	nedrošajā zonā	455	9
	548	8	drošajā zonā	199	2
	0,326		<i>p</i>	0,380	
Anteversija	81	3	nedrošajā zonā	470	10
	573	8	drošajā zonā	184	1
	0,140		<i>p</i>	0,162	
Inklinācija un anteversija kopā	162	4	nedrošajā zonā	611	11
	492	7	drošajā zonā	43	0
	0,378		<i>p</i>	0,379	

vecums mežģījumu grupā bija 62,2 gadi, tas ir, par 8,1 gadu mazāk nekā grupā bez mežģījumiem, taču šī starpība nerasniedza statistisko ticamību ($p = 0,076$). Vidējā inklinācija un anteversija abās grupās atšķīrās ne vairāk kā par 2 grādiem, un to starpība nebija statistiski ticama ($p_{\text{inklinācijai}} = 0,895$, $p_{\text{anteversijai}} = 0,669$).

Pēc mūsu datiem, līdzīgi kā Meijo klinikā [10], lielākā daļa mežģījumu — 63,6% jeb 7 no 11 gadījumiem — bijuši Levinneka (72,7% gan inklinācijas, gan anteversijas) drošajā zonā. Savukārt Vidmera drošajā zonā nav noticis neviens mežģījums (2. tabula).

Inklinācijas drošā zona bija ievērota 556 pacientiem (83,6%) pēc Levinneka un 201 (30,2%) pēc Vidmera, anteversijas drošā zona — 581 (87,4%) pēc



4. ATTĒLS. Acetabulārā komponenta pozīcija. Attēlā pa kreisi atspoguļoti visi pacienti bez mežģījumiem, pa labi — ar mežģījumiem. Taisnstūris, kas veidojas, 4 vienādām līnijām krustojoties, atspoguļo drošo zonu. Drošā zona ————— pēc Levinneka [9]; - - - - - pēc Vidmera [11]; - - - - - pēc Vidmera 32 mm galviņām [12].

Levinneka un 185 pacientiem (27,8%) pēc Vidmera. Kopumā (gan inklinācijas, gan anteversijas) drošā zona bija ievērota 499 (75,0%) pēc Levinneka un tikai 43 pacientiem (6,5%) pēc Vidmera.

Ņemot vērā galviņas diametru un līdz ar to atšķirīgus Vidmera inklinācijas drošos intervālus, šajā pētījumā nekas daudz nemainās. Kopumā ar 28 mm diametra galviņām izoperēti tikai 18 pacienti, no kuriem nevienam nav bijis agrīno mežģījumu. Pārējiem 647 pacientiem izmantotas 32 mm diametra galviņas.

Analizējot šos pacientus ar 32 mm diametra galviņai atbilstošo drošo Vidmera inklinācijas intervālu 38–42°, tāpat kā iepriekš nav konstatēta statistiski ticama atšķirība pacientiem ar un bez mežģījuma inklinācijas ($p = 0,891$) un anteversijas ($p = 0,631$) lielumiem.

Inklinācijas drošā zona bija ievērota 135 pacientiem (20,9%), anteversijas — 184 (28,4%), bet kopumā (gan inklinācijas, gan anteversijas) — tikai 36 pacientiem (5,6%), un tāpat Vidmera drošajā zonā nav noticis neviens mežģījums (3. tabula).

Diskusija

Šim pētījumam nenoliedzami bija arī trūkumi. Pirmām kārtām mazs mežģījumu skaits, un līdz ar to statistiskā analīze bija problemātiska. Nebūtu pilnīgi korekti salīdzināt, cik procentu no mežģījumiem bijuši drošajā

3. TABULA. Acetabulāro komponentu skaits drošajā un nedrošajā zonā pēc Vidmera, ņemot vērā galviņas diametru 32 mm

		Mežģījumi	
		nav	ir
Inklinācija	nedrošajā zonā	505	7
	drošajā zonā	131	4
	<i>p</i>	0,202	
Anteversija	nedrošajā zonā	453	10
	drošajā zonā	183	1
	<i>p</i>	0,151	
Inklinācija un anteversija kopā	nedrošajā zonā	600	11
	drošajā zonā	36	0
	<i>p</i>	0,417	

4. TABULA. Agrīno mežģījumu procents drošajā vai nedrošajā zonā

	Levinneka			Vidmera		Vidmera (32 mm galviņa)	
	Mežģījumi			Mežģījumi			
	nav	ir		nav	ir	nav	ir
Inklinācija	97,2%	2,8%	nedrošajā zonā	98,1%	1,9%	98,6%	1,4%
	98,6%	1,4%	drošajā zonā	99,0%	1,0%	97,0%	3,0%
	0,326		<i>p</i>	0,380		0,202	
Anteversija	96,4%	3,6%	nedrošajā zonā	97,9%	2,1%	97,8%	2,2%
	98,6%	1,4%	drošajā zonā	99,5%	0,5%	99,5%	0,5%
	0,140		<i>p</i>	0,162		0,151	
Inklinācija un anteversija kopā	97,6%	2,4%	nedrošajā zonā	98,2%	1,8%	98,2%	1,8%
	98,6%	1,4%	drošajā zonā	100%	0%	100%	0%
	0,378		<i>p</i>	0,379		0,417	

zonā, kā tas darīts Meijo klīnikā [10], jo drošajā zonā var būt daudz lielāks gadījumu skaits bez mežģījumiem, līdz ar to mežģījumu procents starp visiem pacientiem drošajā zonā varētu būt pat mazāks nekā starp pacientiem nedrošajā zonā (4. tabula).

Tomēr pat šajā gadījumā Vidmera intervāls izskatās drošāks, un, nenoliedzami, tikai Vidmera drošajā zonā (inklinācija un anteversija kopā) ievietotajām protēzēm nav sekojuši agrīnie mežģījumi (neskatoties uz to, ka mēs neņemam vērā kājiņas antetorsiju, kā to rekomendēja Vidmers) [11]. Netika ņemti vērā arī citi iespējamie nestabilitātes faktori, piemēram, mīksto audu vai pacienta kognitīvais stāvoklis, jo tas nebija šā pētījuma mērķis.

Kopsavilkums

Ņemot vērā, ka pacientiem, kuriem acetabulārais komponents bija implantēts Vidmera drošajā zonā, nav notikuši agrīnie mežģījumi, ir jāplāno acetabulārā komponenta pozīcija šajā šaurajā intervālā. Pateicoties mūsdienīgām plānošanas programmatūrām, iegurņa pārskata rentgenogrammā var atzīmēt attālumus no acetabulārās bedres malām līdz komponentam, savukārt sānu rentgenogrammā var ievietot acetabulāro komponentu ar 20–28° anteversiju, atzīmējot attālumu no acetabulārās bedres priekšējās malas. Šo attālumu plānošana palīdz vieglāk orientēties operācijas laikā, lai ar lielāku varbūtību ieliktu implantu šaurajā Vidmera drošajā zonā.

Izmantotā literatūra

1. Zadorožnijs S. Gūžu un ceļu locītavu endoprotezēšana. 2017. *Medicus Bonus*, vol. 30, pp. 40–43.
2. Murphy L., Helmick C. G. The impact of osteoarthritis in the United States: a population-health perspective. 2012. *Am J Nurs*, vol. 112(3 Suppl 1), pp. 13–19.
3. Katz J. N., Barrett J., Mahomed N. N., Baron J. A., Wright R. J., et al. Association between hospital and surgeon procedure volume and the outcomes of total knee replacement. 2004. *J Bone Joint Surg Am*, vol. 86-a(9), pp. 1909–1916.
4. Katz J. N., Losina E., Barrett J., Phillips C. B., Mahomed N. N. et al. Association between hospital and surgeon procedure volume and outcomes of total hip replacement in the United States medicare population. 2001. *J Bone Joint Surg Am*, vol. 83-a(11), pp. 1622–1629.
5. Wolford M. L., Palso K., Bercovitz A. Hospitalization for total hip replacement among inpatients aged 45 and over: United States, 2000–2010. 2015. *NCHS Data Brief*, (186), pp. 1–8.
6. American Academy of Orthopaedic Surgeons. Appropriate use criteria for the management of osteoarthritis of the hip. Available: https://www.aaos.org/uploadedFiles/PreProduction/Quality/AUCs_and_Performance_Measures/appropriate_use/OA%20Hip%20AUC.pdf [skatīts 08.12.2017.]
7. Biedermann R., Tonin A., Krismer M., Rachbauer F., Eibl G. et al. Reducing the risk of dislocation after total hip arthroplasty: the effect of orientation of the acetabular component. 2005. *J Bone Joint Surg Br*, vol. 87(6), pp. 762–769.
8. Zahar A., Rastogi A., Kendoff D. Dislocation after total hip arthroplasty. 2013. *Curr Rev Musculoskelet Med*, vol. 6(4), pp. 350–356.
9. Lewinnek G. E., Lewis J. L., Tarr R., Compere C. L., Zimmerman J. R. Dislocations after total hip-replacement arthroplasties. 1978. *The Journal Of Bone And Joint Surgery. American Volume*, vol. 60(2), pp. 217–220.
10. Abdel M. P., von Roth P., Jennings M. T., Hanssen A. D., Pagnano M. W. What Safe Zone? The Vast Majority of Dislocated THAs Are Within the Lewinnek Safe Zone for Acetabular Component Position. 2016. *Clin Orthop Relat Res*, vol. 474(2), pp. 386–391.
11. Widmer K. H., Zurfluh B. Compliant positioning of total hip components for optimal range of motion. 2004. *J Orthop Res*, vol. 22(4), pp. 815–821.
12. Widmer K. H. [Impingement Free Motion in Total Hip Arthroplasty – How Can We Implement It?]. 2016. *Z Orthop Unfall*, vol. 154(4), pp. 392–397.

Sepses diagnostika, izmantojot hiperspektrālo attēlveidi un termogrāfiju

ZBIGNĒVS MARCINKEVIČS,

LU Cilvēka un dzīvnieku fizioloģijas
katedras asociētais profesors

ANDRIS GRABOVSKIS, LU Biofotonikas
laboratorijas vadošais pētnieks

ULDIS RUBĪNS, LU Biofotonikas
laboratorijas vadošais pētnieks

Projekts tapis ar SIA «Mikrotīkls»
ziedojumu, ko administrē Latvijas
Universitātes fonds.

SIGITA KAZŪNE, LU Atomfizikas un
spektroskopijas institūta pētniece

KARĪNA VOLČEKA,
LU Biofotonikas laboratorijas
zinātniskā asistente

ANASTASIJA CAICA,
LU Biofotonikas laboratorijas
zinātniskā asistente

Smaga sepse, ko plašāk mēdz saukt par asins saindēšanos, ir galvenais infekciozais intensīvās terapijas pacientu nāves cēlonis visā pasaulē, arī Eiropā. Patlaban ārsti sepsi diagnosticē ar metodēm, kas balstās uz nespecifiskiem un ne visai efektīviem novērtējumiem. Laboratorisko izmeklējumu rezultāti bieži ir novēloti, jo ļauj atklāt sepsi relatīvi vēlīnā stadijā, kad terapija jau kļuvusi mazefektīva. Ir pierādīts, ka agrīna sepSES pakāpes noteikšana un optimālas ārstēšanas stratēģijas izvēle ir ļoti būtiska, jo savlaicīga un pareizi izvēlēta terapija uzlabo pacienta stāvokli, samazina mirstības risku un ļauj ietaupīt valsts līdzekļus citu neatliekamo gadījumu ārstēšanai. Latvijas Universitātes starpdisciplināru pētnieku grupas — ārstu un zinātnieku — iestrādnes un sepSES pacientu stāvokļa novērojumi rosināja ideju par jaunas optiskas sepSES diagnostikas tehnoloģijas izveidi. Šī ideja tika īstenota ar LU fonda un SIA «Mikrotīkls» atbalstu 2016. gadā. Idejas pamatā ir hiperspektrālās attēlveides ar augstas izšķirtspējas termogrāfijas metožu apvienošana, kas ļauj bezkontakta veidā veikt sepSES pacientu ādas mikrocirkulācijas novērtējumu.

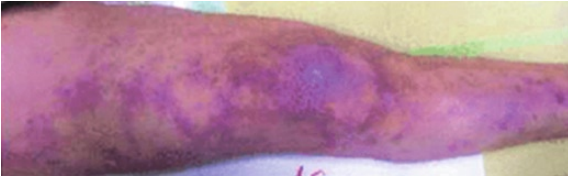
Atslēgvārdi: **sepse, hiperspektrālā attēlveide, termogrāfija, ādas marmorizācija**

levads

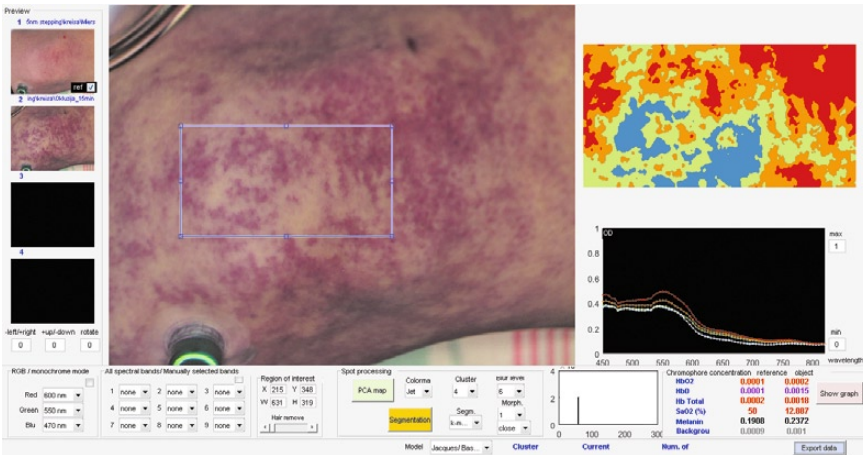
Sepse jeb tā sauktā asinssaindēšanās ir diezgan bieža slimība. Pēc ASV datiem, ik gadu ar sepsi saslimst 3 no 1000 iedzīvotājiem. Ņemot vērā sepsei globāli raksturīgo 35% mirstību, Latvijā tas atbilst ap 2100 nāves gadījumiem gadā. Sepsi var izraisīt cilvēka inficēšanās ar baktērijām, vīrusiem, sēnēm vai parazītiem, kas provocē īpatnēju ģeneralizētu imūnsistēmas atbildes reakciju — sistēmisku iekaisuma reakcijas sindromu (SIRS) [1], kas ir diezgan nespecifisks, līdzīgas pārmaiņas var rasties arī parastas fiziskas slodzes dēļ, un tas nenozīmē, ka ir sākusies sepse. Taču tieši sepSES gadījumā ir būtiski, lai šīs sistēmiskās iekaisuma reakcijas simptomi izpaustos uz akūtas infekcijas fona. Daudzi pacienti ar sistēmisku iekaisumu ārstējas mājās un izveseļojas pēc antibiotiku kursa vai pat spontāni. Tomēr ir slimnieki, kam sistēmiskā iekaisuma reakcija kļūst ļaundabīga, nevadāma un izpaužas kā asinsvadu iekšējās virsmas klājslāņa jeb endotēlija bojājums un lavīnveida iekaisuma mediatoru aktivācija [2], un sistēmiskā asinsspiediena kritums, kam seko lokāls un vispārējs audu un orgānu skābekļa bads. Orgānu bojājums kombinācijā ar sistēmisku iekaisuma reakciju tiek definēts kā smaga sepse. Vispildtākais smagas infekcijas izraisīta stāvokļa piemērs ir pacients septiskā šokā, šādu pacientu mirstība pārsniedz 50%. Agrīnas sepSES diagnostikas mērķis ir identificēt pacientus ar sistēmisku iekaisumu, pirms tas transformējas, apdraudot audus un orgānus, un nepieļaut septiska šoka attīstību.

Sepse nav tikai potenciāli nāvējoša slimība, tā var arī izraisīt paliekošas sekas tiem, kas izdzīvo. Sepse var būt iemesls amputācijai, izraisīt hronisku elpošanas, sirds un nieru mazspēju, paliekošu depresiju un perifērās muskulatūras vājumu. Mirstība no sepSES ir saistāma ar slimības smaguma pakāpi, pakāpeniski pieaugot mirstībai no SIRS (5–10%) līdz septiskam šokam (30–50%), tāpēc kritiskais solis sepSES ārtstēšanā ir terapijas sākšana laikus [3]. Ļoti būtisks jautājums ir sepSES pacientu ātra identificēšana [4], kas ir sarežģīta, jo ir nepieciešams zināt vairākus fizioloģiskos rādītājus un laboratorisko izmeklējumu rezultātus, kā arī identificēt infekcijas perēkli, kas šīs pārmaiņas izsaucis. Mūsu kolēģu iepriekšējie klīniskie novērojumi, kā arī citu autoru atziņas [5] liecina par īpatnējām izmaiņām sepSES pacientu ceļgalu ādas krāsā. Šādas izmaiņas sauc par ādas marmorizāciju, un tās var izpausties kā neviendabīgi, violetas vai rozā krāsas zemādas plankumi, kas mijas ar baltām starpplankumu zonām un, sepsei progresējot, izplešas augšup pa ceļgalu (1. att.).

Plankumu patoģenēze ir sarežģīta, taču pētnieki uzskata, ka tie ir saistīti ar sepSES izraisītu endotēlija disfunkciju, kas izraisa ādas mikrocirkulācijas traucējumus un zemādas kapilāro asiņu skābekļa piesātes variācijas, vietām radot zemas, vietām normālas skābekļa koncentrācijas zonas [6; 7; 8]. Ārsti atzīst, ka šai parādībai neapšaubāmi ir diagnostiskā vērtība, taču līdz šim tai nav izstrādātas noteiktas vadlīnijas, jo gan šo marmorizācijas zonu izmērs, gan marmorizācijas intensitāte šobrīd tiek vērtēta subjektīvi, balstoties tikai uz ārsta veiktu pacienta vizuālu novērtējumu.



1. ATTĒLS. Sepses izraisītā ceļgala ādas marmorizācija.



2. ATTĒLS. Oklūzijas izraisītā fizioloģiskā marmorizācija pēc 15 minūšu ilgās asinsrites bloķēšanas. Labajā augšējā stūrī redzams segmentēts attēls, apakšā attēloti iegūtie ādas gaismas absorbcijas spektri.

Zīmīgi, ka agrīnās sepses gadījumā šīs marmorizācijas zonas nav pamānāmas ar neapbruņotu aci, tāpēc mūsu pētnieku grupai sadarbībā ar klīnikas kolēģiem radās ideja par marmorizācijas izmantošanu kā objektīvu diagnostisku parametru, izmantojot kādu no optiskām metodēm. Ideju atbalstam finansējums tika gūts no LU fonda, kas projekta konkursa kārtībā atbalstīja šo nedaudz avantūristisko ideju.

Sepses diagnostiskās iekārtas prototipa izveide

Pētnieciskās idejas realizēšanai tika izveidota interdisciplināra grupa, iekļaujot tajā dažādu jomu ekspertus. Jaunizveidotajā platformā ietilpa LU

Medicīnas fakultātes, Rīgas Austrumu klīniskās universitātes slimnīcas (RAKUS) Toksikoloģijas un sepses klīnikas, LU Bioloģijas fakultātes Cilvēka

un dzīvnieku fizioloģijas katedras un Atomfizikas un spektroskopijas institūta Biofotonikas laboratorijas speciālisti. Projekta sākumposma uzdevums bija veikt visas nepieciešamās infrastruktūras komplektāciju un jaunu iekārtu iepirkumus. Paralēli šīm aktivitātēm sākās klīniskā materiāla vākšana RAKUS un bioloģisko paraugu noglabāšana Audu centrā.

Fizioloģiskās marmorizācijas modelis

Tika izstrādāts fizioloģijas modeļeksperiments hiperspektrālās metodes validācijai, izmantojot zemādas plankumus, kas līdzinās sepSES pacientu marmorizācijai.

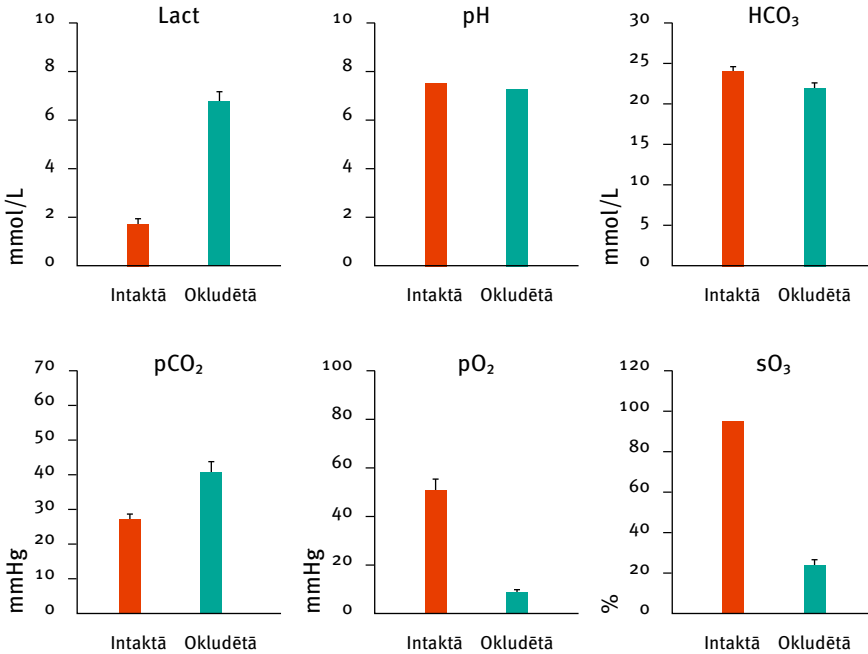
LU Bioloģijas fakultātes Cilvēka un dzīvnieku fizioloģijas katedras Asinsrites fizioloģijas laboratorijā tika radīts fizioloģiskās marmorizācijas modelis — nekaitīgā veidā īslaicīgi veselīem cilvēkiem panākot sepSES pacientiem līdzīgu marmorizācijas ainu (2. att). Metodes pamatā bija 10–20 minūšu ilga augšstilba arteriālā oklūzija, ko veica, ekstremitātei uzliekot manšeti ar 160–200 mm Hg lielu virspiedienu. Okludētajā gultnē, audiem izlietojot pieejamās skābekļa rezerves distāli no oklūzijas vietas, tika izraisīta esošo audu išēmija, kas radīja asins stāzes ādas dermālā pinuma kapilāros.

Asins krāsas tonis ir atkarīgs no hemoglobīna un oksihemoglobīna proporcijas, un šiem hemoglobīna savienojumiem (krāsvielām — hromoforām) ir atšķirīgi gaismas absorbcijas spektri, ko ļoti precīzi var noteikt ar hiperspektrālās attālveides metodi. Hiperspektrālās metodes būtība ir līdzīga spektroskopijai, turklāt kameras izmantošana ļauj iegūt 2D attēlu, kurā katrs attēla punkts satur precīzu informāciju par objekta spektru (krāsu). Iegūtos spektrus apstrādājot, ir iespējams noteikt hemoglobīna piesāti ar skābekli, kas ir klīniski ļoti nozīmīgs parametrs, jo sepSES pacientiem marmorizācijas plankumos skābekļa daudzums ir ļoti heterogēns, vietām sasniedzot pat 40–25% atzīmi. Vienlaikus veicot kapilāro asiņu bioķīmisko analīzi, tika konstatēts, ka okludētajā gultnē pieaug laktāta un ogļskābās gāzes līmenis, toties samazinās hemoglobīna piesāte ar skābekli un skābekļa koncentrācija asinīs (3. att.). Šā modeļa izveide bija stūrakmens turpmāko projekta uzdevumu risināšanā, jo bija iespējams pietiekami kontrolēti radīt dažādu hemoglobīna piesātes līmeņu marmorizācijas plankumus, pēc kā vadīties, izstrādājot un pilnveidojot hiperspektrālo tehnoloģiju sepSES pacientu diagnostikai.

Hibrīdtehnoloģijas prototipa izveide sepSES slimības gaitas monitoringam

Klīniskā materiāla vākšanā ietilpa sepSES pacientu hiperspektrāla un termogrāfiska izmeklēšana, kas tika veikta RAKUS SepSES klīnikā (4. att.) Bezkontakta veidā ar hiperspektrālo kameru tika uzņemta pacientu ceļgalos novērojamā marmorizācija, un ar augstas izšķirtspējas termogrāfijas metodi tika

novērojamā marmorizācija, un ar augstas izšķirtspējas termogrāfijas metodi tika



3. ATTĒLS Išēmiju (skābekļa bads audos) raksturojoši bioķīmiskie rādītāji okludētajā un intaktajā gultnē. Lact — laktāta koncentrācija, pH — vides skābuma rādītājs, HCO₃ — vides bāziskuma indikators, PCO₂ — ogļskābās gāzes parciālais spiediens, pO₂ — skābekļa parciālais spiediens, SO₂ — hemoglobīna saturācija ar skābekli.

noteikta pacientu augšstilbu temperatūras heterogenitāte. Vienlaikus ar optiskiem izmeklējumiem tika ievākti pacientu asins paraugi, kuriem vēlāk veica bioķīmiskās analīzes, nosakot sepsei raksturīgo citokīnu spektrus. Pacienti, atrodoties intensīvās terapijas nodaļā, tika izmeklēti atkārtoti, līdz pacienta atlabšanai vai arī letālam iznākumam.

Turpmākā hiperspektrālo attēlu analīze notika LU Bioloģijas fakultātes Cilvēka un dzīvnieku fizioloģijas katedrā, izmantojot šim nolūkam izstrādātu programmatūru.

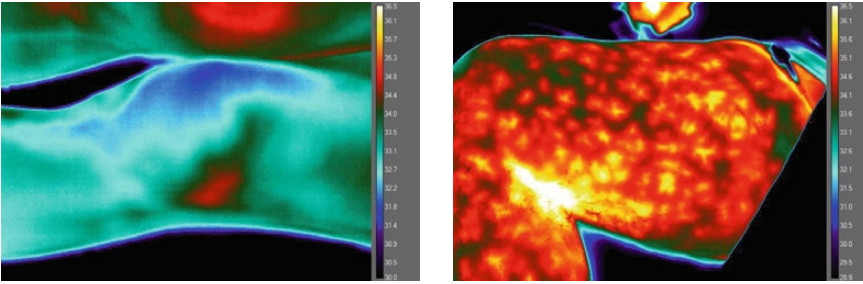
Galvenā problēma bija gaismas izplatīšanās ādā matemātiskā modeļa izveide, kuru būtu iespējams izmantot, no hiperspektrāliem attēliem iegūstot ādā esošo kapilāro asiņu hemoglobīna piesāti ar skābekli. Problēmu vēl vairāk sarežģīja ādas nevienmērīgums un ādas slāņu biezumu individuālās atšķirības dažādiem pacientiem. Tāpēc laboratorijā tika veiktas simulācijas uz mākslīgos apstākļos izraisītas fizioloģiskās marmorizācijas hiperspektrāliem attēliem, līdz tika piemērotākie modeļa vispiemērotākie ādas slāņu biezuma, izkliedes un absorbcijas koeficienti. Visbeidzot esošais



4. ATTĒLS. Pacientu izmeklējumu veikšana RAKUS
Sepses klīnikas intensīvās terapijas nodaļā.

gaismas difūzā transporta ādā modelis tika pārbaudīts laboratorijas apstākļos kontrolētas fizioloģiskās marmorizācijas testos un atzīts par piemērotu pacientu datu apstrādei [9; 10; 11].

Sekoja pacientu termogrāfisko datu apstrāde, noskaidrojot diagnostiskos kritērijus. Ar termogrāfijas palīdzību tika vizualizēti ādas reģioni, kur ir izteiktāka mikroperfūzija — smalko ādas asinsvadu asinsrite. Tā vizualizējās kā krass temperatūras pieaugums nelielā reģionā, veidojot tā sauktos karstos punktus — heterogēnus temperatūras reģionus uz pacienta ādas. Izvērtējot «karsto punktu» daudzumu un formu, tika izmantota vērtējumu skala, piešķirot pacientu ādas temperatūras attēliem vērtību no 0 līdz 5, kur 0 nozīmē homogēnu temperatūras sadalījumu bez šādiem punktiem,



5. ATTĒLS. Sepses pacienta augšstilba termogrāfijas attēls; pa labi — o pakāpes «karstie punkti», pa kreisi — 5. pakāpes «karstie punkti».



6. ATTĒLS. Sepses diagnostikas ierīces prototips; pa kreisi — sistēmas galvenās komponentes: termālā un hiperspektrālā kamera, pa labi — prototipa darba versija.

savukārt 5 ir ļoti heterogēns temperatūras sadalījums ar lielu karsto punktu īpatsvaru (5. att.).

Prelimināri izvērtējot iegūtos sepses pacientu datus, iezīmējās tendence, ka liels īpatsvars vizualizēto ādas «karsto punktu» korelē ar lielāku letālo iznākumu skaitu, turpretī pacientiem ar homogēnu temperatūru bija vērojama pozitīva atveseļošanās dinamika. Iegūtie rezultāti apliecina termogrāfijas attēlu heterogenitātes kā diagnostiskā kritērija vērtību, ko turpmāk var izmantot sepses diagnostikā.

No inženiertehniskā viedokļa laikietilpīgs un grūts uzdevums bija izstrādāt gaismas difūzā transporta ādā matemātisko modeli, kas tika rēķināts uz jaudīga stacionārā servera, vēlāk to pārnesot uz nelielu mobilo diagnostikas iekārtas prototipu. Šajā prototipā bija nepieciešams apvienot

gan miniatūru datoru, gan hiperspektrālo kameru, gan termokameru un multispektrālu gaismas avotu. Turklāt visiem šiem komponentiem bija nepieciešams nodrošināt autonomu barošanu, lai prototipu varētu izmantot klīnikā, veicot sepses pacientu izmeklējumus. Projektā tika izstrādāti un aprobēti vairāki prototipa moduļi, līdz tapa pēdējā prototipa versija, kuras galvenie komponenti redzami 6. attēlā.

Secinājumi

Izstrādātā optiskā hibrīdtehnoloģija ir pierādījusi klīnisko potenciālu sepses diagnostikā un pacientu slimības gaitas monitoringā, ko apliecina vairāki sistēmas prototipa testi un validācija klīniskos apstākļos. Metodes pilnvērtīgai klīniskai ieviešanai un izmantošanai nepieciešama tās komercializācija – turpmāka tehniska optimizēšana, virzot to uz komerciālu prototipu ar augstu tehnoloģiskās gatavības pakāpi.

Pateicības

Šā projekta pētnieku grupa izsaka pateicību par finansiālu atbalstu Latvijas Universitātei, mecenātam SIA «Mikrotikls» un Latvijas Universitātes fondam. Pētījums tika realizēts ERAF projekta Nr. 1.1.1.1/16/A/065 «Optiska neinvazīva hibrīdmetode agrīnai sepses diagnostikai un terapijas vadībai» ietvaros.

Izmantotā literatūra

1. Fan S. L., Miller N. S., Lee J. and D. G. Remick. Diagnosing sepsis — The role of laboratory medicine. 2016. *Clin. Chim. Acta*, vol. 460, pp. 203–210.
2. Backer D. de, Orbegozo Cortes D., Donadello K. and Vincent J.-L. Pathophysiology of microcirculatory dysfunction and the pathogenesis of septic shock. 2014. *Virulence*, vol. 5, pp. 73–79.
3. Kanoore Edul V. S., Dubin A. and Ince C. The microcirculation as a therapeutic target in the treatment of sepsis and shock. 2011. *Semin Respir Crit Care Med*, vol. 32(212), pp. 558–568.
4. de Backer D. et al. Microcirculatory alterations in patients with severe sepsis: impact of time of assessment and relationship with outcome. Mar. 2013. *Crit. Care Med.*, vol. 41(3), pp. 791–799.
5. Ait-Oufella H. et al. Mottling score predicts survival in septic shock. 2011. *Intensive Care Med.*, vol. 37, pp. 801–807.
6. Ince C. The microcirculation is the motor of sepsis. 2005. *Crit. Care*, vol. 9(4), pp. S13–S19.
7. Vincent J. L. Microvascular endothelial dysfunction: a renewed appreciation of sepsis pathophysiology. Jan. 2001. *Crit. Care*, vol. 5(2), pp. S1–5.
8. Boisramé-Helms J., Kremer H., Schini-Kerth V. and Meziani F. Endothelial dysfunction in sepsis. Mar. 2013. *Curr. Vasc. Pharmacol.*, vol. 11(2), pp. 150–160.
9. Rubins U., Marcinkevics Z., Cimurs J., Grabovskis A. and Kviesis-Kipge E. Snapshot hyperspectral system for noninvasive skin blood oxygen saturation monitoring. In: *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2018. Vol. 10685.
10. Marcinkevics Z., Rubins U., Grabovskis A., Cimurs J. and Caica A. Hyperspectral evaluation of skin blood oxygen saturation at baseline and during arterial occlusion. In: *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2018. Vol. 10685.
11. Saknite I. et al. Novel hybrid technology for early diagnostics of sepsis. *Proceedings of SPIE*. 2017. Vol. 10057, p. 100570F.

Magnētiskā lauka attēlošana magnētisko īpašību pētīšanā

ANDRIS BĒRZIŅŠ, LU Lāzeru centra pētnieks

Projekts tapis ar SIA «Mikrotīkls» ziedojumu,
ko administrē Latvijas Universitātes fonds.

Magnētiskais lauks ir daļa no mūsu pasaules, kas bieži cilvēkiem liekas ļoti attālināta no visa ikdienā sastaptā. Tomēr šāds apgalvojums ir pilnīgi nepareizs, jo magnētiskais lauks ir klātesošs praktiski jebkurā objektā. Vienīgi jāatzīst, ka cilvēce relatīvi nesen ir sākusi saprast, cik daudz informācijas magnētiskais lauks spēj dot. Šajā rakstā tiks apskatīts, kādas priekšrocības magnētiskā lauka mērīšana spēj dot un kur magnētiskā lauka mērīšana tiek izmantota. Tāpat tiks pastāstīts par to, kas ir magnētiskā lauka attēlošana, kā šī metode darbojas un kādi ir mērījumu fizikālie pamatprincipi, kā arī kādas priekšrocības tai ir, salīdzinot ar citām magnētiskā lauka mērīšanas metodēm. Tiks demonstrēti rezultāti, kas iegūti ar Latvijas Universitātes Lāzeru centrā izveidoto iekārtu, galveno uzmanību vēršot uz magnētisku mikrodaļiņu, magnētisku plānu kārtiņu un to defektu izpēti.

Atslēgvārdi: **magnētiskais lauks, slāpekļa un vakances centri**

levads

Ja skatāmies uz magnētisma izpratni vēsturiski, iespējams, varam saprast, kāpēc magnētisms ir vāji apjausts fenomens. Lai arī magnētisma efektus cilvēce izmantoja jau simtiem gadu pirms mūsu ēras (piemēram, kompasu), izpratnes par tiem nebija. Tikai 1269. gadā parādījās pirmais franču zinātnieka *Petrus Peregrinus de Maricourt* pētījums par magnētisko lauku, bet arī tas zināmā mērā tikai nostiprināja acīmredzamo — magnētisms ir, un tas ir novērojams (šajā gadījumā dzelzs adatām izkārtojoties gar magnētiskā lauka līnijām). Nākamais pētnieks, kas sākotnēji atkārtoja iepriekšminēto eksperimentu un droši paziņoja, ka Zeme ir magnēts, bija *William Gilbert*. Lai arī tas vēl joprojām neskaidroja, kāpēc magnētiskais lauks rodas, tas lika pamatus magnētismam kā zinātnei. Ap 19. gs. 20.–30. gadiem A. C. Erstedes, A. M. Ampērs, M. Faradejs un citi pazīstami zinātnieki radīja pirmos veiksmīgos magnētisma modeļus, turklāt atklāja, ka elektriskā strāva rada magnētisko lauku. Vajadzēja vēl aptuveni simts gadu, lai A. Einšteins novestu lietas līdz galīgam efekta skaidrojumam, apvienojot kvantu mehāniku ar elektrodinamiku.

Kur tad slēpjas magnētisma maģija? Šeit jāatvainojas lasītājam, bet burtiski nav nekā vienkāršāka par skolā mācīto: «Telpā kustīgs elektriskais lādiņš rada magnētisko lauku.» Lieta tāda, ka magnētisko lauku nav iespējams salīdzināt ar kādu citu ikdienā novērojamu parādību; tas ir tāds, kāds tas ir — mūsu Visuma sastāvdaļa, kas ir visapkārt mums, pat gaismā. Ja runājam par parastu elektrības vadu, šie lādiņi ir skrienoši elektroni, bet magnētiskas ir arī lietas, kas nav pieslēgtas pie strāvas. Šeit jāatceras, ka, vienkāršoti runājot, atoms sastāv no kodola un elektroniem, kas riņķo ap to. Un šis arī ir magnētisma «noslēpums» — riņķojošie elektroni ir kustīgie lādiņi, kas ap sevi rada magnētisko lauku. Un, lai arī katrs atoms atsevišķi dod ļoti mazu magnētisko lauku, to summa rada milzīgus laukus — vienkāršs pierādījums tam ir Zemes magnētiskais lauks, kas arī rodas, «saskaitot» atomu radītos magnētiskos laukus.

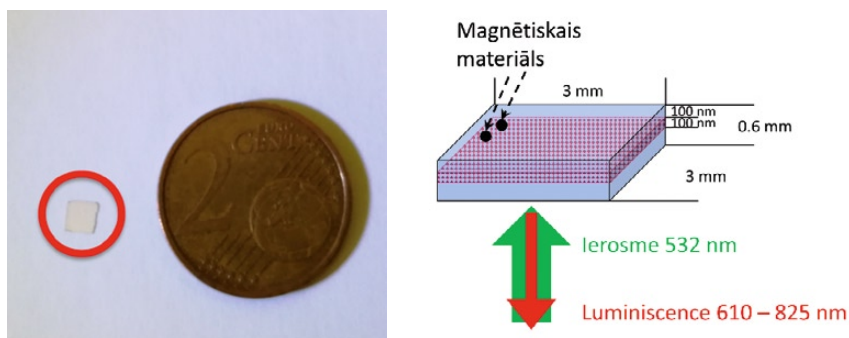
Atšķirīgas magnētiskās īpašības piemīt jebkuram atomam, un praktiski visa mums pazīstamā pasaule ir būvēta no šiem mazajiem ķieģelišiem. Līdz ar to iespējams izteikt apgalvojumu, ka magnētisko īpašību izpratne palīdz praktiski visās mūsu dzīves sfērās — astronomisku objektu magnētisko īpašību izpētē [1], magnētiskā lauka mērījumi palīdz izprast gan Zemes garozas magnētismu, gan okeānu cirkulāciju [2], Zemes virsmas magnētiskā lauka mērīšana var noteikt derīgo izrakteņu atrašanās vietas. Arī visdažādākie metāla detektori nav nekas cits kā magnētiskā lauka mērītāji. Arī medicīnā esam pieraduši dzirdēt par kodolu magnētisko rezonansi, kas arī ir magnētisko mijiedarbību pētīšana. Kodolu magnētiskā rezonanse var palīdzēt arī drošības jautājumos — metāla detektori spēj noteikt metālisku priekšmetu klātbūtni, taču attīstītas tehnoloģijas magnētiskā lauka izpētē varētu palīdzēt detektēt arī plastiskas sprāgstvielas vai narkotiku klātbūtni, jo, kā jau minēts iepriekš, katram atomam ir savas magnētiskās īpašības,

un, ja tie sakombinēti molekulās, katrai molekulai arī ir savs «magnētiskais pirkstu nospiedums». Turpinot par magnētiskā lauka mērījumu uzvaras gājienu, jāmin gan smadzeņu, gan sirds darbības pētījumi, izmantojot magnētiskas metodes [3], tāpat magnētiskas daļiņas darbojas kā marķieri, lai varētu noteikt, piemēram, konkrētu šūnu atrašanās vietu, vai kā kontrastvielas ar konkrētām magnētiskajām īpašībām. Tāpat magnētisms tiek izmantots visdažādāko materiālu īpašību pētīšanā [4; 5], kā arī informācijas glabāšanā — kā plaši zināms piemērs minams datora cietais disks, kura darbība balstās uz magnētisku informācijas ierakstīšanu un nolasi. Arheoloģijā magnētiskā lauka detektori spēj atklāt informāciju gan par vietām, kur kādreiz iespēris zibens, gan par vietām, kur pirms gadu simtiem ticis kurināts ugunskurs [6; 7; 8]. Šo uzskaitījumu varētu turpināt, jo magnētisma pētījumi vēl joprojām uzņem apgriezienus, līdz ar to viegli saprast, ka magnētisma pētījumi ir ļoti nozīmīgi.

Ja konkrētāk runājam par mikroskopisku magnētisku paraugu izpēti, magnētiskā lauka mērīšanas ierīcēm, kuru pamatā ir sārnu metālu tvaiku šūnas, SQUID (abām metodēm raksturīga izcila magnētiska lauka jutība) vai Holla zondes (ļoti robusta tehnoloģija), vai nu trūkst telpiskās izšķirtspējas (ierobežojums, cik lielu magnētisko daļiņu iespējams izmērīt), lai pētītu sīkas detaļas, vai arī to darbības principi ir tādi, ka pašas zondes tuvums var negatīvi ietekmēt paraugu (SQUID gadījumā nepieciešama ļoti zema temperatūra, tvaika šūnu gadījumā — relatīvi augsta temperatūra). Šeit gan jāpiemin atomspēku mikroskopijas īpašais gadījums — Lorenca mikroskopija, kas dod lielisku telpisko izšķirtspēju, tomēr, izmantojot šo metodi, ir ļoti neērti un laikietilpīgi pētīt objektus, kuriem strauji mainās biežuma komponente vai kuru izmērs mērāms vairākos mikrometros.

Pēdējā desmitgadē lokālo magnētisko lauku izpētē savu pozīciju nostiprinājušas magnētiskā lauka mērīšanas iekārtas, kas balstītas uz krāsu centriem — slāpekļa un vakances (angliski *nitrogen-vacancy*; NV) centriem dimanta kristālā [9]. Šā krāsu centra veiksmes stāsts ir sasniedzamā izcilā telpiskā izšķirtspēja (cik mazus objektus mēs spējam izšķirt) kombinācijā ar ķīmiski un fizikāli izturīgu un vienlaikus netoksisku matricu — dimantu. Idejiski par NV centru varam domāt kā par iesaldētu divatomu molekulu, kas arī dod kombināciju no atomam līdzīgas sistēmas apvienojumā ar lielisku matricu. Ar NV centriem izmantotās magnētiskā lauka mērīšanas metodes ir dažādas, no optiski detektētās magnētiskās rezonanses (ODMR) līdz reāliem enerģētisko stāvokļu dzīves laiku mērījumiem [9]. Fokusēsimies uz ODMR metodiku, jo tieši šī metode tiek izmantota magnētiskā lauka attēlošanas eksperimentos Latvijas Universitātes Lāzeru centrā [10], un iemesls tam ir relatīvi vienkārša eksperimentālā tehnika, kas viegli apvienojama ar dažādu veidu pētāmajiem paraugiem.

Magnētiskā lauka attēlošanu vienkāršotā variantā būtu iespējams saukt par magnētiskā lauka mikroskopiju, jo būtībā tā ļauj ieraudzīt mikrometru izmēru magnētiskā lauka sadalījumus. Šī metode izmantojama gan



1. ATTĒLS. Attēla kreisajā pusē redzams raksturīga izmēra dimanta paraugs. Labajā pusē — shematiskais attēls, kas parāda, ka NV slānis izvietots pie vienas no dimanta virsmām. Mērījumu laikā zaļā ierosme — lāzera starojums — tiek pievadīta no parauga apakšas. Pētāmais magnētiskais materiāls novietots uz augšējās dimanta virsmas, pie kuras atrodas arī pats NV slānis. Optiski nolasāmais signāls tiek savākts caur parauga apakšu.

magnētisku objektu pētīšanā — magnētiskas mikrodaļiņas, magnētiskie labirinti un magnētiskas plānās kārtiņas, gan dažādu materiālu kvalitātes kontrolē — jau minēto plāno kārtiņu un citu magnētisku materiālu izveides un apstrādes procesā, kā arī nolietojuma kontrolē, jo, piemēram, defekts metālā, kas no ārpuses nav redzams ar optiskām metodēm, var tikt identificēts tā radītās magnētiskās anomālijas veidā.

Slāpekļa un vakances centrs veidojas, kad dimanta kristālā divi blakus esoši oglekļa atomi tiek aizstāti ar slāpekļa un vakances jeb nosacīta tukšuma kombināciju. Precizitātes labad gan jāpiebilst, ka realitātē vakancē atrodas divi elektroni, kas arī veido NV centra magnētiska lauka jutīgās īpašības.

Kā NV centri nonāk dimantā? Lai arī slāpekklis ir viens no ierastiem piemaisījumiem dabiskos dimantos, tie zinātniskos nolūkos netiek izmantoti. Iemesls ir dažādi citi piemaisījumi un strukturālie defekti, kas dabiskos dimantus padara nederīgus šādam pielietojumam. Magnētiskā lauka attēlošanas eksperimentiem izmanto kontrolētos apstākļos mākslīgi audzētus dimantus. Tiem ir jābūt monokristāliem (monokristāliska cieta viela ir materiāls, kurā visa parauga kristāla režģis ir nepārtraukts līdz parauga malām, bez graudu robežām) ar minimālu piemaisījumu dozu (viens «nepareizs» atoms uz miljonu «pareizu» ir vērā ņemams piemaisījums, kas maina parauga fizikālās īpašības).

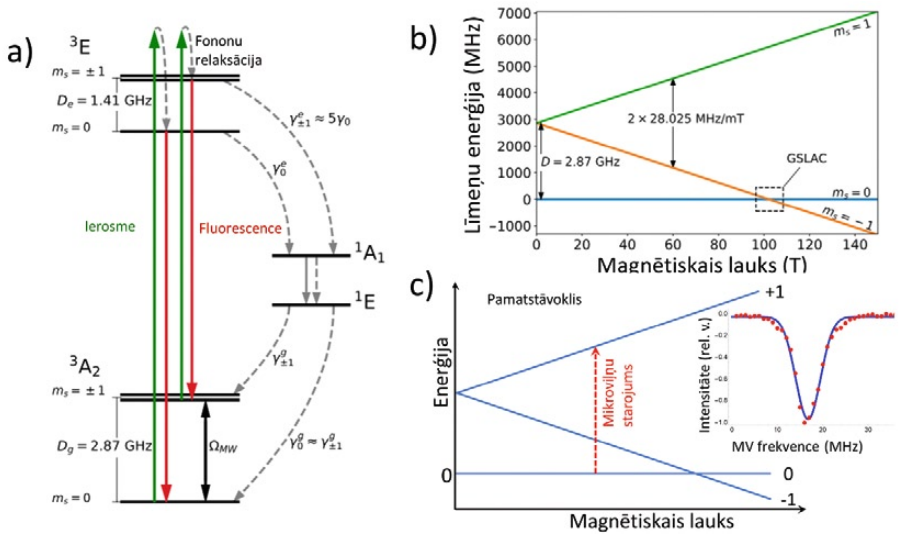
Mūsu gadījumā attēlošanai izmantotie dimanti parasti ir sagatavoti specifiskā veidā — NV centru slānis ir relatīvi plāns pret paša dimanta kristāla biezumu, un šis slānis atrodas vienas virsmas tuvumā (1. att.). Tipiski NV slāņa biezums mērāms dažos simtos nanometru. Aptuvenš novērtējums

nepieciešamajam NV slāņa biezumam, kas pēc nepieciešamības tiek izveidots dimanta kristālā, ir vienkāršs — NV slāņa biezums nedrīkst pārsniegt pētāmā parauga biezumu. Nedrīkst krist arī otrā galējībā, jo slāņa biezums tiešā veidā norāda uz to, cik daudz krāsu centru izspīdēs, kad tie tiks ierosināti; līdz ar to plānāks slānis dos vājāku signālu. Otrs pašsaprotams faktors ir pati NV centru koncentrācija slānī, kas praktisku apsvērumu dēļ parasti svārstās ap 100–200 daļām uz miljonu oglekļa atomu dimantā.

Izmantotā meto- dika un fizikālie pamatprincipi

Magnētiskā lauka attēlošanas eksperimentos tiek izmantota jau pieminētā ODMR metode. Lai saprastu, kā šī metode darbojas, ir mazliet jāiedziļinās NV centru enerģētiskās struktūras īpatnībās. NV centram ir vēl viena priekšrocība — optiskā polarizējamība. Tas nozīmē, ka pietiek ar lāzera gaismu, lai visa apdzīvotība nonāktu vienā no pamatstāvokļiem. Apdzīvotību (elektronu enerģētiskie stāvokļi) varam iedomāties kā bumbiņas un enerģētiskos līmeņus kā kastītes — optiskā polarizējamība nozīmē, ka ar lāzera gaismu visas bumbiņas nogādājam vienā pamatstāvokļa kastītē. Šī īpašība ir izdevīga, jo pēc optiskās polarizācijas apdzīvotību iespējams nogādāt tieši uz tiem stāvokļiem, kur tas būtu vēlams. Attēlā redzams (2. att. A), ka, ierosinot ar zaļo gaismu, iespējamas pārejas no pamatstāvokļa $m_s = 0$ uz ierosinātā stāvokļa $m_s = 0$ un atsevišķi no pamatstāvokļa $m_s = \pm 1$ uz ierosinātā stāvokļa $m_s = \pm 1$ (m_s ir magnētiskie apakšlīmeņi, kurus populārzinātniski varam vienkārši uztvert kā līmeņu numerāciju, neiedziļinoties fizikālajā būtībā). Ierosinātajiem stāvokļiem sabrūkot, izvēles likumi (noteikumi, pēc kuriem bumbiņas var nonākt kādā no kastītēm) ir tādi paši, kas nozīmē, ka apdzīvotība nonāktu atpakaļ tajā pašā stāvoklī, no kura sāka. Tomēr eksistē vēl viens papildu ceļš, kas redzams shēmas labajā pusē; tas ir bezizstarojuma ceļš (enerģijas apmaiņa notiek, neizstarojot gaismu). Šajā ceļā no ierosināto stāvokļu puses nonāk vairāk apdzīvotības tieši no $m_s = \pm 1$ stāvokļiem, kas pēc tam tiek vienmērīgi sadalīta starp visiem pamatstāvokļiem (trīs līmeņi, kas redzami 2. att. A apakšdaļā.) Tādējādi veidojas nevienmērīga apdzīvotības dalīšanas sistēma, kas pēc dažiem optiskajiem cikliem (ierosmes un izstarošanas) nodrošina optiskās polarizācijas veidošanos. Tā kā optiskie cikli norisinās ļoti ātri (optiskie efekti parasti ilgst no dažām nanosekundēm līdz dažiem simtiem nanosekunžu [11]), tad arī optiskā polarizācija cilvēka laika izpratnē iestājas tajā brīdī, kad dimanta kristālam tiek pievadīts lāzera starojums.

Tālāk apskatīsim, kā NV centrs jūt magnētisko lauku. 2. attēlā B parādīts, kā pamatstāvokļa magnētiskie apakšlīmeņi «uzvedas», kad tiem pieliek magnētisko lauku. Redzams, ka $m_s = 0$, pieaugot magnētiskajam laukam, enerģiju nemaina, turpretī stāvokļi $m_s = \pm 1$ sāk sašķelties (attālinās viens no otra). Tieši šī līmeņu $m_s = \pm 1$ atdalīšanās un lineāra attālināšanās



2. ATTĒLS. (A) NV centru enerģētiskā līmeņu shēma, kurā redzami trīs pamatstāvokļa līmeņi ($m_s = 0$ un $m_s = \pm 1$) un trīs ierosinātā stāvokļa līmeņi ($m_s = 0$ un $m_s = \pm 1$). Shēmas labajā pusē redzami bezizstarojuma pāreju līmeņi. **(B)** Pamatstāvokļa magnētisko apakšlīmeņu uzvedība ārējā magnētiskajā laukā, redzams, ka $m_s = 0$ līmenis savu enerģiju nemaina, bet $m_s = \pm 1$ magnētiskajā laukā sašķēļas. **(C)** Vienkāršots eksperimenta skaidrojums, kad pēc optiskās pumpēšanas visa apdzīvotība nonākusi $m_s = 0$ pamatstāvoklī, un, lai noskaidrotu magnētiskā lauka lielumu, jāpieliek mikroviļņu starojums, kas saista $m_s = 0$ un $m_s = +1$ vai $m_s = -1$. Papildu attēlā redzams, kā realitātē izskatās ODMR signāls, ko novēro eksperimentos.

vienam no otra nodrošina magnētiskā lauka jutību. Tagad atliek tikai atrast pareizo veidu, kā no šiem stāvokļiem šo informāciju nolasīt.

Un veids, kā šo informāciju nolasīt, ir relatīvi vienkāršs — enerģētiski attālumī starp līmeņiem $m_s = 0$ un $m_s = -1$ vai $m_s = +1$ ir mikroviļņu diapazonā. Tātad, pieliekot pareizu mikroviļņu frekvenci, divi līmeņi nonāks rezonansē — pieliktā enerģija būs tāda, lai pārnestu apdzīvotību no viena līmeņa uz otru (analogijā ar bumbiņām un kastītēm — arī mikroviļņi pārliet bumbiņas no zemākas kastītes uz augstāku), tādējādi būs iespējams novērot apdzīvotības pārdalīšanos, ko ir iespējams redzēt izspīdošajā gaismā (luminescencē). Mikroviļņu rezonansi iespējams «noķert» optiski, jo pāreja no pamatstāvokļa $m_s = 0$ uz ierosinātā stāvokļa $m_s = 0$ izspīd vairāk gaismas nekā tādos pašos apstākļos pāreja no pamatstāvokļa $m_s = \pm 1$ uz ierosinātā stāvokļa $m_s = \pm 1$. Tādējādi, skenējot mikroviļņu frekvenci, mēs optiskajā

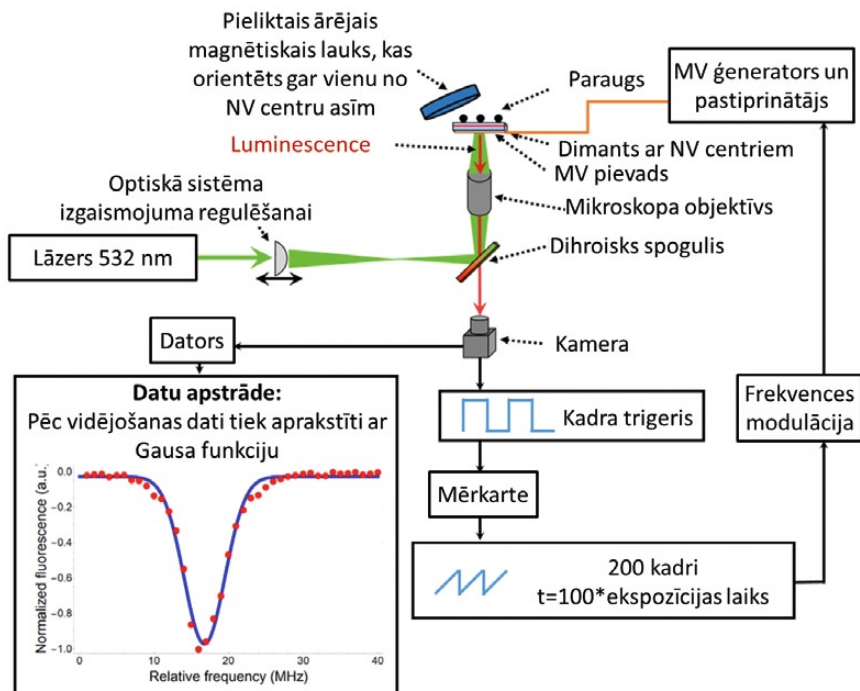
signālā redzam iekritumu vietā, kurā mikroviļņi ir rezonansē starp diviem pamatstāvokļa līmeņiem. Šo signālu arī sauc par optiski detektēto magnētisko rezonansi jeb ODMR. Šīs shēmas vizuāls skaidrojums kopā ar ODMR piemēru redzams 2. attēlā C.

Eksperimentālā iekārta un datu apstrāde. Kad zināmi fizikālie pamatprincipi, iespējams izskaidrot arī to, kā īsti darbojas magnētiskā lauka attēlošanas iekārta. Shematisks iekārtas attēlojums redzams 3. attēlā. Saprotams, ka pamatprincipi — optiskā polarizācija un mikroviļņu frekvences jutīga luminiscence — paliek spēkā. Tikai attēlošanas eksperimenta gadījumā tiek apskatīts telpiski sadalīts NV centru kopums. Tas nozīmē, ka nepieciešams iegūt reālu un telpisku NV centru izspīdēšanas attēlu; to izdara standarta mikroskopa objektīvs, kas savāc izstaroto gaismu un to tālāk nogādā uz kameru. Kameras pikseļu režģis sadala visu attēlu nelielās daļās, un katrs pikselis savāc gaismu no cita telpiskā apgabala. Visi dati, kas savākti no katra pikseļa, tiek apstrādāti vienā veidā — pa vairākiem kadriem iegūtā informācija tiek vidējota, lai samazinātu trokšņus, tālāk datu kopa tiek aprakstīta ar Gausa funkciju (saukts arī par normālo sadalījumu). Gausa funkcijas apraksts nepieciešams, jo zināms, ka šādi procesi labi aprakstāmi ar šo funkciju, turklāt datu punktu blīvums tiešā veidā ietekmē mērījumu ātrumu. Tas nozīmē, ka Gausa funkcijas pielietošana ļauj iztikt ar retākiem datu punktiem (kas ļauj veikt ātrāku mērījumu) un vienlaikus ļauj korekti atrast rezonanses minimumu, pat ja datu kvalitāte nav ideāla. Kad katrā pikselī atrasta minimuma vērtība, kas uz frekvenču skalas arī ir rezonanses frekvence, šī informācija tiek salikta vienā režģī — katrs pikselis dod vienu frekvences vērtību. Tādējādi tiek iegūta rezonanses frekvenču karte, kas dod informāciju par magnētiskā lauka sadalījumu pētāmajā paraugā, jo no rezonanses frekvences viennozīmīgi iespējams izrēķināt magnētiskā lauka vērtību.

Rezultāti

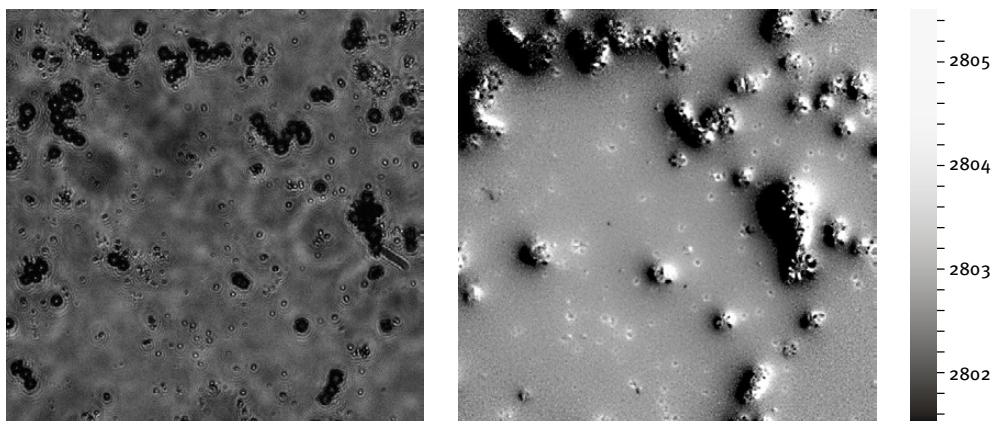
Apskatīsim ar aprakstīto tehniku iegūtos rezultātus. Ar Latvijas Universitātes Lāzeru centrā uzstādītās iekārtas palīdzību ir veiktu divu magnētisko paraugu tipu pētījumi — magnētiskas mikroskopiskas daļiņas un magnētiskas plānas kārtiņas. Sākumā apskatīsim mērījumus no magnētiskām daļiņām (lodītēm) ar dažādu izmēru. 4. attēlā redzams magnētisku daļiņu maisījums — feromagnētiskas daļiņas ar 2 μm diametru un superparamagnētiskas daļiņas ar 0,5 μm diametru. Daļiņas uzklātas uz dimanta plāksnītes piliena formā, pēc tam atļaujot šķidrumam izžūt (ārēja magnētiskā lauka klātbūtnē — lauks vērsts attēla horizontālajā virzienā), atstājot tikai tajā esošo daļiņu maisījumu. Analizējot šo attēlu, iespējams izdarīt vairākus secinājumus, dažus vairāk un dažus mazāk sagaidāmus.

Sāksim ar sagaidāmajiem. Redzams, ka daļiņas ar 2 μm diametru veido principiāli citādu magnētisko attēlu nekā daļiņas ar 0,5 μm diametru.



3. ATTĒLS. Zaļais lāzera (532 nm) stara profils tiek sagatavots nepieciešamajos izmēros ar optiskās sistēmas palīdzību. Tālāk lāzera stars nonāk uz dihroiskā spoguļa, kas atstaro zaļo, bet laiž cauri sarkano gaismu. Tālāk zaļā gaisma caur mikroskopa objektīvu tiek savākta uz NV centru slāņa un tur veic optisko NV centru polarizāciju. NV centru izstarotā un mikroviļņu frekvences jutīgā luminescence tiek savākta, izmantojot to pašu objektīvu, un tā tālāk, izejot cauri dihroiskajam spogulim, nonāk uz kameras. Kamera brīdī, kad ir gatava uzņemt kadrus, dod signālu mērkartei, kas savukārt padod zāģveida signālu mikroviļņu ģeneratoram. Tālāk mikroviļņu ģenerators skenē mikroviļņu frekvenci noteiktā diapazonā, tādējādi «meklējot» rezonansi.

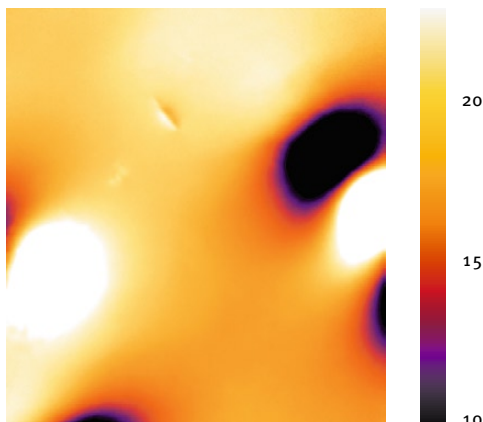
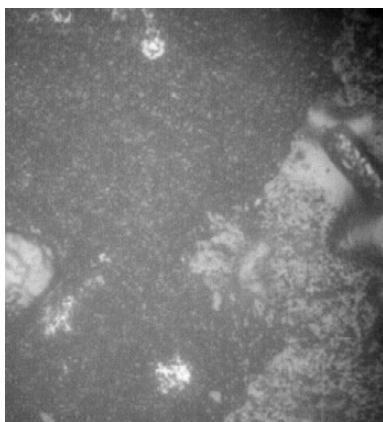
Tas skaidrojams vienkārši — feromagnētiskajām daļiņām ($2\ \mu\text{m}$) ir pastāvīgs magnētiskais lauks, un tā telpiskā orientācija atkarīga no daļiņu telpiskās sakārtošanās un žūšanas laikā pieliktā ārējā magnētiskā lauka. Redzams, ka šīs daļiņas magnētiskajā attēlā rada izteiktas gaišās un tumšās puses jeb izteiktu magnētisko polu orientāciju attēla horizontālajā virzienā. Turpretī superparamagnētiskās daļiņas ($0,5\ \mu\text{m}$ diametrs) lokālu magnētisko lauku veido tikai tad, kad tām ir pielikts ārējais magnētiskais lauks, kas šajā gadījumā ir mērījumiem nepieciešamais pieliktais lauks (perpendikulāri attēla plaknei). Līdz ar to šo daļiņu radītais lauks vērsts iekšā attēla plaknē, un



4. ATTĒLS. Attēla kreisajā pusē redzams optiskais attēls maisījumam no 2 μm un 0,5 μm diametra daļiņām, kas uzklāts piliena veidā, atļaujot tam nožūt ārēja magnētiskā lauka klātbūtnē. Attēla labajā pusē redzams šā paša reģiona magnētiskais attēls, kam blakus esošā krāsu kodu skala raksturo rezonanses mikroviļņu frekvences. Mērījumi veikti uz pārejas no $m_s = 0$ uz $m_s = -1$.

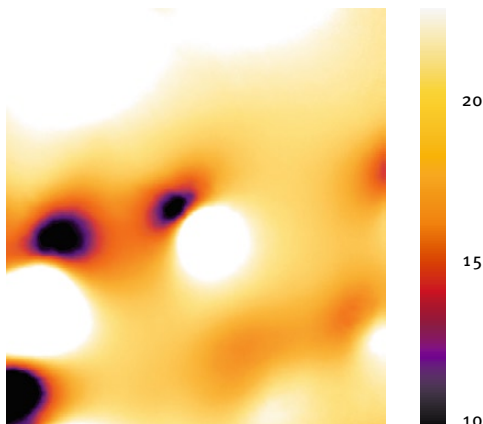
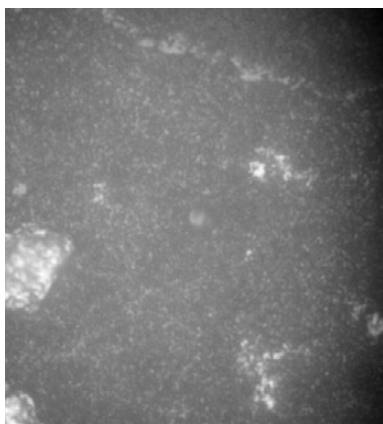
magnētiskajā attēlā šīs daļiņas izskatās kā nelielas bedrītes. Ņemot vērā vienkāršu aprēķinu, ka magnētisko līmeņu nobīde $m_s = -1$ līmenim (uz kura tiek izdarīts mērījums, gadījumā ja ārējais lauks ir orientēts gar NV centra asi, pret kuru tiek izdarīts mērījums) ir $\approx 2,8$ MHz uz 0,1 mT, tad redzams, ka 2 μm daļiņu radītais lauks mainās robežās $\pm 0,07$ mT un daļiņas ar 0,5 μm diametru rada lauka izmaiņas $\approx \pm 0,02$ mT. Jāpiebilst, ka daļiņas ar 0,5 μm diametru jau atrodas uz optiskās difrakcijas robežas (kā redzams optiskajā attēlā, tās izskatās mazliet izplūdušas), bet tas neietekmē magnētisko attēlu, jo šajā gadījumā attēlošanas iekārta reģistrē tikai lokāli izstarotu gaismu no NV centru slāņa, kura netiek apliekta ap objektu malām. Tāpat arī varam secināt — sagaidāms, ka magnētisko daļiņu radītais lauks ir būtiski lielāks par reālo daļiņu izmēriem, kas arī ir noderīgi sīku daļiņu detektēšanā; šajā gadījumā runa varētu būt pat par dažus desmitus nanometru lielām paramagnētiskām daļiņām, kuras būtu relatīvi viegli detektēt, pieliekot tām spēcīgu ārējo lauku.

Runājot par 4. attēlā redzamā magnētiskā attēla mazāk sagaidāmajām īpatnībām, noteikti jāpiemin efekts, kas saistīts ar daļiņu žūšanas īpatnībām. Daļiņas ar 0,5 μm diametru tiecas «paslēpties» zem lielākām daļiņām, jo šķidrums, kas tiek izmantots daļiņu maisījuma uzpilināšanai, zem lielajām daļiņām izžūst mazliet lēnāk nekā uz gludas dimanta virsmas, tādējādi sprauguma spēki mazās daļiņas pavelk zem lielajām daļiņām, kur



Relatīvā rezonances frekvence, MHz

5. ATTĒLS. Attēla kreisajā pusē redzams optiskais attēls — plānas magnētiskas kārtiņas virsma ar dažādu veidu defektiem. Attēla labajā pusē redzams tā paša apgabala magnētiskais attēls. Magnētiskā attēla labajā pusē esošā krāsu kodu skala raksturo relatīvās rezonances mikroviļņu frekvences. Redzes lauka izmērs $30 \times 30 \mu\text{m}$.



Relatīvā rezonances frekvence, MHz

6. ATTĒLS. Attēla kreisajā pusē redzams optiskais attēls — plānas magnētiskas kārtiņas virsma ar dažādu veidu defektiem. Attēla labajā pusē redzams tā paša apgabala magnētiskais attēls. Magnētiskā attēla labajā pusē esošā krāsu kodu skala raksturo relatīvās rezonances mikroviļņu frekvences. Redzes lauka izmērs $30 \times 30 \mu\text{m}$.

šķidrums izžūst pēdējais. Tādējādi tiek demonstrēta vēl viena magnētiskās attēlošanas priekšrocība — var redzēt magnētiskus objektus, kurus optiskajā mikroskopā vispār nebūtu iespējams ieraudzīt, jo tie vienkārši slēpjas zem kādas citas struktūras, turklāt var analizēt relatīvi sarežģītu magnētisko un šķidrums sprauguma spēku radīto mijiedarbību.

Tālāk pievērsīsimies magnētisko plāno kārtiņu mērījumiem. Plānās kārtiņas ir ļoti plašs jēdziens, pat ja konkretizējam, ka apskatām tikai magnētiskas kārtiņas. Arī magnētiskā lauka attēlošana spēj piedāvāt dažādu magnētisko īpašību aspektu izpēti — magnētiskās īpašības atkarībā no pieliktā ārējā lauka, temperatūras vai kāda cita parametra, kas var mainīt magnētiskās īpašības. Šoreiz fokusēsimies uz magnētisku defektu meklēšanu plānajās kārtiņās. Vairākos gadījumos plānās kārtiņas, kas kombinē dažādu veidu atomus vai molekulas, spēj uzlabot materiālu funkcionalitāti, papildus ietaupot lietojamo materiālu apjomu. Tomēr šādas kārtiņas veidošanas vai apstrādes procesā var rasties defekti, kas bojā materiāla īpašības, un šādus defektus nepieciešams identificēt. Apskatīsim kārtiņu, kura veidota sekojošā formā — uz MgO pamatnes 600 °C temperatūrā no trīs dažādu mērķu kombinācijas uzputināta ~600 nm bieza kārtiņa, ko veido hroms, mangāns, gallijs un ogleklis. Korekta plānās kārtiņas formula būtu $(\text{Cr}_{0,5}\text{Mn}_{0,5})_2\text{GaC}$. Pēc tam šai kārtiņai papildus pa virsu uzputināti ~60 nm molibdēna. Pati kārtiņa interesanta ar to, ka tai ir no temperatūras atkarīga magnētisko fāžu pāreja, ko šeit neapskatīsim.

5. attēla labajā pusē redzams plānās kārtiņas virsmas attēls. Uz kārtiņas izveidojušies vairāki defekti, tomēr par šo defektu magnētiskajām īpašībām tīri no optiskā attēla nav iespējams pateikt neko. 5. attēla labajā pusē redzams šī virsmas fragmenta magnētiskais attēls, un skaidri saskatāms, ka tikai divi no defektiem rada spēcīgu lokālu magnētisko novirzi (bipolāru struktūru — krāsu pāreja no melna uz baltu). Pārējā parauga virsma ir relatīvi gluda, tomēr vēl identificējami daži mazāki defekti. Gar pašām magnētiskā attēla malām parādās papildu tumšās struktūras, kas nāk no defektiem, kuri optiskajā attēlā atrodas ārpus redzes lauka.

6. attēla kreisajā pusē redzams optiskais attēls, kurā saskatāmi daži defekti, bet tie salīdzinājumā ar iepriekšējo attēlu sākotnēji šķiet mazāki. Taču, ja apskatām šīs parauga vietas magnētisko attēlu, tad varam konstatēt, ka tā ir ļoti tālu no ideālas. Sagaidāmu magnētisko defektu rada līdzīga struktūra kā 5. attēlā (abos attēlos — struktūra optiskā attēla pašā kreisajā malā). Tomēr 6. attēlā redzams arī magnētiskais defekts, kas optiski ir ļoti grūti pamanāms (pašā attēla vidū). Tāpat redzams — lai arī vājāku, tomēr magnētisko defektu rada divi defekti attēla labā apakšējā malā. Uzmanība jāvērs arī uz parauga augšējo malu, kur redzama robežvirsma starp diviem dažādiem materiāliem; šeit redzams, ka magnētiskā defekta īpašības ir atšķirīgas no tā, ko varētu sagaidīt tīri pēc optiskā attēla. Līdz ar to var secināt, ka magnētiskā lauka attēlošana var palīdzēt identificēt gan optiski redzamus, gan neredzamus plāno kārtiņu magnētiskos defektus.

Runājot par konkrēto defektu ķīmisko sastāvu, spēcīgi magnētiskie defekti, visticamāk, ir intermetāliskie savienojumi Mn_5Ga_8 vai Cr_5Ga_8 , pārējie gaišākie plankumi, visticamāk, ir tīrs gallijs, kura magnētiskās īpašības ir ļoti vājas.

Kopsavilkums

Magnētiskā lauka attēlošana, izmantojot NV centrus, ir ļoti spēcīgs instruments mikroskopisku objektu magnētisko īpašību izpētē. Latvijas Universitātes Lāzeru centrā izveidotā iekārta ir pasaules labāko laboratoriju līmenī, un tas pavēr iespēju jaunai starptautiskai sadarbībai. Taču ar to attīstība nebeidzas, jo sistēma jāpielāgo dažādiem pētāmajiem paraugiem un dažādiem darbības apstākļiem (piemēram, kriogēnām temperatūrām, dinamiskām vidēm un ātriem mērījumiem).

Pateicības

Vēlos izteikt lielu pateicību Latvijas Universitātes fonda administrētajam SIA «Mikrotīkls» ziedojuma projektam par atbalstu modernas un konkurētspējīgas iekārtas izveidē, kā arī projektam «Plāno kārtiņu un NV centru divvirzienu izpēte» 1.1.1.2/VIAA/1/16/024, kas dod iespēju darboties zinātnē.

Izmantotā literatūra

1. Han J. L. Observing Interstellar and Intergalactic Magnetic Fields. 2017. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 55(1), pp. 111–157.
2. Pedreros Bustos F. *et al.* Remote sensing of geomagnetic fields and atomic collisions in the mesosphere. 2018. *Nat. Commun.*, vol. 9(1), p. 3981.
3. Budker D. and Romalis M. Optical magnetometry. 2007. *Nat. Phys.*, vol. 3(4), pp. 227–234.
4. Waxman A. *et al.* Diamond magnetometry of superconducting thin films. 2014. *Phys. Rev. B—Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 89(5), pp. 1–9.
5. Acosta V. M., Bauch E., Ledbetter M. P., Waxman A., Bouchard L.-S. and Budker D. Temperature Dependence of the Nitrogen-Vacancy Magnetic Resonance in Diamond. 2010. *Phys. Rev. Lett.*, vol. 104(7), p. 070801.
6. Jones G. and Maki D. L. Lightning-induced magnetic anomalies on archaeological sites. 2005. *Archaeol. Prospect.*, vol. 12(3), pp. 191–197.
7. Aspinall A., Gaffney C. and Schmidt A. *Magnetometry for Archaeologists*. 2008. Lanham: AltaMira Press.
8. Clark A. J. *Seeing Beneath the Soil. Prospecting Methods in Archaeology*. 1996. London, United Kingdom: B. T. Batsford Ltd.
9. Pham L. M. *et al.* Magnetic field imaging with nitrogen-vacancy ensembles. 2011. *New J. Phys.*, vol. 13(13), p. 45021.
10. Smits J. *et al.* Estimating the magnetic moment of microscopic magnetic sources from their magnetic field distribution in a layer of nitrogen-vacancy (NV) centres in diamond. 2016. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, vol. 73(2), p. 20701.
11. Wrachtrup J. *et al.* Spin dynamics in the optical cycle of single nitrogen-vacancy centres in diamond Infrared emission of the NV centre in diamond Nuclear spin induced collapse and revival shape of Rabi oscillations of a single electron spin in diamond Spin dynamics in the optical cycle of single nitrogen-vacancy centres in diamond. 2011. *New J. Phys.*, vol. 13, pp. 25013–25024.

Aptamēru atlase pret gaišo šūnu nieru karcinomu: šūnu SELEX metodes izmantojums

KĀRLIS PLEIKO, LU Medicīnas fakultātes
zinātniskais asistents

LĪGA SAULĪTE, LU Medicīnas
fakultātes pētniece

VADIMS PARFEJEVS, LU Medicīnas
fakultātes viesdocents

UNA RIEKSTIŅA, LU Medicīnas
fakultātes profesore

Projekts tapis ar SIA «Mikrotīkls» ziedojumu,
ko administrē Latvijas Universitātes fonds.

Onkoloģiskās slimības ir viens no biežākajiem nāves cēloņiem, un pastāvīgi tiek meklēti jauni līdzekļi, kurus būtu iespējams izmantot terapeitiskam vai diagnostiskam nolūkam. Pašlaik audzēju ārstēšanā ļoti bieži tiek lietota klasiskā ķīmijterapija, ķirurģiska audzēja izgriešana un apstarošanas terapija. Šīs ārstēšanas metodes ne vienmēr ir sekmīgas un nenodrošina nepieciešamo specifiskumu — tiek skartas ne tikai ļaundabīgās šūnas, bet arī cilvēka veselie audi. Pēdējos gados aizvien plašāk tiek izmantotas antivielu terapijas, kas ļauj «noņemt bremzes» cilvēka imūnsistēmai, tādā veidā veicinot paša organisma cīņu pret ļaundabīgajām šūnām. Lai gan, ka izstrādātās antivielu terapijas sekmīgi spēj cīnīties pret atsevišķiem audzēju apakštipiem, to efektivitāte ne tuvu nav ideālam. Jau ilgstoši kā alternatīva antivielu terapijām tiek pētīti aptamēri. Latīņu valodā *aptus* nozīmē «piemērots», grieķu valodas vārds *meros* tulkojams kā «daļa», norādot uz to, ka aptamēri spēj piesaistīties pie mērķa proteīna uz šūnu virsmas, līdzīgi kā divi savstarpēji saderīgi LEGO kluči, pateicoties to trīsdimensionālajai struktūrai. Šūnu SELEX (*Systematic Evolution of Ligands by Exponential Enrichment*) metode ļauj atlasīt audzēja šūnu specifiskus aptamērus, izmantojot *in vitro* atlases procesu. Pētījuma mērķis bija ar šūnu SELEX metodi atlasīt aptamērus, kas specifiski atpazīst nieru karcinomas šūnu līnijas. Pētījumā ir identificēti gaišo šūnu nieru karcinomas šūnām specifiski aptamēri, kā arī izstrādāta jauna, otrās paaudzes sekvencēšanā balstīta aptamēru identificēšanas metode. Turpmākajos pētījumos atlasītos aptamērus var izmantot, lai izstrādātu jaunas nieru audzēju ārstēšanas vai diagnostikas metodes.

Atslēgvārdi: **aptamēri, otrās paaudzes sekvencēšana, šūnu SELEX metode**

Ievads

Aptamēri ir vienas virknes dezoksiribonukleīnskābes (DNS) vai ribonukleīnskābes (RNS) oligonukleotīdi, kas specifiski spēj saistīties ar savu mērķi. Aptamēri jau kopš sākotnējiem pētījumiem pagājušā gadsimta deviņdesmitajos gados tika uzskatīti par iespējamu alternatīvu antivielām. Līdzīgi kā antivielas piesaistās antigēnam, arī aptamēriem to trīsdimensionālā struktūra ir aptamēra-mērķa kompleksa veidošanās pamatā. Aptamēriem piemīt vairākas terapeitiskam lietojumam nepieciešamās īpašības. Piemēram, salīdzinājumā ar antivielām, kuras ir 150–180 kDa lielas un to fiziskais izmērs ir aptuveni 15 nm diametrā, aptamēri ir 6–30 kDa lieli, un to fiziskais diametrs ir aptuveni 2 nm. Mazāks izmērs aptamēriem ļauj piesaistīties mazākiem mērķiem šūnā, kā arī piekļūt saistīšanās «kabatām», kuras nav pieejamas antivielām [1]. Aptamēri parasti sastāv no konstantiem praimēru piesaistīšanās reģioniem (aptuveni 16–22 nukleotīdi), kas izvietoti abās pusēs 16–75 nukleotīdus garam randomizētu nukleotīdu reģionam. Kombinātorā sintēze, kurā iegūst arī randomizētu oligonukleotīdu bibliotēku ar lielu ķīmisko daudzveidību, ir viens no vērtīgākajiem farmaceitiskās industrijas rīkiem. Visām kombinātorās sintēzes variācijām raksturīga kopēja vispārīgā struktūra — randomizētas ķīmisko savienojumu bibliotēkas izveide, pret kādu konkrētu mērķi tēmētu specifisku savienojumu izolēšana no izveidotās bibliotēkas un jauniegūtā liganda-mērķa mijiedarbības raksturošana. Randomizēta oligonukleotīdu bibliotēka nodrošina aptuveni 10¹⁵ unikālas sekvences, no kurām iespējams atlasīt visspecifiskākās [2]. Dabā atrodami arī cilvēka nesintezēti aptamēri, un nesenā pētījumā parādīts, ka *E.coli* genoms kodē aptuveni 15 000 aptamēru, kuri specifiski saistās ar RNS polimerāzi un tādā veidā piedalās gēnu ekspresijas regulācijā [3].

Onkoloģija ir viens no pētījumu virzieniem, kurā strauji attīstās aptamēru lietojums. Viens no iemesliem ir tas, ka audzēju molekulārie mehānismi ir ļoti plaši pētīti Audzēja genoma atlasā (TCGA — *The Cancer Genome Atlas*) un izdevies identificēt proteīnus, kuri ir unikāli ekspresēti vai vairāk ekspresēti audzēja šūnās salīdzinājumā ar slimības neskartajiem audiem [4].

Audzēju agrīna diagnostika un audzēja šūnu iznīcināšana, neskarot veselās šūnas, ir divi galvenie izaicinājumi onkoloģijā, kas ļauj uzlabot esošās vai izstrādāt radikāli jaunas terapijas vai diagnostiskos līdzekļus [2]. Lai sekmīgi īstenotu šo mērķi, ir nepieciešams identificēt jaunus biomarkierus. Nacionālais Vēža institūts (*National Cancer Institute*) definē biomarkieri kā «bioloģisku molekulu, kura atrodama asinīs, citos ķermeņa šķidrumos vai audos, kas ir raksturīga normālam vai anormālam procesam, stāvoklim vai slimībai», piemēram, audzējam [5].

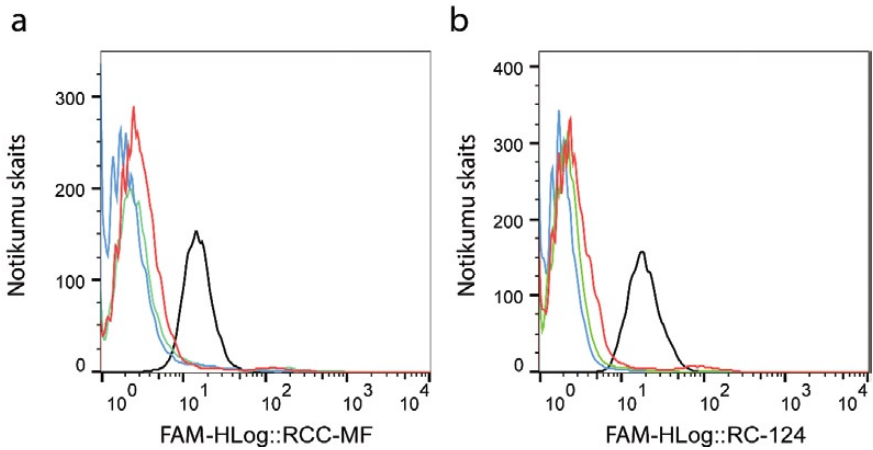
Patlaban aptamērus ir izdevies atlasīt pret ļoti dažādiem mērķiem — baktērijām [6], vīrusiem [7], toksīniem [8], mazām molekulām [9], izolētiem audiem [10], proteīniem [11], neorganiskiem nanostrukturētiem materiāliem [12], audzēja ksenogrāfiem *in vivo* [13], dzīvām šūnām [14; 15]. Pašlaik

Eiropas zāļu aģentūra (EMA) un Pārtikas un zāļu administrācija (FDA) ir apstiprinājušas vienu aptamēru terapeitisko līdzekli *Macugen*, kas paredzēts vecuma makulārās deģenerācijas ārstēšanai [16].

Sākotnējās aptamēru atlases metodes pēdējo gadu laikā būtiski attīstījušās, padarot tās ātrākas, precīzākas un piemērotākas konkrētā molekulārā mērķa specifikai (šūnas, mazās molekulas, dzīvnieki, orgāni). Dažas svarīgākās aptamēru atlases metodes, kas izstrādās kopš sākotnējās SELEX metodes, ir šūnu SELEX [17], kur atlasei tiek izmantotas dzīvas šūnas. Izmantojot šūnu SELEX metodi, ir izdevies *in vitro* atlasīt vairākus aptamērus dažādiem audzēju apakštipiem, piemēram, aizkuņģa dziedzera adenokarcinomu [18], kolorektālo audzēju [19], glioblastomu [20], krūts audzēju [21], aknu audzēju [22] un citiem. Pirmo augstas veiktspējas SELEX metodi (HT-SELEX), sākotnējās metodes variācija, kurā Sangera sekvencēšanas metodes vietā tiek izmantotas otrās paaudzes sekvencēšanas metodes (*next generation sequencing* – NGS), 2009. gadā aprakstīji Zhao et al. [23]. Turpmākajos pētījumos NGS metodes būtiski uzlaboja aptamēru atlases efektivitāti [24; 25]. Sekojoja NGS metožu izmantošana, lai atlasītu RNS aptamērus pret tik sarežģītu mērķi kā β_2 adrenoreceptoru tā divās atšķirīgās konformācijās, ko izdarīja Kahsai ar kolēģiem. Šajā pētījumā tiek izmantota NGS metode, lai raksturotu logaritmisko aptamēru bagātināšanos ar konkrētām sekvencēm pret katru mērķi paralēlās atlasēs [24]. Neraugoties uz to, ka šāda pieeja ir izmantojama, atlasot aptamēru pret konkrētu proteīnu, to nav iespējams tiešā veidā pārnest uz šūnu SELEX eksperimentiem, tāpēc ka uz šūnas virsmas eksistē liels skaits proteīnu mērķu, kas raksturīgi gan mērķa šūnām (audzēja šūnas), gan kontroles šūnām (veselas šūnas, no kurām attīstījies audzējs), kas izraisītu bagātināšanos ar nespecifiskām sekvencēm, ja netiek veikta negatīvā selekcija.

Vairākas pētnieku komandas ir radījušas bioinformātikas rīkus, lai analizētu NGS datus, kas iegūti no aptamēru selekcijas, piemēram, *FASTAptamer*, rīku komplektu, ko izstrādāja Alam un citi un ar kuru ir iespējams izsekot individuālu oligonukleotīdu bagātināšanās trajektoriju SELEX procesa laikā [25]. Pavisam nesen izveidota arī *AptaSUITE*, bioinformātikas sistēma, kas iekļauj lielu daļu līdz šim publicēto funkcionalitāšu aptamēru atlasei – datu pirmsapstrādi, sekvenču klasteru izveidošanu, motīvu identifikāciju un mutāciju analīzi [26].

RNS sekvencēšanas eksperimenti tiek izmantoti, lai kvantificētu konkrētu gēnu ekspresijas atšķirības starp paraugiem [27]. Mūsu grupa izvirzīja teoriju, ka ir iespējams adaptēt bioinformātikas datu analīzes rīkus, kuri parasti tiek izmantoti RNS sekvencēšanas eksperimentos, lai tos pielāgotu izmantošanai HT-šūnu-SELEX eksperimentos. Šūnu SELEX eksperimentos mērķis ir iegūt aptamērus, kas saistās ar mērķa šūnām daudz lielākā skaitā nekā ar kontroles šūnām, padarot eksperimentālo dizainu ļoti līdzīgu RNS sekvencēšanai. Šajā pētījumā mēs piedāvājam atšķirīgās saistīšanās šūnu SELEX metodi, kas var tikt lietota, lai identificētu uz kontroles šūnu

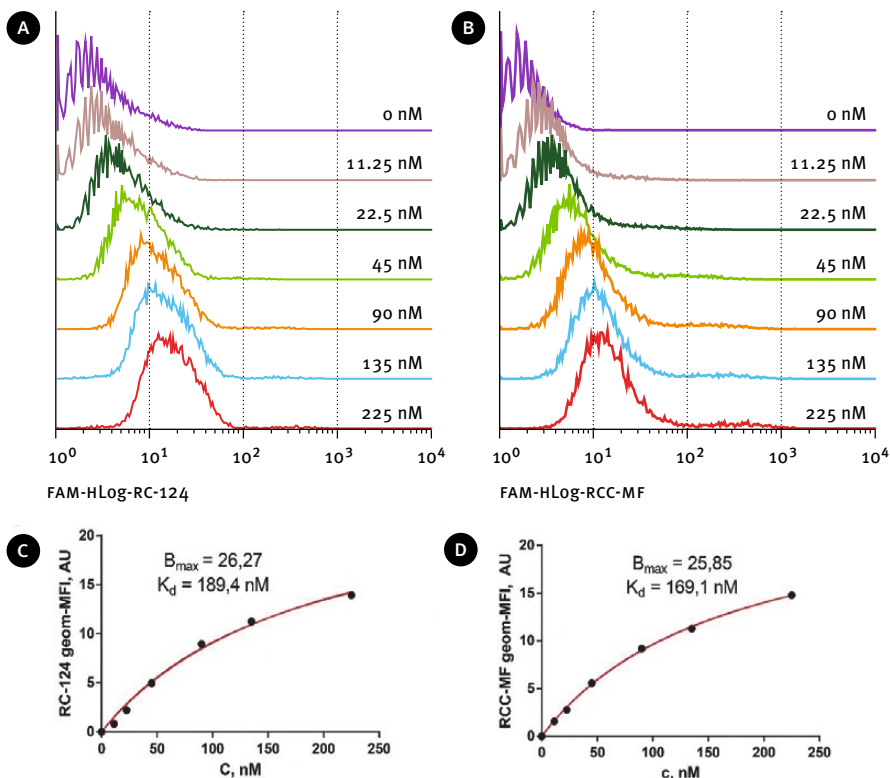


1. ATTĒLS. Plūsmas citometrijas histogrammas ar aptamēru saistīšanos pie RC-124 šūnām (**A**) un RCC-MF (**B**) šūnām pēc 4. (zaļa līnija), 8. (zila līnija) un 11. (melna līnija) cikla.

un mērķa šūnu virsmas atšķirīgā skaitā saistītos aptamērus šūnu SELEX eksperimenta gaitā. Metode arī ļauj aprakstīt statistisko nozīmību katrai šai atšķirībai. Analīze sastāv no *edgeR* (28), bieži lietota bioinformātikas rīka RNS sekvencēšanas analīzēs, kas izmanto negatīvo binominālo sadalījumu, lai identificētu atšķirīgi ekspressētus gēnus, *FASTAptamer* [25] rīku kopuma, lai noteiktu nolasiņumu skaitu, *cutadapt* [29], lai atdalītu konstantos praimeru piesaistīšanās reģionus, kā arī no mūsu rakstīta R koda, kas pieejams atkārtotai izmantošanai. Kombinējot mūsu izstrādāto metodi un sekvenču bagātināšanās analīzi, kuru jau izmanto citas pētnieku grupas, mēs identificējam nozīmīgākos atlasītos aptamēru SELEX procesā.

Rezultāti un diskusija

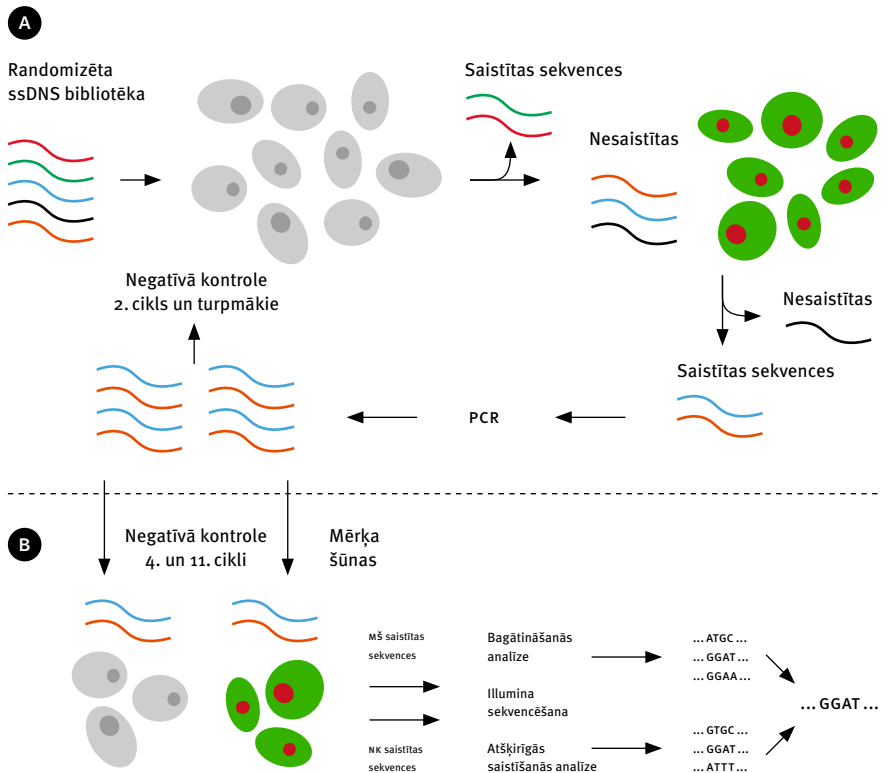
Gaišo šūnu nieru karcinomas specifisku aptamēru atlasēi tika izmantota randomizēta oligonukleotīdu bibliotēka un veikti secīgi 11 šūnu SELEX atlasē cikli, izmantojot RCC-MF (gaišo šūnu nieru karcinomas šūnas) kā mērķa šūnas un RC-124 (proksimālo nieru kanāliņu šūnas) kā kontroles šūnas. Aptamēru atlasē monitorings tika veikts pēc 4., 8. un 11. atlasē cikla. Pēc 4. un 8. atlasē cikla tika novērota neliela saistīšanās atšķirība starp šūnām, pēc 11. atlasē cikla varēja novērot, ka atlasētie aptamēri saistījās pie vairāk nekā 95% mērķa un kontroles šūnu populācijas (1. att.). Iegūtie rezultāti liecina: lai gan pēc SELEX atlasē iegūtajā aptamēru bibliotēkā ir arī specifiskas aptamēru sekvences, procesa laikā notikusi nieru karcinomas šūnām nespecifisku aptamēru sekvenču bagātināšanās.



2. ATTĒLS. Plūsmas citometrijas disociācijas konstantes mērījumi ar RCC-MF un RC-124 šūnām pēc 11 SELEX atlasēm ciklām iegūtajai aptamēru bibliotēkai. Histogrammas, izmantojot dažādas bibliotēkas koncentrācijas ar RC-124 šūnām (**A**) un RCC-MF šūnām (**B**). Disociācijas konstantes aprēķins pret RC-124 šūnām (**C**) un RCC-MF šūnām (**D**).

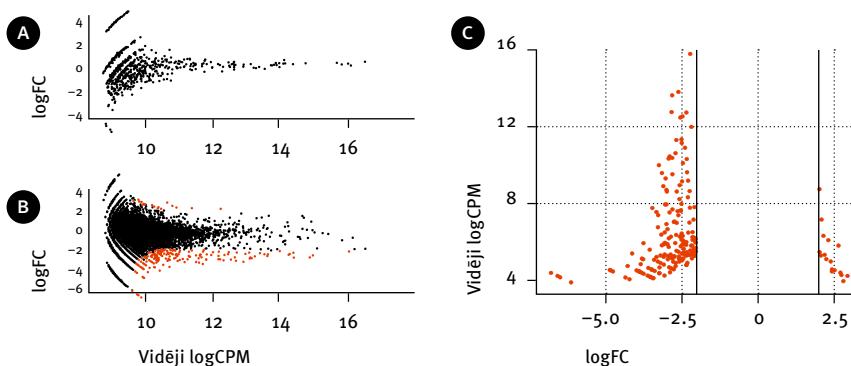
Izmantojot plūsmas citometriju un iegūto 11. cikla aptamēru bibliotēku, kas tika pievienota mērķa un kontroles šūnām dažādās koncentrācijās (2. att., A un B), mēs noteicām disociācijas konstanti bibliotēkai (2. att., C un D). Noteiktās disociācijas konstantes bija salīdzināmas gan RC-124 šūnām (189 nM), gan RCC-MF šūnām (169 nM).

Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem, mēs secinājām, ka pilnībā specifisku bibliotēku pret RCC-MF šūnām nav izdevies iegūt 11 ciklu laikā. Tā kā novērotās disociācijas konstantes ir salīdzinoši zemas, kas ir vēlams, lai veiktu turpmākus pētījumus ar atlasītajiem aptamēriem, mēs izvirzījām teoriju, ka bagātinātajās bibliotēkās tomēr atrodamas gaišo šūnu nieru karcinomas specifiskas aptamēru sekvenses. Lai noskaidrotu saistīšanās atšķirības, kuras varētu eksistēt starp bibliotēkā esošajām sekvensēm, mēs izstrādājām atšķirīgās saistīšanās šūnu SELEX pieeju (3. att.).

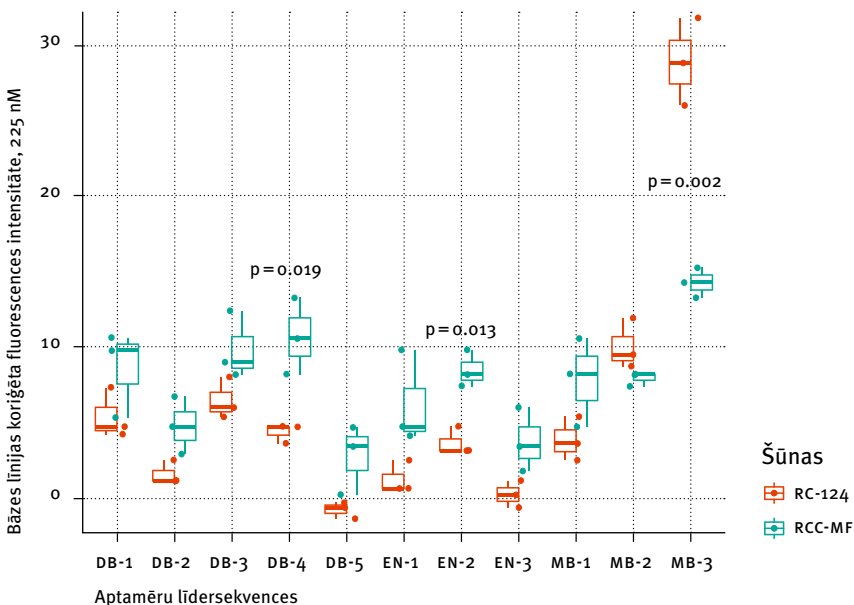


3. ATTĒLS. Atšķirīgās saistīšanās šūnu SELEX metodes grafisks attēlojums. Šūnu SELEX atlase (**A**), papildināta ar atšķirīgās saistīšanās pieeju (**B**); izmantojot NGS no kopsummā nespecifiskas bibliotēkas pēc 11. atlasē cikla, iespējams identificēt aptamēru sekvences, kuras specifiski saistās ar gaišo šūnu nieru karcinomas šūnām.

Atšķirīgās saistīšanās šūnu SELEX eksperimentā, kas tika veikts pēc 4. un 11. atlasē cikla, pēc 4. cikla tika iegūtas 3 627 938 unikālas sekvences, pēc 11. cikla — 503 107 unikālas sekvences, kas liecina, ka aptamēru bibliotēka atlasē laikā ir kļuvusi viendabīgāka. Pēc nolasījumu izfiltrēšanas, lai atsijātu sekvences, kuras uz miljonu nolasījumiem atkārtojas mazāk nekā 2 reizes un parādās mazāk nekā 2 tehniskajos atkārtojumos, turpmākai analīzei tika atlasītas 1015 unikālas sekvences no 4. cikla un 35 859 sekvences no 11. cikla bibliotēkas. Pēc datu analīzes ar *edgeR*, kas ļāva noteikt atšķirīgās saistīšanās statistisko nozīmīgumu, mēs izfiltrējām sekvences, kuru *p* vērtība pēc Benjamini–Hochberg vairāku salīdzinājumu korekcijas bija augstāka par 0,0001 un kuru \log_2 atšķirību vērtība starp mērķa un kontroles šūnām bija robežās no -2 līdz 2 . Analīzē pēc 4. cikla atlasē neizdevās identificēt nevienu statistiski nozīmīgi atšķirīgi saistītu aptamēru



4. ATTĒLS. Atšķirīgās saistīšanās šūnu SELEX rezultāti pēc 4. cikla (A) un 11. cikla (B) selekcijas. Negatīva logFC vērtība norāda palielinātu saistību ar kontroles šūnām RC-124, pozitīva logFC vērtība — uz palielinātu saistīšanos ar mērķa šūnām RCC-MF. Sarkanie punkti norāda statistiski nozīmīgās vērtības ($p < 0,0001$, izmantojot *edgeR* un Benjamini–Hochberg vairāku salīdzinājumu korekciju). Visi rezultāti, kuru p vērtība $< 0,0001$ un $\logFC > 2$ (C).



5. ATTĒLS. Individuālo sekvenču atšķirīgā saistīšanās ar RC-124 šūnām (sarkans) un RCC-MF šūnām (zaļš), izmantojot plūsmas citometriju ($n = 3$). Kastītes augšējā un apakšējā robeža atbilst pirmajai un trešajai kvartilei, pagarinājuma līnijas apzīmē 1,5* interkvartiļu diapazonu. Statistiskais nozīmīgums aprēķināts, izmantojot t-testu ar programmu *GraphPad Prism*.

sekvenci. Pēc 11. cikla tika identificētas 195 sekvenses, no kurām 178 spēcīgāk saistījās pie kontroles šūnām RC-124 ($\log_2 < -2$) un 17 sekvenses spēcīgāk saistījās pie mērķa šūnām RCC-MF ($\log_2 > 2$), norādot, ka atlasītājā bibliotēkā eksistē nieru karcinomas šūnu specifiskas sekvenses (4. att.).

Salīdzinājām datus ar bagātināšanās analīzes pieeju, kas izmantota jau iepriekš citu grupu veiktajos pētījumos, un identificējām 720 unikālas sekvenses, kuru bagātināšanās \log_2 vērtība starp 4. un 11. ciklu ir lielāka par 5. Šādu individuālo sekvenču daudzumu laboratorijas apstākļos pārbaudīt būtu ļoti laikietilpīgi un darbietilpīgi, salīdzinot ar 17 sekvensēm, kuras tika identificētas ar mūsu izstrādāto atšķirīgās saistīšanās metodi, kas norāda uz izstrādātās metodes pievienoto vērtību. Kombinējot rezultātus gan no bagātināšanās analīzes, gan no atšķirīgās saistīšanās analīzes, mēs identificējām 6 sekvenses, kuras bija kopīgas abos gadījumos un kuru individuālo saistīšanos ar abām šūnu līnijām pārbaudījām, izmantojot plūsmas citometriju.

Lai salīdzinātu iegūtos rezultātus, izmantojot katru metodi, aptamēru līdersekvenču testēšanai izvēlējāmies 11 dažādas sekvenses (DB — atšķirīgā saistīšanās, EN — bagātināšanās analīze, MB — visvairāk atrodamās sekvenses). Atšķirīgās saistīšanās līdersekvenses, sarindotas pēc nolasījumiem uz miljonu ar nosaukumiem DB-1, DB-2, DB-3, atšķirīgās saistīšanās metode kombinācijā ar bagātināšanās analīzi ar nosaukumiem DB-3, DB-4, DB-5. Bagātināšanās analīzes metodes identificētās sekvenses, sarindotas pēc \log_2 augstākajām vērtībām EN-1, EN-2, EN-3. Trīs visbiežāk sastopamās sekvenses, kas saistījās ar RCC-MF šūnām, ar nosaukumiem MB-1, MB-2, MB-3 (5. att.).

Rezultāti ļauj secināt, ka 3 sekvenses (DB-4, EN-2, MB-2) ir statistiski nozīmīgi atšķirīgi saistītas ar mērķa un kontroles šūnu līnijām. MB-3 tika identificēta kā trešā visbiežāk sastopamā sekvence pēc nolasījumu skaita īpatsvara, un, lai gan statistiski nozīmīgi atšķirīgi saistīta ($p = 0,002$), šī sekvence specifiski saistās nevis ar mērķa šūnu līniju RCC-MF, bet gan ar kontroles šūnu līniju RC-124, apstiprinot, ka visbiežāk sastopamās sekvenses ne vienmēr reprezentē visspecifiskākās sekvenses. EN-2 sekvence tika identificēta, izmantojot bagātināšanās analīzi un statistiski nozīmīgi ($p = 0,013$) atšķirīgi saistās ar RCC-MF šūnu līniju. DB-4 statistiski nozīmīgi ($p = 0,019$) atšķirīgi saistās ar mērķa šūnu līniju RCC-MF un tika identificēta, izmantojot kombinēto bagātināšanās un atšķirīgās saistīšanās šūnu SELEX metodi.

Secinājumi

Galvenais sasniegtais rezultāts pētījumā ir atšķirīgās saistīšanās šūnu SELEX metodes izstrāde, izmantojot nieru karcinomas šūnas RCC-MF kā mērķšūnas un proksimālo nieru kanāliņu šūnas RC-124 kā kontroles šūnas. Metode ļauj identificēt šūnu veida specifiskas aptamēru sekvenses

no šūnu SELEX bibliotēkām, kuras nebūtu iespējams identificēt, izmantojot līdzšīnējās metodes.

Bagātināšanās analīze identificēja vienu statistiski nozīmīgi ($p = 0,013$) atšķirīgi saistītu sekvenci pie RCC-MF šūnām, ko izdevās apstiprināt, izmantojot plūsmas citometriju. Mūsu izstrādātā atšķirīgās saistīšanās metode ļāva identificēt vēl vienu sekvenci (DB-4), kas statistiski nozīmīgi ($p = 0,019$), kas apstiprināts ar plūsmas citometriju, saistījās ar RCC-MF šūnām. Svarīgi, ka DB-4 tika atrasta, ne tikai izmantojot atšķirīgās saistīšanās šūnu SELEX, bet arī bagātināšanās analīzē; no 720 unikālajām atlasītajām sekvencēm tā ierindojās 528. vietā pēc \log_2 bagātināšanās vērtības. Šāds rezultāts norāda, ka mūsu izstrādātā metode spēj identificēt aptamēru sekvences, kuru validēšanai ar plūsmas citometriju būtu nepieciešams notestēt pārējās 527 sekvences, kuras ir vairāk bagātinājušās nekā DB-4.

Kopumā mēs demonstrējam kombinētu datu analīzes metodi, kas ļauj identificēt aptamēru līdersekvences no zema specifiskuma aptamēru bibliotēkām pēc šūnu SELEX eksperimentiem. Mūsu izstrādātā metode ir viegli iekļaujama pašreizējās šūnu SELEX metodēs, lai palielinātu rezultatīvo aptamēru atlasu īpatsvaru turpmākajos pētījumos.

Pateicības

Paldies SIA «Mikrotīkls» par atbalstu, LU fondam par iespēju piedalīties konkursā un par projekta administrēšanu, LU Medicīnas fakultātes farmācijas studiju programmai par iespēju izmantot laboratoriju aprīkojumu, kolēģiem par rosinošām diskusijām.

Izmantotā literatūra

1. Zhou J. and Rossi J. Aptamers as targeted therapeutics: Current potential and challenges. 2017. *Nat. Rev. Drug Discov.*, vol. 16, pp. 181–202.
2. Pereira R. L., Nascimento I. C., Santos A. P., Ogusuku I. E. Y. Y., Lameu C., Mayer G. and Ulrich H. Aptamers: novelty tools for cancer biology. 2018. *Oncotarget*, vol. 9, pp. 26934–26953.
3. Sedlyarova N., Rescheneder P., Magán A., Popitsch N., Rziha N., Bilusic I., Epshtein V., Zimmermann B., Lybecker M., Sedlyarov V. et al. Natural RNA Polymerase Aptamers Regulate Transcription in *E. coli*. 2017. *Mol. Cell*, vol. 67, pp. 30–43.
4. Akbani R., Ng P. K. S., Werner H. M. J., Shahmoradgoli M., Zhang F., Ju Z., Liu W., Yang J.-Y., Yoshihara K., Li J. et al. A pan-cancer proteomic perspective on The Cancer Genome Atlas. 2014. *Nat. Commun.*, vol. 5, p. 3887.
5. Henry N. L. and Hayes D. F. Cancer biomarkers. 2012. *Mol. Oncol.*, vol. 6, pp. 140–146.
6. Wang L., Wang R., Chen F., Jiang T., Wang H., Slavik M., Wei H. and Li, Y. QCM-based aptamer selection and detection of *Salmonella typhimurium*. 2017. *Food Chem.*, vol. 221, pp. 776–782.
7. Bai C., Lu Z., Jiang H., Yang Z., Liu X., Ding H., Li H., Dong J., Huang A., Fang T. et al. Aptamer selection and application in multivalent binding-based electrical impedance detection of inactivated H1N1 virus. 2018. *Biosens. Bioelectron.*, vol. 110, pp. 162–167.
8. Ma X., Wang W., Chen X., Xia Y., Duan N., Wu S. and Wang Z. Selection, characterization and application of aptamers targeted to Aflatoxin B₂. 2015. *Food Control*, vol. 47, pp. 545–551.
9. Cao F., Lu X., Hu X., Zhang Y., Zeng L., Chen L. and Sun M. *In vitro* selection of DNA aptamers binding pesticide fluoroacetamide. 2016. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, vol. 80, pp. 823–832.
10. Wang H., Li X., Volk D. E., Lokesh G. L.-R., Elizondo-Riojas M.-A., Li L., Nick A. M., Sood A. K., Rosenblatt K. P. and Gorenstein D. G. Morph-X-Select: Morphology-based tissue aptamer selection for ovarian cancer biomarker discovery. 2016. *Biotechniques*, vol. 61, pp. 249–259.
11. Scoville D. J., Uhm T. K. B., Shallcross J. A. and Whelan R. J. Selection of DNA Aptamers for Ovarian Cancer Biomarker CA125 Using One-Pot SELEX and High-Throughput Sequencing. 2017. *J. Nucleic Acids*, vol. 2017, pp. 1–9.
12. Zhou Y., Huang Z., Yang R. and Liu J. Selection and Screening of DNA Aptamers for Inorganic Nanomaterials. 2018. *Chem. — A Eur. J.*, vol. 24, pp. 2525–2532.
13. Mi J., Ray P., Liu J., Kuan C. T., Xu J., Hsu D., Sullenger B. A., White R. R. and Clary B. M. *In Vivo* Selection Against Human Colorectal Cancer Xenografts Identifies an Aptamer That Targets RNA Helicase Protein DHX9. 2016. *Mol. Ther. — Nucleic Acids*, vol. 5, e315.
14. Wu Q., Wu L., Wang Y., Zhu Z., Song Y., Tan Y., Wang X.-F., Li J., Kang D. and Yang C. J. Evolution of DNA aptamers for malignant brain tumor gliosarcoma cell recognition and clinical tissue imaging. 2016. *Biosens. Bioelectron.*, vol. 80, pp. 1–8.
15. Chandrasekaran R., Lee A. S. W., Yap L. W., Jans D. A., Wagstaff K. M. and Cheng W. Tumor cell-specific photothermal killing by SELEX-derived DNA aptamer-targeted gold nanorods. 2016. *Nanoscale*, vol. 8, pp. 187–96.
16. Hussain R. M., Harris A., Siesky B., Yung C.-W., Ehrlich R. and Prall R. The effect of pegaptanib (Macugen®) injection on retinal and retrobulbar blood flow in retinal Ischaemic diseases. 2015. *Acta Ophthalmol.*, vol. 93, pp. 399–400.

17. Hicke B. J., Marion C., Chang Y. F., Gould T., Lynott C. K., Parma D., Schmidt P. G. and Warren S. Tenascin-C Aptamers Are Generated Using Tumor Cells and Purified Protein. 2001. *J. Biol. Chem.*, vol. 276, pp. 48644–48654.
18. Wu X., Zhao Z., Bai H., Fu T., Yang C., Hu X., Liu Q., Champanhac C., Teng I. T., Ye M. et al. DNA Aptamer Selected against Pancreatic Ductal Adenocarcinoma for in vivo Imaging and Clinical Tissue Recognition. 2015. *Theranostics*, 5, pp. 985–994.
19. Hung L.-Y., Wang C.-H., Che Y.-J., Fu C.-Y., Chang H.-Y., Wang K. and Lee G.-B. Screening of aptamers specific to colorectal cancer cells and stem cells by utilizing On-chip Cell-SELEX. 2015. *Sci. Rep.*, vol. 5, p. 10326.
20. Kang D., Wang J., Zhang W., Song Y., Li X., Zou Y., Zhu M., Zhu Z., Chen F. and Yang C. J. Selection of DNA Aptamers against Glioblastoma Cells with High Affinity and Specificity. 2012. *PLoS One*, vol. 7, p. 42731.
21. Zhang K., Sefah K., Tang L., Zhao Z., Zhu G., Ye M., Sun W., Goodison S. and Tan W. A Novel Aptamer Developed for Breast Cancer Cell Internalization. 2012. *ChemMedChem*, 7, pp. 79–84.
22. Tang Z., Shangguan D., Wang K., Shi H., Sefah K., Mallikratchy P., Chen H. W., Li Y. and Tan W. Selection of Aptamers for Molecular Recognition and Characterization of Cancer Cells. 2007. *Anal. Chem.*, vol. 79, pp. 4900–4907.
23. Zhao Y., Granas D. and Stormo G. D. Inferring binding energies from selected binding sites. 2009. *PLoS Comput. Biol.*, vol. 5(12), p. 5.
24. Kahsai A. W., Wisler J. W., Lee J., Ahn S., Cahill T. J., Dennison S. M., Staus D. P., Thomsen A. R. B., Anasti K. M., Pani B. et al. Conformationally selective RNA aptamers allosterically modulate the β 2-Adrenoceptor. 2016. *Nat. Chem. Biol.*, vol. 12, pp. 709–716.
25. Alam K. K., Chang J. L. and Burke D. H. FASTAptamer: A bioinformatic toolkit for high-throughput sequence analysis of combinatorial selections. 2015. *Mol. Ther. — Nucleic Acids*, vol. 4, pp. 1–10.
26. Hoinka J., Backofen R. and Przytycka T. M. AptaSUITE: A Full-Featured Bioinformatics Framework for the Comprehensive Analysis of Aptamers from HT-SELEX Experiments. 2018. *Mol. Ther. — Nucleic Acids*, vol. 11, pp. 515–517.
27. Werner T. Next generation sequencing in functional genomics. 2010. *Brief. Bioinform.*, vol. 11, pp. 499–511.
28. Robinson M. D., McCarthy D. J. and Smyth G. K. edgeR: a {Bioconductor} package for differential expression analysis of digital gene expression data. 2010. *Bioinformatics*, vol. 26, pp. 139–140.
29. Martin M. Cutadapt removes adapter sequences from high-throughput sequencing reads. 2011. *EMBnet.journal*, vol. 17, p. 10.

Statistiskās mehānikas un kvantu ķīmisko aprēķinu pielietojums nesakārtotu cietfāžu raksturošanā

Toms RĒKIS, LU Ķīmijas fakultātes pētnieks

Projekts tapis ar SIA «Mikrotīkls» ziedojumu, ko administrē Latvijas Universitātes fonds.

Darbā ar statistiskās mehānikas un kvantu ķīmisko aprēķinu palīdzību skaidrota nesakārtotas cietfāzes rašanās racēmiska 2-(hinuklidin-3-il)-1,8-naftolimīda gadījumā. Zināms, ka, kristalizējot doto savienojumu, tā struktūrā novērojama statistiska nesakārtotība, t. i., vienīgajā simetriski neatkarīgajā molekulu pozīcijā ar noteiktu attiecību (0,90 : 0,10) sastopami divi dažādi molekulas konformēri. Šī attiecība, kristalizējot savienojumu istabas temperatūrā, ir identiska vairākos mēģinājumos, kas liecina par tās termodinamisko raksturu. No kristāliskās struktūras elementāršūnas tika veidots kanoniskais ansamblis, ietverot visas iespējamās kombinācijas, kas raksturo lokālo struktūru. Ar kvantu ķīmisko aprēķinu palīdzību tika aprēķināta kristālrežģa enerģija katrai simetriski neekivalentajai ansambļa struktūrai. Lietojot Bolcmaņa sadalījumu, no relatīvajām kristālrežģa enerģijām tika aprēķināta katras lokālās struktūras varbūtība. No tām noteiktā nesakārtoto konformēru teorētiskā attiecība izrādījās identiska eksperimentāli novērotajai. Šis piemērs demonstrē, ka tik fundamentālu parādību, kāda ir termodinamiski definēta nesakārtotība molekulārajos kristālos, ir iespējams precīzi kvantificēt, lietojot elegantu un vienkāršu statistiskās mehānikas pieeju. Ar nosacījumu, ka veikti pietiekamas precizitātes kvantu ķīmiskie aprēķini. Šis piemērs atklāj arī 2-(hinuklidin-3-il)-1,8-naftolimīda enantiomēru sistēmā novēroto cieto šķīdumu veidošanās termodinamiskos aspektus, jo parāda, ka struktūras molekulu pozīcijās iespējami abi enantiomēri, kas ir par pamatu cieto šķīdumu veidošanai no racēmiska atšķirīgos sastāvos.

Atslēgvārdi: **nesakārtotas cietvielas, kanoniskais ansamblis, cietie šķīdumi, kristālrežģa enerģija**

Ievads

Attīstoties kvantu ķīmisko aprēķinu metodēm un palielinoties to pieejamībai, arvien vairāk eksperimentāli novērotās parādības iespējams izskaidrot ar teorētiskiem aprēķiniem. Šāda eksperimentālo un teorētisko metožu mijiedarbe sekmē modernas, uz jaunākajiem sasniegumiem balstītas zinātnes attīstību. Arvien biežāk gan zinātniskajā pētniecībā, gan industrijā novērojamas tendences izmantot aprēķinus un dažādu veidu modelēšanu, lai piemēlētu un paredzētu savienojumu un materiālu īpašības, kas citkārt būtu izdarāms, tikai veicot darbu, resursu un laiktēlīgus pētījumus laboratorijā. Fizikālajā ķīmijā, cietvielu fizikā, materiālzinātnē, farmācijas, agroķīmijas, pārtikas u. c. industrijās bieži vien pētniecības objekti ir kristāliskas vielas. Ar kvantu ķīmijas metodēm iespējams paredzēt kristālisko vielu struktūras, fāžu daudzveidību, kā arī aprēķināt dažādas no struktūras izrietošās īpašības. Šajā darbā pievērsta uzmanība nesakārtotībai molekulārās cietvielās.

Nesakārtotība ir samērā bieži novērota parādība molekulārajos kristālos [1]. Statiskas, diskrētas nesakārtotības pamatā visbiežāk ir divu vai vairāku līdzīgu, gandrīz ekvienērgisku pakojumu iespējamība dotajai sistēmai [2]. Līdzīgo pakojumu savstarpējās atšķirības ietver dažādas molekulu konformācijas vai orientācijas. Šādas nesakārotas struktūras stabilizē konfiguracionālā entropija, līdz ar to nesakārtotībai ir dziļi termodinamiska izcelsme. Plašākā kontekstā nesakārtotība saistīta arī ar cieto šķīdumu parādību, jo (līdzīgi kā vienkomponenta nesakārtotu sistēmu gadījumā) kristālisko fāzi veidojošie komponenti acīmredzot var veidot dažādus gandrīz ekvienērgiskus pakojumus ar atšķirīgu komponentu attiecību. Viss iespējamo pakojumu kopums vidēji veido nesakārtotu cietā šķīduma struktūru ar attiecīgo sastāvu.

Statisku nesakārtotību iespējams kvantificēt teorētiski, izmantojot statistiskās mehānikas metodes [3; 4]. Pieņemsim, ka kādu vienkomponenta struktūru apraksta ar elementāršūnu, kurā ir ζ nesakārtotas molekulu pozīcijas, kas var būt aizņemtas ar molekulu tikai divās dažādās konformācijās vai orientācijās. Šādā gadījumā sistēmai kopumā pieejami:

$$N = 2^{\zeta} = \sum_{n=0}^{\zeta} \frac{\zeta!}{n!(\zeta-n)!} \quad (1)$$

stāvokļi (statistiskajā mehānikā diskrētu sistēmas stāvokļi parasti apzīmē ar jēdzienu «konfigurācija»); tā kā vārds «konfigurācija» attiecināms arī uz hirālas molekulas stereogeometriju, šis jēdziens statistiskās mehānikas kontekstā tiks aizstāts ar jēdzienu «lokālā struktūra»). Šo lokālo struktūru kopums var tikt uzskatīts par kanonisko ansambli, kurā darbojas Bolcmaņa sadalījums. Līdz ar to sistēmas stāvokļa i varbūtība p_i izsakāma:

$$p_i = \frac{\exp\left(\frac{-\epsilon_i}{kT}\right)}{\sum_{j=1}^N \exp\left(\frac{-\epsilon_j}{kT}\right)}, \quad (2)$$

kur ϵ_i ir stāvokļa i — enerģija (Z skaitam molekulu lokālās struktūras šūnā); k — Bolcmaņa konstante; T — termodinamiskā temperatūra.

Tā kā vienādojums (1) paredz vienkāršotu kombinatorikas pieeju un tajā netiek ņemta vērā telpiskās grupas simetrija, var gadīties, ka starp N lokālajām struktūrām ir simetriski ekvivalentas (un tādējādi ekvienērģiskas) struktūras. Tādā gadījumā saprātīgi ir izvēlēties tikai M simetriski unikālas struktūras, raksturojot simetriski ekvivalento struktūru skaitu katrā gadījumā ar deģenerāciju g_i . Vienādojums (2) tiek pārveidots:

$$p_i = g_i \frac{\exp\left(\frac{-\epsilon_i}{kT}\right)}{\sum_{j=1}^M \exp\left(\frac{-\epsilon_j}{kT}\right)} \quad (3)$$

Zinot katras lokālās struktūras varbūtību — ieguldījumu vidējā struktūrā, iespējams vienkārši izteikt abu molekulu alternatīvo konformēru vai orientāciju attiecību nesakārtoto molekulu pozīcijā. Turklāt iespējams aprēķināt arī Helmholca brīvo enerģiju, kas paver iespējas plašai termodinamiskai analīzei, piemēram, tālāk no tās izsakot konfiguracionālo entropiju utt.

Ir vērts apsvērt to, cik lielu šūnu izvēlēties kanoniskā ansambļa ģenerēšanai, t. i., vai izvēlēties vienu elementāršūnu vai kādu $n_a a \times n_b b \times n_c c$ superšūnu. Jāņem vērā, ka, izvēloties tikai divreiz lielāku šūnu, nekā ir elementāršūna, piemēram, nesakārtotas $\zeta = 4$ struktūras gadījumā kopējais skaits lokālo struktūru pieaug no $N = 16$ līdz $N = 256$. Tas ļoti sadārdzina kvantu ķīmisko aprēķinu izmaksas.

Aprakstītais statistiskās mehānikas ietvars derīgs vienkomponta sistēmām, savukārt divkomponentu sistēmām (kāda pētīta arī šajā pētījumā) piemērojams lielais kanoniskais ansamblis, kurā iekļaujami arī komponentu ķīmiskie potenciāli μ un kur normalizēšanai izmanto Landau potenciālu, nevis Helmholca brīvo enerģiju. Tomēr, ņemot vērā, ka šajā gadījumā pētīta īpaša divkomponentu (enantiomēru) sistēma, kuras komponentu ķīmiskie potenciāli ir identiski, iepriekš aprakstītais statistiskās mehānikas ietvars ir korekts.

Eksperimentālā daļa

Kanoniskā ansambļa ģenerēšana. Pētītā savienojuma struktūra ar molekulu atomu pozīcijām elementāršūnā tika

ņemta no iepriekš publicēta pētījuma [5]. Kanoniskā ansambļa lokālās struktūras tika ģenerētas no vienas elementāršūnas ($Z = \zeta = 4$) ar pašrakstītu programmu programmēšanas valodā FORTRAN, kas ar rekursīvu algoritmu paredz iterācijas cauri visām kombinācijām, katrā $i = [0, \zeta]$ ciklā izvēloties katras i molekulas, kurām nesakārtotā molekulas fragmenta pamata atomu koordinātu vietā izvades failā rakstīt alternatīvās atomu koordinātas.

Tādējādi tika ģenerēti 16 izvades faili ar atomu pozīcijām elementāršūnā visiem iespējamajiem nesakārtotās struktūras lokālajiem modeļiem. Tālāk no šīs kopas tika izslēgti visi simetriski ekvivalentie lokālie modeļi, atstājot vienu unikālo struktūru katrā gadījumā un nosakot šā stāvokļa deģenerāciju g .

Atomu pozīciju optimizācija. Visām ģenerētajām simetriski unikālajām struktūrām tika veikta atomu pozīciju optimizācija programmā *Quantum Espresso* [6], izmantojot oriģinālo (*ultrasoft*) pseidopotenciālu bibliotēku, PBE funkcionāli un pielietojot Grimma D2 dispersijas korekcijas metodi. Konverģences kritēriji un k -punktu režģis tika izvēlēti, ņemot vērā ieteikumus molekulāru kristālisku struktūru optimizācijai [7].

Kristālrežģa enerģijas aprēķini. Starpmolekulāro mijiedarbību enerģija katrai simetriski neatkarīgai molekulai elementāršūnā ar katru no apkārtējām molekulām noteikta sfēras rādiusa ietvaros tika aprēķināta ar programmu *Crystal Explorer* [8], izvēloties funkcionāli B3LYP un bāzes komplektu 6-31G(d, p). Aprēķinātajām elektrostatiskā potenciāla, polarizācijas, dispersijas un atgrūšanās starpmolekulāro mijiedarbību enerģiju komponentēm izmantotas programmā dotās normalizācijas konstantes, lai iegūtu patiesu to summu, kas atspoguļo kopējo mijiedarbības enerģiju katrā molekulu pāri.

Ņemot vērā, ka starp kanoniskā ansambļa lokālajām struktūrām ir arī struktūras, kas aprakstāmas ar polārām telpiskajām grupām, kristālrežģa enerģijas nepieciešams koriģēt ar elementāršūnas dipolmomenta ieguldījumu kopējā enerģijā [9]. Elementāršūnu dipolmomenti tika aprēķināti programmā *Gaussian09* [10] ar identisku funkcionāli un bāzes komplektu (B3LYP/6-31G(d, p)). Kristālrežģa enerģijas korekcija tika aprēķināta šādi:

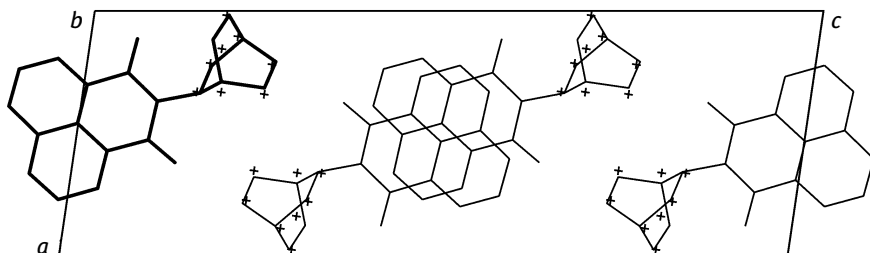
$$E_{kor} = -2\pi \frac{\mu^2}{3} ZV \quad [7].$$

Tika secināts, ka šajā gadījumā korekcijas vērtības nepārsniedz $-0,05 \text{ kJ mol}^{-1}$, kas ir aptuveni 10 reizes mazāka nekā panāktā konverģence nekoriģētas kristālrežģa enerģijas aprēķinam, tāpēc šīs korekcijas netika lietotas. Niecīgais šūnas dipolmomenta ieguldījums liecina: lai arī atsevišķas struktūras formāli ir polāras, tās ir ļoti pseidocentrosimetriskas, līdz ar to elementāršūnu dipolmomenti ir nebūtiski.

Rezultāti un diskusija

Nesakārtotības daba pētītajā naftalimīda atvasinājumā. Savienojums **1** (2-(hinuklidīn-3-il)-1,8-naftolimīds) ir hirāls, tā

racēmiskais maisījums kristalizējas monoklīnās singonijas $P2_1/c$ telpiskajā grupā ar vienu molekulu asimetriskajā vienībā, $Z' = 1$ (1. att.).



1. ATTĒLS. Savienojuma *rac-1* kristāliskās struktūras attēlojums gar kristalogrāfisko *b* asi (asimetriskā vienība izcelta; ar + atzīmētas molekulas fragmenta atomu alternatīvās pozīcijas).

Nesen publicētajā savienojuma struktūrā novēro statistisku nesakārtotību [5] — asimetriskā vienība ir abu enantiomēru R un S superpozīcija ar attiecību 0,90 : 0,10 (t. i., 10% gadījumu molekulas hinuklidīna fragmenta atomi raksturojami ar to alternatīvajām pozīcijām). Struktūras centrosimetriskums joprojām nodrošina racēmisko sastāvu. Sakārtotā struktūrā jebkurās divās molekulu pozīcijās, starp kurām pastāv otrās kārtas simetrijas elements, būtu viens R un viens S enantiomērs. Šajā struktūrā 10% no R molekulu pozīcijām aizņēmušas S molekulas, un otrādi. Iemesls tam varētu būt gan kinētiska, gan termodinamiska rakstura. Otrajā gadījumā tas nozīmē, ka enerģētiski tuvas ir sistēmas lokālās struktūras, kurās ar statistiski novērotajiem otrās kārtas simetrijas elementiem saistītās molekulu pozīcijās ir arī vienas un tās pašas konfigurācijas molekulas.

Struktūrā līdz ar enantiomēru nekonekvento izvietojumu novērojama arī korelējoša molekulu konformācijas alterācija. Abi enantiomēri ieņem vienu no divām konformācijām (I vai II), un katrā molekulu pozīcijā attiecība 0,90 : 0,10 attiecināma ne tikai uz molekulu konfigurāciju, bet arī uz konformāciju. Pretēji konfigurācijai, kura mainās uz pretējo, realizējot otrās kārtas simetrijas operācijas, konformācija, saprotams, mainīta netiek. Līdz ar to kristāliskajā struktūrā 90% molekulu ieņem konformāciju I, 10% — konformāciju II.

Lai arī sākotnēji savienojuma struktūra publicēta bez nesakārtotības [11], pārbaudot publikācijas autoru sniegtos monokristāla rentgendifrakcijas datus, noteikts, ka arī pētījumā, kurā šī struktūra aprakstīta pirmo reizi, lietotais monokristāls raksturojams ar nesen publicēto kristāliskās struktūras modeli, turklāt ar identisku (0,90:0,10) konformēru I : II attiecību. Tieši identiskā attiecība liecina par iespējamu nesakārtotības termodinamisko raksturu un konfiguracionālās entropijas lomu šādas nesakārtotas struktūras stabilizēšanā.

1. TABULA. Savienojuma *rac-1* kanoniskā ansambļa lokālās struktūras

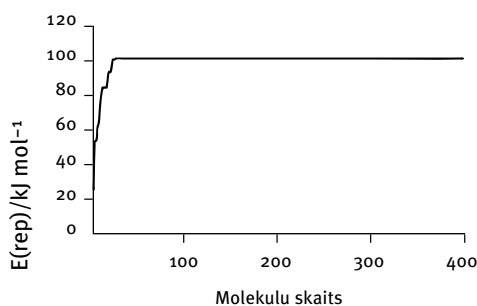
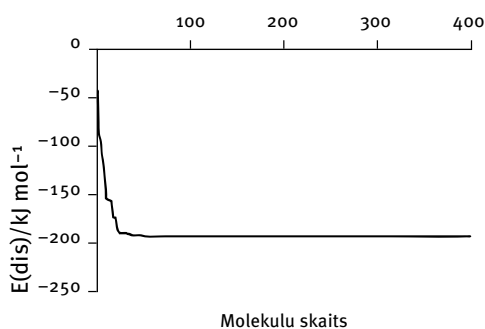
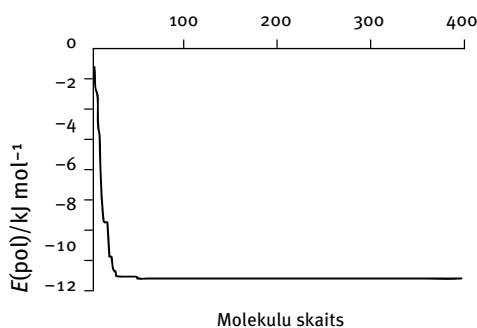
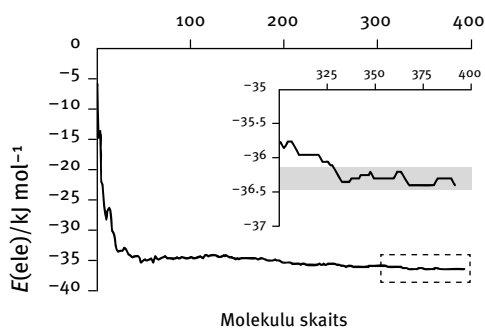
Struktūras nr.	Deģenerācija, <i>g</i>	Telpiskā grupa	<i>Z'</i>	Konformēru I : II attiecība
#0	1	$P_{2_1/c}$	1	1 : 0
#1	4	P_1	4	0,75 : 0,25
#5	2	P_{2_1}	2	0,50 : 0,50
#6	2	P_{-1}	2	0,50 : 0,50
#7	2	P_c	2	0,50 : 0,50
#11	4	P_1	4	0,25 : 0,75
#15	1	$P_{2_1/c}$	1	0 : 1

Kanoniskais ansamblis. Naftalimīda atvasinājuma lokālo struktūru kanoniskais ansamblis tika veidots, izvēloties vienu elementāršūnu ($Z = \zeta = 4$ molekulas). No 16 iespējamajām struktūrām 7 tika identificētas kā unikālas, t. i., simetriski neekvivalentas. Katrai no šīm struktūrām tika noteikta deģenerācija, *g*, un tikai unikālajām struktūrām tika veikta atomu pozīciju relaksācija elementāršūnā ar fiksētiem režģa parametriem — tādiem, kādi tie noteikti pētītajā naftalimīda atvasinājuma struktūrā istabas temperatūrā [5]. 1. tabulā uzskaitītas visas 7 unikālās struktūras.

Noskaidrojot lokālo struktūru enerģijas, iespējams aprēķināt katra modeļa ieguldījumu vidējā struktūrā, no kā tālāk izsakāma teorētiskā konformēru I : II attiecība.

Kristālrežģa enerģijas. Visām 7 unikālajām lokālajām struktūrām pēc atomu pozīciju relaksācijas tika aprēķināta kristālrežģa enerģija. Tas tika veikts, izmantojot summēšanas modeli [9], kas paredz katrai asimetriskās vienības molekulai aprēķināt mijiedarbības enerģiju ar visām apkārtējām molekulām izvēlēta rādiusa sfēras tilpumā. Par kristālrežģa enerģiju uzdod pusi no mijiedarbību enerģijas summas un vidējo vērtību no šiem lielumiem, ja asimetriskajā vienībā ir vairāk nekā viena molekula. Jāņem vērā: lai arī pētītā ir $Z' = 1$ struktūra, starp ģenerētajām lokālajām struktūrām ir attiecīgi arī $Z' = 2$ un $Z' = 4$ struktūras (1. tabula).

Starpmolekulārā mijiedarbību enerģija tiek uzdota kā elektrostatiskā potenciāla, polarizācijas, dispersijas un atgrūšanās enerģiju summa [9]. Katra no šīm kontribūcijām atkarībā no molekulu ģeometrisko centru savstarpējā attāluma konverģē atšķirīgi. 2. attēlā redzama kristālrežģa enerģijas komponentu konverģence atkarībā no summēto molekulu skaita, kas sakārtotas pieaugošā savstarpējo centroīdu attālumā. Par piemēru izraudzīta $Z' = 1$ struktūra #0, un aprēķinos izmantota molekulu sfēra ar rādiusu 25 Å.



2. ATTĒLS. Kristālrežģa enerģijas (nenormētu) komponentu konverģence ($E(\text{ele})$ – elektrostatiskā potenciāla enerģija; $E(\text{pol})$ – polarizācijas enerģija; $E(\text{dis})$ – dispersijas enerģija; $E(\text{rep})$ – atgrūšanās enerģija).

Redzams, ka visas kopējās mijiedarbību enerģijas komponentes, izņemot elektrostatiskā potenciāla enerģiju, konverģē ļoti strauji. Kristālrežģa enerģija, izmantojot aprēķinus vairāk nekā aptuveni 50 tuvākās molekulas (līdz $\sim 16,5$ Å rādiusā), ir tikai un vienīgi atkarīga no $E(\text{ele})$ komponentes. Izvēloties visas tuvākās molekulas 25 Å sfēras rādiusā no centrālās molekulas ģeometriskā centra (gandrīz 400 molekulu pāri), var secināt, ka kristālrežģa enerģijas konverģence ir $< 0,5$ kJ mol⁻¹, ko var uzskatīt par pietiekamu.

Ņemot vērā aprēķinu ārkārtīgi lielo datorresursietilpību, kanoniskā ansambļa lokālo struktūru kristālrežģa enerģijas aprēķināšanai sākotnēji izvēlēts 11 Å molekulu sfēras rādiuss, kas būtiski samazina molekulu pāru skaitu (no ~ 400 līdz ~ 120). Kristālrežģa absolūtās un relatīvās enerģijas, kā arī no tām aprēķināto lokālo struktūru varbūtības un katra konformēra ieguldījums vidējā struktūrā apkopots 2. tabulā.

Atkarībā no relatīvās kristālrežģa enerģijas katrai lokālajai struktūrai aprēķinātā varbūtība norāda šā modeļa ieguldījumu vidējā struktūrā. Aprēķinos izmantotajā temperatūrā, 25 °C (savienojuma *rac-1* kristalizācijas temperatūra), lokālās struktūras varbūtība ir tuva 0, ja tās kristālrežģa

2. TABULA. Savienojuma *rac-1* kanoniskā ansambļa kristālrežģa absolūtās un relatīvās enerģijas (11 Å molekulu sfēra) un no tām izrietošie varbūtību lielumi

Struktūras Nr.	Deģenerācija, <i>g</i>	Kristālrežģa enerģija, $E/k\text{ mol}^{-1}$	Relatīvā kristālrežģa enerģija, $E_r/k\text{ mol}^{-1}$	Varbūtība, <i>p</i>	Konformēru I : II attiecība	Konformēra I varbūtība
#0	1	-151,0	0,0	0,91	1 : 0	0,91
#1	4	-147,4	3,6	0,01	0,75 : 0,25	0,01
#5	2	-149,0	2,0	0,08	0,50 : 0,50	0,04
#6	2	-144,1	6,9	0,00	0,50 : 0,50	0,00
#7	2	-144,4	6,7	0,00	0,50 : 0,50	0,00
#11	4	-145,7	5,3	0,00	0,25 : 0,75	0,00
#15	1	-146,9	4,1	0,00	0 : 1	0,00

3. TABULA. Savienojuma *rac-1* kanoniskā ansambļa kristālrežģa absolūtās un relatīvās enerģijas (25 Å molekulu sfēra) un no tām izrietošie varbūtību lielumi

Struktūras nr.	Deģenerācija, <i>g</i>	Kristālrežģa enerģija, $E/k\text{ mol}^{-1}$	Relatīvā kristālrežģa enerģija, $E_r/k\text{ mol}^{-1}$	Varbūtība, <i>p</i>	Konformēru I : II attiecība	Konformēra I varbūtība
#0	1	-154,5	0,0	0,79	1 : 0	0,79
#1	4	-151,2	3,3	0,01	0,75 : 0,25	0,01
#5	2	-153,2	1,3	0,20	0,50 : 0,50	0,10

enerģija atšķiras no visvarbūtīgākās struktūras par aptuveni 4 kJ mol^{-1} , kas nozīmē, ka šādos pētījumos kvantu ķīmiskos aprēķinus svarīgi veikt ar iespējami augstāku teorijas līmeni un atbilstošiem konverģences kritērijiem, lai spētu pareizi novērtēt salīdzinoši mazas enerģiju atšķirības. No katra lokālā modeļa varbūtības un atbilstošās konformēru attiecības modelī var aprēķināt abu konformēru ieguldījumu vidējā struktūrā. Summējot to, iegūst, ka teorētiskā konformēru I un II attiecība ir $0,96 : 0,04$, kas nedaudz atšķiras no eksperimentāli novērotās.

Ņemot vērā, ka teorētiski aprēķinātā konformēru attiecība ir sensitīva uz mazām enerģiju atšķirībām, tika veikti papildaprēķini ar nolūku uzlabot kristālrežģa enerģijas konverģenci, izvēloties 25 \AA molekulu sfēras. Tas gan tika veikts tikai struktūrām #0, #1 un #5, jo atbilstoši 2. tabulas datiem tieši šīs struktūras atrastas kā varbūtīgas lokālās struktūras, savukārt atlikušo struktūras modeļu relatīvās enerģijas ir pārāk lielas, lai arī pēc pilnīgākas konverģences tās dotu būtisku ieguldījumu vidējā struktūrā. Dati apkopoti 3. tabulā.

No 3. tabulas redzams, ka, izmantojot augstākus konverģences kritērijus, aprēķinātā konformēru I : II attiecība ir $0,90 : 0,10$, kas atbilst eksperimentāli novērotajai.

Secinājumi

Pētījums parāda, ka ar statistiskās mehānikas un kvantu ķīmisko aprēķinu palīdzību iespējams izskaidrot eksperimentāli novēroto nesakārtotību hinuklidīna atvasinājuma, 2-(hinuklidīn-3-il)-1,8-naftolimīda, racēmiska sastāva struktūrā. Ļoti tuvās kristālrežģa enerģijas atsevišķām lokālajām struktūrām parāda, ka dažādie pakojumi ir enerģētiski izdevīgi, kas pierāda, ka savienojuma kristalizācija sakārtotā struktūrā pēc viena konkrēta lokālās struktūras modeļa nav vēlama. Izraugoties stingrākus konverģences kritērijus, iespējams arī kvantificēt nesakārtoto komponentu attiecību, kas sakrīt ar eksperimentāli novēroto. Līdz ar to var secināt, ka nesakārtotība pētītajā savienojuma struktūrā ir termodinamiska. Plašākā kontekstā pētījums pamato arī novēroto cieto šķīdumu veidošanos šajā enantiomēru sistēmā.

Aprēķini norāda, ka atsevišķas lokālās struktūras (#0, #1 un #5) ir varbūtīgas, kamēr dažu lokālo struktūru varbūtība ir praktiski 0. Turklāt, aplūkojot divus visvarbūtīgākos modeļus, var redzēt, ka struktūras modelī #5 ir tikai viens enantiomērs, kamēr struktūrā #0 abi enantiomēri vienādā skaitā veido centrosimetrisku struktūru. Tas liek secināt, ka pētītā savienojuma struktūrā ir atsevišķi enantiotīri (#5) un racēmiski (#0) domēni. Lai gan klasiski monokristālu rentgendifrakcija sniedz ieskatu tikai vidējā struktūrā, pētījumu būtu iespējams attīstīt, analizējot kvalitatīvu difrakcijas datu difūzo izkliedi, kas ļautu izdarīt secinājumus par lokālo struktūru pētītajā savienojumā arī no eksperimentāliem datiem.

Izmantotā literatūra

1. Allen F. H. The Cambridge Structural Database: a quarter of a million crystal structures and rising. 2002. *Acta Cryst. B*, vol. 58, pp. 380–388.
2. Price S. L. Predicting crystal structures of organic compounds. 2014. *Chem. Soc. Rev.* vol. 43, pp. 2098–2111.
3. Schmidt M. U., Glinnemann J. Explanation for the stacking disorder in tris(bicyclo[2.1.1]hexeno)benzene using lattice-energy minimisations. 2012. *Z. Kristallogr.*, vol. 227, pp. 805–817.
4. Habgood M., Grau-Crespo R., Price S. L. Substitutional and orientational disorder in organic crystals: a symmetry-adapted ensemble model. 2011. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 13, pp. 9590–9600.
5. Rekis T., d'Agostino S., Braga D., Grepioni F. Designing solid solutions of enantiomers: lack of enantioselectivity of chiral naphthalimide derivatives in the solid state. 2017. *Crys. Growth Des.*, vol. 17, pp. 6477–6485.
6. Giannozzi P. et al. Quantum Espresso: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials. 2009. *J. Phys.: Condens. Matter*, vol. 21, p. 395502.
7. Lund A. M., Orendt A. M., Pagola G. I., Ferraro M. B., Facelli J. C. Optimization of Crystal Structures of Archetypical Pharmaceutical Compounds: A Plane-Wave DFT-D Study Using Quantum Espresso. 2013. *Cryst. Growth Des.*, vol. 13, pp. 2181–2189.
8. Turner M. J. et al. CrystalExplorer17. 2017. University of Western Australia.
9. Thomas S. P., Spackman P. R., Jayatilaka D., Spackman M. A. Accurate lattice energies for molecular crystals from experimental crystal structures. 2018. *J. Chem. Theory Comput.*, vol. 14, pp. 1614–1623.
10. Frisch M. J. et al. Gaussian Inc 09, Revision D.01; Gaussian Inc.: Wallingford, CT, 2009.
11. d'Agostino S., Braga D., Grepioni F., Taddei P. Intriguing Case of Pseudo-Isomorphism between Chiral and Racemic Crystals of racand (S)/(R)2-(1,8-Naphthalimido)-2-quinuclidin-3-yl, and Their Reactivity Toward I₂ and IBr. 2014. *Cryst. Growth Des.*, vol. 14, pp. 821–829.

Laika intervālu mērītāja RTS 2006 modernizācija

KALVIS SALMIŅŠ, LU Astronomijas
institūta pētnieks

Projekts tapis ar SIA «Mikrotīkls» ziedojumu,
ko administrē Latvijas Universitātes fonds.

Zemes mākslīgo pavadoņu jeb satelītu lāzerlokācija ir metode, ar kuras palīdzību tiek noteikts attālums līdz satelītam, izmērot laika intervālu, kurā ļoti īss lāzera impulss ceļo no speciāli konstruēta teleskopa līdz satelītam un atpakaļ. Zinot gaismas ātrumu un laiku, kurā lāzera impulss ceļo turp un atpakaļ, var noteikt attālumu līdz satelītam ar ļoti augstu precizitāti, kas var sasniegt 1 cm vai pat mazāk. Tiek augstas precizitātes mērījumi ļauj noteikt koordinātes uz Zemes virsmas vienotā koordinātu sistēmā un kvantitatīvi novērtēt globālās izmaiņas uz Zemes, precizēt satelītu orbītas un veikt fundamentālās fizikas teoriju pārbaudi. Augsto mērījumu precizitāti nodrošina ļoti precīzi laika intervālu mērītāji, kurus lāzerlokācijas vajadzībām ražo arī Latvijā. Projekta ievaros tika uzlabota 2006. gadā speciāli LU Astronomijas institūta vajadzībām izstrādātā mērītāja RTS 2006 precizitāte, sasniedzot pat divas reizes labākus rezultātus.

Atslēgvārdi: **SLR, lāzerlokācija, kosmiskā ģeodēzija, laika intervālu mērīšana, globālās izmaiņas, vispārīgā relativitātes teorija**

Satelītu lāzerlokācija (angliski *Satellite Laser Ranging* jeb SLR) ir viena no trijām kosmiskās ģeodēzijas galvenajām metodēm. Tā tiek izmantota, lai noteiktu koordinātas uz Zemes virsmas, satelītu orbītu precizēšanai, fundamentālās fizikas teoriju pārbaudē, kā arī kosmiskās telpas pārraudzībā. Attālumu mērījumi tiek veikti ar ļoti augstu precizitāti, izmantojot laika intervālu mērītājus. Viena mērījuma kļūda ir ap 1 cm robežās, bet, grupējot mērījumus un apstrādājot tos īsās sērijās, var sasniegt pat 1 mm precizitāti. Koordinātu uz zemes noteikšana un satelītu orbītu precizēšana ar tik augstu precizitāti ļauj nomērīt un noteikt izmaiņas laikā uz Zemes notiekošiem procesiem, no kuriem plašāk ir zināmi tektonisko plašu dreifs un okeānu līmeņu izmaiņas.

Hipotēzi par kontinentu kustību pirmo reizi formulēja vācu meteorologs un polārpētnieks Alfrēds Vēgeners 1912. gadā, bet atzīta tā tika tikai pēc Otrā pasaules kara. Vieni no pirmajiem tektonisko plašu ātrumu mērījumiem notika Rietumkalifornijā, ASV, 1973. gadā, kad izdevās nomērīt tektonisko plašu kustību Sanandreaa ģeoloģiskā lūzuma (*fault line*) rajonā, izmantojot lāzerlokāciju un nodemonstrējot tās potenciālu. 1976. gadā kosmosā tika palaists pirmais tikai lāzerlokācijai paredzētais satelīts — *Lageos* (*Laser Geodynamics Satellite*). Viens no tā uzdevumiem bija noteikt tektonisko plašu kustību ar SLR palīdzību.

Mūsdienās tektonisko plašu dreifu ātrumu un virzienu var nomērīt ar 1 mm gadā lielu precizitāti. Piemēram, Latvija atrodas uz Eirāzijas tektoniskās plates, kas pārvietojas ziemeļaustrumu virzienā ar ātrumu apmēram 2,4 cm/gadā. Plašu tektonika mūsdienās ir aktīvs pētījumu virziens. Viens no iemesliem ir tas, ka tektonisko plašu saskarsmes vietas parasti ir arī seismiski aktīvas. Lāzerlokācijas augstā orbītu noteikšanas precizitāte kalpo arī okeāna līmeņa un ledāju mērījumiem paredzētiem satelītu *Jason-2*, *Jason-3* un *Cryosat-2* radaru kalibrēšanai. Lai varētu korekti interpretēt radaru mērījumus no šiem pavadoņiem, ir nepieciešams zināt to orbītas ar augstu precizitāti, kuru precizitātes kontroli nodrošina regulāri lāzerlokācijas mērījumi. Iepriekšminētie pavadoņi ir mērījumu prioritāšu augšgalā. Vēl viens lāzerlokācijas pielietojums ir fundamentālā fizika. Augstā mērījumu precizitāte ļauj nomērīt atšķirības satelītu kustībā no klasiskās Ņūtona teorijas. Viens no Einšteina vispārīgās relativitātes teorijas paredzējumiem, tā sauktais Lense-Tīringa efekts (*Lense-Thirring effect*), 2004. gadā tika pārbaudīts ar 10% precizitāti, izmantojot satelītus *Lageos* un *Lageos-2*. Turpmākiem eksperimentiem ar vēl augstāku precizitāti 2012. gadā tika palaists pavadonis LARES (*LAser RELativity Satellite*). LARES kodols ir izgatavots no tangstīna sakausējuma, tāpēc šis satelīts ir visblīvākais līdz šim zināmais objekts Saules sistēmā. Tā masa ir 386,8 kg, rādiuss 182 mm, blīvums — 15,3g/cm³.

Vēl viens fundamentālās fizikas eksperiments GREAT (*Galileo gravitational Redshift Experiment with eccentric sATellites*) tika veikts 2017./2018. gadā. Veselu gadu tika mērīti divi Galileo globālās navigācijas



1. ATTĒLS. Pavadoņi LARES. Itālijas Kosmiskās aģentūras attēls.

sistēmas satelīti *Galileo-201* un *Galileo-202*, kuri nesēja raķetes kļūmes dēļ nonāca nepareizās orbītās ar lielāku ekscentricitāti, nekā sākotnēji bija plānots. Tāpēc šo pavadoņu attālums līdz Zemei periodiski mainās robežās no 17 000 līdz 26 000 kilometru. Šie pavadoņi ir apgādāti ar ļoti precīzu atompulkstēni — ūdeņraža māzeru. Abi šie faktori kopā deva iespēju veikt šo eksperimentu, jo saskaņā ar vispārīgās relativitātes teoriju pulksteņu gaitai ir jāmainās vienlaikus ar attāluma maiņu līdz Zemei. Pulksteņu gaitas izmaiņas gravitācijas laukā sauc par gravitācijas sarkano nobīdi. GREAT eksperimentā piedalījās arī starptautiskā lāzerlokācijas tīkla ILRS stacijas, nodrošinot precīzu orbītu noteikšanu. 2018. gadā nogalē iegūtie rezultāti tika publicēti *Physical Review Letters* [1]. Einšteina relativitātes teorijas postulāts tika apstiprināts un pārbaudīts ar 5,4 lielāku precizitāti nekā iepriekšējais 1976. gadā veiktais eksperiments ar speciālu satelītu *Gravity Probe A*. GREAT eksperimentā piedalījās arī Latvijas Universitātes Astronomijas institūta observatorija kā ILRS dalībniece, un tās iegūtie mērījumi arī tika izmantoti šajā eksperimentā.

Latvijas Universitātes Astronomijas institūta observatorija atrodas LU Botāniskā dārza teritorijā un ar satelītu problemātiku strādā jau kopš pirmā mākslīgā Zemes pavadoņa palaišanas 1957. gada 4. februārī. Lāzerlokācijas teleskops LS-105, kura konstruēšanā arī piedalījās LU Astronomijas institūta speciālisti, regulāru darbu sāka 1987. gada septembrī. 1991. gada rudenī notika kolokācija ar Vācijas mobilo lāzerlokācijas sistēmu MTLRS, un LU observatorijas SLR sistēma veiksmīgi iekļāvās starptautiskajā apritē. 1991. gadā tā kļuva par Eiropas lāzerlokācijas staciju EUROLAS dalībniecei un tūlīt pēc Starptautiskās lāzerlokācijas dienesta (*International Laser Ranging Service*, ILRS) nodibināšanās — arī par tās dalībniecei. Mūsdienās

ILRS apvieno vairāk nekā četrdesmit lāzerlokācijas sistēmas no sešpadsmit pasaules valstīm.

Viens no LU Astronomijas institūta darbības virzieniem ir jaunu ar SLR saistītu tehnoloģiju izstrāde. LU Astronomijas institūta sadarbojas ar Elektronikas un datorzinātņu institūtu ļoti precīzu laika intervālu mērītāju izstrādē un testēšanā, kurus izmanto lāzerlokācijā. Lai iegūtu attāluma mērījumu precizitāti 1 cm, laika intervāla mērījuma kļūda nedrīkst pārsniegt 10 ps (1 ps = 10⁻¹² sekundes). Mūsdienās Latvijā ražotie laika intervālu mērītāji ir vieni no visplašāk izmantotajiem ILRS tīklā. Tos izmanto arī citās zinātnes un tehniskajās nozarēs, kurās ir vajadzīga laika intervālu mērīšana ar ļoti augstu precizitāti, piemēram, absolūtajos gravimetros, kodolfizikā un lāzeraltimetros. Pirmie jaunās paaudzes laika intervālu mērītāji vispirms tika izmēģināti LU Astronomijas institūta observatorijā. Paralēli notika arī darbs pie visas sistēmas precizitātes paaugstināšanas, jo, pat ja izdodas laika intervālu nomērīt ar vajadzīgo precizitāti, tas vēl negarantē labu rezultātu.

Ir arī vēl citi faktori, kas ietekmē sistēmas kopējo precizitāti. Viens no tādiem faktoriem ir tas, ka no satelīta uztvertā signāla intensitāte jeb amplitūda var mainīties ļoti plašā diapazonā un tās izmaiņu ietekme, pārreķinot attāluma mērvienībās, ir mērāma vairākos desmitos centimetru. Šis efekts ar angļu nosaukumu *time-walk* ir labi zināms, un tā kompensēšanai tiek izmantotas vairākas metodes. Viens no risinājumiem ir izmantot speciālu signālu apstrādes ierīci jeb konstantās daļas diskriminatoru (CFD). Metodes trūkums ir tas, ka CFD realizētā kompensācija labi strādā tikai salīdzinoši nelielā signāla amplitūdu diapazonā. Papildus apgrūtinājums ir arī CFD noregulēšana, kas, lai sasniegtu maksimāli iespējamo precizitāti, ir netriviāls uzdevums. 2006. gadā Elektronikas un datorzinātņu institūts sadarbībā ar LU Astronomijas institūtu izstrādāja laika intervālu mērītāju RTS 2006 [2], kas papildus laika intervālu mērīšanas funkcijai realizēja arī hibrīdu *time-walk* kompensācijas shēmu, kura paplašināja CFD darbības diapazonu, izmantojot paralēlu signāla amplitūdas mērīšanas ierīci, kalibrēšanas procedūru un signālu apstrādes programmatūru. Vēl viena iekārtas specifiska īpašība bija iespēja nomērīt signāla amplitūdu nosacītās laika vienībās, izmantojot RTS 2006 laika intervāla mērītāju.

2017. un 2018. gadā ar SIA «Mikrotīkls» finansiālu atbalstu tika realizēts LU fonda pārvaldīts projekts RTS 2006 modernizācijai. Galvenais mērķis bija izstrādāt jaunu, uzlabotu signālu apstrādes shēmu, izmantojot nesen tirgū parādījušās jaunas elektroniskās komponentes, ar mērķi paaugstināt mērījumu precizitāti un panākt, lai tā darbotos arī ar jaunākajiem laika intervālu mērītāju modeļiem. Projektā izstrādātā ierīce TS/ATIC (*Time Selector/Amplitude Time Interval Converter*) ne tikai panāca būtisku mērījumu precizitātes paaugstinājumu, kas var sasniegt pat 30% un vairāk, salīdzinot ar RTS 2006, bet arī dod iespēju atteikties no hibrīdās shēmas ar CFD, tādējādi realizējot pilnībā digitālu risinājumu un vienkāršojot mērīšanas



2. ATTĒLS. TS/ATIC iekārta.

aparāturu. Mērīšanas sistēmas vienkāršošana ļauj samazināt arī kopējo mērījumu kļūdu, jo katra elektronikas komponente vai ierīce mērījumu shēmā ir arī papildu kļūdu avots.

Līdzīgi kā iepriekšējam variantam, kas bija iebūvēts RTS 2006, jaunizveidotā iekārta ir jākalibrē, lai *time-walk* kompensācijas programmatūra strādātu pareizi. Laboratorijas testi ar signālgeneratoru un emulētiem fotonu detektora signāliem rāda, ka izstrādātais risinājums ļauj kompensēt lāzerlokācijas signāla *time-walk* efektu ar kļūdu $3\sigma = \pm 8$ ps, kas ir vairāk nekā divas reizes mazāka par vislabāko pašlaik tirgū pieejamo CFD kompensācijas kļūdu. To apstiprina arī kalibrēšanas testi ar SLR sistēmu reālos darba apstākļos LU Astronomijas institūta observatorijā, kas rāda, ka precizitāte var pieaugt pat divas reizes, salīdzinot ar iepriekšējo RTS 2006 versiju. Darbā gaitā radītie kalibrēšanas uzlabojumi jau tagad ir ieviesti LU Astronomijas institūta lāzerlokācijas sistēmas darbā. Tuvākajā nākotnē ir paredzēts modernizēt RTS 2006 programmatūru un izstrādāt jaunu kalibrēšanas shēmu.

Izmantotā literatūra

1. Delva P. et al. Gravitational Redshift Test Using Eccentric Galileo Satellites. 2018. *Physical Review Letters*, vol. 121(23); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.231101>.
2. Artyukh Yu. et al. Event Timing System for Riga SLR Station. 2006. In: *Proceedings of the 15th International Workshop on Laser Ranging*, Canberra, Australia, October, pp. 16–20. Available: http://edi.lv/media/uploads/UserFiles/event_timing/Publication/EventTimingSystem4Riga.pdf.

Magnētiskās hidrodinamikas attīstība, rotējošu pastāvīgo magnētu ierosinātas plūsmas industrijā un pētniecībā

DIDZIS BERENIS, LU Fizikas institūta
Magnētiskās hidrodinamikas tehnoloģiju
laboratorijas zinātniskais asistents

LU fonda 2018./2019. akadēmiskā gada
SIA «Mikrotikls» stipendiāts

Raksta autors 2018. gada rudenī ir sācis doktora darba pētījumu magnētiskās hidrodinamikas (MHD) fizikas nozarē. Magnētiskajai hidrodinamikai ir liela nozīme metalurģijā un iekārtu dzesēšanā ar šķidrajiem metāliem, kur magnētiskie spēki ierosina šķidra metāla plūsmu. Doktorā darbā tiks izpētīta rotējošu pastāvīgo magnētu maisītāju ierosinātā šķidra metāla plūsma 20 tonnu alumīnija krāsnīs. Tiks veikti aprēķini un rastas atbildes uz saistītiem MHD uzdevumiem, arī šķidru metālu pastāvīgo magnētu sūkņiem un sasilšanas aprēķiniem. Pirmais pētījuma rezultāts ir cilindra formas pastāvīgo magnētu sūkņu un maisītāju teorijas apraksts darbaspējas un sasilšanas aprēķiniem. Rakstā tiek apskatīta MHD vēsture un attīstība pasaulē un Latvijā – Latvijas Universitātes Fizikas institūtā. Pievērsta uzmanība nozīmīgiem 20. gadsimta pētījumiem šķidra metāla sūkņu attīstībā un plūsmu modelēšanā, kā arī lielākajiem MHD sasniegumiem LU Fizikas institūtā, arī rotējošu pastāvīgo magnētu sūkņu ražošanas aizsākumiem un LU Fizikas institūta MHD Tehnoloģiju laboratorijā izstrādātajiem industriālajiem rotējošo pastāvīgo magnētu maisītājiem.

Atslēgvārdi: **MHD, magnetohidrodinamika, pastāvīgo magnētu sūkņi, pastāvīgo magnētu maisītāji, turbulence**

levads

Fizikas nozare magnētiskā hidrodinamika jeb magnetohidrodinamika (MHD) pēta plūsmas, kuras rodas elektrovadošos šķidrums (parasti šķidrums metālos) elektromagnētisko spēku ietekmē. MHD uzdevumu risināšana prasa vienlaikus veikt šķidrums plūsmu jeb hidrodinamikas aprēķinus un elektromagnētisko lauku aprēķinus. Industrijā MHD sastopama, pārkausējot metālus metalurģijā, metālu ražošanā pārsūknējot šķidrums metālus. Šķidro metālu pārsūknēšanu izmanto arī dzesēšanas nolūkos, īpaši pētnieciskajos kodolsintēzes reaktoros, jo šķidrā metāla dzesētāji ir efektīvāki un darbojas augstākā temperatūrā nekā ūdens dzesētāji.

Darba autors kopš 2018. gada rudens LU Fizikas institūta MHD Tehnoloģiju laboratorijā izstrādā doktora darbu ar mērķi atrast rotējošu pastāvīgo magnētu maisītāju optimālos darba parametrus šķidru metālu maisīšanai industriāla izmēra tilpumos. Iekārtas lielie izmēri aprūtinā problēmas atrisināšanu ar precīzām skaitliskajām metodēm, tāpēc nepieciešams atrast atbilstošu modeli plūsmas aprakstam. Pastāvīgo magnētu iespējas MHD industrijā ir vairākas — sūkņi, maisītāji, sildītāji. Pastāvīgo magnētu iekārtu ģeometrijas mēdz būt arī vienkāršas, bet ne visos gadījumos ir iegūti precīzi atrisinājumi. Līdz ar to doktora darba uzdevums tiek aplūkots pa daļām, tiek aplūkoti arī saistīti uzdevumi ar rotējošu pastāvīgo magnētu šķidru metālu sūkņiem un vienkāršotām ģeometrijām.

Par MHD plūsmu aprakstošās fizikas — hidrodinamikas — pirmsākumiem mūsdienu izpratnē varētu uzskatīt 19. gadsimta sākumu, kad Klauds Luiss Navjē un sers Džordžs Gabriels Stokss neatkarīgi viens no otra ieguva vienādojumus, kas apraksta šķidrums plūsmas, ņemot vērā arī šķidrums viskozitāti [1]. Tas bija ļoti nozīmīgi, jo aprēķini bez šķidrums īpašības — viskozitātes — nesakrīta ar eksperimentiem. Tā sauktos Navjē–Stoksa (N-S) vienādojumus var aprakstīt ar vienu skaitli — Reinoldsa skaitli. Reinoldsa vārdā skaitlis nodēvēts par godu Osbornam Reinoldsam, kurš 19. gadsimta beigās veica virkni eksperimentu, pētot vienmērīgas, sakārtotas jeb lamināras plūsmas pāreju haotiskā jeb turbulentā plūsmā [2]. Reinoldsa skaitlis nav atkarīgs no konkrēta procesa ģeometriskajiem izmēriem, ātrumiem un materiālu īpašībām. Tas nozīmē, ja Reinoldsa skaitlis ir viens un tas pats, tad vienādojumu atrisinājums vai viena eksperimenta rezultāti apraksta daudzus gadījumus ar citiem izmēriem, plūsmas ātrumiem un citiem šķidrums rumiem. Šķidrums rumiem ar lielu viskozitāti, piemēram, medum, parasti atbilst mazi Reinoldsa skaitļi un rodas lēna, lamināra kustība, bet tāda paša izmēra traukos šķidrums rumiem ar mazāku viskozitāti, piemēram, ūdenim un šķidrums metāliem, biežāk atbilst liels Reinoldsa skaitlis un plūsmas ir sastopamas haotiskā, turbulentā režīmā.

Par MHD magnētiskā apraksta — mūsdienu elektrodinamikas — pirmsākumiem uzskatāmas 19. gadsimta beigas, kad Džeims Klerks Maksvels publicēja tā sauktos Maksvela vienādojumus, kuri apraksta elektromagnētiskās parādības [3]. Lai izrēķinātu šķidru metālu plūsmas, nepietiek zināt tikai

Reinoldsa skaitli, jo šķidrie metāli vada elektrību, un ir jāņem vērā arī elektromagnētiskie spēki.

Pats nosaukums — magnētiskā hidrodinamika — fizikas literatūrā pirmo reizi sastopams tikai ap 20. gadsimta vidu un saistīts ar Hannesu Alfvēnu. 1942. gadā Alfvēns žurnālā *Nature* publicēja īsu rakstu, kurā pievērsa uzmanību iepriekš nepamanītai fizikālai parādībai gadījumos, kad šķidrums plūsmas un elektromagnētiskās parādības stipri mijiedarbojas viena ar otru [4]. Sekojošā rakstā Alfvēns sniedza jaunatklātās parādības — elektromagnētiski hidrodinamisko viļņu — detalizētu skaidrojumu un kā dabā sastopamu piemēru minēja plūsmas un magnētiskos laukus uz Saules un plankumu rašanos [5]. Alfvēna atklājums un turpmākie pētījumi deva lielu ieguldījumu plazmas fizikā, arī Saulē notiekošo procesu izpratnē. Par elektromagnētiski hidrodinamisko viļņu atklāšanu 1970. gadā Alfvēns saņēma Nobela prēmiju. Vēlāk šāda cieša mijiedarbība starp plūsmām un elektromagnētiskiem spēkiem izrādījās iespējama arī laboratorijas apstākļos un, domājams, ir arī Zemes magnētiskā lauka rašanās pamatā.

Šķidra metāla sūkņi un plūsmas kanālos

Šķidru metālu plūsmu izpratne sākās 1937. gadā, kad fiziķis Julius Hartmans aprakstīja dzīvsudraba plūsmas kanālā teoriju, atrodoties nemainīgā ārējā

magnētiskajā laukā. Hartmans apskatīja šķidru metālu lamināru plūsmu šauros kanālos magnētiskā lauka klātbūtnē [6]. Aprēķinos Hartmans parādīja, ka plūsmas forma ir atkarīga no viena skaitļa. Šis skaitlis atšķīrās no Reinoldsa skaitļa un vēlāk tika nosaukts Hartmana vārdā. Hartmans kopā ar Freimutu Lazarusu 1937. gadā arī veica eksperimentālus plūsmas mērījumus caurulēs [7]. Eksperimenti apstiprināja, ka plūsma ir atkarīga no Hartmana skaitļa, nevis Reinoldsa skaitļa kā plūsmās bez magnētiskā lauka.

Visvienkāršākie šķidra metāla sūkņi ir kondukcijas sūkņi. Tie balstās uz Lorenca spēku — cauri šķidrajam metālam tiek laista stipra strāva, un strāvas virzienam perpendikulāri ir pielikts magnētiskais lauks. Tādā veidā tiek ierosināta šķidrā metāla plūsma trešajā perpendikulārajā virzienā. Kondukcijas sūkņi tika realizēti jau 20. gadsimta vidū, bet, lai arī fizikāli vienkārši, tie izrādījās tehniski sarežģīti, savukārt elektromagnētiskie sūkņi, kas rada ceļojošu vai rotējošu magnētisko lauku un «velk» šķidro metālu līdz lauka pārvietošanās virzienam, ieguva popularitāti. Tomēr elektromagnētiskajos sūkņos ir lieli zudumi, jo magnētiskais lauks tiek iegūts, laižot stipru strāvu cauri elektromagnēta spolēm.

1953. gadā Džons Arturs Šerklifs, atsaucoties uz Hartmana sasniegumiem, ieguva vispārīgāku atrisinājumu šķidru metālu plūsmām caurulēs magnētiskā lauka klātbūtnē [8]. Šerklifs varētu būt arī viens no pirmajiem, kurš nodemonstrēja, ka pastāvīgos magnētus var izmantot šķidru metālu plūsmas ierosināšanai. 1965. gada mācību video redzams, kā Šerklifs

demonstrē plūsmas iegūšanu šķidrā metālā, velkot lielu pastāvīgo magnētu gar šķidruma virsmu [9]. Šķidrā metāla kanālā tiek «vilkti» līdzīgi par pašu fiziķi lielākam magnētam, un plūsma ir izteikti turbulenta. Tobrīd magnētisko materiālu zinātne vēl nebija attīstījusies un nebija pieejami tik spēcīgi maza izmēra pastāvīgie magnēti, lai izgatavotu pastāvīgo magnētu sūkņus. Šerklifs izstrādāja šķidru metālu plūsmas ātruma mērītāju teoriju, izmantojot pastāvīgos magnētus.

20. gadsimta deviņdesmitajos gados strauji attīstījās spēcīgu pastāvīgo magnētu ražošana. Līdz ar to bija iespējams izveidot pastāvīgo magnētu sūkņus, kuru izstrādes pamatlicējs ir LU Fizikas institūta vadošais pētnieks Imants Bucenieks.

Šķidra metāla sūkņi visbiežāk izmantoti dzesēšanas nolūkos pētnieciskajos kodolsintēzes reaktoros. Magnētiskā hidrodinamika kodolsintēzes reaktoros sastopama ne tikai dzesēšanai ar šķidru metālu palīdzību, bet arī pašā reaktorā, kur atrodas plazma. Kodolsintēzes reaktori ir viens no tā sauktajiem tīrās vai alternatīvās enerģijas avotiem, kuri enerģijas ražošanas procesā atmosfērā izdala salīdzinoši maz oglekļa dioksīda [10]. Funkcionāli kodolsintēzes reaktori spētu nodrošināt teju neizmēlamu enerģijas apjomu, turklāt atšķirībā no citiem — vēja ģeneratoriem vai saules paneļiem — nebūtu atkarīgi no laikapstākļiem. Neraugoties uz potenciāli lielo ieguvumu, kodolsintēzes reaktora realizācija ir ļoti grūts uzdevums pat ar pasaules mēroga sadarbību un budžetu. Kodolsintēzes reaktorā nepieciešams panākt procesus kā Saules centrā, un, lai to izdarītu, jāizmanto aptuveni 200 miljonu grādu karsta plazma [10]. Tādu temperatūru neviens materiāls nevar izturēt, bet, tā kā plazma ir elektrovadoša vide, tad to var novirzīt no trauka sienām, izmantojot spēcīgus magnētiskos laukus. Šobrīd lielākais kodolsintēzes reaktors ITER tiek būvēts Francijā, kura realizēšanā piedalās 28 valstis [10]. Paredzams, ka ITER spēš demonstrēt tehnoloģisko sagatavotību pirmā elektroapgādes kodolsintēzes reaktora DEMO realizēšanai un uzticamas alternatīvās elektroenerģijas nodrošināšanai patērētājiem [10].

Turbulences problēma, plūsmu modelēšana

zemes magnētiskā lauka (dinamo) teorija un eksperimenti. Tomēr arī mūsdienās, 21. gadsimtā, kad iespējams fizikas uzdevumus risināt ar jaudīgiem datoriem, joprojām ir grūtības rast atbildes uz MHD jautājumiem, kuri rodas industriālu MHD iekārtu izstrādes procesā. Tas ir galvenokārt tāpēc, ka elektrovadošu šķidrumu plūsmas magnētiskos laukos gandrīz vienmēr ir turbulentas — tās satur daudz mazu virpuļu, kas ietekmē kopējo plūsmu [11]. Tas nozīmē, ka tiešus skaitliskos aprēķinus parasti nav iespējams

20. gadsimtā ir veikti eksperimenti un izstrādātas teorijas, kas izskaidrojušas daudzas MHD parādības, piemēram Alfvēna viļņi, Hartmana robežslāni,

veikt, jo pat ar jaudīgu datoru nepietiek, lai aprēķinātu plūsmu vissīkākajās detaļās. Turbulentu plūsmu modelēšanā ir pētītas gan statistiskās fizikas, gan haosa teorijas metodes, kuras labi spēj aprakstīt atmosfēras dinamiku [12]. Tomēr MHD problēmu risināšanai noslēgtos traukos, kuriem bieži vien ir sarežģīta ģeometrija, parasti nākas izvēlēties kādu vienkāršu turbulences modeli un atkarībā no pētāmās problēmas rast kompromisu starp aprēķinu precizitāti un patērēto aprēķina laiku. Vienkāršākie turbulences modeļi ir Reinoldsa vidējotie Navjē–Stoksa (RANS) modeļi, kas patērē salīdzinoši maz datora resursu. Savukārt vieni no precīzākajiem turbulences modeļiem ir dinamiskie LES (*Large Eddy Simulation*) modeļi [13], kuri prasa vairāk datora resursu nekā RANS, bet tajā pašā laikā daudz mazāk datora resursu nekā tiešie skaitliskie aprēķini, bez turbulences modeļa.

Plūsmas jāaprēķina skaitliski — ar datora palīdzību, jo turbulence ir matemātiski sarežģīta parādība. Ar matemātiskajām metodēm Navjē–Stoksa plūsmu vienādojumus nevar atrisināt vispārīgā turbulenta plūsmas gadījumā [11]. Pagājušā gadsimta 50. gados matemātiķis Eberhards Hopfs pārveidoja Navjē–Stoksa vienādojumus citā formā, kas matemātiski noformulēja vispārīgo turbulences problēmu [14]. Hopfa formulējumu lietot praktisku problēmu risināšanā ir sarežģīti, bet skaitliskās metodes attīstās, arī plūsmu risināšanai balstoties uz Hopfa turbulences formulējumu [15; 16].

MHD izpēte un attīstība Latvijā, LU Fizikas institūtā

Pasaulē lielu ievērību guvušais, Latvijā vislielākais zinātniskais sasniegums magnetohidrodinamikā nenoliedzami ir LU Fizikas institūta vadošā pētnieka

Agra Gailīša vadībā realizētais dinamo eksperiments, kas 1999. gada 11. novembrī pirmo reizi pasaulē nodemonstrēja Zemes magnētiskā lauka rašanās mehānismu laboratorijas apstākļos [17]. Dinamo modeļos magnētiskā lauka ģenerēšana notiek ar skrūvveida virpuļu palīdzību. Tie var būt daudzi mazi virpuļi turbulentā plūsmā [18] vai lieli virpuļi, kuru veido vidējā plūsma [19]. Tāpēc izdala turbulentās plūsmas un vidējās plūsmas dinamo modeļus [18; 19]. No turbulences modelēšanas viedokļa ir interesanti, ka plūsmas turbulence, domājams, ir dinamo mehānisms, ģenerējot Zemes magnētisko lauku [20; 19], bet LU Fizikas institūta dinamo eksperimentā ar izvēlēto modeli panākta magnētiskā lauka ģenerēšana, izveidojot vidējās plūsmas virpuļojošu spirālveida kustību, kurā turbulence nav noteicošā [21].

Rīgas dinamo eksperimenta pamatā ir Ponomarenko, vidējās plūsmas, dinamo modelis, viens no vienkāršākajiem zināmajiem kustības modeļiem, kas ģenerē magnētisko lauku. Turpinot Ponomarenko dinamo modeļa teoriju, LU Fizikas institūta teorētiskie fiziķi Agris Gailītis un Jānis Freibergs ieguva kritisko magnētiskā Reinoldsa skaitļa vērtību, ierosināšanas sliedzi, pie kura tiek pastiprināta ārējā magnētiskā lauka vērtība [22]. Pats modelis

tika pārveidots tā, lai to varētu realizēt laboratorijas eksperimentā ar šķidru nātriju. Pirmie centieni Ponomarenko modeļa eksperimentālai pārbaudei ir veikti vēl padomju laikos, 1986. gadā, Ļeņingradā, NIIIEFA institūtā, bet iekārtas vibrāciju dēļ tad nevarēja sasniegt pietiekami augstu plūsmas ātrumu magnētiskā lauka ģenerēšanai [23]. Otrais eksperiments sākās 90. gadu vidū, kad tika nolemts būvēt dinamo iekārtu Latvijā ar Drēzdenes institūta palīdzību. Vispirms iekārta tika izmēģināta ar ūdeni, kam ir līdzīgs blīvums kā nātrijam. Tika uzlaboti maisītāju propelleri un aprēķināta un pārbaudīta iekārtas mehāniskā noturība.

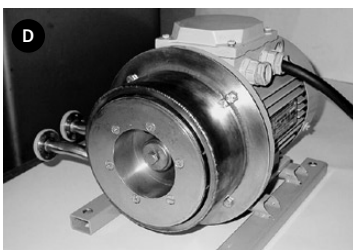
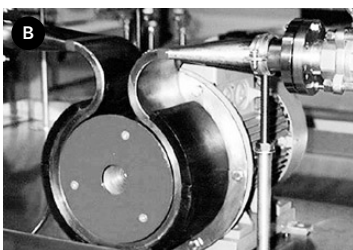
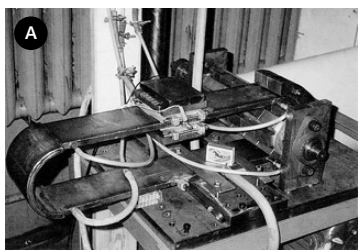
1999. gada 11. novembrī iekārta bija gatava darbam ar nātriju. Pirmajā eksperimentā tika pārbaudīts, vai dinamo pastiprina ārējo, ierosmes lauku. Ģenerētais magnētiskais lauks tika pierakstīts uz ierosmes magnētiskā lauka fona, tāpēc tikai pēc datu pieraksta izpētišanas varēja pārliecināties, ka dinamo pats ir ģenerējis magnētisko lauku. Neilgi pēc tam saplīsa nātrija blīvslēgs, radās sūce, un eksperimentu nācās beigt. Šis viens gandrīz nejaušais datu pieraksts arī bija pirmā reize, kad dinamo eksperiments ir uzskatāms par veiksmīgu. Stāstot par dinamo eksperimentu, Agris Gailītis vienmēr uzsver, ka viņa eksperiments ir bijis labi aprēķināts, tāpēc rezultāts sasniegts jau pirmajā mēģinājumā. Nākamais eksperiments notika 2000. gada jūlijā, kad bija uzstādīts jauns blīvslēgs un varēja sasniegt piesātinājumu, tas ir, maksimālo lauka vērtību, ko dinamo ir spējīgs ģenerēt noteiktā ātrumā. Gandrīz vienlaikus, tomēr nedaudz vēlāk par LU Fizikas institūta eksperimentu, 1999. gadā tika iedarbināts arī dinamo eksperiments *Forschungszentrum* Karlsrūē, Vācijā [24]. Tajā uzreiz sasniedza piesātinājuma režīmu un tika ģenerēts pastāvīgs magnētiskais lauks atšķirībā no LU Fizikas institūta eksperimenta, kurā iegūst mainīgu magnētisko lauku.

Pastāvīgo magnētu sūkņi

Aprakstot šķidro metālu sūkņu teoriju, kādreizējais LU Fizikas institūta akadēmiķis Tāļivaldis Kalniņš 1980. gada

grāmatā par lineārajiem MHD sūkņiem papildus elektromagnētiskajām metodēm aplūkoja arī gadījumu, kad šķidrāajā metālā ģenerētās strāvas tiek ierosinātas ar pastāvīgā magnēta lauku [25].

1995. gada starptautiskajā magnetohidrodinamikas konferencē Rīgā interesi par tagadējā vadošā pētnieka Imanta Bucenieka darbu ar šķidro metālu dzīvsudrabu izrādīja pārstāvji no Korejas, un neilgi pēc konferences Imants Bucenieks kopā ar Jāni Valdmani devās uz Koreju. 1996. gadā, atceroties Tāļivalža Kalniņa grāmatā aprakstīto pastāvīgo magnētu darbības principu un pasūtot tajā laikā tikko kā pieejamos vienus no pirmajiem neodīma-bora pastāvīgajiem magnētiem, Bucenieks ar Valdmani Korejā realizēja pavisam primitīvu pastāvīgo magnētu sūkņa prototipu (1. att. A), bet izrādījās, ka korejiešu zinātnieki tomēr nevēlējās turpināt šo projektu, un pētnieki atgriezās Latvijā. Aptuveni pēc 30 gadiem darba ar toksisko



1. ATTĒLS. Pastāvīgo magnētu sūkņi: **(A)** pirmais realizētais pastāvīgo magnētu sūknis; **(B), (C), (D)** pēc pasūtījuma LU Fizikas institūtā realizētie pastāvīgo magnētu sūkņi.



2. ATTĒLS. Industriāla izmēra rotējošu pastāvīgo magnētu maisītājs: **(A)** pastāvīgais magnēts ar 30 cm diametru; **(B)** rūpnīcā uzstādīts pastāvīgo magnētu maisītājs pie alumīnija krāsns; **(C)** krāsns iekšpuse ar izkausētu alumīniju.

dzīvsudrabu Imantam Buceniekam vairs nebija atļauts ar to strādāt, un viņš pievērsās eutektikai, precīzāk — nekaitīgajam metālu gallija, indija un alvas sakausējumam, kurš ir šķidrums istabas temperatūrā un kuram ir mazāks blīvums un lielāka vadītspēja nekā dzīvsudrabam. Agrākie mēģinājumi realizēt pastāvīgo magnētu sūkņus LU Fizikas institūtā bija neveiksmīgi vājo magnētu dēļ, tāpēc teorētiskie fiziķi bija skeptiski noskaņoti par pastāvīgo magnētu lietošanu šķidru metālu sūkņēšanā. Taču nu jau Korejā izstrādātā iekārta ar neodīma pastāvīgajiem magnētiem bija pārvesta uz Salaspili, un Imants Buceniekš nodemonstrēja Fizikas institūta teorētiskajiem fiziķiem Agrim Gailītim un Olgertam Lielausim par pārsteigumu sūkņa darba spēju uzpumpēt eutektiku līdz darba zāles 6 metru griestiem. Tas pārliecināja arī teorētiķus par pastāvīgo magnētu potenciālu šķidru metālu sūkņēšanas industrijā. Šobrīd Fizikas institūts ir izpildījis vairāk nekā 50 pastāvīgo magnētu sūkņu pasūtījumus, no kuriem 30 ir bijuši lieli Eiropas līmeņa pasūtījumi, to skaitā nesenākais pasūtījums Lielajam hadronu paātrinātājam Šveicē. Starp citiem pasūtītājiem ir zinātniskie institūti, uzņēmumi šķidru metālu pārsūkņēšanai ražošanas procesā un metālu pārstrādes uzņēmumi. 1. attēlā redzami daži izstrādātie pastāvīgo magnētu sūkņi.

Šķidru metālu maisīšana indu- strijā, pastāvīgo magnētu maisītāji

Nākamais lielais solis pastāvīgo magnētu izmantošanā MHD industrijā bija rotējošu pastāvīgo magnētu šķidra metāla maisītāju realizēšana. Pirmos maza izmēra šķidru metālu maisīšanas

eksperimentālos pētījumus veica Toms Beinerts, kuru rezultātus apkopoja 2009. gadā savā bakalaura darbā (darba vadītājs — Andris Bojarēvičs) [26].

Vēlāk, 2017. gadā, LU Fizikas institūta MHD Tehnoloģiju laboratorijā tika realizēts pirmais industriāla mēroga pastāvīgo magnētu maisītājs ar magnēta diametru 30 cm (2. att. A) un veiksmīgi integrēts 20 tonnu alumīnija maisīšanai pārkausēšanas rūpnīcā Norvēģijā (2. att. B, C). Tika nodemonstrēts, ka industriālam pielietojumam realizētais pastāvīgo magnētu maisītājs ir pat līdz 30 reīžu efektīvāks par samērojamu elektromagnētisko maisītāju [27]. LU Fizikas institūtā ir izstrādāts vēl lielāks maisītājs ar magnēta rādiusu 40 cm, un patlaban norit pēdējie sagatavošanās darbi, lai maisītāju nosūtītu uz rūpnīcu Anglijā.

Nākamais pētījums

Darba autora doktora darbā tiks veikti aprēķini un iegūta teorētiska izpratne par rotējošu pastāvīgo magnētu maisī-

tāju ierosināto plūsmu industriāla izmēra tilpumos. Tiks rastas atbildes arī uz saistītiem MHD uzdevumiem un vienkāršākām ģeometrijām. Rotējošu pastāvīgo magnētu sūkņu ģeometrijas parasti ir cilindriskas. Zinot rotējošā

magnēta magnētisko lauku, var izrēķināt inducēto strāvu sadalījumu un tilpuma spēkus metālos. Magnētiskā lauka izteiksme cilindra formas magnētām ir iegūta pavisam nesen [28], un, balstoties uz to, ir iegūts viens no pirmajiem pētījuma rezultātiem — izteiksme strāvām un spēka sadalījumam cilindra un gredzena formas metālos [29]. Analītiskām izteiksmēm ir priekšrocība salīdzinājumā ar skaitliskajiem rezultātiem, jo ar tām var iegūt rezultātus nevis atsevišķam gadījumam, bet dažādiem ģeometriskajiem izmēriem, rotācijas ātrumiem utt., tādējādi atvieglojot aprēķinus fizikālās iekārtas projektēšanai. Diemžēl reti kad var iegūt analītiskas izteiksmes, kas pietiekami precīzi aprakstītu fizikāli sarežģītus procesus, arī šķidru metālu plūsmas industriālās MHD iekārtās. Tas ir galvenokārt plūsmas turbulences dēļ, bet arī sarežģītās ģeometrijas un sarežģītās magnētiskā lauka formas dēļ. Ar iegūto analītisko izteiksmi var aprēķināt spiediena kritumu slēgtā kanālā un kanālā izdalīto siltuma daudzumu, kas ļauj novērtēt plānotās iekārtas darba spēju un veicamos pasākumus vēlamo iekārtas darba režīmu nodrošināšanā. Pētījuma turpinājumā tiks veikti turbulentu MHD plūsmu aprēķini metalurģiskiem procesiem.

Noslēgums

Magnetohidrodinamikas un turbulentu plūsmu pētījumiem ir sena vēsture, bet aprēķini industriāliem nolūkiem sagādā grūtības pat jaudīgiem datoriem. LU Fizikas institūtā ir izstrādātas pasaulē pieprasītas industriālas rotējošu pastāvīgo magnētu MHD iekārtas (maisītāji, sūkņi u. c.), kurām nepieciešams aprēķināt plūsmas pielietojumiem industrijā. Raksta autora sākotnējais šķidru metālu maisītāju plūsmu apraksta pētījums padziļinās izpratni optimālu pastāvīgo magnētu maisītāju izstrādē un jaunu MHD iekārtu izstrādē.

Pateicības

Autors izsaka pateicību doktora darba vadītājam Ilmāram Grantam, laboratorijas vadītājam Andrim Bojarēvičam un visam MHD Tehnoloģiju laboratorijas kolektīvam. Pateicos Imantam Buceniekam un Guntim Lipsbergam. Paldies pētījuma atbalstītājiem LU fondam un mecenātam SIA «Mikrotīkls».

Izmantotā literatūra

1. Bistafa S. On the development of the Navier-Stokes equation by Navier. 2017. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 40(2); doi:10.1590/1806-9126-rbef-2017-0239.
2. Jackson J. Osborne Reynolds: Scientist, Engineer and Pioneer. 1995. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 451(1941), pp. 49–86; doi:10.1098/rspa.1995.0117.
3. James Clerk Maxwell. Encyclopædia Britannica, Encyclopædia Britannica, inc. Available: <https://www.britannica.com/biography/James-Clerk-Maxwell> [skatīts 08.02.2019.]
4. Alfvén H. Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves. 1942. *Nature*, vol. 150(3805), pp. 405–406; doi:10.1038/150405d0.
5. Alfvén H. A. New Type of Wave Motion and its Importance in Solar Physics. 1946. *Acta Radiol.*, vol. 27(3–4), pp. 228–242; doi: 10.3109/00016924609135179.
6. Hartmann J. Hg-dynamics I: theory of the laminar flow of an electrically conductive liquid in a homogeneous magnetic field Math.-fys. 1937. *Medd.*, vol. 15(6).
7. Hartmann J., Lazarus F. Hg-dynamics II: experimental investigations on the flow of mercury in a homogeneous magnetic field Math.-fys. 1937. *Medd.*, vol. 15(7).
8. Shercliff J. Steady motion of conducting fluids in pipes under transverse magnetic fields. 1953. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 49(1), pp. 136–144; doi: 10.1017/S0305004100028139.
9. Shercliff J. Magnetohydrodynamics (a 30 min. educational film). 1965. Educational Services Inc. for the National Committee on Fluid Mechanic Films, USA.
10. EUROfusion. 2018. European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy, Programme Management Unit, Boltzmannstr. 2, 85748 Garching/ Munich, Germany.
11. Ecke R. The Turbulence Problem An Experimentalist's Perspective. 2005. *Los Alamos Science*, No. 29, pp. 124–141.
12. Kraichnan R. H. New Perspectives in Turbulence. 1991. *Springer-Verlag*, New York; doi:10.1007/978-1-4612-3156-1.
13. Fröhlich J., Rodi W. Introduction to Large Eddy Simulation of Turbulent Flows. 2002. In: B. E. Launder, N. D. Sandham (eds.), *Closure Strategies for Turbulent and Transitional Flows*, Cambridge University Press, pp. 267–298.
14. Hopf E. Statistical Hydromechanics and Functional Calculus. 1952. *Journal of Rational Mechanics and Analysis*, vol. 1, pp. 87–123.
15. Giles M. J. Probability distribution functions for Navier–Stokes turbulence. 1995. *Physics of Fluids*, 7, p. 2785; doi:10.1063/1.868657.
16. Venturi D. The numerical approximation of nonlinear functionals and functional differential equations. 2018. *Physics Reports*, vol. 732, pp. 1–102; doi:10.1016/j.physrep.2017.12.003.
17. Gailitis A., Lielausis O., Dementev S., Platacis E, Cifersons A. Detection of a Flow Induced Magnetic Field Eigenmode in the Riga Dynamo Facility. 2000. *Physical Review Letters*, vol. 84(19), pp. 4365–4368; doi:10.1103/PhysRevLett.84.4365.
18. Matthaeus W. H., Goldstein M. L., Lantz S. R. The alpha dynamo parameter and measurability of helicities in magnetohydrodynamic turbulence. 1986. *Physics of Fluids*, vol. 29, p. 1504; doi: 10.1063/1.865668.

19. Gailītis A., Lielausis O., Platacis E., Gerbeth G., Stefani F. On the results of the Riga dynamo experiments. 2001. *Magnetohydrodynamics*, vol. 37(1/2), pp. 71–79.
20. Rüdiger G., Pipin V. V., Belvédère G. Alpha-Effect, Helicity and Angular Momentum Transport for a Magnetically Driven Turbulence in the Solar Convection Zone. 2001. *Solar Physics*, vol. 198(2), pp. 241–251; doi: 10.1023/A:1005217606269.
21. Gailītis A., Lielausis O., Platacis E., Dement'ev S., Cifersons A., Gerbeth G., Gundrum Th., Stefani F., Christen M., Will G. Dynamo experiments at the Riga sodium facility. 2002. *Magnetohydrodynamics*, vol. 38(1–2), pp. 5–14.
22. Gailītis A. and Freiberg Ya. Theory of a helical MHD dynamo. 1976. *Magnetohydrodynamics*, vol. 12(2), pp. 3–6 [in Rus., English translation], pp. 127–129.
23. Gailītis A. K., Karasev B. G., Kirillov I. R., Lielausis O. A., Luzhanskii S. M., Ogorodnikov A. P., Preslitskii G. V. Experiment with a liquid-metal model of an MHD dynamo. 1987. *Magnetohydrodynamics*, vol. 23(4), pp. 3–7 [in Rus., English translation], pp. 349–352.
24. Müller U., Stieglitz R. Can the Earth's magnetic field be simulated in the laboratory? 2000. *Naturwissenschaften*, vol. 87(9), pp. 381–390.
25. *Lineynnye induktsionnyye mashiny s poperechnym magnitnym potokom*. 1980. Kalniņš T. K., Rīga [in Rus.].
26. Beinerts T. Magnētisku dipolu rotācijas inducēta šķidra metāla kustības eksperimentāla izpēte. 2009. Bakalaura darbs, Latvijas Universitāte. Fizikas un matemātikas fakultāte, Rīga. Darba vadītājs: Andris Bojarēvičs.
27. Beinerts T., Bojarevičs A., Baranovskis R., Milgrāvis M., Kaldre I. Permanent magnet dipole stirrer for aluminium furnaces. 2018. IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering*, vol. 424; doi:10.1088/1757-899X/424/1/012037.
28. Caciagli A., Baars R. J., Philipse A. P., Kuipers B. W. M. Exact expression for the magnetic field of a finite cylinder with arbitrary uniform magnetization. 2018. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 456, pp. 423–432; doi:10.1016/j.jmmm.2018.02.003.
29. Berenis D., Grants I. Analytical induced force solution in conducting cylindrical bodies and rings due to a rotating finite permanent magnet. 2019. [Iesniegts publicēšanai.]

Dabiskie krāsu zemju minerālu pigmenti, okeri un to krāsas

AIGARS KOKINS, LU Ģeoloģijas nodaļas pētnieks

Projekts tapis ar SIA «Mikrotīkls» ziedojumu,
ko administrē Latvijas Universitātes fonds.

Cilvēka domāšanas evolūcija saistāma ar semiotisku zīmju sistēmu un krāsu simbolu lietojumu jau aptuveni 800 000–200 000 gadu pirms mūsu ēras, cilvēks sevi identificē ar apzinātu krāsu pigmentu izmantošanu rituālu un simbolu valodai [1]. Krāsa plaši lietota jau pirmajās alu mākslas zīmēs, gleznojumos [2], un tā tiek izmantota arī mūsdienās. Esam krāsu un toņu pasaules ieskausti, bet krāsas lietojums nes sevī arī informāciju, kas veido mūsu simboliskās domāšanas pamatu: domu protoprocesi, kā dzīvība, auglība, nāve, atdzimšana, kā arī mākslas vēsturei būtiskie aspekti un gadu simtu un tūkstošu uzkrātās domāšanas un skaistā vizuālie šabloni — zīmes — gleznu vai mākslas instalāciju veidā. Dabisko okeru zemes resursi — minerālu pigmenti — ir pirmo krāsu pamats un līdztekus aizvēstures gleznu kompleksiem, kā *Chauvet*, *Lascaux*, *Altamira*, veido cilvēces vizuālās mākslas pamatus. Katram laikam ir savas krāsas, savas krāsu receptes, tām ir reģionāls tonis, arī mūsdienās aktuālas ir mākslas krāsas — dabisko zemes minerālu krāsvielas.

Dabas minerālu nogulumus — okerus — iespējams pārstrādāt par pigmentu pulveri, senāk tradicionāli beržot uz akmens plāksnes, tagad tehnoloģiski maļot dzirnavās. Pigmenti tiek lietoti, tos iemaisot kādā no krāsas saistvielām — eļļā, ūdenī, olas dzeltenumā — vai veidojot kādu no sintētisko saistvielu krāsām. Krāsu īpašības uzlabo pievienotās krāsu piedevas, tā veidojot unikālu krāsas recepti, tehniku un mākslas veidu (ūdens krāsa, eļļas krāsa, olas temperas krāsa un to gleznas). Projekta mērķis bija izvērtēt krāsu zemju resursus Latvijā, radīt kvalitatīvas mākslinieku klases eļļas krāsas, kas veidotas, izmantojot Latvijas dabas minerālus. Lietojot unikālo Latvijas eļļas krāsas toni, meklēt eļļas krāsas gleznojumos jaunas, patlaban aktuālas vizuālas zīmes, kā arī reflektēt par gara nozīmi, veidot ikonas, lietojot olas temperas krāsu.

Atslēgvārdi: **dabiskie minerālu pigmenti, okeri, eļļas krāsa, krāsu zeme**

levads

Ģeoloģiskie procesi dabā veido minerālus, kristālus ar noteiktu ķīmisko sastāvu un fizikālajām īpašībām un minerālu agregātus — iežus, kas jo plaši tiek lietoti tautsaimniecībā, sākot ar smilšu un betona izmantošanu celtniecībā, metālu industrijas produktiem mašīnbūvē līdz pat datorkomponentēm — silīcija mikroshēmām, saules bateriju paneļiem kā dabas minerālu atvasinājumiem. Šo ģeoloģisko resursu lietojums veido lielu daļu materiālās kultūras, kur sava vieta ir arī pigmentu iegūšanas un izmantošanas tehnoloģijai, lietojumam, kas sevišķi izceļams un aplūkojams, jo veido krāsvielu pamatsastāvu — vienu no pasaules krāsainības pamatiem. Izstrādājami arī sintētiskie pigmenti, kā arī organiskās krāsvielas, bet, koncentrējot uzmanību uz dabas produktiem — dabas minerālu resursiem, iespējams iegūt kvalitatīvus, cilvēka veselībai nekaitīgus pigmenta produktus, kas lietojami, veidojot eļļas un olas temperas krāsas (organisko saistvielu krāsvielas), ūdens krāsas, kā arī sintētisko saistvielu krāsas. Pigmentu lietojums gan ir daudz plašāks, tos lieto arī medikamentu piedevās, tāpēc reducējoši tiks aplūkoti tikai krāsu zemju, dabisko okeru pigmenti, kā arī iespējas māla minerālus lietot kā krāsu.

Krāsu zemes, dabiskais okers ir dzelzs oksīdus saturoši minerāli, kas pēc kristālu uzbūves (minerālģiskā sastāva), ķīmiskā sastāva un granulometrijas atšķiras tonāli no dzeltenīgas līdz sarkanbrūnai krāsai. Okera ķīmiskajā sastāvā galvenā komponente ir dzelzs oksīds (galvenokārt Fe_2O_3), bet ir arī kaļķi (CaO), smilts (SiO_2), mālu minerālu piejaukumi, kā arī citu ķīmisko savienojumu piejaukumi (piemēram, Al_2O_3 , MnO , MgO , K_2O u. c.). Krāsu zemju minerālais sastāvs ir atkarīgs no vides veidošanās apstākļiem, kā arī no atkārtotas vides dinamiskās ietekmes, kur kvalitatīvākas krāsu zemes ir viendabīgākas savā sastāvā — gētīts un hematīts (dzelzs oksīda minerāli), kvarcs un kalcīts, bet sastopamas arī atkārtoti dēdētas polifāžu nogulas, kas var būt neviendabīgas. Aplūkojot krāsvielu pamatkomponentes — pigmentus, uzmanība gan vairāk tiek pievērsta krāsas tonim un ne tik daudz minerālģiskā sastāva viendabībai, jo pigmenti savā sastāvā var būt daudzkomponentu, bet iespējams dot specifiski patīkamu toni. Krāsu zemju veidošanās dabā saistīta ar dzelzs bagātu pazemes ūdeņu izsēšanos un oksidācijas procesiem, tāpēc krāsu zemju nogulumi sastopami dzelzs avotu tuvumā, purvos, upju un ezeru tuvumā un ūdeņainās pļavās. Krāsu zemes bieži izsēžas nelielos slāņos, un, lai krāsu zemes kļūtu par okera pigmenta pulveri, jāveic tehnoloģiska apstrāde — resursa iegūšana, žāvēšana un malšana. Ja pigmentu tonalitātes izmaiņai tehnoloģiskajā procesā tiek iekļauta arī materiāla apdedzināšana, krāsu zemes kļūst par dedzināto okeru vai umbras pigmentu atkarībā no iegūstamā pigmenta toņa. Mālu minerālu izmantošana krāsvielās ir līdzvērtīga, to atšķirība ir minerālģiskajā un ķīmiskajā sastāvā — mālu kā sekundāri dēdētu produktu sastāvā ir mazāks dzelzs daudzums. Gan krāsu zemes, gan māli ir lietojami kā pigmenti krāsās.

Lai arī resursi dabā rodami bieži, to izmantošana par krāsvielu nav tūlītēji paredzama — ir jāveic paraugu apstrāde, iegūstot pigmentus ar smalku granulometrisku sastāvu, piemēram, 10 μm robežās vai lielāku graudu, atkarībā no to lietojuma. Pigmentus suspendē krāsas saistvielā, un tikai tad, izvērtējot materiāla īpašības, tam mijiedarbojoties ar gaismu, krāsas saistvielu refrakcijas un refleksijas ietekmē, pigmentam absorbējot un atstarojot gaismu, iespējams noteikt jaunizveidotās krāsas toni, kas dabas pigmentiem atkarībā no to ķīmiskā sastāva spēj būt kardināli atšķirīgs no to sākotnējās, dabā novērotās krāsas. Pigmentu granulometrijas, graudiņu smalkums ietekmē tumši gaišās krāsas attiecības — rupjāka maluma pigmenti būs tumšāki, smalkāki — gaišākā tonī, bet pašas krāsas toni būtiski var mainīt lietotā krāsu saistviela. Dabas pigmenti, kas sākotnēji šķiet dzeltenīgi brūni, eļļas krāsās var kļūt sarkani, zaļie māli — pelēki atkarībā no to mineraloģiskā sastāvā, kristālu ģeometriskās veidošanās un apstākļiem, to ķīmisko elementu (dzelzs, skābekļa un citu jonu vērtības) un brīvo elektronu elektromagnētiskā starojuma absorbcijas [3].

Krāsa tiek veidota no pigmenta un saistvielas, kā arī tās īpašību modificēšanas piedevām. Krāsai ir nozīmīga loma kultūrvēsturē. Vizuālās mākslas pamats glezniecība ir radīta, izmantojot krāsu zemju jeb okera pigmentus — viduslaiku baznīcu ikonas, renesanses mākslinieki, kā Mikelandželo (16. gs. Siksta kapelas freska Vatikānā [4]), Ticiāns, Karavadžo, flāmu gleznotāji, kā P. P. Rubenss, A. van Deīks, Rembrants, un daudzi citi, kas veidojuši Eiropas kultūras pamatus, savās krāsu paletēs lietojuši krāsu zemju pigmentus, dabiskos okerus un to krāsu paveidus.

Mūsdienās pigmentu lietojums saistāms ar dažādu krāsvielu, laku un beiču ražošanu, koksnes aizsardzības līdzekļu tonēšanu (antiseptiķi, anti-pirēni). Pigmentu piedevas izmanto celtniecības javas, asfaltbetona, keramikas masu, papīra, stikla, tekstilijas izstrādājumu tonēšanai, plastikāta un gumijas ietonēšanai, ķieģeļu, bruģa, jumta pārklājumu ražošanā, industriālās ķīmijas produktos, lauksaimniecības zemju mēslojumam — bagātinot zemi ar dzelzi. Iespējams lietot arī farmācijas produktos un kosmētikas līdzekļos, kaut gan šo nišu aizstāj sintētiskie pigmenti. Krāsu zemes iespējams lietot arī deggāzes attīrīšanai, vēsturiski plaši tās lietotas metalurģijā [5].

Pasaules tirgus krāsu zemju pigmentiem ir ļoti plašs. 2017. gada statistikas dati liecina, ka pasaules importa bilance dzelzs oksīdiem un hidroksīdiem ($\geq 70\% \text{Fe}_2\text{O}_3$) veido 1 070 906 tonnas, pasaules eksports — 1 064 360 tonnas gadā, kur Latvijas imports ir 280 tonnas 2017. gadā, tai skaitā importējot dzelzs oksīdus un hidroksīdus no Ķīnas 76 tonnas gadā, bet Latvijas eksports ir 5 tonnas [6]. Lai arī šie statistikas dati nenodala dabiskos un sintētiskos produktus, kā arī nenorāda eksporta produkta izcelsmi (ražotājvalsti), statistika norāda uz samērā lielu un pieaugošu dzelzs oksīdu iepirkumu Latvijā.

Attīstot vietējo resursu izstrādi un piedāvājot to tirgū, ir iespējams nosegt daļu pieprasījuma. Bijušais uzņēmums «Staiķes krāsu cehs»

spēja pārstrādāt un eksportēt vietējos zemes resursus, dabisko okeru vidēji 265 tonnas gadā (1967–1991) [7]. Savas valsts dabisko resursu izmantošanai nav tikai makroekonomisks apsvērums, minerālu pigmentu iegūšana, apstrāde un lietošana ir videi un cilvēkam draudzīga, rūpniecības procesi neizmanto papildu ķīmijas produktus (dzelzs sulfātus, naftas pārstrādes produktus), ražošanas procesā izmantotais ūdens nav īpaši jāattīra, tas neradīs vides piesārņojumu, jo dabiskās krāsu zemes nav toksiskas un to ražošana nav videi kaitīga. Krāsu zemes un mālu minerālus iespējams pārstrādāt un tirgū piedāvāt kā pigmentus, kā arī dažādu saistvielu krāsas, arī kā mākslinieku eļļas krāsas.

Mākslas krāsas ir augstvērtīgs produkts, kam nepieciešams kvalitatīvs pigments un viendabīgs tonis. Jebkuras citas krāsas tirgū ir šo krāsu vienkāršāka versija. Mākslinieku eļļas krāsai ir sava vēsture. Senākās krāsas ir arheoloģijas pētījumu lauks, bet secīgi tuvāk – mākslas pētnieku un gleznotāju ikdiens. Mākslas eļļas krāsas izveide ir autordarbs un aizsargāts komercnoslēpums, kas gadu simtiem bija pašu mākslinieku, mākslas meistarību maize, bet līdz ar lielražošanas attīstību ap 19. gadsimtu, ar pirmo alumīnija tūbiņu parādīšanos tirgū mākslas krāsas eļļas krāsa arvien vairāk ir mākslas krāsu ražotāju kompetence.

Gleznotājs arvien mazāk pārzina savas krāsas sastāvu, uzticot krāsu formulāciju specializētām krāsu ražošanas fabrikām, kas spēj piedāvāt krāsu ar smalkāka maluma pigmentiem, viendabīgu sastāvu un paredzamām krāsas īpašībām. Katras krāsu ražošanas kompānijas produkcija mazliet atšķiras no konkurentiem, ko panāk, krāsas sastāvā iekļaujot piedevas, kas modificē krāsas klāšanās spēju, žūšanas ilgumu, krāsas reoloģiju, krāsas biežumu, caurspīdīgumu u. c. unikālas īpašības, ieskaitot pigmenta izvēli un to smalkumu. Formulācijas sastāvs netiek atklāts, pigmentu izcelsme ir māksliniekam nezināma, jo produkta aprakstā min tikai pigmentu indeksus – dabisko dzelzs oksīdu indekss ir PR102, sintētisko pigmentu alternatīva – PR101 [8]; iespējami arī brūnas krāsas dzelzs oksīdi (umbra) ar indeksu P.Br.7, kas ir dabiski minerālu pigmenti, bet to sintētiski veidotā alternatīva ir P.Br.6, krāsās tiek lietoti arī dabisko un sintētisko pigmentu jaukumi, piemēram, P.Br.7-P.Y.83.

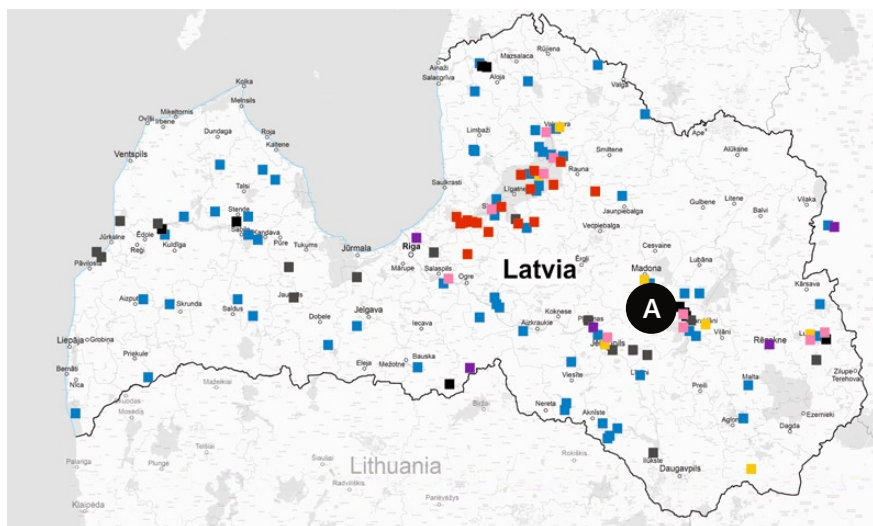
Dabisko pigmentu krāsas ir kvalitatīvākas, to graudiņu smalkums ir rupjāks salīdzinājumā ar sintētiskiem pigmentiem (līdz pat 10 reižu), tām piemīt krāsas noturība, piesātinājums, gaismas spīdums un krāsas dziļums, gaismas caurstarošanās, pigmentu nevienādība, kas izmaina gaismas laušanu un atstarošanos un padara krāsu bagātīgāku sava toņa niansētā uztverē [9]; šīs īpašības ir būtiskas gleznotājiem [10]. Sintētiskie pigmenti ir smalki, homogēni, tie labāk klājas, to tonis ir vienāds lielākā laukumā («plakans»); šīs īpašības ir vēlamas arhitektūrā izmantojamās krāsās (piemēram, sienas krāsa), bet ne gleznotāju paletēs, tāpēc gleznotāju un restauratoru krāsās ir jābūt dabas pigmentam. Ražotājiem savas krāsas sastāvos to lietošana būtu skaidrāk jāidentificē.

Pilotprojekts eļļas krāsas izveidei

Lai risinātu projekta gaitā izvirzītos mērķus — identificēt krāsu zemju resursu, izveidot pigmentus, formulēt krāsu —, projekts tika sadalīts vairākās vienlīdz nozīmīgās daļās — tehnoloģiskās bāzes nodrošināšana un metodes izstrādāšana, resursu apzināšana un to kvalitātes novērtēšana, krāsas formulācija un testi, kā arī ārpakalpojumu piesaiste, domājot par projekta vizuālo tēlu un informatīvo kampaņu. Projekta realizācijai daļu ražošanas iekārtu nodrošināja Latvijas Universitātes Iežu pētījumu laboratorija, bet specifiskas iekārtas — bumbu dzirnavas, mufeļa krāsni, trīs ruļļu dzirnavas, izsmidzinošo žāvētāju, spektrokolorimetru, viskozimetru, homogenizatoru, grindometrus, aplikatorus, krāsu filmas — un citas iekārtas un mērinstrumentus nācās iegādāties specifiski projekta realizācijai, lai spētu veidot pigmentus, kvalitatīvu krāsu, novērtēt tās toni, krāsu filmas īpašības. Krāsu zemju resursu identificēšana tika risināta Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātē sadarbībā ar ģeoloģijas speciālistiem *Dr. geol.* Valdi Segliņu un *Dr. geol.* Ģirtu Stinkuli, kā arī pētot Latvijas Ģeoloģijas fonda arhīva materiālus un veicot ģeoloģiskās rekognoscijas darbus krāsu zemju atradnēs, paraugus analizējot Latvijas Universitātes Ķīmijas fakultātes Fizikālās ķīmijas nodaļā sadarbībā ar pētnieku Juri Kostjukovu. Krāsas formulācija mākslinieku klases eļļas krāsai ir specifiska katram izstrādātajam, tāpēc, lai izvērtētu krāsas klāšanās spēju, nepieciešamo žūšanas ilgumu un citas īpašības, tika pieaicināta gleznotāja, Latvijas Mākslas akadēmijas absolvente Elīna Alka, kā arī notika konsultācijas ar Latvijas Mākslas akadēmijas restaurācijas nodaļas vadītāju profesoru Andri Začestu. Projekta vizuālais tēls, zīmols un iepakojuma dizains tika uzticēts kā ārpakalpojums dizaina studijai «Tundra Graphic», autors Kirils Kirasirovs. Projekta atspoguļošanai publiskajā telpā veidotās videofilmas autors ir Latvijas Mākslas akadēmijas absolvents, mākslinieks Klāvs Loris. Pigmenti tika dāvāti arī ikonu gleznošanas darbnīcas «Eleusa» māksliniecēm Annai Zandbergai-Šenkei un Evijai Rudzītei olas temperas krāsu testiem un ikonu glezniecībai.

Krāsu zemes Latvijā

Apzinot krāsu zemju resursus Latvijā (1. att.), veicot ģeoloģiskās rekognoscijas darbus vairākās dabiskā okera atradnēs, ievācot paraugus ķīmiskā un mineraloģiskā sastāva analizēm, projekta mērķiem tika izvēlēta krāsu zemju atradne Talicka (Madonas novadā, uz austrumiem no Aiviekstes pietekas Talickas). Tās ģeoloģisko slāņu sastāvs ir samērā mainīgs (1. tabula), augsts dzelzs oksīdu daudzums visos slāņos, īpaši 1,0–1,2 metru dziļumā, kur tā saturs Fe_2O_3 — 82,1%. Atradne pieļauj veidot divas tonalitātes okerus, izvēloties resursu no ģeoloģiskā slāņa kārtas ar lielāku vai mazāku dzelzs oksīda un kaļķu daudzumu tajā. Projekta mērķim tika izvēlēts slānis 0,5–0,8 metru dziļumā, kas modificēts,



1. ATTĒLS. Krāsu zemes Latvijā (www.rustearth.lv/map)

A — Talickas krāsu zemju atradne

1. TABULA. Krāsu zemju ķīmiskā sastāva analīzes Talickas atradnē, kas veiktas ar rentgenstaru fluorescences metodi

Talicka	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	MgO
0,2–0,5 m	32,5	49,9	6,6	1,4	0,6
0,5–0,8 m	50,8	24,9	8,5	1,9	0,5
1,0–1,2 m	82,1	4,5	6,3	2,8	0,2

2. TABULA. Blīvums un eļļas absorbcijas spēja (Talicka)

Blīvums	2,8 g/cm ³
Eļļas absorbcija	65 g/100 g

to apdedzinot, iegūstot dedzināta okera pigmentus. Krāsu zemju atradne Talicka literatūrā minēta kā viena no lielākajām dabiskā okera atradnēm Latvijā ar krājumu 4170 m³ [11]. Atradnē pētītā okera mineralogiskais sastāvs ir salīdzinoši viendabīgs, tā sastāvā dominē kalcīts un getīts. Ievāktie krāsu zemju paraugi tika analizēti Latvijas Universitātes Iežu pētījumu laboratorijā, kur tika veikta to žāvēšana, īpašību noteikšana (2. tabula) un apstrāde par pigmentiem.

Pigmentu izveide

Lai krāsu zemes kļūtu par pigmentiem — okeru, umbru vai sjēnu, atkarībā no iegūtā toņa tās tehnoloģiski jāapstrādā. Ievāktie paraugi tika žāvēti, sijāti caur 250 μm sietu, atdalot akmentiņus un organiskās vielas, lielāka izmēra agregātus smalcinot piestā. Iegūtās krāsu zemes tika pārbaudītas pēc sava toņa, tās suspendējot krāsas saistvielā (piemēram, linellā). Atkarībā no iegūtā toņa izmaiņām tika izvērtētas krāsu zemju izmantošanas iespējas — veidot dabisko okeru (dzeltenīgi brūnu pigmentu) vai dedzināta okera pigmentu (sarkanīgi brūnā krāsā). Dabas minerālus nav iespējams pārveidot, lai iegūtu noturīgu, piesātinātu toni, tie nepakļaujas modifikācijai, vienīgi apdedzināšanai. Apdedzinātu krāsu zemju pigmenti maina to sastāvā esošo dzelzs oksīdu fāzi. Getītam pārejot hematītā, mainās tā krāsas tonis.

Tika pieņemts lēmums krāsu zemju paraugus apdedzināt stikla kausēšanai paredzētā mufeļu krāsnī (*Rohde Glass Fusing Kiln*), jo tā pieļauj lielāka daudzuma paraugu vienmērīgu karsēšanu tā mineraloģiskā sastāva izmaiņai. Krāsu zemju paraugi tika karsēti 500–800°C atkarībā no to mineraloģiskā sastāva; zemāko temperatūru izvēlas, ja krāsu zemju sastāvā ir mālu minerālu piemaisījumi, kas paaugstinātā temperatūrā kļūst zaļgani, radot pigmenta toņa nevienādību. 500–550°C temperatūra bieži ir pietiekama, lai iegūtu vienmērīgu dedzināta okera pigmentu — kalcinētu krāsu zemi.

Apdedzinātie krāsu zemju pigmenti tika pakļauti malšanai ūdens suspensijā, lietojot planetārās dzirnavas (*Tencan XQM-4*), samazinot krāsu zemju granulometrisko sastāvu 6–10 μm robežās, kas ir atkarīgs no malšanas ilguma (250 rpm / 2 h — 10 μm; 250 rpm / 6 h — 6 μm). Žāvējot līdz gaissausam pigmentam, atdalot ūdens molekulas, bija jāraugās, lai pigmenti neveidotu agregātus [12], krāsu zemju maltā suspensija tika žāvēta, lietojot izsmidzinošo žāvētāju, bet iespējama arī liofilizācija. Projekta mērķiem lietotā iekārta izsmidzinošais žāvētājs (*Pilotech, Mini Spray Dryer YC-500*) karsta gaisa plūsmas ciklonā iztvaicē ūdens molekulas, bet cietā materiāla frakcija izkrīt tai paredzētā savācēja traukā, iegūstot pigmentu pulveri [13], un krāsu zemes ir kļuvušas par pigmentiem.

Eļļas krāsas formulācija

Katra pigmenta eļļas absorbcijas spēja ir nedaudz individuāla, tā tiek aprēķināta pēc standarta (2. tabula) un nevar tikt samazināta vai būtiski palielināta eļļas krāsā, kas nosaka pigmenta (~55%) un eļļas (~40%) proporciju kā būtiskāko — aizņemot ap 95% visas krāsvielas sastāva. Atlikušie ~5% ir krāsvielu piedevas, kas nodrošina tās īpašības un noturību. Pētījums parādīja, ka, dabisku krāsu zemju pigmentus saistot ar eļļu, piemēram, rafinētu linellu vai auksti spiestu valriekstu eļļu, to savstarpējā noturība nav ilga, ar laiku eļļa atslāņojas no pigmentiem, un krāsa sabrūk. Neatslāņošanās piedeva krāsās ir balināts, hidrogenēts vasks



2. ATTĒLS. Elīna Alkas glezna «Kūpošās zemes» (audeklis, eļļa, 40 × 50), 2018.



3. ATTĒLS. Krāsas tūbiņas un iepakojuma dizains.

(bišu vai rīcinieļļas vasks), krāsu stabilizēšanai tika pievienots arī alumīnija stearāts, krāsu filmas žūšanai — metāla sāļi (*kobalta sāļi*). Eksperimentāli krāsas struktūrai tika pievienota dedzināta smiltis, kas iejaukta eļļā. Mēģinājumi parāda, ka ir iespējams atjaukt pigmentus, padarīt tos tumšākus vai gaišākus. Formulētās eļļas krāsas filmas biežums tika praktiski pārbaudīts ar grindometru, krāsa tika uzvilkota uz krāsu filmām, lai testētu žūšanu, toni un noturību. Krāsai būtisks ir neatslāņošanās tests, kā arī reoloģija (krāsas plūstamība), krāsas toņa vienmērīgums un citas īpašības, kas tika vērtētas pētniecības projektā, izvēloties optimālo risinājumu.

Krāsu formulācija ir procentuāli iesvērtu saistvielu, stearāta, bišu vaska maisīšana augsta griezes stresa apstākļos ar homogenizatoru līdz vienmērīgai emulsijai. Pētījuma gaitā pievienotais pigmenta pulveris jāiemaisa ar mazākas jaudas mikseri, pēdējo pievienojot žūšanas aģentu iepriekš noteiktā proporcijā un atkārtoti maisot krāsu līdz tās vienmērīgam sastāvam. Lai arī krāsa šķiet gatava, tā atkārtoti tika pārmalta īpaši izstrādātās trīs ruļļu dzirnavās, sagraujot pigmentu agregātus, vienmērīgi izkliedējot lietoto saistvielu un piedevu emulsiju, samazinot krāsas filmas biežumu. Izrullētā krāsa tika pārbaudīta ar grindometru, uzklāta uz krāsu filmas, nosakot krāsas caurspīdīgumu un vienmērību. Gatavas krāsu filmai (75 μm) — Talickas dedzinātajam okeram — ir dziļš tumši sarkanbrūns tonis, tā ir necaurspīdīga un žūst 3–4 dienas, kas ir būtiski māksliniekiem, jo ļauj modulēt krāsu gleznā ilgākā laika intervālā.

Gatavie eļļas krāsas prototipi un pigmenti

Eļļas krāsas tūlīt pēc izstrādes tiek pildītas alumīnija tūbiņās, aizvākotas, nepieļaujot oksidācijas procesu sākšanos. Krāsas tūbiņas tiek aplīmētas ar izstrādāto etiķeti (3. att.) un dāvātas māksliniekiem, lai praksē pārbaudītu iegūto krāsu un radītu gleznas (2. att.). Projekta gaitā izstrādātie pigmenti ir kā atsevišķs produkts. Ikonu gleznotāji, kas izmanto olas temperas krāsas (pigments + olas dzeltenums + ūdens), tās veido īsi pirms gleznošanas, krāsa nav ilgi uzglabājama. Pētījuma gaitā iegūtos pigmentus ir iespējams izmantot arī citu masu tonēšanai.

Noslēgums

Izstrādātie krāsu zemju pigmenti, eļļas krāsu prototipi (dedzināts okers), olas temperas krāsu prototipi ļauj pozitīvi vērtēt projektā ieguldīto darbu un prognozēt izaugsmes iespējas. Krāsu pētniecības projekts atklāj iespējas izstrādāt arī citu toņu krāsas, mālu minerālu krāsvielas, kā arī, izmantojot uzkrāto zināšanu bāzi, paplašināt produktu klāstu. Īstenojot pozitīvu informatīvo kampaņu, pētniecības pilotprojekts viegli var tapt par tehnoloģijas un metodes bāzi vairākiem jaunuzņēmumiem, kuri vēlētos ar saviem produktiem konkurēt vietējā vai pasaules tirgū.

Pateicības

Izsaku pateicību par atbalstu krāsu ražošanas pilotprojekta realizācijā, restaurējot minerālkrāsu ražotni no Latvijas dabiskajām izejvielām, Latvijas Universitātei, mecenātam SIA «Mikrotīkls», Latvijas Universitātes fondam un tā izpilddirektorei Lailai Kundziņai personīgi.

Izmantotā literatūra

1. Peregrine P. N., Ember M. et al. 2001. *Encyclopedia of Prehistory*, vol. 1. Africa. Springer Science, New York, pp. 5–11.
2. Clottes J., Lewis-Williams D., Hawkes S. *The Shamans of Prehistory: Trance and Magic in the Painted Caves*. 1998. Harry N. Abrams, New York, p. 120.
3. Ball P. *Bright Earth: The Invention of Colour*. 2008. Vintage Books, USA, pp. 33–35.
4. Colalucci G. Michelangelo Buonarroti: Restoration of the Frescoes on the Vaulted Ceiling and the Last Judgment in the Sistine Chapel. 2016. *Conserv. Sci. Cult. Herit.*, vol. 16(1), pp. 89–108.
5. Juškevičs J. *Hercoga Jēkaba laikmets Kurzemē*. 1932. Valstspapīru spiestuves izd., Rīga, 163.–183. lpp.
6. Trade Map — International Trade Statistics (Product: 2821 Iron oxides and hydroxides; earth colours containing $\geq 70\%$ by weight). Available: <https://www.trademap.org> [skatīts 03.01.2019.]
7. Kokins A., Kostjukovs J. Staicele Paint Manufactory, Ochre Deposit of Reциems: A Retrospective Journey Through the History of Staicele Paint Manufactory and Evaluation of Production Technologies. 2017. *Mater. Sci. Appl. Chem.*, vol. 34(1), pp. 63–68.
8. The Color of Art Pigment Database: Pigment Red, PR: <http://www.artiscreation.com/red.html#PR1> [skatīts 14.01.2019.]
9. Price M. A Renaissance of Color: Particle Separation and Preparation of Azurite for Use in Oil Painting. 2000. *Leonardo*, vol. 33(4), pp. 281–288.
10. Price M. *Renaissance Mysteries*. 2016. Volume I: Natural Color. Page Publishing, USA, p. 239.
11. Kuršs V., Stinkule A. *Latvijas derīgie izrakteņi*. 1997. Rīga, Latvijas Universitāte, 162. lpp.
12. Kokins A., Kostjukovs J., Meija R. Evaluation of Limonite Concretions by Chemical and Mineralogical Composition, Their Formation Model. 2018. *18th Int. Multidiscip. Sci. GeoConference SGEM 2018 Proc.*, vol. 18(1.1), pp. 91–98.
13. Kokins A., Kostjukovs J., Zariņa L. Natural iron oxide (earth colour) deposits in Latvia: an assessment of the possibilities for their use in inorganic pigment manufacturing. 2018. *Color. Technol.*, vol. 134(6), pp. 491–500.

Pārdzīvojušā laulātā mantojuma tiesības latviešu tautasdziesmās

KRISTĪNE ROTBAHA, LU Filozofijas un socioloģijas institūta zinātniskā asistente

LU fonda 2014./2015. akadēmiskā gada profesora Ernesta Felsberga piemiņas stipendijas un 2015./2016. akadēmiskā gada padomju totalitārā okupācijas režīma izpētes stipendijas stipendiāte

Latviešu folkloras kā ieražu tiesību avota pētniecība ir visai komplicēta. Latvijā ieražu tiesības nekad nav tikušas pilnībā kodificētas. Arī latviešu folkloras materiāls neļauj spriest par kādu vienotu tiesību sistēmu senatnē. No apjomīgā krājuma tikai nelielu daļu var definēt kā juridisko jeb tiesību folkloru. Jāņem vērā, ka jebkura tiesību rekonstrukcija pēc šiem netiešajiem tiesību avotiem nedrīkst kļūt par dogmu, bet saglabā hipotētiska rakstura secinājumus. Raksts neapskata plašāku mantošanas ieražu esamību latviešu folklorā, lai gan to līdzšinējā pētniecība ir izmantoto tekstu fons. Uzmanība šajā rakstā koncentrēta uz tautasdziesmu tekstiem jeb dainām, kas vēsta par atraitņu jeb, lietojot mūsdienu juridisko terminoloģiju, pārdzīvojušā laulātā mantojuma tiesību, un uzrāda tradīciju veidā no paaudzes paaudzē nodotās zināšanas un prakses, kas regulējušas atraitņu tiesības un mantošanas kārtību senatnē, veidojot tautas tiesisko domu un ietekmējot tiesību kultūru līdz mūsdienām.

Atslēgvārdi: **juridiskā folklorā, ieražu tiesības, tautasdziesmas, mantojums, atraitne**

levads

Tiesības ir īpaša kultūras nozare — tāpat kā valoda vai māksla. Latviešu folklorā pamatoti tiek uzskatīti par valodas pieminekli, vienlaikus tā ir nezuodošs apliecinājums mūsu senču tiesiskajai domai un kultūrai. Jāatzīst, ka folkloras materiāla precīza datēšana ir apgrūtināta, taču varam domāt, ka «tautas dziesmas ir tik vecas, cik veca ir pati tauta, bet to relatīvais vecums tajos tekstos, kas mums saglabāti, iet atpakaļ tik tālu, cik veci ir tie kultūras fakti, kas tajos atspoguļojas. Šāds uzskats dod mums iespēju [...] redzēt tautas dziesmās [...] vēsturiskajam atskatam noderīgu materiālu». [1]

Tiesību etnoloģijai un antropoloģijai Latvijā joprojām tiek pievērstas nepamatoti maz uzmanības. Starpkaru periodā atraitņu tiesības, salīdzinot latviešu tautasdziesmu tekstus ar senkrievu un ģermāņu ieražu tiesību kodeksiem un vietējiem tiesību avotiem, pētījis jurists Jānis Sūna [2]. Pēckara periodā emigrācijā tiesību ieražas tautasdziesmās pētījis Arveds Švābe [3]. Nelielu atraitņu agrīno tiesību apskatu devuši tiesību vēsturnieki Viktors Kalniņš [4] un Jānis Lazdiņš [5]. Atraitņu sociālajam statusam sabiedrībā latviešu literatūras kontekstā pievērsusies literatūrzinātniece Eva Eglāja-Kristsone [17]. Lai gan vēsturnieka Jāņa Bērziņa izteiktais secinājums brīdināja, ka kādas parādības meklēšana Latvju dainās ir «grūts, neproduktīvs un atbaidošs darbs» [6], autore vairāku gadu zinātniskie pētījumi veltīti mantojuma ieražu tiesībām senatnē, kā tiesību avotu izmantojot latviešu folkloras materiālu. Ieražu tiesībām Civillikumā atvēlēta sekundāra loma, tomēr nereti tiesiskajās savstarpējās attiecībās darām tā, kā pieņemts dzimtā vai plašākā paziņu lokā. Kāds vēlas mantojumu «norakstīt» vecākajam dēlam, kāds piesakās uz tēva plašo zemes mantojumu, lai gan tur faktiski jau gadiem tēvam palīdzējis un saimniekojis brālis, kurš uzskata, ka mantojums pienākas tikai viņam. Kāda mantojuma atstājēja laulātā iesaistās juridiskā strīdā ar mirušā bērniem no pirmās laulības. Tie ir kāzusi, ar kādiem esmu saskārusies juridiskajā praksē. Novērotais ļāvis izvirzīt pieņēmumu, ka mantojuma novēlēšanā un dališanā nereti rīcība balstās senajos *tēvu tēvu* likumos — *mores paganorum* — ieražu tiesībās. Arī Civillikums pieļauj mantojuma labprātīgu dališanu mājas kārtībā [7].

Ieražu tiesības uzskatāmas par senākajiem tiesiskās uzvedības noteikumiem, kas pastāvēja nerakstītā formā un tika nodotas no paaudzes paaudzē. Ieražu tiesības, kuras kā tiesību tradīcijas gadu simteņiem bija iesakņojušās tautas apziņā, laikiem mainoties, tika pielāgotas sabiedrības vajadzībām un pierakstītas. Pirmās rakstītās liecības, kas vēsta par atraitņu mantojuma tiesību, atrodamas vietējo zemju jeb Livonijas zemnieku tiesībās (turpmāk tekstā — Zemnieku tiesības), kas, domājams, ir vecākais Livonijas zemnieku ieražu tiesību pieraksts 13. gadsimtā. Jāņem vērā, ka ieražu tiesību izcelsmes vai piederības uzskatīšana par lokālām ir tikpat utopiska kā visu folkloras motīvu nacionalizēšana. Jāņem vērā akulturācijas¹ sekas un tiesību recepcija².

1 Akulturācija ir process, kas noris, ilgstošā saskarsmē nonākot atšķirīgām kultūrām piederīgiem cilvēkiem. Akulturācijas ietekmē notiek pārmaiņas saskarsmē nonākušo personu vai grupu kultūrās, jo tās savstarpēji ietekmējas un bagātinās.

2 Ar tiesību recepciju saprot citā valstī vai laikā radusies tiesību aizgūšanu un pielāgošanu attiecīgās sabiedrības ekonomiskajiem, sociālajiem, kultūras u. c. apstākļiem.

Problemātiska ir tautasdziesmās uzrādīto ieražu izcelsmes datēšana. Ja kāda tiesību norma uzrādīta rakstītajos avotos un atspoguļota arī folkloras materiālā, var pieņemt, ka šīs tiesību folkloras motīvs folklorā radies ne vēlāk kā attiecīgās tiesību normas pieraksts. Ieraža, kas atspoguļota tautasdziesmā vai kādā citā latviešu folkloras vienībā, jau kādu laiku pastāvējusi sabiedrībā un tiek atspoguļota kā atpazīstama prakse.

Lai gan latviešu folkloras materiāls, sevišķi pasakas, bagātīgi vēsta par nabaga atraitnēm³, šajā darbā kā avots izmantots Krišjāņa Barona sakārtotā un rediģētā izdevuma «Latvju dainas», saukta arī par Dainu skapi, elektroniskā versija [8], tekstā norādot dainas (saīsinot — LD) kārtas numuru krājumā. Ne vienmēr dainu teksts nepārprotami uzrāda tiesību pazīmi. Analizējot folkloras tekstus, uzmanība pievērsta kontekstam, kas liecina par atraitņu tiesisko statusu. Rakstā tautasdziesmās atrodamās nedrošās liecības salīdzinātas ar rakstītajiem tiesību avotiem, kas vienlaikus ir arī etnogrāfiski tiesību liecinieki, — Livonijas zemju (zemnieku) tiesībām, kas datētas, sākot ar 13. gs., senkrievu ieražu tiesībām, kas uzrakstītas ap 1016. gadu, sauktas par Krievu tiesu, 19. gs. Krievijas impērijas guberņu tautas tiesību ieražu krājumu, 20. gs. sākuma Latgales ieražu tiesību apkopojumu. Ieražu tiesību nospiedumi izvērtēti Latvijas Republikas Civillikuma 2017. gada redakcijā.

Raksta mērķis ir sniegt padziļinātu izpratni par senākajām atraitņu tiesībām mantojuma tiesību kontekstā, izmantojot latviešu tautasdziesmu tekstus kā ieražu tiesību avotu. Raksts adresēts ne vien tiem savas jomas speciālistiem, kuru zinātnisko interešu lokā iekļautas tiesības vai folklorā, bet visiem, kurus patiesi interesē latviešu tautas kultūra un vēsture.

Atraitnes statuss sabiedrībā

Vārdu *atraitne* un *atraitnis*, tautasdziesmās minēti arī *atraikne*, *akraiknis*, pamatā ir indoeiropiešu vārda sakne

**rei-* (tecēt), no kā veidojies darbības vārds **riet-ti* (riest), kam pievienots piedēklis *at-*. Vārda sākotnējā nozīme — tāds, kas atrisis, atraisījies. [9: 84. lpp.] Šis senās cilmes vārds kā juridisks termins joprojām tiek lietots arī mantojuma tiesību kontekstā un ir pat iestrādāts Civillikumā. Senajā patriarhālajā sabiedrībā atraitnei un atraitnim ir atšķirīgas sociālās lomas un tiesības. Atraitnis atrodas saimnieciski izdevīgākā pozīcijā, kamēr atraitne, *atraisoties* no vīra, zaudē materiālo labklājību. Lai gan atraitnei ir tādas pašas tiesības uz precībām, pūru, mantojumu kā neprecētai meitai, tomēr redzams, ka viņas sociālais statuss ir zemāks. Atraitne tiek pielīdzināta auzām, kas zemturībā tiek vērtētas kā otršķirīga labība.

Sēju auzu lielu lauku,
Ņēm' atraitni līgaviņu.

Vaj auziņa ne labība,

Vaj atraitne ne līgava? (LD 22172-10)

3 Vacūs laikūs dzeivuoja šai pasaulē viņa vaca atraitne [...]. Jī beja tyk naboga, ka nebeja kū ēst, ni kur puorgulēt nakti.[...] Jai nabeja nikaida monta, tikai viņa zūss, kura vaduoja vacū atraitni (P. Šmits. Latviešu pasakas un teikas)

Saprotams, ka «augstvērtīgāka» *prece* (atvasinājums — *precēt, precinieks*) būtu bagāta *mātes meita*, tomēr šajā piemērā izpaužas tolerance pret atraitnēs palikušu sievieti. Šādu attieksmi veidoja paša precinieka ierobežotā rocība.

Labā mātes meita, kas folklorā faktiski nozīmē turīgas dzimtas atvasi, tradicionāli tika izprecēta tikpat turīgam *tēva dēlam*, kurš manto savu dzimtas priekšteču nekustamo īpašumu jeb *tēvu zemi*, pretstatā *zemiem ļaudīm* — kalpiem, iegātņiem, bandiniekiem, bāreņiem, kā arī vergiem jeb dreļļiem, kam tiesībspējas nebija.

Mūsdienās likumdevējs noteicis, ka pārdzīvojušais laulātais saņem pusi no mantojuma, ja mirušam nepaliek lejupējo mantinieku, bet visu mantojumu, ja nav ne pēcnācēju, ne brāļu vai māsu un to pēcteču. [10] Šādas atraitnes tiesības izveidojušās laikā, kad pastāvēja spēcīgas dzimtas saites un noteicošais mantošanas kārtībā bija piederība pie vīra (tēva) dzimtas. Apprecoties sieviete zaudēja saikni ar savu dzimtu un kļuva piederīga vīra dzimtas. Mirušā izprecinātās māsas (meitas) savukārt tika pieskaitītas vīru dzimtām un mirušā brāļa (tēva) mantojumā netika ieskaitītas.

Meita mana, meita mana,
Kad guleja šūpulī;
Kad tautām roku sniedza,
Nava vairs mana meita. (LD 1983)

Tādējādi latviešu tiesību folkloras piemēros saskatāmas agnātiskās radniecības pazīmes, kuras pazīst arī romiešu tiesības.

Atraitnes tiesības uz mantojumu

Apskatot atraitnes tiesības tautasdziesmās, būtu izšķirama tāda atraitne, kura, ieprecoties vīra dzimtas lielģimenē, nokļuvusi nedalītā saimniecībā, kur kopā ar vīru saimniekojuši vīra brāļi, no tādas, kas dzīvojusi vīra atsevišķā saimniecībā. Pirmajā gadījumā, zaudējot sociālo un materiālo aizstāvību, atraitne tiek pielīdzināta kalponei. Atraitnei jālūdz uzturs vīra radiem, arī saimniekošana tai iedalīta visnelabvēlīgākajā laikā.

Agri, agri dūmi kūp
Atraitnites namiņā;
Tai javāra tautiņām
Svētu rītu azaidītis. (LD 27825-0)

Pat ja atraitne patur pūra mantu vai pat manto vīra kustamu mantu, tas viņu materiāli nenodrošina, jo zeme paliek lielģimenes vīriešu (*tautiņu*) kopīpašumā, un tiem nu jānodrošina atraitnei mūža uzturs.

Arajiņa līgaviņa,
 Dod maizites atraiknei;
 Dievs atdos arajam
 Pa vadziņas galiņam. (LD 27831-0)

Vēl kāda interesanta tiesība ir nedzemdējušas atraitnes prasījums pret mirušā vīra brāļiem par vainaga maksas atlīdzību. Te varētu runāt par neizmaksātu līgavas izpirkuma maksu vai kompensāciju par sagaidāmo, bet nenodrošināto uzturu:

Maksajiet, dieveriņi,
 Manu skaistu vainadziņ',
 Kam tas jūsu brāleliņš
 Ilgu mūžu nedzīvoj'. (LD 27867-0)

Ja mirušajam bijusi sava atsevišķa saimniecība, atraitne varējusi turpināt tajā saimniekot. Zemnieku tiesības noteica, ka atraitnei bijušas tiesības tikai uz vīra kustamu mantu. [11: 10. p. 1. d.] Tautasdziesmas liecina, ka viņa lietojusi arī lauku zemi, nav gan zināms — ar īpašuma vai valdījuma tiesībām.

Atraitnīte gauži raud
 Tīrumiņa galiņā:
 Bij zirdziņš, bij arkliņš,
 Arajiņa vien nebij. (LD 27849-2)

Tas gan iespējams tikai tad, ja mirušajam nepaliek pēcnācēji vai brāļi vai nepastāv novēlējums mantot ne vien atstāto nekustamo īpašumu, bet arī precēt atraitni. Tautasdziesmas vēsta par kādu arhaisku tiesību institūtu, kas liecina par jaunās atraitnes sociālo aizsardzību vīra vai līgaviņa nāves gadījumā.

Tas ir kā pēdējās gribas rīkojums precēt pārdzīvojušo laulāto vai sadērēto, ar vārdu *līgava* (variantos — *laudava*) apzīmējot kā vienu, tā otru. Līgava tiek novēlēta jaunākajam bāliņam:

Paliek manis kumeliņis
 Apsedlotis, neiejāts,
 Paliek mana līgaviņa
 Sadereta, nepreceta.
 [..]
 Jaunajami bāliņami,
 Tam es savu mantu došu, [..]
 Lai prec manu līgaviņu,
 Lai jā man kumeliņu. (LD 31907-4),

vai vispārīgi tam, kam novēlēts viss mantojums:

Paliek manim bērzu birzs,
Paliek jauna ļaudaviņa.
Kas to manu birzi lida,
Lai ņem manu ļaudaviņu. (LD 31907-3)

Arveds Švābe šādu mantojuma tiesību saista ar tā saukto levirātu: «iera-dumu, pēc kura jaunākam brālim vai kādam radniekam jāprecē vecākā brāļa atraikne. Arī latviešos šīs normas attiecās ne vien uz brāļiem, bet uz visiem viena novada bāliņiem.» [12] Šādi precedenti paredzēti situācijām, kad vīrietis dodas karā, izteiktais novēlējums stājas spēkā viņa nāves (faktiskas vai pieņemtas) gadījumā. Tautas atmiņā liecības par šo arhaisko mantošanas ieražu saglabājušās vismaz līdz 20. gs. vidum.

Daugavpils apriņķī 20. gs sākumā pierakstīta ieraža, kas noteica atraitnei valdījuma tiesību uz mirušā mantu, tomēr, gadījumā ja tā no jauna apprecas, viņa šo tiesību zaudē, un mantojums nonāk mirušā brāļiem, ja tādi ir. [13] Te līdzība ar Krievu tiesā iekļauto senkrievu ieražu tiesību principu, saskaņā ar to sievietai nekas nepienākas. [14: c. 85, 86] Tāda, bez mantas palikusi, atraitne tiek pielīdzināt bārenei:

Snōtineite, šnuraucēņa,
Tei dubļēšu bridējeņa;
Atraitēte, bōrineite,
Tei osoru traucējeņa. (LD 4262)

Tomēr atraitnes otrreizēja precēšanās ir bijusi pierasta un saimnieciski nepieciešama, jo palikšana mirušā vīra saimē kalpones statusā ir gan saimnieciski, gan tiesiski neizdevīga, sevišķi, ja atraitne vēl gados jauna.

Atraitnes dalīša-nās ar bērniem

Saskaņā ar zemnieku tiesībām atraitne iestājās mantošanas tiesībās tikai tādā gadījumā, ja mirušajam nepalika tiešo mantinieku — dēlu. [11: 10. p. 3. d., 11. p. 1. d.] Tādējādi viņa pielīdzināta neizprecinātai meitai, un uz viņu attiecināms tautasdziesmās ietvertais princips:

Tai meitai tēva zeme,
Kam neviena bāleliņa. (LD 3755)

Māte ar meitām manto līdzvērtīgi, bet mantojumu pārvalda kopīgi. Kad kāda no viņām, arī māte, precas, meitas ar māti līdzīgi dalās mantojumā. Šī kārtība fiksēta zemnieku tiesībās un atspoguļota tautasdziesmās.

Nāc, Laimiņa, dalībās,
Māt' ar meitu dalijās:
Pušu šķīra govīs, vēršus,
Pušu baltas villanītes. (LD 16412-2)

Tāpat atraitne nedalīti pārvalda mantojumu, kamēr ir mazgadīgi mantinieki — dēli. Tā kā folkloras materiālā ir maz liecību, kad, dēlam apņēmot sievu, zemi izdala māte, ne tēvs, jāpieņem, ka tie attiecināmi uz atraitnes tiesību.

Saka bārgu dēlu māti,
Dēlu māte gana laba:
Savu zemi ta atdeva,
Savu dēlu arajiņu. (LD 23372)

Atraitnes manta

Ja mirušajam paliek pieauguši leļupējie vīriešu kārtas mantinieki, atraitne nemanto, šajā gadījumā viņas labklājība atkarīga no dēla sievas, līdzīgi kā bezbērnu atraitnei no vīra radiem.

Atraiknīte maizes prasa
Uz araja līgaviņas:
Dod, araja līgaviņa,
Jele kādu launadziņu! (LD 27839)

Gan tautasdziesmās, gan tiesību avotos atrodamas liecības par atraitnes mantojuma daļā ietilpstošās mantas sastāvu. Kā atraitnei piederošs tautasdziesmās uzrādīts *tirumiņš, sētiņa, namiņš, istaba, arkliņš un zirdziņš*.

Tautasdziesmās, līdzīgi citiem ieražu tiesību avotiem, ar jēdzienu manta jāsaprot kustama manta — drēbes, saimniecības inventārs, lopī, nērti — arī ēkas, bet ar mantojumu — nekustamais īpašums — lauki, meži, arī bišu koki. Mūsdienās atraitņu tiesības ir gan plašākas, toties paplašinātais mantinieku loks vairāk ierobežo viņu mantojuma daļu. Tautasdziesmās nekustamā īpašuma vienības ir atraitnes rīcībā, tātad tiek raksturoti tie gadījumi, kad jau pastāvējusi dalīta saimniekošana. Daļu mantas vīrs varēja nodot sievas īpašumā vēl dzīves laikā.

Zemnieku tiesībās šāda mantas nodošana sievas rīcībā atrunāta ar izņēmumu attiecībā uz nekustamo īpašumu: «Ja vīrs ņem sievu, tad viņš var tai dot visu mantu, izņemot tīrumus, pļavas un (bišu) kokus.» [15] Tas būtu uzskatāms kā kopējas saimniecības princips, mūsdienās pazīstams kā laulāto kopmanta. Līdzīga bijis pie senkrieviem: «Ko tai vīrs nodevis, tam tā ir saimniece.» [14: c. 88] Arī latviešu folklorā atrodams, ka sieva valda pār mantu, viņai pieder «atslēgas vara».

Neviens mani nezinaja,
Ka es biju saimeniece;
Situ roku pie skoteles,
Lai skaneja atslēdziņas. (LD 20978-2)

Ir vēl kāds precedents, kad sievai tika piešķirtas atraitnes tiesības uz dzīva vīra mantu. Ja vīrs sievu pameta, viņa saskaņā ar pierakstītajām zemnieku tiesībām kļuva par dzīva vīra atraitni ar visām atraitnes tiesībām. Folklorā šis mantiskais princips neatspoguļojas, jādodomā, tas nenostiprinājās kā vispārpieņemta tiesiska ieraža, gluži otrādi, redzams, ka šķīroties manta tiek dalīta laulāto starpā.

Šķīramies mēs, tautieti,
Lai gan mīļi dzīvojam;
Šķīrsim pušu dēļu gultu,
Smalkus linu paladziņus. (LD 26909-2)

Domājams, ka likumdevējs mēģinājis stiprināt kristīgās baznīcas noteikto vienīgās laulības principu un ierobežot šķīršanos un daudzsieviību, ko uzrāda jaunāka slāņa tautasdziesma ar kristietības ietekmi. Uz to norāda laulības institūts un baznīcas rituāla termins *laulāt*, kas jau bija izveidojies lībiešu draudzēs un ko katoļu priesteri un mūki ieviesa senlatviešu reliģiskajā aprūpē [9: 508. lpp.].

Laulà mani, mācītais
Jele daudz maz ciešāk;
Man aizbēga pirmais vīrs,
Pasvabaži salaulats. (LD 16039-3)

Atraitņa tiesības

Atraitņa tiesības tautasdziesmās pieminētas ļoti fragmentāri. Atšķirībā no atraitnes atraitņa sociālais statuss sabiedrībā nemainās.

Drīz iekūru uguntiņu
Deģošās pagālēs;
Drīzi mantu ieguvos,
Pie atraitņa aiziedama. (LD 22175-0)

Kā mirušās atsevišķās mantas jeb pūra mantinieces parasti uzrādītas meitas, retāk — leļupējie un augšupējie vispār, neizdalot asinsradniekus.

Vakar māti glabajam,
Šodien mantu dalīsim:

Citam cimdi, citam zeķes,
 Citam vecas sietaviņas.
 Vecajai vedeklai
 Bez piedurkņu kažociņš. (LD 27824-1)

Tā kā pūrs ir būtiska precību līguma (no kā atvasināti vārdi *līdzināt*, *līgava*) un preces sastāvdaļa, tad līgums uzskatāms par izbeigušos, ja sieva mirusi, pirms viņa izpildījusi daļu no saistībām, t. i. dzemdējusi pēcnācēju, un šādā gadījumā pūrs atdodams atpakaļ sievas radiem. Līdzīgs princips bijis baltkrieviēm, kur pūrs «tiek atgriezts mirušās vecākiem vai pat sāņu radiem». [16]

Tomēr tautasdziesmas uzrāda kādu mantu, ko manto mirušās saderinātais. Tas bijis mirušās gredzens, ko viņa dāvinājusi iecerētajam *tautu dēlam*. Folklorā gredzens var būt *zelta* vai *zaļa vara*, taču par materiālo liela ir pievienotā emocionālā vērtība.

Mirtin miršu es, māmiņa,
 Pūru manu izdalat: [..]
 Manas pašas mīļakam,
 Tam to zelta gredzentiņu. (LD 27812-19)
 (variants) Tam puīšam es iedevu
 Savu zelta gredzentiņu. (LD 27812-14)

Šī arhaiskā ieraža, līdzīgi kā saderināšanas institūts, saglabājusies cauri laikiem un nostiprināta Civillikumā: «Nav jādod atpakaļ dāvanas, ja laulība nenotiek tāpēc, [...] ka saderinātais dāvinātājs miris.» [10: 27. p. 2. d.]

Iespējams, mirušās pūrs palicis atraisītā rīcībā, ja palikuši mazgadīgi bērni vai tāds bijis mirušās vēlējums.

Lūgšus lūdzu tautietim
 Manas drānas neizdot;
 Valkā manus linu kreklus,
 Liec villaines oderē. (LD 27362-0)

Šādi var izskaidrot tos piemērus, kad meitai pūra mantu dod nevis māte, bet tēvs, kurš kā mantojuma aizgādņis izdala meitai mātes atstāto mantojumu.

Mans tēvs, mans tēvs,
 Ko tu savai meitai vēli?
 Pilnu pūru linu kreklu,
 Kūtī govīs raibaliņas. (LD 3751-0)

Šā principa atblāzma civiltiesībās saglabājusies līdz šodienai. [10: 394. p.]

Secinājumi

Atraitne mantošanas tiesībās tiek nostādīta vienādā mantošanas pakāpē ar neprecētajām meitām, viņai ir tādas pašas tiesības gan uz nekustamu īpašumu, gan kustamu mantu, t. i., atraitne nemanto, ja paliek mantinieki dēli. Atraitnes tiesības tiek ierobežotas, ar īpašuma un mantas piederēšanu saprotot kā tās lietošanu un pārvaldīšanu ar nepilnām īpašumtiesībām, dalot tās ar meitām. Atraitnei tiesības uz mirušā vīra mantojumu ir plašākas, ja viņai paliek mazgadīgi bērni. Bezbērnu gadījumā atraitnei piešķirtas divējas iespējas — bārenes, tātad — kalpones, statuss svaiņa saimē, līdz viņa otrreiz apprecas, vai iespēja ņemt iegātņi un pārvaldīt saimniecību gadījumā, ja mirušajam nav citu vīriešu dzimtes mantinieku.

Pūra manta folklorā vienmēr ir sievas atsevišķs īpašums. Saderētā dāvinātās lietas, piemēram, gredzens, viņa nāves gadījumā mantojuma masā netiek iekļautas. Folklorā uzglabājusies arhaiskā tiesība uz mirušā brāļa atraitni, ko varētu pieskaitīt gan pie labumiem, gan pienākumiem, kas laikam tomēr atkarīgs no subjektīvajiem apstākļiem. Atraitņa tiesības un saistības apskatītajā materiālā aprobežojas ar viņa tiesībām uz dažām sievas apģērba un auduma vienībām, kā arī pirms laulības sievas dāvināto mantu, pārējo mirušās bezbērnu sievas pūru atgriežot viņas dzimtā. Atraitnis pārvalda mirušās meitām pienākošos pūra daļu, līdz viņas tiek izprecinātas.

Izvērtējot senāko ieražu tiesību avotu — folkloru, var izprast kontekstu, kādā veidojušās tiesiskās tradīcijas, un saskatīt nacionālo tiesību kontinuitāti mūsdienu tiesiskajā kultūrā.

Izmantotā literatūra

1. Straubergs K. Tautas dziesmas un to dziedāšana. 1952. *Latviešu tautas dziesmas*, I sēj. Imanta, Kopenhāgena, 30. lpp.
2. Sūna J. Atraitnes un atraitņa mantošanas tiesības pēc Latvju daiņām. 1923. *Tieslietu Ministrijas Vēstnesis*, Nr. 7, 260.–276. lpp.
3. Švābe A. Mantojuma tiesības. 1953. *Latviešu tautas dziesmas*, II sējums. Imanta, Kopenhāgena, 83.–85. lpp.
4. Kalniņš V. Agrīno valstisko veidojumu un sākotnējo tiesību izcelšanās Latvijas teritorijā. 1952. *LVU Zinātniskie raksti*, 12. sēj. Rīga.
5. Lazdiņš J. Baltu un līvu privāttiesību paražas. 2006. *Jurista Vārds*, Nr. 32. Pieejams: <http://www.juristavards.lv> [skatīts: 09.02.2019.]
6. Bērziņš J. *Par mūsu tautas dziesmu kā vēstures avotu izlietošanu*. 2005. [b. i]. Rīga, 20. lpp.
7. Latvijas Republikas Civillikums, 731. p. Pieejams: <https://likumi.lv/doc.php?id=225418> [skatīts 09.02.2019.].
8. K. Barona Dainu skapja elektroniskā versija. Pieejams: www.dainuskapis.lv [skatīts 09.02.2019.].
9. Karulis K. *Latviešu etimoloģijas vārdnīca*. 2001. Avots, Rīga.
10. Latvijas Republikas Civillikums, 396. p. Pieejams: <https://likumi.lv/doc.php?id=225418> [skatīts 09.02.2019.].
11. Rīgas arhibīskapijas zemnieku tiesības. Pieejams: <https://www.historia.lv/dokumenti/latgalu-tiesibas-jeb-rigas-arhibiskapijas-zemnieku-tiesibas-teksts-lejasvacu-valoda-un> [skatīts 09.02.2019.].
12. Švābe A. *Raksti par latvju folkloru*. I. 1923. J. Roze, Rīga, 29. lpp.
13. Bukovskis V. Īss apskats ieradumu tiesību noteikumiem Latgalē, laucinieku vidū, mantošanas lietās. 1931. *Tieslietu Ministrijas Vēstnesis*, Nr. 11, 12, 486. lpp.
14. Пространная руская правда по Троицкому списку второй половины XIV в. Pieejams: <http://www.hist.msu.ru/ER/Etext/RP/prp.htm> [skatīts 09.02.2019.].
15. Kuršu un zemgaļu zemnieku tiesības, 27. p. 1. d. Pieejams: <https://www.historia.lv/dokumenti/kursu-tiesibas-jeb-kursu-un-zemgalu-zemnieku-tiesibas-teksts-lejasvacu-valoda-un-tulkojums> [skatīts 09.02.2019.].
16. Брандт А. О. Юридические обычаи у крестьянъ Могилевской губернии. 1901. *Сборникъ народныхъ юридическихъ обычаевъ*, Том II. С. А. С. Суворов, Петербургъ, с. 101.
17. Eglāja-Kristsons, E. Blaumaņa atraitnes: sociālās lomas un dzimtes reprezentācija. *Rūdolfs Blaumanis: teksts un konteksts*. 2013. Kalniņa I. (red.), LU Akadēmiskais apgāds, Rīga, 185.–204. lpp.

Rietumkrievijas brīvprātīgo armijas uzbrukums Rīgai 1919. gada 8.–19. oktobrī: politiskie un militārie aspekti

ROBERTS RASUMS, Latvijas Universitātes fonda
2016./2017. akadēmiskā gada Ainas Galējas
piemiņas stipendiāts un 2017./2018. akadēmiskā
gada prof. Ernesta Felsberga piemiņas stipendiāts

Bermontiāde ir vienīgais Latvijas Neatkarības kara posms, ko Latvijas armija izcīnījusi bez tieša sabiedroto sauszemes spēku atbalsta pret skaitliski un materiāli daudz spēcīgāku pretinieku. Neraugoties uz to, ka Bermontiādi varētu uzskatīt par visaktīvāk pētīto Latvijas Neatkarības kara posmu, tās izpēte aprobežojas ar militāro aspektu pētniecību, neiedziļinoties jautājumā, kādu mērķi vēlējās sasniegt vācu-krievu spēki reģionā. Ņemot vērā militārpolitisko procesu specifiku Austrumeiropā 1919. gadā (augstas intensitātes militārs konflikts, kurā iesaistīti ierobežoti militāri resursi un nav skaidri nosakāmi vai arī regulāri puses maina politiskie sabiedrotie un pretinieki), nav iespējams izprast militārās operācijas plānošanu un specifiku, to neiekļaujot vispārējā politiskajā kontekstā. Šādi ir jāapskata arī Rietumkrievijas brīvprātīgo armijas uzbrukums Rīgai (operācija *Blitzschlag*). Šajā rakstā tiks apskatīts Bermontiādes pirmais posms — laiks, kad Rietumkrievijas brīvprātīgo armija bija nozīmīgākais militārais spēks Latvijā. Tradicionāli tiek pieņemts, ka Rietumkrievijas brīvprātīgo armijas darbība Latvijā primāri ir vērsta pret Latvijas valsts eksistenci, lai būtu iespējams saglabāt Vācijas ietekmi reģionā. Ņemot vērā Pāvela Bermonta un Rīdigers fon der Golca atmiņas, kurās Latvijas jautājumam ir pievērsta maza uzmanība, šāds pieņēmums ir apšaubāms, tāpēc ir nepieciešams apskatīt uzbrukuma operacionālos mērķus politiskās situācijas kontekstā.

Atslēgvārdi: **Bermontiāde, Latvijas Neatkarības karš, Pāvels Bermonts, Rīdigers fon der Golcs**

Politiskā situācija Latvijā 1919. gada otrajā pusē

Lai arī Vācija Pirmajā pasaules karā Rietumu frontē bija cietusi sakāvi, 1918. un 1919. gadā tā vēl joprojām palika nozīmīgākais militārpolitiskais spēks

Austrumeiropā, kur tā karu bija beigusi ar uzvaru, Vācijas armijas vienībām apstājoties Petrogradas pievārtē. Lai arī Baltijā dislocētā 8. armija principā beidza eksistēt, salīdzinoši ātri tās vietā stājās t. s. dzelzs vienības¹, kas tika apvienotas VI rezerves korpusā, kura vadību 1919. gada janvārī uzņēmās vācu ģenerālis grāfs Rīdigers fon der Golcs (*Rüdiger Graf von der Goltz*). Līdz pat 1919. gada vidum cīņa ar boļševismu apvienoja gan latviešu, gan vācu, gan Antantes pusī, taču pēc lielinieku ofensīvas Baltijā apturēšanas savstarpēja konfrontācija starp t. s. balto spēkiem² un nacionālajām kustībām, kā arī starp Antanti un Vāciju kļuva neizbēgama.

Vācu sakāve un tam sekojošais Strazdumuižas pamiers šķietami pielika punktu vācu plāniem Baltijā. Dzelzs divīzijas hauptmaņa Heinca Guderiana ziņojumā par situāciju Latvijā jūlija vidū tika minēts, ka «politiskais stāvoklis Latvijā pēc Niedras kabineta atkāpšanās ir mainījies pašos pamatos [...] Vācijas politika, kas bija balstīta kopīgā ceļā ar Latviju, ir piedzīvojuši kuģa katastrofu». [3: S. 473] Tā kā Antante pieprasīja vācu spēku evakuāciju no Latvijas, fon der Golcs izeju atrada, saformējot Rietumkrievijas Brīvprātīgo armiju, ko nomināli komandēja Pāvels Bermonts³. 1919. gada 8. oktobrī šie spēki sāka

operāciju *Blitzschlag* — plašu uzbrukumu Latvijas armijas grupējumam, kas aizsargāja Rīgu, sākot posmu, kas ieguvis nosaukumu Bermontiāde.

Bermontiāde nosacīti ir iedalāma trīs posmos — 1919. gada 12. jūnijs — 1919. gada 10. oktobris (operācija *Blitzschlag*), 1919. gada 15. oktobris — 11. novembris (cīņas par Rīgu) un 1919. gada 13. novembris — 3. decembris (Rietumkrievijas armijas padzīšana no Latvijas). Šajā laikā Latvijas Neatkarības karš bija sasniedzis savu kulmināciju — Latvijas armija bija spiesta karot divās frontēs, Latvijas Republiku *de iure* nebija atzinusi neviena no pasaules lielvalstīm, tās teritorijā uzturējās piecu dažādu valstu armiju spēki⁴, un kuriem trīs (Vācijas, Padomju Krievijas un Rietumkrievijas) bija vērtējami kā naidīgi Latvijas Pagaidu valdībai. Lai arī *de facto* Latvijas Pagaidu valdība saņēma Sabiedroto politisku atbalstu, brīdī, kad sākās Rietumkrievijas armijas uzbrukums, militāri Pagaidu valdība bija palikusi viena. Situācijas nevienlīdzību ilustrē tas, ka Dzelzs divīzijā vien bija vairāk ložmetēju nekā visā Latvijas armijā kopā.

Kā liecina britu informācija un vācu puses avoti, līdz pat septembra vidum fon der Golcs operācijas plānoja sektorā starp Daugavpili un poļu fronti, un tāpēc bija nepieciešams attiecības ar Baltiju nesaasināt vēl vairāk [5], to apstiprina arī Bermonta ziņojums admirālim Kolčakam 14. augustā [1: S. 192].

1 Dzelzs vienības — neoficiāls brīvprātīgo formējumu apzīmējums Vācijas armijas sastāvā, kas sevi apvienoja vēl nedemoralizētos karavīrus, kuri bija gatavi turpināt saglabāt militāro disciplīnu.

2 Baltā kustība (krievu — Белое движение) — vispārpieņemts politisko kustību apzīmējums Krievijas Pilsoņu karā, kuras apvienoja pretboļševistiski noskaņotos spēkus.

3 Arī šim vārdam ir dažādas transkripcijas un veidi — Bermonts, Bermodts, Bermodts, dažkārt vēl to papildinot ar Pāvela Bermonta sev piešķirtā kņaza Avalova titulu. Šajā darbā tiek lietots Bermonts.

4 Padomju Krievijas, Rietumkrievijas, Vācijas, Igaunijas un Lietuvas armijas.

Līdz 1919. gada septembrim fon der Golcs un Pāvels Bermonts ieņēma pat samērā draudzīgu attieksmi pret Latviju, un nav pamata uzskatīt, ka oktobra uzbrukums ir bijis plānots agrāk par 1919. gada septembra nogali; līdz tam operācijas tika plānotas Šauļu–Daugavpils rajonā, cerot, ka Sabiedrotie spēš sakārtot attiecības starp Latviju un Rietumkrievijas brīvprātīgo armiju.

Šādas politikas virsotne bija 1919. gada 4. septembrī Bermonta iesniegtā nota Antantes militārās komisijas vadītājam Stīvenam Talentam, kurā tika paziņots, ka Bermontam nav nekā cita, kā vienīgi miermīlīgi plāni pret Latviju, un ka viņš ir gatavs pakļauties Latvijas armijas virspavēlniekam [10: 12 l.p.]. Tajā pašā laikā Bermonta pieņemtā politiskā platforma neatzina Latvijas kā valsts eksistenci, savukārt Latvijas valsts neatzina vācu-krievu karaspēka tiesības izmantot tās teritoriju kā operāciju bāzi un atklāti naidīgi izturējās pret vācu-krievu spēku iziešanu uz fronti cauri Latvijas teritorijai. Konflikts šķietami izlīdzinājās 26. augustā, kad Rīgā notika apspriede, kurā piedalījās latviešu, Pāvela Bermonta, krievu monarhistu, igauņu, poļu un lietuviešu pārstāvji un kurā tika pieņemts lēmums visām armijām 15. septembrī sākt uzbrukumu lieliniekiem; Bermontam tika ierādīts operacionālais rajons Daugavpils–Veļikaje Luki. [1: S. 177]

Politiskais konflikts ar Latviju saasinājās 1919. gada 11. septembrī, kad Padomju Krievija Latvijas, Lietuvas⁵ un Somijas valdībām nosūtīja piedāvājumu sākt sarunas, šādu piedāvājumu iepriekš bija saņēmusi arī Igaunija. [15: 17. lpp.] Pēc ilgstošām apspriedēm 1919. gada 4. oktobrī Igaunijas, Latvijas un Lietuvas Pagaidu valdības paziņoja Padomju Krievijai, ka ir gatavas sākt sarunas, taču ne vēlāk 25. oktobrī. Padomju puse piedāvāja sākt sarunas 12. oktobrī. [17: 9. lpp.] Vācu-krievu puse par šīm sarunām bija informēta — savā vēstulē Bermontam par tām ir brīdinājis Andrievs Niedra. [8: 45. lpp.] Ņemot vērā šos apstākļus, radās nepieciešamība nostiprināt Rietumkrievijas armijas kreiso spārnu, kura galvenais drauds bija Latvijas armijas ieņemtais placdarms Daugavas kreisajā krastā, kurā nemitīgi tika pastiprināti spēki; jau 1919. gada augustā Bermonts Britu militārās misijas vadītājam Baltijas valstīs ģenerālim Bērtam akcentēja savas bažas par Latvijas armijas koncentrāciju Daugavas kreisajā krastā. [4: p. 200]

Operacionālā situācija Latvijā 1919. gada rudenī

Latvijas atklāti naidīgā pozīcija, miera sarunas ar Padomju Krieviju, aizvien pieaugošais Antantes spiediens uz Vāciju un baumas par igauņu karaspē-

ka ierašanos [16: S. 56] radīja apstākļus, kuros iniciatīvas saglabāšanai vācu-krievu spēkiem bija nepieciešams 1) iegūt laiku un 2) neitralizēt tūlītējos draudus, ko radīja Latvijas politiskā pozīcija. Tā kā diplomātiskie līdzekļi bija izsmelti un bija skaidra Sabiedroto vēlme saglabāt iespējami spēcīgu pretboļševistisko fronti, atlika tikai strauja militārā operācija. Vācu-krievu spēkiem bija jāreķinās ar to, ka Sabiedroto interesēs nav novājināt pretlielinieciskos spēkus Latvijā; tie

⁵ Lietuvas puse tehnisku problēmu dēļ piedāvājumu saņēma tikai 15. septembrī.

nepieļautu ilgas kaujas, kā to pierādīja notikumu attīstība pēc Cēsu kaujām, operācijai bija jābūt ātrai un jārada veiksmīga bāze turpmākām sarunām.

1919. gada oktobrī Rietumkrievijas brīvprātīgo armija bija sasniegusi savu spēku maksimumu. Pēc paša Bermonta datiem, armiju veidoja 52 000 cilvēku, no tiem apmēram 40 000 vāciešu, kuru apbruņojumā skaitījās apmēram 120 lidmašīnu (lidot spējīgas 40–45 lidmašīnas), 600 ložmetēji, 50 mīnmetēji un 100 lielgabali. [1: S. 219] Latvijas armijas štāba operatīvā daļa 1919. gada oktobra sākumā ziņoja, ka Bermonta armija sastāvēja no 47 100 cilvēku, no kuriem apmēram 10 000 cilvēku atrodas Lietuvā. No tiem 37 000 cilvēku, kas atradās Latvijā, kaujas daļās ietilpa 16 970 kājnieki un 1073 jātnieki, kas bruņoti ar 154 lielgabaliem un 338 ložmetējiem. [12: 7. l.p.]

1919. gada 7. oktobrī Latvijas armija vēl joprojām bija formēšanās stadijā — tikai pirms trim mēnešiem (1919. gada 10. jūlijā) tika izveidota Latvijas armija kā vienota institūcija ar virspavēlnieku ģenerāli Dāvidu Sīmansonu, savukārt pavēle par divīziju formēšanu tika izdota tikai 1919. gada 9. oktobrī. [11: dok. «Virspavēlnieka pavēle par divīziju formēšanu», 350. l.p.] Lai arī Latvijas armija skaitliski pārspēja vācu-krievu spēkus — aptuveni 40 000 vīru [13: 63. lpp.] —, Latvijas armijai bija vāja materiālā bāze — tikai 33 lielgabali un aptuveni 300 ložmetēju [turpat], un Dienvidu frontē atradās tikai daļa spēku — 1919. gada oktobrī Dienvidu frontes pavēlnieka Jorga Zemitāna rīcībā bija 12 000 cilvēku, no tiem kaujas vienībās — 7000 vīru un 16 lielgabali [6: 110. lpp.].

Militārā situācija likās labvēlīga uzbrukuma plānam. Latvijas armijas Dienvidu frontes galvenie spēki ieņēma 32 kilometrus garu fronti Daugavas kreisajā krastā, kuru vienīgais atkāpšanās ceļš veda pāri Daugavas tiltiem; fronte bija izstiepta un vācu-krievu spēkiem bija kvantitatīvs un kvalitatīvs pārspēks. Ja izdotos šos spēkus nogriezt no tiltiem, ielenkt un iznīcināt, tiktu panākti vairāki mērķi vienlaikus — Latvijas armijas centrs tiktu sagrauts, savukārt Austrumu frontē esošās vienības (Baloža brigādi un Landesvēru) fon der Golcs ne bez pamata uzskatīja par sev draudzīgām. No šādas labvēlīgas pozīcijas būtu iespējams attīstīt turpmākas sarunas ar Antanti un Latvijas Pagaidu valdību, kā arī iegūt izdevīgu aizsardzības pozīciju pret eventuāliem latviešu un/vai igauņu mēģinājumiem vācu-krievu spēkus no Latvijas izspiest. 1919. gada 6. oktobrī Rietumkrievijas brīvprātīgo armijas komandieris izdeva operatīvo pavēli Nr. 4 sākt uzbrukumu no pozīcijām, kuras vienības bija ieņēmušas 30. septembrī pēc fon der Golca pavēles. [7]

Operācijas norise un mērķis

1917.–1919. gadā pret Rīgu no Daugavas kreisā krasta puses ir īstenotas trīs liela mēroga operācijas: Rīgas ieņemšanas operācija, ko veica Vācijas VIII armijas vienības 1917. gada 1.–6. septembrī, forsējot Daugavu pie Ikšķiles, 1919. gada 22. maija uzbrukums, kurā vācu-

latviešu spēki ieņēma Rīgas tiltus un pa tiem ielauzās pilsētā, un operācija *Blitzschlag*. Kā norāda Dzelzs divīzijas komandieris majors Bišofs, 8. oktobra uzbrukums savā būtībā mēģināja atkārtot 22. maijā notikumus [3: S. 218] Salīdzinot abas operācijas, ir jāuzsver, ka Rīgas ieņemšana 22. maijā pa Rīgas tiltiem bija pārsteidzošs operācijas pavērsiens. Kā norāda fon der Golcs, operācija 22. maijā tika plānota tāpat kā 1917. gada Rīgas ieņemšanas operācija, paredzot pretinieka spēku saistīšanu pie Rīgas tiltiem, kamēr galvenie spēki virzās cauri Vecumniekiem un pārceļas pār Daugavu pie Ikšķiles [5: S. 191]. 1919. gada 22. maijā vācu-latviešu spēki sāka ofensīvu, kuras operacionālais mērķis bija Rīgas ieņemšana. Uzbrukuma smailē bija Landesvēra trieciena bataljons barona Hansa fon Manteifela vadībā, kas straujā triecienā ieņēma un noturēja Rīgas tiltus līdz Landesvēra galveno spēku pienākšanai. Ja salīdzina uzbrukumus 22. maijā un 8. oktobrī, ir redzams kopīgs plāns — uzbrukums notiek trijās kolonnās, kas virzās gar Babītes ezeru, pa Jelgavas un Ķekavas šoseju, labajai kolonnai saistot pretinieka spēkus. Tieši šis Bišofa salīdzinājums ļauj pieņemt, ka operācijas mērķis nav bijis Rīgas ieņemšana, kā to norāda gan Bišofs, gan Golcs, gan Bermonts, gan Niedra.

Jāņem vērā, ka 1919. gada oktobrī vācu spēki praktiski netraucēti varētu pārcelties pāri Daugavai; kā norāda ģenerālis Radziņš, Rietumkrievijas brīvprātīgo armija bija pietiekami spēcīga, lai šādu operāciju īstenotu [14: 41., 42. lpp.]. Ja tas bija iespējams vēl 1919. gada novembra sākumā, pat pēc Latvijas armijas īstenotās Daugavas forsēšanas un placdarma ieņemšanas Daugavas labajā krastā, tas noteikti bija iespējams arī 1919. gada oktobra sākumā, turklāt, kā liecina 5. Cēsu kājnieku pulka darbības apraksts, 9. oktobrī pie Doles salas nelieliem vācu spēkiem bija izdevies pārcelties Daugavas labajā krastā [9: 7. l.], un, pēc visu pušu atmiņām, 9. oktobra vakarā situācija ir bijusi mierīga, pat neraugoties uz to, ka tiltu aizsardzības organizēšana sākās tikai nākamajā dienā [16: p. 367].

Ņemot vērā šos faktorus, Rīgas ieņemšana nav uzskatāma par operācijas mērķi, un jāpiekrīt vācu puses tēzei par nepieciešamību likvidēt Latvijas armijas ieņemto placdarmu Daugavas kreisajā krastā. Ja tiktu izpildīts operācijas mērķis — nodrošināt Rietumkrievijas Brīvprātīgo armijas kreiso flangu, tā aizsardzību balstot Daugavas līnijā, un likvidēt Latvijas armijas Dienvidu grupējumu —, Daugavas līnijas segšanai pietiktu ar daļu Dzelzs divīzijas spēku, kas sastāvētu no tiem vācu karavīriem, kas nevēlējās pamest Kurzemi viņiem piesolītās zemes dēļ. [5: S. 253] Tiesa, veiksmīgas operācijas gadījumā, t. i., ja tiktu pārrauta fronte, ieņemti tilti, tādējādi nogriežot Latvijas armijas atkāpšanās ceļu, nav izslēdzama iespēja, ka vācu vienības ielauztos Rīgā, taču tur, kā norādīja Golcs, tās apdraudētu iespēja, ka Sabiedrotie būtu gatavi iznīcināt tiltus, tāpēc, visdrīzāk, vismaz sākotnēji Rīgā vācu-krievu karaspēks neieietu.

Rietumkrievijas armijas un Latvijas armijas karaspēka darbība 8.–10. oktobrī ir iedalāma divos posmos. 8. oktobrī sāktajā uzbrukumā Rietumkrievijas Brīvprātīgo armija mēģināja īstenot plānu

Blitzschlag — sasniegt Daugavas tiltus, pārraujot latviešu fronti uz Jelgavas šosejas, lai pa to sasniegtu Daugavas tiltus un nogrieztu Latvijas armijas atkāpšanās ceļu. Plāns neizdevās latviešu pretestības un apvidus dēļ. Nākamajā dienā vācu uzbrukuma smaguma punkts tika pārcelts uz Bauskas šosejas rajonu, cenšoties Daugavas tiltus sasniegt gar Daugavas malu. Lai arī Latvijas armijas kreisais spārns tika sakauts, vācu spēkiem fronti pilnībā neizdevās sagraut, un Latvijas armija varēja relatīvi netraucēta atkāpties pāri Rīgas tiltiem.

Izvērtējot operāciju, var pieņemt, ka militāri operācijas mērķis tika sasniegts pilnībā — Latvijas armijas spēki zaudēja uzbrukumam izdevīgo placdarmu Daugavas kreisajā krastā. Tajā pašā laikā Latvijas armija istenoja ja ne līdz galam veiksmīgu, tad katrā ziņā sekmīgu aizstāvēšanās operāciju — vācu uzbrukums, neraugoties uz pretinieka skaitlisko un materiālo pārsvaru, tika apturēts, un fronte nostabilizējās uz Daugavas līnijas. Vācu karaspēks nespēja nogriezt Latvijas armijas vienību atkāpšanās ceļu, neļāva vācu-krievu pusei iegūt vajadzīgo politisko pozīciju, ar kura palīdzību atjaunot sarunas ar Antanti jautājumā par vācu karaspēka palikšanu Kurzemē un iespēju iziet uz Daugavpils fronti. Operācijas pilnīgas izdošanās gadījumā būtu iespējams attīstīt uzbrukumu Daugavpils virzienā, pēc tam savienojoties ar Judeniča vienībām un paplašinot operāciju rajonu līdz pat Petrogradai [2: 119. lpp.]. Ņemot vērā, ka Padomju Krievija tobrīd izcīnīja smagas kaujas gan pret Judeniču un igauņiem (oktobra sākumā Judeničs tika apturēts 30 kilometru attālumā no Petrogradas), gan Deņikinu (oktobra vidū tika apturēts pie Orlas), var pieņemt, ka 1919. gada oktobrī apturētais uzbrukums ir būtisks pagrieziena punkts ne tikai Latvijas, bet arī visa reģiona vēsturē.

Izmantotā literatūra

1. Awaloff K. W. *Im Kampf gegen den Bolschewismus*. 1925. Hamburg: Augustin,
2. Benets D. *Atbrīvojot Baltiju. 1919.–1920.* 2012. Rīga: Zvaigzne ABC.
3. Bischoff J. *Die letzte Front: Geschichte der Eisernen Division im Baltikum 1919.* 1935. Berlin: Buch- und Tiefdruck Gesellschaft.
4. *Documents on British Foreign Policy, 1919–1939.* 1. First Series, vol. III
5. Goltz R. *Meine Sendung in Finnland und im Baltikum.* 1920. Leipzig: K. F. Koehler, S. 236–239.
6. Krīpens A. *Latvijas Atbrīvošanas kara vēsture.* Kara skolā lasītās lekcijas. 1937. Mašīnraksta kopija.
7. LVVA, 3301. f. 1. apr. 6. l. Rietumkrievijas brīvprātīgo armijas komandiera operatīvā pavēle Nr. 4.
8. LVVA, 3301. f., 1. apr. 1. l. Bermonta dienestbiedru atmiņas par viņu; akti par bermontiešu patvarībām pret civiliedzīvotājiem, štāba pavēļu kopijas.
9. LVVA, 6033. f. 1. apr. 201. l. 5. Cēsu kājnieku pulka darbības pārskats par laiku no 1. jūlija līdz 31. decembrim, 1919. gadam.
10. LVVA, 6033. f., 1. apr., 32. l. Materiāli par Bermontu — Avalovu.
11. LVVA, 6033. f., 1. apr. 59. l. Armijas virspavēlnieka štāba izlūkošanas nodaļas un Vidzemes divīzijas ziņojumi par sarkanās armijas un Bermontiešu frontes dislokāciju, Austrumu frontes un Dienvidu frontes pavēlnieku kaujas pavēles.
12. LVVA, 6033. f., 1. apr., 75. l. Armijas virspavēlnieka štāba operatīvās daļas ziņojumi par Bermonta armijas sastāvu.
13. Peniķis M. *Latvijas atbrīvošanas kara vēsture.* II daļa. 2005. Rīga: Austrālijas balva latviešu jaunsargiem.
14. Radziņš P. *Latvijas atbrīvošanas karš.* 1990. Rīga: Avots.
15. Stranga A. *Latvijas — Padomju Krievijas miera līgums 1920. gada 11. augustā.* 2000. Rīga: Fonds «Latvijas vēsture».
16. Tallents S. *Man and Boy.* 1943. London: Faber and Faber.
17. Varslavāns A. Rietumu politiskais faktors Latvijā. 1993. *Latvijas Vēsture,* Nr. 4(11).
18. Wagener O. *Von der Heimat geächtet.* 1920. Stuttgart: Belsersche Verlagsbuchhandlung.

**LU fonda mecenātu
atbalstītie stipendiāti no
2014./15. līdz 2018./19.
akadēmiskajam gadam**

Abace Laura	Ābelnīca Kaspars	Birģele Sintija
Abdullins Juris	Ābiķe-Kondrāte Agija	Birkāns Renārs
Abouelkheir Belal	Ābrama Dace Terēza	Birznieks Bruno
Adejanova Inga	Āriņa Kristiana	Bistrova Darja
Adejanovs Artūrs	Ārniece Ilze	Bistrovs Kirils
Ahadovs Maksims		Biteniece Natalja
Ahiļčenoka Guna	Babāns Raimonds	Bižāns Andris
Ait Taleb Mohamed	Babijs Viktors	Bīriņš Artūrs
Aizpurietis Andis	Balanda Sanita	Blaubārde Selga
Aizpurvs Jēkabs	Balašova Anastasija	Blitsone Vineta
Akmenis Jēkabs Jānis	Baldasēvičs Ignats	Bloha Dina
Akhmedjanov Ulugbek	Baldiņa Laima	Blomis Artūrs
Akmentiņš Pauls Austris	Baldunčiks Juris	Blūma Olga
Akopjans Nikita	Balode Zane	Bļinova Jeļena
Al Siblani Khodor	Balodis Andriš	Bobinskis Kaspars
Aleksandroviča Anna	Balodis Mārtiņš	Bobrovska Olga
Aleksejeva Inese	Baltace Paula	Bobule Laura
Alka Liene	Baltiņa Anete	Bocharev Artyom
Alonderis Viesturs	Baltiņa Elīna	Bogdanova Anna
Alstere Iveta	Bambals Ainārs	Bogdanovičs Raimonds
Altāne Krista Melisa	Bancāne Ruta	Bogdanovs Artjoms
Altenburga Sintija	Banjara Pramod	Bogdanovs Oļegs
Alunāns Aleksandrs	Barabanovs Kristers Andris	Bogdanovs Vladlens
Yano	Barana Viktorija	Bohomaz Yurii
Aļohins Romāns	Barane Ineta	Boikova Karina
Aļšanska Anna	Baranovska Anna	Boldāne Solvīta
Ambrasa Ilze	Bartusēviča Diāna	Boltunova Viktorija
Amirovs Arturs	Barvidis Toms Deimonds	Bondarenko Vineta
Anaite Zane	Barviks Oskars	Bondars Raivis
Andaševa Olga	Batarāga Anda	Borisova-Japiņa Jekaterina
Andersone Laura	Baunis Haralds	Boroviks Artems
Andranovs Mārtiņš	Bebre Marija	Borskoviča Sintija
Andrejevs Ņikita	Bebris Pauls	Brants Egons
Andrejevs Ruslans	Beča Līga	Brants Kārlis
Andrejevs Sergejs	Beitlers Dāvis	Brejers Raitis
Andronovs Konstantīns	Belogradova Ludmila	Brencis Jevgēņijs
Andruškeviča Eleonora	Belševica Krista Anna	Brēmers Ģirts
Andžāne Ilze	Belte Aiva	Brikmanis Jānis
Aniūkštyte Deimante	Berenis Didzis	Briķis Valters
Anohins Artūrs	Beresnēvičs Igors	Briņeva Līga
Anstrags Dāvis Daniels	Berezkina Elena	Briška Bella
Antonovičs Vladlens	Berga Eva	Brizgalovs Dmitrijs
Aņisimovs Dainis	Bergs Pauls	Brūklene Uģis
Apinis Matīss	Berkoits Jānis	Brūna Rota
Apsēna Līga	Berkolds Deivids	Brūnava Madara
Apškrūms Roberts	Bernatovičs Kristiāns	Brūveris Jurģis
Arbuzova Olga	Beronte Baiba	Bučinska Ļubova
Arigela Anurang	Bessmertnijs Dmitrijs	Bukšs Raivis
Artemova Alena	Bērtulis Elvis	Buligina Alise
Artjuhova Karīna	Bērziņa Antra	Bulindžs Kaspars
Atvare Airisa	Bērziņa Asnate	Bulinska Jeļizaveta Jeva
Aubakirova Alina	Bērziņa Kitija	Bulle Krišjānis
Audris Artūrs	Bērziņa Santa	Bulmers Kārlis
Augšpūle Evita	Bērziņa Signe	Buls Aigars
Augustovskis Rūdolfš	Bērziņš Armands	Bundziņa Liene
Auzāne Anna	Bērziņš Edgars	Buračevskis Kristaps
Auzina Vera	Bērziņš Guntars	Burceva Ilze
Auziņa Ieva	Bērziņš Mairis	Bureks Aleksandrs
Auziņa Ernests Tomas	Bērziņš Ulvis	Burinskis Edgars
Avotiņa Lidija	Bhattacharya Sandip	Burka Kaspars
Avotiņa Marija	Biezais Artūrs	Burkēviča Lauma
Avotiņš Gatis	Bikare Kristīne	Burnieks Ēriks
Avramenko Artjoms	Biksīte Sigita	Burvāne Zane
Avruškins Staņislavs	Bikše Ginta Ieva	Burve Elza
Ažēns Jānis	Bimšteina Agnese	Butāns Kārlis
	Birģele Anda	Butkāne Inita

Butkēviča Anete	Deņisova Kristīne	Eсанov Bakhtiyor
Caica Anastasija	Derevjanko Andrejs	Ešenvalde Airita
Calkovskis Ričards	Deruks Pāvels	Everte Karlīna Luīza
Casno Kristīne	Dēnava Ilona	Ērglis Andris
Cebaks Edgars	Didenko Jurijs	Fadejeva Larisa
Celmiņa Līva	Didenko Veronika	Faišušēviča Ramona
Ceļapīters Kristaps	Didrihsone Elīna	Fedotovs Valts
Ceļmalnieks Oskars	Didrihsone-Tomaševska Ineta	Felce-Kalpšteina Rita
Ceplītis Sandis	Dieziņa Rūta	Feldentāle Evita
Cepurītis Jānis	Dieziņš Dāvis	Felkners Rendijs
Cērpa Mārtiņš	Dīks Valērijs	Fernandez Cespedes
Chandrasekaran Dinesh	Diļevka Anna	Kelly Veronica
Chen Jiahuan	Dinārs Konstantīns	Fiļimonovs Vladlens
Cherny Vojtech	Dindune Ilze Izabella	Fišers Kaspars
Cibuļskis Aigars	Dobeļe Anna	Fišers Mārtiņš
Cibuļskis Dāvis	Dobkins Andrejs	Fjodorovs Konstantīns
Ciemiņa Tīna	Dobulāne Anete	Fjodorovs Vladislavs
Cilinska Annija	Dombrovskis Haralds	Freiberģa Agnese
Cīrulis Dāvis	Draeger Sophia	Freimane Dārta
Cīrulis Imants	Draguns Andis	Freimane Kristīne
Cīrulnieks Austris	Dravnieks Valdis	Freimane Rūta
Corbin Norman	Dreimane Liene	Freimanis Raivo
Corera Manuel Ashwin	Dreimanis Valts	Freipiča Inese
Cucure Evita	Drīliņa Una	Freisa Sofija Anna
Cummings Jessica	Druviņa Laura	Fricberģs Toms
Cvetkovs Ivans	Dubovika Bella	Fridmanis Jēkabs
Čākure Linda	Dubra Elīna	Frolova Taisija
Čeksters Krišjānis Artis	Dudarevs Rudolfs	Frolovs Kirils
Čekunovs Sergejs	Duhovičs Aleksejs	Fučadži Natālija
Čelebijs Kirils	Dulmane Linda	Gadiške Klaudija
Černooka Elīna	Dumpis Atis Ēriks	Gaidašs Vladislavs
Čertova Svetlana	Dūdiņa Kristīne	Gaidučeks Valentīns
Červinska Elīna	Dzalbe Jānis	Gailāne Indra
Česle Eva Emīlija	Dzalbe Uldis	Gailāns Oskars
Čivčis Vladimirs	Dzenis Agris	Gaile Antra
Čižovs Jurijs	Dzenis Imants	Gaile Mudīte
Čižovs Vjačeslavs	Dzenis Reinis	Gailiša Karīna
Čīma Inīta	Dzenītis Elvijs	Gailītis Gunārs
Čornijs Antons	Dzērve Salvīs	Gailītis Kaspars
Čudars Toms	Dzintare Laura	Gailītis Rihards
Čuprakova Aleksandra	Dzirkalis Jānis	Galvanovskis Artis
Dabra Nauris	Džeriņa Guna	Gamarra Daniils
Dadojenkovs Pāvels	Efnere Jolanta	Gandjuka Laura
Daģe Eva	Egle Jūlija	Ganiņa Gundega
Dahal NabinRaj	Eglīte Anete	Ganstog Manal-Ochir
Dance Laima	Eglīte Laura	Gaņina Ilze
Danovskis Gunārs	Eglītis Eduards	Garančs Emīls
Daņilovs Maksīms	Eglītis Mairis	Garavņova Anastasija
Darģis Oskars	Eglītis Miks	Garā Anita
Das Neloj	Eglītis Raitis	Garkājs Artūrs
Daugaviete Ilze	Eglītis Rihards	Garnizone Agrita
Dārziņš Emīls	Eidone Līga	Gaumīgs Gatis
Dārznieks Kārlis	Eiduks Artūrs	Geislere Armanda
Dārznieks Ojārs	Eiduks Jānis	Gerte Silvija
Dātavs Mārtiņš	Eihenbaums Raivis	Getaute-Zariņa Agnese
De las Heras Daniel	Emiane-Silkāne Anita	Gilodo Mihails
Decuks Igors	Eižvertiņš Jurijs	Giļņičs Aleksejs
Degtjarjovs Dmitrijs	Ekša Liene	Ginters Armands
Degusa Elīna	Ekševica Ieva	Gluškova Jevģenija
Dejus Sandis	Elbere Ilze	Glēba Alvis
Dekants Andris	Eltermanis Kristaps	Gļinka Svetlana
Demičs Georgijs	Emsis Eduards	Gobiņa Annija
Demme Vegīta	Eņiņš Aleksandrs	Gobleja Anete
	Epaneshnikov Vladislav	
	Erdmane Santa	

- Golovackis Aigars
 Golubeva Larisa
 Golubeva Lidija
 Golubevs Pāvils
 Gomančenko Tatjana
 Gorbunova Marija
 Gorbunovs Aleksejs
 Gorjačko Gunita
 Goško Emils
 Grahovska Vita
 Grantiņš Dāvis Ansis
 Grants Zane Grēta
 Grašneks Edgars
 Graudiņa Anniņa
 Graudiņa Liene Luīze
 Graudule Ieva
 Grāvelsiņš Uģis Rūdolfs
 Grebņevs Artūrs
 Greidāne Patricija
 Gridjuško Aigars
 Grigorjevs Dmitrijs
 Griķīte Liene
 Griņuka Viktorija
 Grišāns Mārtiņš
 Grīnfelds Renāts Kristaps
 Grīns Lauris
 Grīntāle Elīna
 Grosberga Diāna
 Gruduls Nauris
 Grundāne Kristīna
 Grundmane Kristīne
 Gruntmane Zane
 Gruzinskis Gatis
 Gulbis Kristis Krīsters
 Gulbis Miķelis
 Gulbis Rinalds
 Gulzade Sabina
 Guļa Andželika
 Guļenko Pāvils
 Gundegs Modris
 Gurecka Agnese
 Gusarovs Dmitrijs
 Guseva Oļga
 Gusta Inese
 Gutāns Kristaps
 Gžibovska Aleksandra
- Ģemze Undīne
 Ģinkuls Roberts
- Hamrakulov Doston
 Heidenbergs Mārtiņš
 Heincis Daniels Marks
 Hmeļņicka Ramona Karīna
 Hološenko Valentīna
 Homiča Samanta
 Horsts Rūdolfs
 Hovhannisyan Marine
 Hremenkins Linards
 Hudayberdiyeva Maysa
- Ieva Elīna
 Igaune Silvija
 Igumnova Viktorija
 Ikauniece Indra
 Ikaunieks Artis
- Ikstens Ivars
 Ilješāns Ojārs
 Illarionovs Aleksandrs
 Ilyas Muhammad
 Ildeikins Viktors
 Iljina Juliana
 Indrāns Dāvis
 Intenbergs Aivis
 Irbe Didzis
 Irbe Signe
 Isangulova Ilona
 Islamovs Nizami
 Isupova Marija
 Ivanenko Alise
 Ivanova Aleksandra
 Ivanova Anna
 Ivanova Ilona
 Ivanova Jekaterina
 Ivanova Marina
 Ivanovna Jeļizaveta
 Ivanovs Jānis
 Ivanovs Maksīms
 Ivanovs Nikīta
 Ivaškevičs Romans
 Izmailova Kitija
- Jafarov Ulvi
 Jagmina Inga
 Jakovecs Aleksandrs
 Jančevskis Vadīms
 Janičevs Edgars
 Jankovs Mārcis
 Jankovskis Krīsts
 Janovska Laura
 Jansone Ilze
 Jansone Karlīna
 Jansone Lelde
 Jansone Liene
 Jansone Līva
 Jansone Natālija
 Jansone Žanna
 Jasiņeca Anna Marija
 Jašins Edvards
 Jaunarājs-Janvāris
 Madars
 Jaunarājs Jēkabs
 Jaunzeme Agita
 Jaunzems Linards
 Jaunžekare Gita
 Jayapal Jiju
 Jedunovs Nikolajs
 Jegorčenko Anatolijs
 Jemeljanova Dinija
 Jeminejs Andris
 Jencis Andrejs Andris
 Jenča Anete
 Jenča Annija
 Jerjomina Karīna
 Jermakova Arīna
 Jermakova Ludmila
 Jermašonoks Sergejs
 Jermuša Zane
 Jeršovs Andris
 Jeršovs Ilja
 Ješkina Karīna
 Ješkīns Jurijs
- Ješkīns Krīstaps
 Jēgermane Zanda
 Jēkabsons Atis
 Jokste Ieva
 Jolkina Anna
 Jonāne Inga
 Jonāne Karīna
 Joriņa Inta
 Judicka Monta
 Juminova Inga
 Junga Karīna
 Junga Laura
 Jurciķis Klāvs
 Jurēvica Liāna
 Jūrģele Marija
 Jūrīna Jeļena
 Jurjkovskis Aleksejs
 Jurkāns Nauris
 Jurovskis Aleksejs
 Juška Sintija
 Juškeviča Ludmila
 Jūra Zane
- Kablukova Terēza
 Kacēns Jānis
 Kadeģis Jānis
 Kaibe Liene
 Kajandere Jeļena
 Kalana Andris
 Kalašņikova Linda
 Kalašņīks Artūrs
 Kalausa Viktorija
 Kalēja Anna Luīze
 Kaliahina Kīra
 Kalinka Ulla
 Kalks Estere
 Kallings Krīšjānis
 Kalnačs Valters
 Kalniņa Anete
 Kalniņa Elīza
 Kalniņa Evīta
 Kalniņa Līga
 Kalniņa Paula
 Kalniņa Zane
 Kalniņa-Zaķe Dana
 Kalniņš Edvards
 Kalniņš Gatis
 Kalniņš Jurgis
 Kalniņš Kaspars
 Kalniņš Matīss
 Kalniņš Mārcis
 Kalniņš Mārtiņš
 Kaltņiece Una
 Kalvāns Armands
 Kalve Agija
 Kalčevs Antons
 Kaļiņins Rolands
 Kaminskis Aivars
 Kantajevs Aleksandrs
 Kaņepe Baiba
 Karabaeva Baktygul
 Karelova Marina
 Kari-Yakubova Tamila
 Karijs Mihails
 Karpova Lita
 Kartamīsevs Aleksejs

Kartišova Veronika	Kovirzanova Tamāra	Kuzņecova Sabīne
Kartuzova Aleksandra	Kovrigo Jeļena	Kuzņecovs Jevgēņijs
Kassaliete Jana	Kozirevs Konstantīns	Kvelde Amanda
Kašina Irina	Kozlova Aleksandra	Kviesis Nils
Kašs Juris	Kozlova Sofija Anna	
Kauliņš Oskars	Kozlovskis Atis	Keiris Matiss
Kavaleva Krystina	Kozlovskis Kaspars	Ķīrisis Ēriks
Kazimjaņeca Roberta	Kramkovska Ariadna	Ķude Amanda Gabriēla
Kazina Diāna	Krasts Ēriks	
Kazuša Ginta	Kraševska Aija	Laasfeld Tonis
Kaža Kristaps	Kraševska Līga	Lagzdkalne Līga
Kālis Mārtiņš	Kraukle Dace	Laizāne Andra
Kārklīņa Kristīne	Krauklis Kārlis	Lakmane Everita
Kārklīņš Jānis	Krauklis Mārtiņš	Lallo Raivo
Kerubiņa Diāna	Kravalis Kristaps	Lalvele Rita
Kicenko Aleksandra	Kravceva Irina	Langins Aigars
Kims Sergejs	Krebss Andis	Lankovska Anna
Kirillovs Juris	Kreicberga Diāna Anna	Lapins Deniss
Kirnaja Diāna	Krekņins Igors	Lapinskis Mārtiņš
Kiršteina Anna	Krekovska Ieva	Lapiņa Marta
Kirvels Staņislavs	Krēgers Miks	Lapiņš Kārlis
Kirvels Vladislavs	Krēsliņa Arta	Lapiņš Oskars
Kiseļovs Aleksandrs	Krēsliņa Santa	Lapiņš Viesturs
Kišļeva Žanete	Krēsliņš Uldis	Larevs Aleksandrs
Kistkins Svjatoslavs	Krēvics Riņhards	Larionovs Vladislavs
Kižlo Sergejs	Krieviņa Daīga	Larsenbergs Edgars
Klampe Milda	Krieviņa Liene	Lastovkina Liāna
Kleinberga Annija	Krimans Daniels	Latvele Rita
Kleine Anete	Kristapsons Arturs	Latvena Endija
Klibiķis Valts	Kristiņa Dina	Lauberts Kalvis
Kličovs Roberts	Kriģerte Viktorija	Laukmane Aiva
Klodža Simona	Krjukovs Oļegs	Laukmane Santa
Klusa Laura	Krumbergs Ģirts	Laure Kristīne
Kļaviņa Elīna	Krūklīņa Jūta	Laure Zane
Kļaviņa Jana	Krūmiņa Anna	Laurens Valdis
Kļaviņa Laura	Krūmiņa-Koņkova Solveiga	Lauris Miks
Kļaviņa Zane	Krūmiņš Roberts	Lauzis Uldis
Kļaviņš Linards	Krūze Aija	Lavenieks Valfrīds
Kokins Aigars	Kubrenkov Roman	Laviņa Una Loreta
Kokins Gatis	Kučina Eva	Lazareva Gaļina
Kokins Gundars	Kučinskis Artūrs	Lazda Jānis
Kolbina Jana	Kudrovs Sergejs	Lazda Lauris
Koleda Oskars	Kukaine Dana	Lazdāne Laura
Komača Žanna	Kukle Līva	Lazdiņš Kārlis
Komļeva Jana	Kukule Sanita	Lācberga Laura
Kondakovs Kristiāns	Kumar Raghwendra	Lāce Agija
Kononova Irēna	Kumarina Inese	Lācis Krišjānis
Konovalova Marija	Kuņičins Roberts	Lācis Oskars
Konstantinovs Nils	Kuodis Ričards Armands	Lācis Toms
Korolevičs Ilja	Kupša Aleksandrs	Ledaks Rolands
Korotkaja Ksenija	Kurme Santa	Legdiņa Linda
Korotkovs Ilja	Kuropatņikovs Romāns	Leitāne Inese
Korovnikovs Andris	Kurseviča Marija	Leitāns Jānis
Korpa Dana	Kurtukova Vladislava	Leivāns Andris
Kosīte Daina	Kusiņa Kristiāna	Leja Edgars
Kostins Artūrs	Kusiņš Kristaps	Leja Līva
Košinskis Kristiāns	Kutumova Jeļena	Lejniece Sandra
Koškina Paula Anna	Kuvshynov Mykhailo	Lektavers Arnis
Kotovs Maksims	Kuzenkovs Dmitrijs	Lenšs Māris
Kovaļčuka Tatjana	Kuzma Anda	Leonovs Vadims
Kovaļenko Aleksejs	Kuzmičovs Normunds	Leškēviča Krista
Kovaļenko Artūrs	Kuzmina Patrīcija	Lielbriede Linda
Kovaļenko Inta	Kuzmins Mihails	Lielmane Beāte
Kovaļevska Linda	Kuzmins Ņikita	Lielpētere Madara
Kovaļova Anastasija	Kuzņecova Anna	Lielturka Diāna
Kovaļova Darja	Kuzņecova Jana	Liepa Aivars

- Liepa Eva
 Liepa Ilze
 Liepa Ivo
 Liepa Kristaps
 Liepiņa Katrīna
 Liepiņa Kristīne
 Liepiņa Marta
 Liepiņa Sandra
 Liepiņš Haralds
 Liepiņš Jānis
 Liepiņš Lauris
 Liepiņš Sandijs
 Lindāne Madara
 Lindberga Kristīne
 Linde Valdis
 Liniņa Elza Līna
 Lipnagova Darja
 Lipskis Uldis
 Lipšāns Didzis
 Lipšens Dāvids
 Lisenkovs Edgars
 Lismanis Mārtiņš
 Lisovs Mārtiņš
 Lisovska Marija
 Ločmele Inese
 Logašins Dmitrijs
 Logunova Jana
 Losāne Rudīte
 Lošaka Diāna Dana
 Lukjanska Anna Viktorija
 Luksis Ritvars
 Lukstiņš Juris
 Lungevičs Jānis
 Lurie Svens
 Lūse Līta
 Lūse Sigita
- Ļeđeņovs Romāns
 Ļevšovs Sergejs
 Ļivenskis Artjoms
 Ļuļe Jeļena
 Ļuļļa Mārtiņš
- Macko Everita
 Madžulis Toms
 Magdaļenoka Māra
 Magone Dārta
 Magone Renārs
 Magons Kristis
 Maiļjane Karina
 Majors Jēkabs
 Majors Mārcis
 Makarova Aleksandra
 Makarovs Viktors
 Maksimovics Arturs
 Maķevica Sintija
 Mališevs Vjačeslavs
 Mališevskis Edvīns
 Maļavko Margarita
 Maļinovskis Maksims
 Maļuga Aleksandrs
 Mangale Andra
 Maraka Endija
 Marčena Aleksejs
 Markule Anna Katrīna
 Markus Egils
- Martuženoks Konstantīns
 Martynova Yana
 Mateja Diāna
 Matjuka Viktorija
 Matulis Haralds
 Matvejeva Margarita
 Mazarēvičs Artūrs
 Mazjāne Anna Kristīne
 Mazurs Artūrs
 Mālere Anna Patrīcija
 Medne Ilze
 Medvedeva Jūlija
 Meinharde Lolita
 Mekers Edmunds
 Melbārde Karīna
 Melbārdis Māris
 Meldere Kristiāna
 Melderis Jānis
 Melers Kristaps
 Melgalve Ieva
 Melne Laura
 Melngaile Līga
 Melnychenko Oleksandr
 Meļņika Madara
 Meņailova Veronika
 Merei Nikola Elvīra
 Merkulova Vita
 Mertsa Katrīna
 Meržvinska Krista
 Mešalkina Marija
 Metlovs Vadims
 Mežiņš Lauris
 Micko Eleonora
 Mičulis Elvijs
 Mielavs Edgars
 Mierkalne Katrīna Silva
 Miezāks Davids
 Mihailišens Jevgēņijs
 Mihailova Ilze
 Mihailovs Aleksejs
 Mihailovs Dmitrijs
 Mihins Mihails
 Mihnoviča Agnese
 Mihnovičs Vladimirs
 Mikanovskis-
 Mikalovskis
 Armands
 Mikuckis Artūrs
 Mikulāne Undīne
 Miķelsone Karina Klāra
 Miķelsone Madara
 Miļka Ņikita
 Millere Signe
 Millere Viktorija
 Millers Sandis
 Miltoviča Madara
 Miņins Vitālijs
 Mirzahanjana Kristīne
 Misāns Patriks
 Mitrofanova Ksenija
 Mizga Kristaps
 Modnika Liene Paula
 Moisejevs Andrejs
 Molčanovs Jānis
 Molodavčenko Daina
 Moreina Laila
- Morkovska Vera
 Morozov Iaroslav
 Morozovs Eduards
 Morozs Aleksandrs
 Moskaļonoka Viktorija
 Moskvina Aleksandra
 Muceniēks Raivis Jānis
 Muceniēks Toms
 Muciņš Linards
 Muhametovs Kristians
 Mukhtarov Shukur
 Muraška Oskars
 Muraško Madara
 Murāne Santa
 Murāne Una
 Murāns Kārlis
 Muzičkins Antons
 Muzikants Ādams
 Mūrniece-Pakule Elīna
 Mūrnieks Rainers
 Mūrnieks Rihards
- Narbute Karīna
 Narbute Katrīna
 Nastajs Kirils
 Nazarenko Juris
 Nāgele Zane
 Neiburga Katrīna
 Neiburgs Uldis
 Nelsone Annika
 Nemirol Anna
 Netlaua Una
 Neverkovics Aleksandrs
 Niedra Helvijs
 Niedra Roberts
 Niedrītis Andris
 Nikolajeva Jeļizaveta
 Nikolajevs Maksims
 Nikolajevs Oļegs
 Norlinds Artis
 Noskova Jolanta
 Novika Daina
 Novika Serafima
 Nuķe Arta Paula
- Ņikitenko Agris
 Ņikitina Ludmila
- Obsokovs Grigorijs
 Oknere Inga
 Okorogo Ihechukwudere
 Olekšs Artūrs
 Oniščuks Oļegs
 Opmane Beatrise
 Opmane Juta
 Ore Daniels Dāvis
 Orlovs Vjačeslavs
 Osadčuka Ksenija
 Ose Samanta
 Ostašs Imants
 Ostrovskis Ojārs Artis
 Ošiņš Mārcis
 Ošs Dāvis
 Otto Kārlis
 Ozere Ilona
 Ozerovs Dmitrijs

- Ozers Oskars
 Ozerskis Dmitrijs
 Ozola Dārta
 Ozola Ginta
 Ozoliņa Ieva
 Ozoliņa Laura
 Ozoliņa Līva
 Ozoliņa Tatjana
 Ozoliņa Zane
 Ozoliņš Selvijs
 Ozols Klāvs
 Ozols Toms
- Pačko Ņikita
 Pahars Sergejs
 Pakalna Santa
 Pakalns Pēteris
 Pakers Reinis
 Pal Anushka
 Paļčevska Svetlana
 Panagiotis Dimas
 Papatde Līga
 Paramonovs Andrejs
 Parve Vaibhav Bhujangrao
 Pašjko Arturs
 Paškova Olga
 Paštone Alvīne
 Patel Himanshu Prakashbhai
 Patrick Laviolette
 Pauliņa Inese
 Pauls Raivis
 Paura Elīna
 Pavāre Linda
 Pavārs Edgars
 Pavītola Juta
 Pavlova Džeina
 Pavlova Ernestīne
 Pavlova Inga
 Pavlovičs Igors
 Pavlovs Jans
 Pavlovska Elīna
 Pavlovska Eva
 Pavlovskis Reinis Jānis
 Pavra Arina
 Pāls Matīss
 Pāvils Toms
 Pāvulāne Diāna
 Peččenko Svetlana
 Peičs Daniels
 Pelnēna Dīta
 Pelšs Jānis
 Pencis Oskars
 Percovs Romāns
 Perevozcikovs Vitalijs
 Perlgauškis Mārtiņš
 Perminovs Leonīds
 Peslovs Pāvels
 Petrenko Deniss
 Petrenko Jekaterīna
 Petrova Alīne
 Petrova Elīna
 Petrova Renāta
 Petrova Žanna
 Petrovs Aleksandrs
 Petrovs Ņikita
 Petrovska Kristīne
- Petrovska Marta
 Pētersone Dace
 Pētersone Evija
 Pētersons Aivars
 Pētersons Armands
 Pētersons Edijs
 Pētersons Jānis
 Pētersons Raivis
 Pickainis Āris
 Pičugins Aleksandrs
 Pikuļins Andrejs
 Pinigili Vinay Reddy
 Pinkena Laura
 Pisareva Laima
 Piskunovs Romāns
 Plankājs Eduards
 Plase Daiga
 Platā Laima
 Platgalve Diāna
 Platonova Valērija
 Plauča Paula Kristiāna
 Plaudis Rītvārs
 Plācis Elvis
 Pleiko Kārlis
 Plešauniece Linda
 Plikšs Māris
 Pliska Romāns
 Pohodņevs Fjodors
 Pokatiļovs Oļegs
 Pokšāne Alise
 Polis Guntars
 Polis Rihards
 Ponomarjovs Vladimirs
 Poota Gerda
 Popovs Andrejs
 Popovs Ilja
 Poshiya Pratik Chandulal
 Postnovs Ilja
 Postovaja Olga
 Potaičuks Aleksandrs
 Potaluļeva Jevgēnija
 Potapova Katrīna
 Potašs Matīss
 Potrebko Andris
 Pozņaks Ingmārs
 Pretkalniņa Alise Ella
 Priadko Tatjana
 Pribītoks Antons
 Pričins Ivars
 Priede Aleksandra
 Priede Sintija
 Priedēns Kristaps
 Priedīte Inga
 Priedīte Marta
 Priekulis Jānis
 Prohorenko Deniss
 Prokopcevs Dmitrijs
 Prokopaņeva Aleksandra
 Prokopovičs Edgars
 Puķe Dairis
 Puķins Emīls
 Puķītis Kārlis
 Puķītis Rūdolfs
 Pulmanis Kārlis
 Pumpura Estere
 Pumpure Loreta
- Punāns Ralfs Jānis
 Pundurs Jānis
 Puriņš Mikus
 Purviņš Edgars
 Pustovyi Oļeksandr
 Puvāciete Viktorija
 Pušpurs Mārtiņš
 Putintsev Sergii
 Putniņa Sanda
 Putniņš Jānis
 Putniņš Kristers
 Puzankova Žanna
 Pūce Gunta
 Pūcītis Oskars
 Pūķe Ieva
- Raga Raisa
 Ragaine Linda
 Ragaine Līga
 Raghunatha Rao
 Yashoda Savanth
 Raģina Jevgēnijs
 Raituma Marta
 Rajan Ashin Gabriel
 Rajput Shivam
 Raju Kiran Kumar
 Ramanauskis Tomass
 Ramša Rita
 Ramza Laura
 Rancevs Armands
 Ranciņš Mārtiņš
 Rasčevskis Elvijs
 Rasums Roberts
 Ratniece Madara
 Ratnieks Pēteris Kārlis
 Ratnieks Reinis
 Raudive Signe
 Rautmanis Pēteris
 Ravichandran Mathivannan
 Razzgals Gunārs
 Razums Rojs
 Reinholde Laura
 Rence Ilze
 Reneslāce Linda
 Repins Jevgēnijs
 Reshetnikova Natalia
 Rēboks Guntars
 Rēķis Pēteris
 Rēķis Toms
 Riabykh Oļeksandr
 Ribkina Karīna
 Riekstiņa Sabīne
 Riherts Jānis
 Riherts Māris
 Rimkus Alīna
 Rimšāne Diāna
 Rītuma Dārta
 Rižnikova Liza
 Rībena Signija
 Rīta Tija
 Rode Ivo
 Rodriguez Moncada
 Idania Lizbeth
 Rogaiška Tatjana
 Rokina Natalja
 Rokis Harijs

- Rolle Elīna Lūcija
 Romanovska Ilze
 Romanovska Inīta
 Romanovskis Andris
 Romaņuks Aleksejs
 Romchuk Anton
 Rotbaha Kristīne
 Roze Solvīta
 Rozenbaks Lauris
 Rozenberga Kristīne
 Rozenfelde Rūta
 Rozenštams Jānis
 Rozentāls Ainis
 Roziņa Liene
 Rozīte Zane
 Renja Atilio
 Rubenis Harijs
 Rubenis Oskars
 Rubenis Rūdis
 Rubens Jānis
 Rubina Paula
 Rublāns Mārcis
 Rudenko Irina
 Ruduka Annija
 Rudus Krišjānis
 Rudzīte Agnese
 Rudzīte Anete
 Rudzīte Evija
 Rudzīte Katrīna
 Rudzīte Linda
 Rudzīte Sintija
 Ruhocka Agnija
 Ruļuka-Paša Diāna
 Rumbiņa Zane
 Rumkovska Inga
 Rumkovskis Edgars
 Rumpa Agneta
 Rupeiks Mārtiņš
 Rusilo Ļevs
 Ruska Rihards
 Rutkis Jēkabs
 Rūtiņa Ilze
- Sabirovs Rinats
 Sabule Liene
 Safonovs Andrejs
 Safronova Inese
 Sagaidaka Ināra
 Sakale Laura
 Saknītis Elvijs Pauls
 Salceviča Inga
 Salenieks Eduards
 Salenieks Māris
 Samarska Diāna
 Samarskyi Roman
 Samoviča Marija
 Sandere Zane
 Sankāne Oļga
 Sardiko Egīta
 Sargūns Dāvis
 Sarkans Agris
 Sasekle Krista
 Sattarov Shokhruz
 Saulītis Agnis
 Savchenko Ekaterina
 Saveļjevs Pāvels
- Savickis Dmitrijs
 Savkina Olga
 Savkins Aleksandrs
 Sčastļivis Aleksejs
 Sčastnijs Andrejs
 Seilis Rūdolfs
 Seljivanova Jekaterina
 Semikins Vladislavs
 Semjonovs Andrejs
 Seniva Violeta
 Seņkovs Māris
 Sējējs Mārcis
 Shah Arpan Hareshkumar
 Shakya Sugan
 Sherrill Franklin
 Shivanandaiah
 Deepak Tumkur
 Sidorovičs Eduards
 Sīkora Kristīne
 Siktars Kristaps
 Silavs Sandis
 Silāre Anna
 Siliņa Madara
 Siļeckis Andrejs
 Simanovičs Kaspars
 Sīnuka Aija
 Siņicins Andrejs
 Sīvakova Evita
 Sīle Ieva
 Sīmanis Mikoss
 Sīpola Zane
 Sīpols Oliveris Oskars
 Skalkovičs Rihards
 Skarpa Laila
 Skičko Konstantīns
 Skopis Vladimirs
 Skore Edgars
 Skrastiņa Anna
 Skripka Arturs
 Skripko Artjoms
 Skrīveris Jānis
 Skudra Laura
 Skudra Marija Stefānija
 Skuja Helēna
 Skujiņa Agnese
 Skutāne Eliza
 Skutele Lelde
 Skutelis Arturs
 Skvireckis Eduards
 Sledevskis Rainers
 Slišāne Agnese
 Slišāns Intars
 Sloboda Diāna
 Smagars Aivars
 Smila Andris Artūrs
 Smirnova Anastasija
 Smirnova Elīna
 Smolovskis Andris
 Smoļaks Oskars
 Soboļevska Kristīne
 Sokolova Gaļina
 Solomencevs Artūrs
 Solovjovs Ēriks
 Sondore Daiga
 Sorokina Džanīta
 Sorokins Dmitrijs
- Sorokins Hermanis
 Sosnars Artūrs
 Sparinskis Dāvis
 Spiridonovs Aleksejs
 Sporāns Dāvis
 Sprice Arta
 Sprīņģis Norberts
 Sproģe Baiba
 Sproģe Dace
 Sproģe Ilze
 Stabiņš Reinis
 Stalidzāne Gita
 Stanka Anna
 Staņa Ģirts
 Starodubcevs Aleksejs
 Starostenko Ilona
 Starostina Marta
 Stars Māris Jānis
 Staseļūns Artūrs
 Staškēvičs Roberts
 Stepanova Jekaterīna
 Stepanova Zane
 Stepanovs Ņikīta
 Stepe Kerolaine
 Stepena Anna
 Stepens Ojārs
 Stepiņš Alvis
 Stikāne Līga
 Stikāns Mairis
 Stikuts Andris Pāvils
 Stīpnieks Jānis
 Stračiņa Ieva
 Strafun Volodymyr
 Strakis Rolands
 Strakova Malvīne Nelda
 Stramkalis Vairis
 Strautiņa Maija
 Strautiņš Rainers
 Eduards
 Strautmanis Matīss
 Strautnieks Oskars
 Strazdiņa Alise
 Strazds Andris
 Strādere Dina
 Streiča Valērija
 Striķe Dagnija
 Strods Dāvis Sandis
 Stroža Aiva
 Strupkova Evita
 Stuglis Ingars Sarmis
 Stukāns Juris
 Subhankulovs Ernests
 Sudare Līga
 Suhanovskis Dmitrijs
 Sumrova Natālija
 Suntaža Sintija
 Sunteika Illa
 Suraks Edgars
 Surikovs Ilja
 Suta Krista
 Suvorovs Kirils
 Sūcite Guna
 Svelpe Undīne
 Sveržicka Eliza Nikola
 Svilpe Lauma
 Svirčenkova Anneta

- Swathi Christina
 Divyabalaprakash
 Syed Nida Anjum
 Syundyukov Emil
- Šabanovs Aleksandrs
 Šablinskis Zigurds
 Šafika Egita
 Šaipuks Romāns
 Šaromovs Aleksandrs
 Šastakovičs Raivis
 Šaule Anna Karolina
 Šaule Elīza
 Šauriņa Eva
 Šāvējs Modris
 Šenbergā Elīza
 Šeļovs Kirils
 Šibass Rendijs
 Šilaks Artūrs
 Šimkus Anrijs
 Širokovs Maksims
 Šišovs Mihails
 Šķļarova Larisa
 Šķņarovs Andrejs
 Šķēls Mārcis
 Šķipars Ēriks
 Šlema Iveta
 Šlesers Edijs
 Šmeļova Tatjana
 Šmoteka Sintija
 Šneidere Madara
 Šnēbahs Kurts Džeralds
 Šņepste Ieva
 Šohova Ksenija
 Šološičs Jevgēņijs
 Šošins Aleksandrs
 Špakovs Viktors
 Šteinbergs Jānis
 Šteinmane Zane
 Šterna Dzidra
 Štikāne Katrīna
 Štolceris Silvestrs
 Štolcs Ričards
 Šukelaitis Vladislavs
 Šutovs Artjoms
 Švandere Alise
 Švarce Liene
 Švinberga Vita
- Tamša Olīta
 Tarasovs Dmitrijs
 Taškāne Brita
 Taube Andris
 Taurenis Arvis
 Teilāns Artis
 Telegina Jeļizaveta
 Temčuks Kirills
 Teteris Ēriks
 Teteris Rihards
 Tebergs Kristaps
 Tilgalis Toms
 Tilgass Rūdolfs
 Timošenkova Karīna
 Timoškāns Elmārs
 Timoškina Anna
 Tims Jānis
- Titava Lelde
 Tirumniece Laura
 Tjarve Jānis
 Tolēns Jānis
 Tolkačovs Valērijs
 Tomiņš Dāvis
 Tomiņš Ēriks
 Toms Harijs
 Torsters Mārtiņš
 Traškovs Agris
 Travčenko Jevgēņijs
 Trefi Saied
 Trembača Natālija
 Trikule Inga
 Trimdale Aija
 Trojanovska Karīna
 Trompets Modris
 Tropina Alīna
 Trūpa Inita
 Trūpa Renāte
 Tučs Ēriks
- Uburģe Madara
 Ugochukwu Henry Emenike
 Ulanovs Ņikita
 Uldriķis Normunds
 Uldriķis Roberts
 Ulmane Liene
 Ulme Māra
 Umbraško Krista
 Ungure Lāsma
 Upenieks Uldis
 Urbāne Anna
 Urbelis Dainis
 Urtāns Ēvalds
 Urtāns Gļebs
 Usāne Aelīta
 Ustinova Monta
 Ūtkina Valērija
 Uzare Aiga
 Uzare Inga
 Uzariņa Alisa
 Uzars Āris
- Vainšēlbauma Ninēļa
 Miriama
 Vaitkus Igors
 Valejeva Anastasija
 Valkovska Baiba
 Vaļeika Kristīne
 Vaļģis Dāvis
 Vanaga Ilona
 Vanags Edgars
 Vanags Jānis
 Vardanjans Edgars
 Varkale Annija
 Vasīle Laima
 Vasiļenko Deniss
 Vasiļevska Anna
 Vasiļjeva Tamāra
 Vasiļjevs Sergejs
 Vāvers Edijs
 Vecpūsis Varis
 Vegi Bhargav
 Veidelis Ivars
 Veilande Sindija
- Veinberga Agneta
 Veitnere Aija
 Velichkin Maxim
 Veliks Andrejs
 Ventaskraste Nora
 Ventiņa Ilze
 Veraļjeva Renāte
 Verdiša Katerīna
 Vesīngi Vilmārs
 Vestmane Elīna
 Vēvere Kristīne
 Vēvere Marina
 Vēveris Mārcis
 Vidronoka Diāna
 Viġneshwar Alavandhar Jai
 Vihovaneca Katrīna
 Vilcāne Inese
 Vilcāne Vita
 Vilcāns Raivo
 Vilciņa Edīte
 Vilkaplāters Miks
 Vīlne Madara
 Vilsons Toms
 Viļums Jānis
 Viļumsons Ģirts
 Vincāns Edgars
 Virse Sindija
 Visocka Santa
 Visune Natālija
 Viška Signe
 Višķere Zane
 Vizule Laura
 Vizulis Andris
 Vīksna Eva
 Vīksne Agnese
 Vīna Everita
 Vītola Elīna Luīze
 Vītola Liene
 Vītola Virginija
 Vītoliņš Juris
 Vītols Gatis
 Vladimirovs Danīls
 Vodolagins Staņislavs
 Voice Vladislav
 Voitiņš Rolands
 Voitkevičs Pāvels
 Voitovs Aleksejs
 Volkova Anastasija
 Volkova Jevgēņija
 Volkovs Sergejs
 Volodenoks Andris
 Volodins Igors
 Vorobjovs Vadīms
 Voronin Dmitry
 Voronova Arina
 Voroņina Iryna
 Voroņins Antons
- Wang Ziming
 Wijewardana Aruna
 Priyankara
- Yanchyk Viktorija
- Zaharans Ēriks
 Zaharenko Renārs

Zaiceva Ella
Zaiceva Regīna
Zaicis Dāvids
Zaķe Dārta Maija
Zaķe Maija
Zalcmanis Oskars
Zalžko Poljina
Zamulovica Marta
Zandersons Viesturs
Zandmanis Mārcis
Zariņa Ieva
Zariņš Francis
Zariņš Gints
Zars Kārlis
Zaube Kalvis
Zaula Sabine
Zavickis Dāvis
Zaytsev Valery
Zāģeris Ģirts
Zālītis Arvis
Zdaseņa Andrejs
Zelmanis Aleksandrs
Zelēņina Zane
Zemberga Lelde
Zemniece Sniedze
Zhuravka Olesia
Ziemele Sandra
Zommerovskis Roberts
Zrelovs Ņikita
Zujevs Eduards
Zutiņš Sandis
Zvaigzne Katrīna
Zvejniece Baiba
Zvejs Mārtiņš
Zvirbule Helēna
Zvirbulis Jānis
Zvonkovičs Vladislavs

Žagars Alberts
Žagars Jānis
Žarovs Daniels
Želonkins Romāns
Žižuns Mārcis
Žīgurs Jānis
Žogota Rimants
Žolds Daniels
Žukovska Jevgēņija
Žunda Kārlis
Žvinklis Artūrs
Žvirīņa Dana

Grāmatas dizainu un maketu izveidojis
Aleksejs Muraško. Teksta salikumā izmantoti
burtveidoli *FF Meta* (Ēriks Špikermans, Berlīne)
un *Brioni Text* (Nikola Džureks, Zagreba).

Grāmata iespiesta un iesieta Jelgavas
tipogrāfijā. Papīrs iekšlapām: *Munken Polar
Rough* 90 g/m²; papīrs vākam: *Arctic Volume
White* 300 g/m² (*Arctic Paper*, Zviedrija).