

EESTI VABARIIGI TEADUSPREEMIAD

2004

TALLINN, 2004

Raamat sai ilmuda tänu

EESTI VABARIIGI HARIDUS- JA
TEADUSMINISTEERIUMI
toetusele

Jüri ENGELBRECHT (vastutav toimetaja)
Riigi teaduspreemiate komisjoni esimees

Helle-Liis HELP, Galina VARLAMOVA

Raamatu kujundamisel kasutati laureaaside
teaduspreemiate kätteandmisel 24.02.2004 tehtud fotosid
ja diplomi fotot

SISUKORD

Saateks	5
Jüri Engelbrecht Riigi teaduspreemiate komisjoni esimehe tervitus teadus-, kultuuri- ja spordipreemiate kätteandmisel 24.02.2004	7
Tšeslav Luštšik teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest	10
Sulev Vahtre teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest	20
Nikolai Kristoffel, Teet Örd teaduspreemia täppisteaduste alal tööde tsükli “Magneesiumdiboriidi ülijuhitivuse mehhanism” eest	26
Margus Lopp (kollektiivi juht), Tõnis Kanger, Anne Paju teaduspreemia keemia ja molekulaarbioloogia alal tööde tsükli “Uued asümmeetrilised reaktsioonid ja nende katalüsaatorid” eest	36
Arkadi Berezovski teaduspreemia tehnikateaduste alal töö “Faasisiirdefrondi martensiitsetes tahkistes” eest MUUTUVATE OMADUSTEGA MATERJALID	48
Eero Vasar (kollektiivi juht), Sulev Kõks, Vallo Volke, Vootele Võikar teaduspreemia arstiteaduse alal uuringutsükli “Psühhofarmakoloogiline ja geenitehnoloogiline lähenemisviis negatiivsete emotsioonide neurobioloogiliste mehhanismide selgitamiseks” eest ÄREVUSE NEUROBIOLOOGIA – MOLEKULAARNE VAADE HINGEPEEGLISSE	58

Helgi Arst	
teaduspreemia geo- ja bioteaduste alal tööde tsükli “Mitmekomponendiliste looduslike vete optilised omadused ja veealune valgusväli” eest	66
Malle Mandre (kollektiivi juht), Katri Ots , Jaan Klõšeiko , Henn Pärn	
teaduspreemia põllumajandusteaduste alal tööde tsükli “Metsaökosüsteemi dünaamika ja okaspuude ökofüsioloogiline seisund looduslikes ning antropogeensetes stressitingimustes” eest	80
Mikko Langerspetz	
teaduspreemia sotsiaalteaduste alal tööde tsükli “Postsotsialistliku siirde mõjud Eesti ühiskonnas” eest POSTSOTSIALISTLIKUST SIIRDEST UUE ÜHISKONNAKORRA KONSOLIDEERUMISENI – JA EDASI?	88
Mati Laur	
teaduspreemia humanitaarteaduste alal uurimuse “Eesti 18. sajandi ajalugu” eest	96

SAATEKS

Kaheksas köide Eesti teaduspreemia laureaatide töödest näeb ilmavalgust Euroopa Liidus. Tulemused sulanduvad uude põnevasse mosaiiki, millele võiks nimeks anda “Euroopa teadusruum”. Kuid see ruum on üksikute alamuuride summa, kus põimuvad erinevad keeled, koolkonnad, probleemid ja ka tulemused. Ning tulemused väljuvad alati Eesti raamidest, sest nii ongi lugu teaduses.

Pikaajaline teadustöö näitab seda eriti värvikalt, sest “ükski inimene pole saar”, nagu ütles J. Donne. Laureaatide teadustöö on põimunud arvukate kolleegidega nii meil kui ka mujal. Uurimistöö objektideks on mets ja vesi, materjalid ja teadvus, ühiskond ja ajalugu. Laureaatide tulemused on rakendatavad juba täna, küll praktiliste sammudena, küll maailma parema mõistmisena. Väga iseloomulikuna püstitab üks laureaat täiesti otsese küsimuse – kuhu edasi? Tegelikult on see küsimus varjul kõikides ülevaadetes, sest teadusuuringud on ju lõputu otsing. Ikka rohkem ja rohkem on probleeme meie keerulises maailmas ja Euroopa viimase aasta suundumus on selge – rohkem tähelepanu alusuuringutele. Kui põhialused paremini selged on, saab ka tulemusi kiiremini kasutada. On ju kiirus teadmispõhise ühiskonna üks alustalasid – info, mis tehtud, mis tegemisel, on levimas (või vähemalt peaks levima) kiiremini kui kunagi varem.

Üks iseloomulik tahk on teaduses veel – säravad tulemused sünnitavad uusi säravaid tulemusi. Selle tõestuseks piisab vaadata ühe tänase pikaajalise teadustöö laureaadi seost oma õpilasega, kes pälvis aastapreemia oma teadustöö eest. Edasi kanduvad just väärtussüsteemid ja printsiipialne hoiak või, nii nagu ütles Hermann von Keyserling, – loov tunnetus.

Nii on nende kaante vahel järjepidevus teaduselusel, kopsakad tulemused ja tulevikuvaade.

Autasustamisel on laureaatidele juba õnne soovitud, selle raamatu saateks soovin loovat tunnetust lugejatele.

Jüri Engelbrecht



Riigi teaduspreemiate komisjoni esimees, Eesti Teaduste Akadeemia president
Jüri Engelbrecht

Jüri Engelbrecht

Riigi teaduspreemiate komisjoni esimees

Tervitus teadus-, kultuuri- ja spordipreemiate kättemõtmisel 24.02.04

Mul on hea meel kõiki õnnitleda Eesti Vabariigi 86. aastapäeva puhul.

Iga aasta toob teaduses uut ja ootamatut – see on omane inimloomusele. Me küsime teinekord, millised on teadmiste piirid, me küsime, mida saab teadus teha inimkonna heaks. Täna sel päeval, mil räägime palju Euroopa Liidust ja Euroopa teadusruumist, on teaduse globaalne iseloom selgelt tunnetatav. Ometi on meil teadmisi vaja ka kodus, see tähendab Eestis. Teadmispõhine ühiskond on kõlmas paljudes arutlustes ja selle mõiste varjus kipub teinekord pragmaatilisus võimust võtma. Tehke ainult seda, mida vaja igapäeva elu arendamiseks öeldakse, jättes aga ütlemata, mida siis vaja on. Kui ma midagi seon vajadusega, siis meil on vaja head teadust. Ainult hea teadus on võimeline ette vaatama ja olukorda hindama, soovutama teadmisi igapäeva tarbeks ja oskama eraldada teri sõkaldest. On äärmiselt hea meel, et me seda suudame. Et meil on teadlasi, kel arusaamise sügavus ja kontseptuaalne mõtlemine, vaimu-jõud ja energia, otsustusvõime ja perspektiivitunne, tõepüüdlus ja paindlikkus, mõtteelegantsus ja vastuvõtlikkus. Traditsiooniliselt on Vabariigi aastapäev, 24. veebruar, see päev, mil peaminister annab üle teaduspreemiad. Ja on traditsioon, et selleks koguneme me Akadeemia saali, kus akadeemiline pidulikkus on seotud vaadetega kaugemale – nii uuenevale vanalinnale kui kasvavale uuslinnale.

Me alustame preemiatest pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest. Neid preemiaid on kaks ja komisjonil oli väga raske, sest tublisid kandidaate oli palju.

Maailm meie ümber on allutatud füüsikaseadustele. Nende tundmaõppimine nõuab teadmisi ja täpset meelt, vaistu ja püsivust. 50 aastat on tänane laureaat uurinud luminesentsi ja kristalle, loonud füüsikute koolkonna Tartus ja kasvatanud nii aukartustäratava hulga õpilasi – 50 teaduskraadiga füüsikut, 12 professorit, 2 akadeemikut, 10 Eesti teaduspreemia laureaati. Väga paljus on ta kujundanud Eesti füüsikute vaimsust. Preemia vääriliseks on tunnustatud Tšeslav LUŠTŠIK.

Eesti ajalugu on olnud pikk ja raske ja me peame seda tundma, nii kurvemaid kui rõõmsamaid perioode siin kivisel Läänemere nurgal. Ajaloost on kantud meie rahvuslik meel, mis on meid hoidnud ka okupatsiooniaastail. Me pärjame täna ajaloo professorit, kes on üle poole sajandi Tartu Ülikoolis ajalugu uurinud ja õpetanud. Meest, kelle elutööks on olnud Eesti ajaloo vanem osa ja kelle monograafiad on ajaloo kullafondis, meest, kelle õpilaste hulgas on ajaloolasi ja poliitikuid ja kelle peatoimetamisel on valmimas paljukõiteline Eesti ajalugu. Preemia vääriliseks on tunnustatud Sulev VAHTRE.

TÄPPISTEADUSED

Preemia vääriliseks tunnustati füüsikud, kes uurisid ülijuhtivust kõrgtemperatuuril. Nende teooria ja selle õigsust kinnitavad eksperimendid avavad uued võimalused kõrgtehnoloogias. Preemia väärilisteks tunnustati Nikolai KRISTOFFEL ja Teet ÖRD.

KEEMIA JA MOLEKULAARBIOLOOGIA

Keemikute tööd on alati seotud ainete vaheliste reaktsioonidega, mille tulemusena sünteesitakse uusi aineid nii elusas kui eluta looduses. Premeeritud töö käsitleb asümmeetriliste reaktsioonide uurimist – need on reaktsioonid, mis ühelt poolt on sarnased, teiselt poolt aga erinevad nagu kindad kindapaaris. Uuringute tulemusena saab sünteesida juhitud omadustega ühendeid. Juba on näha ka alusuuringute rakendamist praktikasse, näiteks meditsiinis või fungitsiidide tootmisel. Preemia saab kollektiiv Margus LOPP (kollektiivi juht), Tõnis KANGER ja Anne PAJU.

TEHNIKATEADUSED

Mehaanika on vanimaid teadusvaldkondi üldse, kuid ometi pakub üllatusi. Tänapäeva materjalide käitumise ennustamisel on vaja tunda termodünaamikat, seda eriti kujumäluga sulamite kasutamisel. Premeeritud uuringud käsitlevad uut suunda – termomehaanikat, kus elegantne alusuuring on realiseeritud praktilise algoritmi näol, mis võimaldab arvutada mehaanikalisi pingevälju kõrgtehnoloogias kasutatavates materjalides. Preemia saab Arkadi BEREZOVSKI.

ARSTITEADUSED

Tänane arstiteadus on tihedalt põimumas geenitehnoloogiliste meetoditega, et anda selgitust organismi käitumisele molekulaarsete tunnuste põhjal. Ja nii käsitlebki premeeritud kollektiivi uurimus psühho-farmakoloogilist ja geenitehnoloogilist lähenemisviisi negatiivsete emotsioonide neurobioloogiliste mehhanismide selgitamiseks. Preemia saab kollektiiv Eero VASAR (kollektiivi juht), Sulev KÕKS, Vallo VOLKE ja Vootele VÕIKAR.

GEO- JA BIOTEADUSED

See on loodus meie ümber ja meie tähelepanu on täna suunatud merele ja järvedele, mille puhtus meile ju nii oluline on. Looduslike vete optilised omadused on otseselt sõltuvad nendes lahustunud ainetest, hõljumitest ja reostusest. Kaugseire meetodite arendamine, mis lubab vete kvaliteeti määrata lennuvahenditelt ja satelliitandmetelt, on oluline samm keskkonnakaitse huvides. Äsja publitseeritud teadusmonograafia ja teiste tulemuste eest pälvis geo- ja bioteaduste aastapreemia Helgi ARST.

PÕLLUMAJANDUSTEADUSED

Meie loodusvarade hulka kuulub ka mets, mida tuleb harida ja tunda, nii nagu viljapõldusidki. Metsaökosüsteemi uuringud on olulised nende produktiivsuse ja kvaliteedi hindamisel, püsikindlate puistute rajamisel ebasoodsates keskkonnanatingimustes, meil näiteks Kirde-Eestis ning Edela-Eestis. See laiahaardeline uurimus nõuab meeskonnatööd ja nii saabki aastapreemia kollektiiv, kes on tulemusrikkalt uurinud metsa ökosüsteemi dünaamikat ja okaspuude ökofüsioloogilist seisundit. Kollektiivi juht Malle MANDRE, koos temaga Katri OTS, Jaan KLÕŠEIKO ja Henn PÄRN.

SOTSIAALTEADUSED

Võiks öelda, et sotsiaalteadused uurivad elu meie ümbruses. Siirdeühiskonna protsessid on keerulised ja vajavad lahtimõtestamist – uue identiteedi otsing, vabanemine nõukogude pärandist, kodanike-ühiskonna teke, väärtustesüsteemi kujunemine ja palju muud. Aastapreemia vääriliseks tunnustatud uuringud avavad neid tahke Eesti ühiskonnas ja tutvustavad neid maailmale. Mul on hea meel kuulutada aastapreemia laureaadiks sotsioloog Mikko LAGERSPETZ.

HUMANITAARTEADUSED

Me alustasime ajaloo ja lõpetame ajaloo, Eesti ajaloo 18. sajandist. Peame ju ka teadma, et Eesti- ja Liivimaa olid tollel ajal tihedalt seotud poliitilise arenguga mujal Euroopas, et talurahva vaimuelu oli oluline, et agraarreform tagas ülemineku modernsesse ühiskonda. Niisiis, humanitaarteaduste aastapreemia läheb viljakale ajaloolasele ja ma usun, et laureaati ei pahanda, kui ütlen nii: aastapreemia saab Sulev Vahtre õpilane Mati LAUR.

Lubage mul tänada riigipreemiate komisjoni suure töö eest. Kui komisjonil on olnud raske, siis on see märgiks, et teadusuuringud edenevad.

Teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest



Tšeslay
Luštšik

Sündinud 15.02.1928 Sankt-Peterburgis

- 1946 Sankt-Peterburgi 284. Keskkool
- 1951 Sankt-Peterburgi Riiklik Ülikool, füüsikateaduskond
- 1954 füüsika-matemaatikakandidaat, Sankt-Peterburgi Riiklik Ülikool
- 1964 füüsika-matemaatikadoktor, Vavilovi nim Riiklik Optika Instituut, Sankt-Peterburg
- 1964 Eesti Teaduste Akadeemia liige
- 1968 professor

Alates 1954. aastast Tartus, Eesti TA Füüsika Instituut (alates 1997 TÜ Füüsika Instituut): 1954–1959 ja alates 1994 kuni käesoleva ajani vanemteadur, 1960–1993 laboratooriumijuhataja, 1974–1988 osakonnajuhataja.

Avaldanud 350 teaduspublikatsiooni.

Sada aastat enne minu Eesti Teaduste Akadeemia akadeemikuks valimist, 1864. aastal, saadeti mu vanavanaisa Feliks Luštšik tsaarivalitsuse poolt Siberisse, tema perekond aga Poolast välja. Perekond jäi elama Peterburi, kus sündisid mu vanaisa ja isa. Mina sündisin 15. veebruaril 1928. a kolmanda põlve peterburilasena. Minu isa Bronislav Adamovitš Luštšik töötas aastaid inseneri ja peainsenerina elektrijaamu projekteerivas instituudis, kasvatades oma eeskujuga minuski tööarmastust ja loomingutahet. Minu ema Aleksandra Vladislavovna Luštšik suri 1942. a veebruaris blokeeritud linnas nälga, kuid suutis päästa oma laste elu.

1946. aastal lõpetasin ühe kolmest sõjajärgse Leningradi poisslaste keskkoolist ja mind võeti vastu ülikooli füüsikateaduskonda. Ülikooli juurde kuuluva esimese Venemaa füüsika-alase teadusinstituudi seinte vahel veetsin oma kaheksa üliõpilas- ja aspirantuuriaastat. Mul oli õnn kuulata akadeemikute S. E. Friši, V. A. Foki, T. P. Kravetsi, B. I. Stepanovi ja professorite M. V. Veselovi, L. E. Gurevitši, V. M. Tšulanovski, A. N. Zaideli, N. A. Tolstoi suurepäraseid loengukursusi. Teaduslikel seminaridel tegid ettekandeid akadeemikud A. N. Terenin, J. I. Frenkel, A. F. Joffe, E. F. Gross.

See oli pooljuhtide füüsika tormilise arengu aeg. Pooljuhtide elektrilised omadused võimaldasid teostada revolutsiooni tehnikas, minna üle suurtelt vaakumraadiolampidelt pooljuht-mikroelektroonikale. Reaalne vaakum asendati kristalli ideaalse perioodilise struktuuriga, milles liikusid kvaasiosakesed: juhtivuselektronid ja positiivset laengut kandvad kerged kvaasiosakesed, mis said nimetuse “auk” (puuduv elektron). Pooljuhtides saab kõrge liikuvusega kvaasiosakesi tekitada, kiiritades neid nähtava või isegi infrapunase valgusega, nii et neeldunud fotonid tekitaks kristallis elektroonseid omaergastusi. Minu aspirantuuriaastate ajal optiliste nähtuste tundmaõppimine pooljuhtides alles algas. Kuigi füüsikateaduskond andis meile hea ettevalmistuse kvantmehaanikas, aatom- ja molekulaarspektroskoopias, teati neil aastatel veel väga vähe optilistest nähtustest kristallides – dielektrikutes, milles keelatud energiate tsoon (energiapilu) on palju kordi laiem kui pooljuhtides. Selleks, et laia keelutsooniga kristallile suunatud fotonid suudaksid seal tekitada liikuvaid elektrone ja auke, tuli kasutada vaakumultraviolettkiirgust (VUV) (footoneid energiaga 6–15 eV). Spektri VUV-piirkonna jaoks maailma tööstus tol ajal standardriistu ei valmistanud. Lihtne VUV-monokromaator oli aga juba ehitatud akadeemik A. N. Terenini, keda ma oma teaduslikuks vanaisaks pean, laboratooriumis.

Minu vahetuks juhendajaks 4.–5. kursusel ja aspirantuuris oli Fjodor Klement – üks A. N. Terenini õpilastest. Alates 4. kursusest alustasin koos abikaasa Natalja Luštšikuga F. Klementi väikeses laboratooriumis õhukeste kilede ja ioonsete monokristallide uuringuid. Kasutades võimsa sädelahenduse VUV-kiirgust ja Terenini monokromaatorit tekitasinioonkristallides selektiivselt elektronergastusi ja registreerisin ühe esimese fotoelektronkordistaja abil kristalli kuumutamisel tekkivat luminesentsi, mis tekkis erinevatest lõksudest vabanevate elektronide ja aukude rekombineerumisel. Luminesents-termoaktiivsioonspektroskoopia meetodit täiendasime hiljem, juba Tartus, optilise

neeldumise ja elektronide paramagnetilise resonantsi spektrite relaksatsiooni mõõtmisega, samuti kristallide elektronemissiooni ja termostimuleeritud voolude mõõtmistega. See võimaldas detailselt uurida elektronide ja aukude käitumist paljudesioonkristallides.

Kohe pärast füüsika-matemaatikakandidaadi dissertatsiooni kaitsmist Lenini-gradi ülikoolis sõitsin perekonnaga oma juhendaja, tol ajal juba Tartu Ülikooli rektori F. Klementi kutsel Tartusse. Alates 1954. aastast kuni käesoleva ajani töötan Tartu Füüsika Instituudis. Mõned esimesed aastad lugesin loengukursusi kristallide ja molekulide luminesentsist Tartu ja Riia Ülikooli üliõpilastele, aspirantidele ja õppejõududele, algatasin iganädalase tahke keha füüsika seminari (töötas regulaarselt kuni 1967. aastani), jätkates samaaegselt lumineseerivate ioonkristallide termoaktivatsioon-spektroskoopia uute meetodite väljatöötamist [Lushchik, 1955] ning valides välja põhisuunad edasisteks teaduslikeks ja rakendusuuringuteks paljudeks aastateks. Sellele aitas palju kaasa NSVL teadlastele 1956. aastal avanenud võimalus osaleda ühel esimestest püüetud ajaegsetest rahvusvahelistest teaduskonverentsidest Pariisis A. N. Terenini poolt juhitud Peterburi, Moskva ja Tartu füüsikute-spektroskoopistide grupi koosseisus. Aastatepikkune raudne eesriie Lääne ja Ida vahel oli lõpuks avanenud. Sel konverentsil sai esmakordselt teatavaks hiljuti pooljuhtides avastatud neutraalse kõrge liikuvusega kvaasiosakese – eksitoni luminesents. Küpses soov eksperimentaalselt uurida kvaasiosakeste – elektronide, aukude ja eksitonide käitumist laia keelutsooniga dielektrikutes ja võrrelda seda kvaasiosakestega kitsa keelutsooniga pooljuhtides.

Ioonkristallide kvaasiosakeste uurimine nõudis spetsiaalseid meetodeid ja uurimisriistu. Elementaarsete elektronergastuste (kvaasiosakeste) tekitamiseks ja uurimiseks dielektrikutes tuli hõlvata kuuekümnendate aastate keskpaigaks peaaegu uurimata VUV ja ultrapehme röntgenkiirguse spektripiirkonnad ning temperatuurivahemik 2–500 K, töötada välja ioonkristallide põhjaliku puhastamise ja kasvatamise meetodid, samuti võtted nende legerimiseks lumineseerivate sondidega, mis võimaldaksid jälgida eksitonide ja aukude migreerumist kristallvõres. Selliste kõrgtundlike sondidena kasutasime esmakordselt rühma “elavhõbedasarnaseid” s⁻-ioone (Ga⁺, In⁺, Tl⁺, Ge²⁺, Sn²⁺, Pb²⁺ jt). Uuriti detailselt lisanditsentrite füüsikalise-keemilise struktuuri, elektron-võnkeprotsesse nende ergastamisel, relakseerumisel ja lumineseerimisel [Lushchik jt, 1960b; Lushchik jt, 1970].

1960. aastal ületas minu poolt juhitud ioonkristallide füüsika laboratoorium ühena esimestest maailmas lühilainelise kiirguse (6–22 eV) kasutamisega seotud tehnilised raskused ja lülitus kvaasiosakeste iseärasuste uurimise laia keelutsooniga dielektrilistes materjalides, kasutades optilisi, elektrilisi ja magnetmeetodeid [Lushchik jt, 1961; Ilmas jt, 1965; Lushchik jt, 1973]. Selle keerulise probleemi uurimine nõudis paljude eksperimentaatorite ja teoreetikute kaasamist mitte ainult Tartus, vaid ka Riias ja Peterburis. Ajavahemikul 1967 kuni 1991 toimusid vaheldumisi Eestis ja Lätis 34 neljapäevalist laia keelutsooniga materjalide füüsika alast Baltimaade seminari. Erilist tähelepanu pöörati erinevate anorgaaniliste dielektrikute klasside oma- ja lisandite elektronergastuste fundamentaalsete iseärasuste ning nende uutel tehnika-aladel praktilise kasutamise võimaluste arutamisele. Seminari juhendasin koos oma õpilase ja kolleegi Läti Ülikooli professori Ilmar Vitolsiga. Aja jooksul muutusid seminarid populaarseks mitte ainult Eestis ja Lätis, vaid ka Peterburi, Jekaterinburgi ja

Tomski füüsikute ning isegi Tartus õppinud Kasahstani ja Kirgiisia aspirantide ja stažööride hulgas.

Nagu oli oodata, on paljude laia keelutsooniga kristallide eksitonide optilised spektrid iseloomulike omadustega ja erinevad märgatavalt pooljuhtide eksiton-spektrist. BeO, SrO, Al₂O₃, Y₂O₃ kristallides kaotavad VUV kiirgusega selektiivselt tekitatud eksitonid varsti pärast tekitamist liikuvuse (autolokaliseeruvad) ja kaovad siis iseloomuliku laia spektriribaga kiirgusega [Lushchik jt, 1998; Kirm jt, 1999; Lushchik jt, 2000]. Esmakordselt tuvastati ja uuriti kergelt liikuvate vabade eksitonide joonkiirgust kristallides NaI, KI, RbI, NaBr [Kuusmann jt, 1975; Lushchik jt, 1975; Lushchik, 1982]; MgO, CaO, [Lushchik jt, 1975; Lushchik jt, 2000] ning unikaalsetes LiH, LiD kristallides [Lushchik jt, 1979; Lushchik jt, 1985]. Leelisjodiidide näitel tuvastati eksperimentaalselt esmakordselt vabade (kõrgliikuvate) ja autolokaliseeritud (liikumatu) eksitonide, mille põhiseisundid on eraldatud aktivatsioonibarjääri, kooseksisteerimine [Lushchik jt, 1979; Lushchik, 1982]. Sellise barjääri olemasolu olid teoreetiliselt ennustanud L. D. Landau ja E. N. Rashba. Meie eksperimendid näitasid, et dielektrikutes tuleb eristada vabu ja relakseerunud kvaasiosakesi (eksitonid ja augud). Seni uuritud dielektrikutes on juhtivuselektronide autolokaliseerumine haruldane nähtus, kuid ometi leiti see hiljuti seatina halogeniidides.

Erilist huvi äratas ioonkristallide eksitonide ebatavalise kiirguseta lagunemise avastamine; mitte soojuse eraldumisega, nagu oletas Frenkel, vaid nanomõõtmeliste stabiilsete struktuuridefektide paari, nn. F- ja H-tsentri tekkega. Lihtsaima F-tsentri struktuur on ammu tuntud – see on kristallvõre tühja võresõlme (vakantsi) juures lokaliseerunud elektron. F-tsentri tekke kristallide kiiritamisel X-kiirtega tuvastas juba A. F. Joffe. Palju aastaid arvati, et X-kiired tekitavad kristallis liikuvaid elektrone, mis lokaliseeruvad enne kiiritamist olemas olnud vakantsidel. Juba meie esimesed eksperimendid KI ja KBr kiiritamisega VUV-kiirgusega näitasid, et elektronide selline triviaalne haaramine vakantsidele ja teistele defektidele lisanditsentrite fotoioniseerimisel tõesti toimub. Võrreldamatult efektiivsemalt tekivad F-tsentrid kristallis aga juhul, kui ergastavad footonid tekitavad selektiivselt eksitone või rekombineeruvaid elektrone ja auke [Lushchik jt, 1960a]. Koos M. Elangoga 1964. a Salaspõlts Balti tuumareaktoril IRT-2000 teostatud eksperimendid näitasid, et NaCl ülipuhastes kristallides kiirete neutronite, γ -kiirte ja X-kiirtega F-tsentrite ja teiste defektide tekitamise protsessid ei erine praktiliselt protsessidest, mis toimuvad selektiivsel kiiritamisel VUV-kiirtega (7,8–22 eV) [Lushchik jt, 1965]. VUV-kiirgusega F-tsentrite tekitamise spektreid mõõdeti laboratooriumis mitmesuguste optiliste (E. Ilmas, N. Roose) ja fotoelektriliste meetoditega (H. Käämbre, V. Bitševin). H-tsentrite tekitamine registreeriti 4 K juures elektronide paramagnetilise resonantsi meetodil (J. Kolk), seejärel foto- ja termoaktivatsioon-spektroskoopia meetodeil (A. Luštšik, E. Vassiltšenko, E. Tiisler). Kooskõlas I. Vitoli ja minu poolt pakutud mehhanismiga [Lushchik jt, 1977; Lushchik, 1986] tekitatakse kõikides leelishalogeniidkristallides 4 K juures eksitonide lagunemisel ja elektronide lokaliseeritud aukudega rekombineerumisel F ja H tsentrid, mis asuvad üksteisest 3–5 ioonidevahelise teepikkuse kaugusel. Tuvastati ka F-H paaride ümberlaadumine laengute tunneleerumisel, mille käigus tekivad anioonvakantsid ja halogeeni sõlmedevahelised ioonid [Lushchik jt, 1982].

Elektronsete omaergastuste lagunemine, mille käigus tekivad nanomõõtme- lised struktuuridefektid, on paljude tahkete ainete kiiritusliku ebastabiilsuse põhjuseks. Monograafias [Lushchik, Lushchik A., 1989] on analüüsitud põhi- faktoreid (energeetiline, ajaline, orientatsiooniline, temperatuuriline), mis mõ- juvad kiiritusdefektide tekitamisele ja kõrgtemperatuursele stabiliseerimisele. Paljudes dielektrikes ületab see defektide tekkemehhanism efektiivsuselt oluliselt klassikalist nn “löökmehhanismi”, mille korral defekte tekitavad kii- rete osakeste (prootonid, neutronid, ioonid) põrked kristalli moodustavate ioonidega (aatomitega). Paljude metallide jaoks on need “piljardi” protsessid hästi uuritud ja teoreetiliselt läbi arvatud. Löökmehhanismide arvutused annavad aga kiirituskindluse jaoks kõrgendatud näitajad. Võimalik, et mitte ainult laia keelutsooniga dielektrikes, vaid ka pooljuhtides ja isegi metallides tuleb arvestada löökmehhanismide kõrval ka mitmesuguste elektronergastuste lagunemise protsessidega, mille käigus tekib nanodefekte, eriti kristallvõre nõrgestatud kohtades (materjali pinnal jne).

Alates 1968. aastast muutus tahkiste füüsika alastele uuringutele kättesaada- vaks polariseeritud, laia spektripiirkonnaga sünkrotronkiirgus, mis tekib suure energiaga elektronide või positronide tsüklilistes kiirendajates ja haarab ka VUV piirkonna (6–40 eV). On loomulik, et esmajärjekorras kasutasid indust- rialsete kiirendajate suuri võimalusi need vähesed laboratooriumid, kes juba ammu enne “sünkrotroniajastut” teostasid uuringuid tahkiste VUV-spektro- skoopia piirkonnas. Juba 1964. aastal meie laboratooriumis Ilmas, Liidja ja mi- na avastasime ionokristallide fotoluminesentsi kvantsaagisega $QY > 1$. Kris- talli poolt neelatud üks foton transformeerub kaheks-kolmeks väiksema ener- giaga fotoniks. Seda efekti hakati nimetama fotonkordistamiseks (või tükel- damiseks) [Ilmas jt, 1965]. Laboratooriumis teostati suur otsinguprogramm ökoloogiliselt puhaste (elavhõbedavabade) luminesentslampide jaoks foton- kordistamisega spektraaltransformaatorite väljatöötamiseks. E. Ilmase, T. Sa- vihina ja minu poolt uuriti läbi üle saja FI-s, TÜ-s (I. Meriloo, M.-L. Allsalu jt.) ning mõnes rakendusinstituudis valmistatud spektraaltransformaatori. Mõ- ned neist (näiteks $Y_2O_3:Eu$, $Y_2O_2S:Eu$, mille $QY \approx 2$) leidsid kasutust neoon- luminesentslampides. Kõige perspektiivsemate – ksenoonlampide jaoks kiiri- tuskindlaid spektraaltransformaatoreid, mille $QY > 1$, siis välja töötada ei õnnes- tunud, kuid $QY > 1$ saamiseks vaadeldi [Lushchik, Savikhina, 1981] võimalikke liikuvate eksitonide osalusega protsesse, samuti elektronide ja aukude kas- kaadrekombinatsioone, mida praegu edukalt uuritakse nii meie kui teistes labo- ratooriumides [Lushchik A. jt, 2004].

Kui 1986. aastal avastati mõnede keeruliste oksiidide kõrgtemperatuurne üli- juhtivus (KTÜJ), omandati meie laboratooriumis, kus oli olemas lumines- seerivate metallioksiidide väljatöötamise rikkalik kogemus, kiiresti $Y_1Ba_2Cu_3O_{6+x}$ monokristalliliste ja keraamiliste objektide valmistamise tehnoloogia (A. Maaros, I. Meriloo). Meie laboratooriumis uuriti KTÜJ objekte es- makordselt luminescentsmeetoditega (F. Savihhin, E. Feldbach, I. Kuusmann, R. Kink) [Lushchik jt, 1988; Lushchik jt, 1991]. Selgus, elektronkimbu nano- sekundiliste impulssidega ergastatava laiaribalise kiirguse (tsoonisene aukluminesents) lühilaineline serv jahutamise käigus süsteemi üleminekul ülijuhtivasse seisundisse järsult muutub, mis viitab elektronide tiheduse ümber- jaotumisele valentsitsooni serva juures, tänu aukude kollektiivi tekkimisele, mis ongi $Y_1Ba_2Cu_3O_{6+x}$ ülijuhtivuse eest vastutav. Meie katsed leida elektroni-

de kiirguslikku rekombineerumist ülijuhtiva aukude kollektiiviga lõppes edukalt. Ülijuhtiv kollektiiv osutus püsivaks mitte ainult, nagu juba teada, hajumise suhtes defektidel ja kristallvõre võngetel, vaid ka kiiritamisega tekitatavate mittetasakaaluliste elektronide mõju suhtes. Finantseerimise lõppemise tõttu tuli 1992. aastal keeruliste oksiidide KTÜJ alased uuringud katkestada.

TÜ FIioonkristallide füüsika laboratooriumi, mida juba 10 aastat, alates 1994. aastast, juhivad tahkisefüüsika professor D.Sc. Aleksandr Luštšik, põhilised jõupingutused on suunatud laia keelutsooniga halogeniidide ja eriti metallioksiidide VUV spektroskoopia arendamisele. Kasutusele on võetud moderniseeritud unikaalsed laboratoorsed seadmed materjalide lühilaineliste kiirguste mitmete uute liikide (tsoonisisene aukluminesents, krossluminesents, rekombinatsioonikiirgused) uurimiseks 5–500 K juures. Neid kiirgusi ergastatakse elektronkimpudega ja laboratoorsete VUV-kiirguse allikatega. Regulaarne HASYLAB, DESY (Hamburgis) ja MAX-Lab (Lundis) sünkrotronide kogujaringide kiirguse kasutamine võimaldas koondada laboratooriumi põhilised pingutused laia keelutsooniga materjalide protsesside spetsiifika uurimisele tingimustes, kui üks 10–40 eV energiaga foton tekitab 2–4 ruumiliselt korreleeritud ergastust. Kristallide-dielektrikute puhul, mille keelutsoon (E_g) on vahemikus 1,5 kuni 4 eV, õnnestus spetsiaalselt väljatöötatud spektraalkineetiliste meetoditega (kasutades ka ühe telje suunalist elastset survet) eristada elektronergastuste kordistamise – ühe footoni poolt 2–3 elektronergastuse tekitamise – kolm põhilist mehhanismi. Esimene neist on seotud, nagu pooljuhtides, kuuma fotoelektroniga sekundaarse elektron-auk paari tekitamisega. Teine ja kolmas mehhanism on seotud kuumade fotoelektronidega sekundaareksitonide tekitamisega [Lushchik A. jt, 1996] ja lisanditsentrite otsese ergastamisega (gaasides jälgitud Franck-Hertzi efekti analoog) [Feldbach jt, 1997]. Need protsessid on paljude stsintillaatorite funktsioneerimise aluseks, mis võimaldavad registreerida mitmesuguseid kiirgusi uusimates meditsiiniseadmetes, aga ka uutes kõrgete energiatega füüsika alastes uuringukompleksides. Kaasajal otsivad maailma juhtivad firmad uusi spektraaltransformaatoreid VUV kiirguse nähtavaks muutmiseks, nii valgusallikate kui ka televisiooniseadmete tarvis, kus traditsiooniline elektronkimp on asendamisel ksenooni gaaslahenduse VUV-kiirgusega (7–9 eV). Selliste transformaatorite efektiivseks tööks tuleb rakendada fotonkordistamise uusi mehhanisme, mis töötaksid footonite oluliselt madalamatel lävienergiatel. Neis otsingutes osalevad muidugi ka TÜ FI füüsikud [Lushchik A. jt, 2003].

Kui üks foton tekitab kaks-kolm ruumiliselt korreleeritud elektronergastust, tekib lokaalne ebanormaalselt kõrge kvaasiosakeste tihedus, mis, nagu selgus, on eriti soodne toatemperatuuril ja veel kõrgematel temperatuuridel püsivate defektide tekitamiseks [Lushchik A. jt, 1995]. Ühelt poolt on see efekt oluline kasutamiseks mõnedes pikaajalise mälu seadmetes, näiteks V. Denksi (Tartus) ja V. Demidenko (St.Peterburg) poolt välja töötatud alumosilikaatide (sodaliitide) optilistes keraamikates [Lushchik jt, 2001], teiselt poolt aga äärmiselt kahjulik võimsate energeetikaseadmete konstruktsioonimaterjalide kiirituskindlusele. Laboratooriumis on näidatud, et kolmest-neljast ruumis lähestikku asuvast elementaardefektist koosnevad rühmad töötavad omapäraste, mikro- ja makrodefektide teket soodustavate idudena, muutes suurte doosidega kiiritamisel paljud dielektrilised materjalid rabadaks ja kergesti purunevaks.

Pärast vanusepiiri ületamise tõttuioonkristallide füüsika laboratooriumi juhataja tööpostilt lahkumist töötan instituudis vanemteadurina lepingu alusel. Osa tööajast pühendan endiselt mõnede uuringute planeerimisele ja tulemuste arutelule. Samuti analüüsin, mil määral on end õigustanud meie prognoosid laia keelutsooniga materjalide füüsika arengu suhtes ning milliseid korrektsioone tuleks teha, lähtudes tänapäeva reaalsusest. Dielektriliste materjalide defektide alasel rahvusvahelisel konverentsil ICDIM 1981. aastal usaldati mulle kokkuvõtliku lõppettekande tegemine, mis sisaldas konverentsi lõppjärelused ning laia keelutsooniga materjalide füüsika arengu ja nende rakenduste prognoosi lähitulevikuks [Lushchik, 1981]. Neil aastail kuni 1991. a juhatasin suuri sektioone NSV Liidu Teaduste Akadeemia kahes –luminestseerivate materjalide ning tahkiste kiiritusfüüsika teadusnõukogus. Need teadusnõukogud koordineerisid paljude instituutide teadustegevust, organiseerisid teaduskonverentse ning jälgisid hoolikalt maailmateaduse uudiseid. Selgus, et peaaegu kõik minu 1981. aasta prognoosid on end õigustanud, ehkki realiseerumise tempod on olnud oodatust palju aeglasemad. Järjekordse ICDIM konverentsi eel, mis toimub 2004. a juulis Riias ning mille organiseerimine on usaldatud Riia ja Tartu füüsikutele (kaasesimehed I. Tale ja A. Luštšik), oli mul võimalus tutvuda dielektriliste materjalide füüsika alaste uuringute eesliini temaatikaga. Endiselt huvitavad teadlased elektronergastuste käitumise iseärasustest laia keelutsooniga materjalide erinevates klassides, kuid uuritavate süsteemide energiapilu laius on jõudnud juba 22 eV-ni (kristalliline heelium). Enamus uuringuid, arvestades uue tehnika huvisid, on suunanud tähelepanu keerulistele mitmekomponendilistele metallide oksiididele ja fluoriididele, mille E_g asub vahemikus 2 kuni 14 eV, alustades kitsa keelutsooniga niobaatidest kuni laia keelutsooniga aluminaatide, boraatide ja fluoriidideni. Uuritakse ruumilisi ja pinnanähtusi, keerulisi nanostruktuure, kuni nanotoruden välja. Jätkab fotonkordistamise intensiivne uurimine, mida nüüd sagedamini nimetatakse 'photon cutting'. On ilmunud palju uusi materjale monokristallide, keraamikate ja õhukeste kilede kujul. Palju tähelepanu pööratakse lühiealiste ja stabiilsete kiiritusdefektide tekitamise iseärasustele materjalides äärmuslikult suurte kiiritustiheduste ja dooside rakendamisel. Paljud reaalseina tunduvad lootused uute materjalide saamiseks nanoelektronika, laseroptika, valgustehnika, selektiivse registreerimise ja dosimeetria jaoks kahjuks ei realiseeru materjalide ebapiisava kiirituskindluse tõttu. Konstruksioonimaterjalide ebapiisav kiirituskindlus osutub raskesti ületatavaks barjääriks ka termotuumaeenergeetika arenguteel, mis, tänu liitiumi sisaldavate materjalide kasutamisele toodaks ise kasutatavat tuumakütust (tritium). Loodan, et eesti füüsikud ja keemikud suudavad selles suhtes olla Euroopa Liidu teadusele ja tehnikale kasulikud.

Pärast oma teadusliku ja rakendusteadusliku loomingu mõnede etappide ja tulemuste lühikest kirjeldamist märgin, et minu teaduslike publikatsioonide nimestik (ilma ettekannete teesideta) sisaldab umbes 350 nimetust: 3 monograafiat ja 3 suurt peatükki kollektiivsetes raamatutes, ligikaudu 260 artiklit teaduslikes ajakirjades (seehulgas ligi 160 CC-publikatsiooni) ja 85 teadusartiklit teistes väljaannetes. Kuni 1991. aastani said laboratooriumi töötajad 16 autoritunnistust (4 minu otsesel osalusel) seoses uute luminestseerivate kristallide, fotonkordistamisel töötavate spektraaltransformaatorite, stsintillaatorite, kiirete neutronite dosimeetrite materjalide, uute VUV-kiirgurite, VUV piirkonna optiliste akende, info pikaajaliseks salvestamiseks sobivate alumosilikaatkeraamikate väljatöötamisega.

Minu kolleegid loendasid, et olen vaid 50 artikli ainus autor, teistel juhtudel – üks kaasautoritest. Seetõttu, kui räägitakse minu loomingust, on vaja kindlasti arvestada, et kollektiivne komponent on selles väga kõrge. Tartus kujunes väga soodne atmosfäär nii individuaalseks, kui ka kollektiivseks loominguks. Paar aastat pärast mu uuringute algust Füüsika Instituudis töötasid minu juhendamisel instituudi koosseisu arvatud TÜ üliõpilased H. Käämbre ja G. Liidja, TÜ töötajad R. Gindina, N. Luštšik, T. Soovik, L. Uibo, I. Jaek, välisaspirandid I. Vitols, F. Zaitov, K. Schwartz. Pisut hiljem tulid laboratooriumi M. Elango, V. Denks, H. Jõgi, I. Kuusmann, E. Ilmas; F. Savihhin, I. Meriloo, S. Zazubovitš, A. Maaros, H. Soovik, T. Savihhina, E. Vasiltsenko, A. Kuznetsov, T. Kärner. Meiega tegi tihedat koostööd TÜ elektronide paramagnetilise resonantsi rühm (Ü. Haldre, L. Pung jt) ja analüütilise keemia kateedri kollektiiv (M.-L. Allsalu, E. Pedak jt). Minu doktoritöö, milles oli lühidalt esitatud meie ioonkristallide füüsika suuna kontseptsioon, kaitsmise ajaks (1964. a) oli Tartus välja kujunenud tugev noorte spetsialistide grupp. Igaüks oli andekas isiksus, andes teadusele maksimaalse osa oma ajast ning olles samaaegselt huvitatud laia keelutsooniga dielektrikute elektronergastuste (kvaasiosakeste) ja defektide (defektonide) mitmesuguste aspektide kompleksest kollektiivsest uurimisest. Olime kursis ka oma problemaatika põhiliste rakenduslike aspektidega ning püüdsime oma kogemusi ja saavutusi edasi anda erialainstituutidele. See avas samaaegselt võimaluse defitsiitsete seadmete saamiseks.

Alates 1957. aastast kaitsti minu juhendamisel edukalt 50 kandidaadidissertatsiooni, neist 47 füüsika-matemaatika- ja 3 keemiakandidaadi kraadi taotlemiseks. Veel ligi 60 teaduskandidaati (PhD) on ette valmistatud Füüsika Instituudi tahkisefüüsika osakonnas minu otseste õpilaste poolt. Ligikaudu 110 tahkisefüüsika spetsialistist üle 70 töötavad või töötasid Tartus, Tallinnas, Võrus, ülejäänud jätkasid oma uuringuid Lätis (8), Venemaal (7), Kasahstanis (11), Kirgiisias (8). Minu õpilastest on 20 saanud hiljem füüsika-matemaatikadoktori kraadi (D.Sc.) ning loonud oma laboratooriumid ja kateedrid. G. Liidja ja K. Schwartz said akadeemikuteks, vastavalt Eestis ja Lätis. 12 füüsikut said mitmete ülikoolide professoreiks: M. Elango, I. Jaek, A. Luštšik ja L. Pung – Tartu Ülikoolis; I. Vitol – Läti Ülikoolis; Š. Tšolah ja V. Pustovarov – Uurali Polütehnilises Ülikoolis; T. Kuketajev, T. Nurahmetov ja K. Šunkeev – Kasahstanis; M. Tajirov ja K. Osmonalijev – Kirgiisias. Teaduste doktorid H. Käämbre, S. Zazubovitš ja V. Denks teevad teadustööd Eestis, A. Makhov – Venemaal, A. Belkind – USAs, A. Dudelzak – Kanadas. Eesti riikliku preemia laureaateideks said G. Liidja, M. Elango, I. Jaek, Ü. Haldre, J. Kolk, H. Käämbre, T. Kärner, N. Luštšik, A. Luštšik, L. Pung, F. Savihhin, E. Vasiltsenko. Allpool toodud minu publikatsioonide lühiloetelus esineb 36 kolleegi ühiste uuringute kaasautorina. Olen sügavalt tänulik pikaajalise viljaka koostöö eest kõigile ülalpool nimetatud kolleegidele ja publikatsioonide kaasautoritele.

KIRJANDUS

Feldbach, E., Kamada, M., Kirm, M., Lushchik, A., Lushchik, Ch., Martinson, I. 1997. Direct excitation of impurity ions by hot photoelectrons in wide-gap crystals. *Phys. Rev. B*, 56, 13908-13915.

Ilmas, E. R., Liidya, G. G., Lushchik, Ch. B. 1965. Photon multiplication in crystals. I; II. *Opt. Spectrosc.*, 18, 255-259; 359-361.

Kirm, M., Zimmerer, G., Feldbach, E., Lushchik, A., Lushchik, Ch., Savikhin, F. 1999. Self-trapping and multiplication of electronic excitations in Al_2O_3 and $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Sc}$ crystals. *Phys. Rev. B*, 60, 502-510.

Kuusmann, I. L., Liblik, P. Kh., Lushchik, Ch. B. 1975. Edge luminescence of excitons in ionic crystals. *JETP Lett.*, 21, 72-74.

Lushchik, A., Feldbach, E., Kink, R., Lushchik, Ch., Kirm, M., Martinson, I. 1996. Secondary excitons in alkali halide crystals. *Phys. Rev. B*, 53, 5379-5387.

Lushchik, A., Kirm, M., Kotlov, A., Liblik, P., Lushchik, Ch., Maaros, A., Nagirnyi, V., Zimmerer, G. 2003. Intrinsic and impurity luminescence and multiplication of excitations in complex oxides. *J. Lumin.*, 102-103C, 38-43.

Lushchik, A., Kudryavtseva, I., Lushchik, Ch., Vasil'chenko, E., Kirm, M., Martinson, I. 1995. Creation of stable Frenkel defects by VUV radiation in KBr crystals under conditions of multiplication of electronic excitations. *Phys. Rev. B*, 52, 10069-10072.

Lushchik, A., Lushchik, Ch., Kotlov, A., Kudryavtseva, I., Maaros, A., Nagirnyi, V., Vasil'chenko, E. 2004. Spectral transformers of VUV radiation on the basis of wide-gap oxides. *Radiat. Meas.* (In press).

Lushchik, Ch. B. 1986. Creation of Frenkel defect pairs by excitons in alkali halides. Chapter 8. Johnson, R. A., Orlov, R. A. (eds.). *Physics of Radiation Effects in Crystals*. Elsevier, 473-525.

Lushchik, Ch. 1981. Electronic excitations and defects in insulating crystals. Past. Present. Near Future (Summary Talk). Tuchkevich, V. M., Shvarts, K. K. (eds.). *Defects in Insulating Crystals*. Riga : Zinatne; B.: Springer-Verl., 709-720.

Lushchik, Ch. B. 1982. Free and self-trapped excitons in alkali halides: Spectra and dynamics. Chapter 12. Rashba, E. I., Struge, M. D. (eds.). *Excitons*. Amsterdam, North-Holland, 506-541.

Lushchik, Ch. B. 1955. Investigation of trapping centres in alkali halide crystal-phosphors Tartu, 227 p. (Trudy Inst. Fiz. Astr. Akad. Nauk Estonian SSR; 3). (In Russ.).

Lushchik, Ch., Demidenko, V., Kirm, M., Kudryavtseva, I., Lushchik, A., Martinson, I., Nagirnyi, V., Vasil'chenko, E. 2001. Creation of F centres and multiplication of electronic excitations in $\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{NaBr})_{2x}$ optical ceramics under VUV irradiation. *J. Phys: Condens. Matter*, 13, 6133-6149.

Lushchik, Ch. B., Gavrilov, F. F., Zavt, G. S., Plekhanov, V. G., Cholakh, S. O. 1985. Electronic excitations and defects in lithium hydride crystals. Moscow : Nauka, 214 p. (In Russ.).

Lushchik, Ch., Gindina, R., Zazubovich, S., Lushchik, N. 1970. Nature of the luminescence centers in ionic crystals. *Czech. J. Phys. B*, 20, 585-604.

Lushchik, Ch. B., Liidja, G. G., Jaek, I. V. 1960a. The mechanism of formation of color centers in ionic crystals by ultraviolet irradiation. *Proc. Intern. Conf. on Semiconductors Physics*. Prague : Czech. AcadSci Publ. House, 717-721.

- Lushchik, Ch., Liidja, G., Lushchik, N., Vasil'chenko, E., Kalder, K., Kink, R., Soovik, T. 1973. Exciton mechanisms of impurity centre luminescence in ionic crystals. Williams, F. (ed.). Luminescence of crystals, molecules, and solutions. N.Y.-L. : Plenum Press, 162-170.
- Lushchik, Ch. B., Liidya, G. G., Elango, M. A. 1965. Electron-hole mechanism of color center creation in ionic crystals. *Sov. Phys. Solid State*, 6, 1789-1794.
- Lushchik, Ch. B., Liidya, G. G., Lushchik, N. E., Shvarts, K. K., Jaek, I. V. 1961. Physical processes in alkali-halide crystal phosphors activated by mercury-like ions. *Sov. Phys. Solid State*, 3, 855-860.
- Lushchik, Ch., Kolk, J., Lushchik, A., Lushchik, N., Tajirov, M., Vasil'chenko, E. 1982. Decay of excitons into long-lived F,H and α ,I pairs in KCl," *Phys. Status Solidi B*, 114, 103-111.
- Lushchik, Ch. B., Kuusmann, I. L., Kuznetsov, A. I., Feldbach, E. Kh. 1988. Intrinsic luminescence of dielectrics and metal-dielectrics. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. (USA)*, 52, 54-59.
- Lushchik, Ch. B., Kuusmann, I., Liblik, P., Liidja, G., Lushchik, N. E., Plekhanov, V. G., Ratas, A., Soovik, T. 1975/1976. Edge luminescence of excitons in ionic crystals. *J. Lumin.*, 11, 285-289.
- Lushchik, Ch., Kuusmann, I., Plekhanov, V. 1979. Luminescence of free and self-trapped excitons in ionic crystals. *J. Lumin.*, 18/19, 11-18.
- Lushchik, Ch. B., Lushchik, A. Ch. 1989. Decay of electronic excitations with defect formation in solids. Moscow : Nauka, 263 p. (In Russ.).
- Lushchik, Ch., Lushchik, A., Kärner, T., Kirm, M., Dolgov, S. 2000. Relaxation, self-trapping and decay of electronic excitations in wide-gap oxides. *Russ. Phys. J. (USA)*, 43, 171-180.
- Lushchik, Ch. B., Lushchik, N. E., Shvarts, K. K. 1960b. Electronic-vibrational processes in the luminescence centers of ionic crystals. *Opt. Spectrosc.*, 9, 113-117.
- Lushchik, Ch. B., Savikhin, F. A., Feldbakh, E. Kh., Meriloo, I. A. 1991. Properties of the luminescence of HTSC oxides during transition to the superconducting state. *Sov. J. Low Temp. Phys.*, 17, 687-688.
- Lushchik, Ch. B., Savikhina, T. I. 1981. Photoluminescence of crystals having quantum yield greater than unity. *Bull. Acad. Sci. USSR, Ser. Phys. (USA)*, 45, 34-38.
- Lushchik, Ch. B., Vitol, I. K., Elango, M. A. 1977. Decay of electronic excitations into radiation defects in ionic crystals. *Sov. Phys. Usp.*, 20, 489-505.

Teaduspreemia pikaajalise tulemusliku teadus- ja arendustöö eest



Sulev
Vahtre

Sündinud 7.07.1926 Laiuse vallas

1947	Tartu Arve- ja Plaanindustehnikum (end Kommertsgümnaasium)
1952	Tartu Ülikool, ajaloo osakond
1955	ajalookandidaat, Tartu Ülikool
1971	ajaloodoktor, Tartu Ülikool
1974	professor
1990	Arthur Puksovi fondi (Kanadas) preemia
1991	Balti Ajaloo Komisjoni (Göttingenis) korrespondentliige
1991–1992	Eesti Vabariigi Põhiseaduse Assamblee liige
1993	Tartu Ülikooli emeriitprofessor
1997	Riigivapi III klassi orden
1999	Avatud Eesti Fondi iseseisvuspäevapreemia
2000	Tartu linna aukodanik
2001	Õpetatud Eesti Seltsi auliige

Alates aastast 1955 kuni emeriteerumiseni 1993 Tartu Ülikooli ajaloo osakonna õppejõud: nooremõpetaja, vanemõpetaja, dotsent, professor, Eesti ajaloo õppetooli juhataja. Aastatel 1971–72 põhikohaga Eesti Teaduste Akadeemia Ajaloo Instituudi vanemteadur.

Avaldanud 200 teaduspublikatsiooni.

Minu isa oli taluperemees ja ema taluperenaine Laiuse vallas toleaeagsel Põhja-Tartumaal. Kaugemad esivanemad, kelle kohta teada olevad andmed ulatuvad kuni aastani 1700, on ka kõik põldu harinud ja karja kasvatanud, põhitöök on siiski olnud kolmel põlvel möldri, ühel metsavahi ja ühel koolmeistri amet. Kõik nad on elanud kas Laiuse või Torma vallas (ja kihelkonnas) looduslikult kenades kohtades, suurte metsade piirimail. Ei tea kas sellest, aga puude ja metsa vastu tunnen nõrkust minagi.

Suguvõsa elukutsete mitmekesisust olen omapoolselt täiendanud ajaloolase ametiga, mille valisin küll alles vähe aega enne ülikooli astumist. Minu kasvukeskkonnas hinnati kooliharidust kõrgelt, ülikooliharidust eriti, kuid rohkem peeti lugu "praktilistest" aladest (arst, advokaat, insener, kirikuõpetaja jms). Humanitaarteaduste sisust ja võimalustest teati maarahva hulgas vähem, headeks eeskujudeks olid siiski paar naabrusest pärit filoloogi, kes töötasid Tartus gümnaasiumiõpetajatena. Naaberkihelkonnast pärit arheoloog Harri Moora oli ka hea mainega nimi.

Ajalugu seostub aga ka poliitikaga ja "ilma asjadega" tegeldi minu kodus juba päris palju. Isaisa oli olnud nooruses hea tuttav Carl Robert Jakobsoniga ja Jakobsoni pilt oli tema toas aukohal. See oli vist ka minu esimene kokkupuude Eesti poliitilise ajalooaga. Teine vanaisa ja minu isa olid erksad ühistegelased ja pidasid mitmesuguseid ilmalikke ning kiriklikke ameteid kuni vallavanema ametipostini välja. Kodus valitsenud rahvuslik-kristlik vaim ja haridus ning kultuurilembus oli täies kooskõlas selle õpetuse ning kasvatusega, mida sain kuue õppeaasta jooksul Kivijärve algkoolis. Koolijuhataja oli tõeline maa sool, kes õpetas lapsi maailma mõistma ja juhtis edukalt kohalikku kultuurielu. Nii kodus kui koolis rõhutati ühtviisi, et kõige aluseks on aus töö ja et iga tööd tuleb korralikult teha.

Minu esimest trükis ilmunud kirjatööd võiks lugeda nii poliitika kui ka ajaloo valdkonda kuuluvaks. 1941.aasta sõjasuvel, 15-aastase noorukina, mingil määral tajusin nende päevade tähendust, nii et panin kirja sel ajal kodukohas toimunud tähtsamad sündmused. Need märkmed, mida olen praeguseni säilitanud, said aluseks lühikesele artiklile "Sõjasuvi Laiusel", mis ilmus anonüümselt "Postimehes" 26. jaanuaril 1942. Rohkem huvi pakub toona kirjapandu endale praegu selles mõttes, et teismeliseea arusaamad ja hinnangud on edaspidigi püsima jäänud.

Ülikooli studiumi ajal tegin kursusetöid Inglise ja Prantsuse agraarajaloost dots Julius Madissoni ja dots (hiljem prof) Jaan Konksu juhendamisel, viimase käe all ka diplomitöö agraarküsimusest Prantsuse revolutsioonis. Suuresti mõjutas suhtumist ajaloo uurimisse ja edasisi valikuid dots Rudolf Kenkmaa, kes õpetas Eesti ajaloo vanemat osa ja ajaloo allikaõpetust, aineid, mis edaspidi said ka minu põhiaineteks. Dots Kenkmaa kauaaegse arhiivitöötajana sidus õpetatava materjali lahutamatu allikatega ja õpetas nägema ajalugu allikate kriitilise kasutamise kaudu.

Ülikooli lõpetamisel aastal 1952 avanes võimalus astuda aspirantuuri feodalmiperioodi Eesti ajaloo alal. Ametlikuks juhendajaks oli prof Hilda Moosberg, tegelik juhendaja aga dots Kenkmaa, kes aitas ka leida allikaõpetusliku suunaga ning eestlaste muistse vabadusvõitlusega seotud teema, mis kõigiti vastas minu huvidele. Kandidaaditöö “Liivimaa noorem riimkroonika (1315–1348) ajalooallikana” (1955) uurimisobjektiks oli Liivi ordumeistrite kaplani Bartholomäus Hoenke algkujul mittesäilinud kroonika, mille põhiosaks oli kirjeldus Jüriöö ülestõusust. Ülestõusu põhjuste hulgas selgitasin põhjalikumalt varajaste feodaalmõisate osa, peatähelepanu oli siiski pööratud allikakriitilistele küsimustele. Erinevalt senistest uurijatest jõudsin tekstide analüüsi põhjal järeldusele, et Marburgi Wigandi Preisi kroonikas pole Liivimaa nooremat riimkroonikat kasutatud, mis tähendab seda, et Wigandi teated Jüriöö ülestõusust on sõltumatud ja sellisena ülimalt väärtuslikud. 1990. aastatel sama küsimuse juurde veelkord tagasi pöördudes leidsin, et Wigandi kroonika abil on võimalik oluliselt täpsustada Jüriöö ülestõusu eri etappe (eriti 1343. aasta suve sündmusi) ja nende kaalu ülestõusu üldises käigus. Raamatuna ilmus kandidaaditöö põhiosa 1960. aastal, andes lisaks allikakriitilisele osale uurijate käsutusse noorema riimkroonika ümberjutustuste kõik algtekstid ja nende eestikeelsed tõlked koos kommentaaridega.

1960. aastate algul tõusis päevakorda doktoridissertatsiooni kirjutamine. Selle teema valikul sai jälle lähtunud allikaõpetuslikust aspektist ja vaatluse alla võetud omaaegsete maksualuse elanikkonna loenduste – hingeloenduste – materjalid, esmajoonelised loenduste algdokumendid – hingeloendid. Hingeloendeid oli seni kasutatud peamiselt kodulooliste ja genealoogiliste uurimuste tarbeks, minu eesmärk oli selgitada selle mahuka allikate massiivi kui ajalooallika olemust ja kasutamise võimalusi põhiliste rahvastikuprobleemide selgitamiseks. Nii omandas doktoritöö ajaloolis-demograafilise uurimistöö iseloomu, ulatudes uurimisvaldkonda, mis juba mõnda aega oli populaarne Lääne-Euroopa ja USA ajaloolaste seas ning leidis järgijaid ka Eestis (Heldur Palli, Juhan Kahk, Raimo Pullat, Herbert Ligi). Kaasa oli võimalik tõmmata ka üliõpilasi, kelle kursuse- ja diplomitööd üksikute kihelkondade rahvastikust aitasid üksikprobleeme täiendada ja täpsustada.

1970. aastal kaitsesin väitekirja “Hingeloendused Eestimaa kubermangus (1782–1858) ja nende andmed talurahva ajaloo allikana”, mis mõneti süvendatult ilmus trükkis 1973. aastal pealkirjaga “Eestimaa talurahvas hingeloenduste andmeil (1782–1858). Ajaloolis-demograafiline uurimus”. Analüüsitud on hingeloenduste korraldust ja nende käigus tekkinud dokumentatsiooni, rahvaarvu ja selle dünaamikat, talurahva territoriaalset paiknemist, sotsiaalset kihistumist, soolis-vanuselist jaotumist ja nende liikumist. Rahvastikuliikumist kujundanud tegureid selgitades osutus vajalikuks kasutada kirikuasutuste ma-

terjale, jälgida mitmesuguste eri allikate abil ilmastiku, saagikuse ja haiguste mõju rahvastiku muutustele.

1980. aastal võimaldus trükkis avaldada raamat Jüriöö ülestõusust, siiski vaid populaarses vormis ja kirjastuse nõudel ilma viideteta. Juhtisin selles tähelepanu ülestõusu tugevasti romantiseeritud käsitluste ühekülgsele, vaatlesin ülestõusu kui muistse vabadusvõitluse jätku ja epiloogi. Ülestõusu oluliseks ajendiks oli sel ajal akuutselt päevakorrale tõusnud Põhja-Eesti võõrandamine, olukord, milles ülestõusnud üritasid oma sõna kaasa ütelda. Nad esinesid veel arvestatava ja rahvusvaheliselt tunnustatud jõuna, eesmärk oli taastada kaotatud poliitiline vabadus. Selle raamatu eest sain Arthur Puksovi fondi (Kana-das) preemia.

Doktoritööga seoses teoks saanud lähem tutvumine kirikuarhiividega äratas sügavama huvi eesti rahva vaimuelu ja sellega seotud kirikuajaloo vastu. Olen nendel teemadel juhendanud diplomitöid ja 1990. aastatel rida magistritöid, kirjutanud David Dubberchi kirikuvisitatsioonidest (1987), Sangaste maineka kirikuõpetaja Chilian Rauscherti tegevusest (1995), Vastse Testamendi ilmumisa ja kiriklik-kultuurilisest miljööst (1996) jm.

Eesti ajaloo põhi- ja erikursustest kogunenud tähelepanekute ja mõtete kokkuvõttena avaldasin 1990.aastal laiemale lugejaskonnale mõeldud raamatu "Muinasaja loojang Eestis. Vabadusvõitlus 1208–1227", milles enam tähelepanu pöörasin allikate iseloomustamisele ja probleemi uurimisloole, vabadusvõitluse sündmustikku käsitledes püüdsin välja tuua sellest tulenevaid järeldusi Eesti ühiskonna poliitilise arengutaseme kohta.

Kandidaaditööst peale on üheks meelisteemaks olnud balti vanema ajalookirjutuse ajalugu, kroonikad ja mõned muud ajalookirjutuse žanrid 13.–18. sajandi ni. Esialgne põhjalikum ülevaade sellest on praegu veel käsikirjas, siiski üliõpilaste ja teiste asjahuviliste poolt juba sageli kasutatud. Trükki on jõudnud uurimused Tilmann Bredenbachist (2001), Timann Brakelist ja Balthasar Rus-sowist (2003), samuti kokkuvõtlik ülevaade vanema historiograafia uurimiseisust ja -ülesannetest (2001). Balti ajalookirjutuse uurimisel on palju tehtud, kuid tööpõld on siiski veel väga avar. Seni on kroonikaid vaadeldud rohkem allikaõpetuslikust aspektist, faktilise allikmaterjali seisukohast, vähem tähelepanu on pööratud vanema ajalookirjutuse seesmise arengu, ajaloolise mõtte selgitamisele.

Viimastel aastakümnetel on tulnud toimetada ja koostada mitmeid kollektiiv-seid üldkäsitlusi Eesti ajaloost. Olgu neist nimetatud tollal noorte autorite ja hiljutiste õpilaste Mart Laari, Lauri Vahtre ja Heiki Valgu "Kodu lugu" (esi-trükk 1989); "Eesti ajalugu. Kronoloogia" (1994, autorid Ain Mäesalu, Sulev Vahtre, Mati Laur, Tiit Rosenberg, Ago Pajur, Allan Liim); "Eesti ajalugu elulugudes" (1997, autorid Allan Liim, Ago Pajur, Sulev Vahtre, Toomas Kar-jahärm, Anu Raudsepp, Mart Laar, Tiit Rosenberg, Urmas Klaas, Tõnis Lu-kas). 1999. aastast on moodustunud suurem autorite kollektiiv minuga peatoimetaja osas kolmeköitelise "Eesti ajalugu 1700–2000" kirjutamiseks, millest lugeja lauale on jõudnud aastaid 1700–1816/1819 käsitlev köide (2003, autorid Mati Laur, Tõnu Tannberg, Helmut Piirimäe, tegevtoimetaja Mati Laur). Niisuguste teoste koostamine ja toimetamine on olnud heaks koostöövormiks eri

asutustes töötavate ajaloolaste vahel, võimaldanud asjalikke mõttevahetusi ja arutelusid.

* * *

Ülikooli õppejõu tööajast lõviosa kuulub üliõpilaste õpetamisele. Õpetada teaduslikku lähenemisviisi ja oskusi uurimistööks on aga võimalik vaid siis, kui õppejõud ise pidevalt teadustööga tegeleb. Üle viiekümne aasta olen saanud sõna sekka ütelda Eesti ajaloo mitmesuguste probleemide käsitlemisel, uurida nii majandus-, poliitilise, sotsiaalse kui kultuuriajaloo küsimusi. Südamelähedasemad ja enda arvates tulemusrikkamad on olnud tööd talurahva ja agraarajaloo, ajaloolisest demograafiast, kroonikakirjutusest ja kirikuloost, kõigi nende põhitegelaseks on nii või teisiti eesti rahvas, pikki aegu enamuses talurahvas. Vahest kõige suuremat rõõmu ja rahulolu on pakkunud aga noorte teadusesse pürgijate juhendamine ja kaasaelamine nende edusammudele. Seda rõõmu tunda on mulle rohkesti antud.

KIRJANDUS

Eesti ajalugu. Kronoloogia. 1994. Koost. S. Vahtre. Tallinn, 256 lk.

Eesti ajalugu elulugudes. 101 tähtsat eestlast. 1997. Koost. S. Vahtre. Tallinn, 238 lk.

Eesti talurahva ajalugu. 1. kd. 1992. Peatoim. J. Kahk; tegevtoim. E. Tarvel. Tallinn, 656 lk.

Hoeneke, B. 1960. Liivimaa noorem riimkroonika : (1315-1348). Tallinn, 167 lk.

Kahk, J., Ligi, H., Palli, H., Pullat, R., Vahtre, S. 1972. Sur l'histoire démographique de l'Estonie. Annales de Démographie Historique, 425-446.

Kleio. Ajaloo ajakiri, 1996, 2(16), 72 lk. (Pühendatud Sulev Vahtre 70. sünnipäevale).

Laar, M., Vahtre, L., Vahtre, S., Valk, H. 1999. Észtorszig története. Szombathely, 280 p. (Folia Estonica; 7).

Laur, M., Tannberg, T., Piirimäe, H. 2003. Eesti ajalugu. IV, Põhjasõjast pärisorjuse kaotamiseni. Tegevtoim. M. Laur; peatoim. S. Vahtre. Tartu, 311 lk.

Muinasaaja loojangust omariikluse läveni : pühendusteos Sulev Vahtre 75. sünnipäevaks. 2001. Koost. A. Andresen. Tartu, 417 lk.

Vahtre, S. 1966. Põllumajandus ja agraarsuhted Eestis XIII – XIV sajandil. Tartu, 87 lk.

Vahtre, S. 1970. Ilmastikuoludest Eestis XVIII-XIX sajandil (kuni 1870.a.) ja nende mõjust põllumajandusele ning talurahva olukorrale. Tartu Riikliku Ülikooli Toimetised, 258, 43-159.

Vahtre, S. 1972. Kirchenchroniken als Quelle der Bauern- und Agrargeschichte Estlands. Проблемы развития феодализма и капитализма в странах Балтики. Tartu, 74-85.

- Vahtré, S. 1973. Eestimaa talurahvas hingeloenduste andmeil (1782-1858). Ajaloolis-demograafiline uurimus. Tallinn, 298 lk.
- Vahtré, S. 1980. Jüriöö. Tallinn, 94 lk.
- Vahtré, S. Eine neue Gesellschaft – neue Erscheinungen in der Demographie. National Movements in the Baltic Countries during the 19th Century. Studia Baltica Stockholmiensia. 2, Acta Universitatis Stockholmiensis. 1985. Uppsala, 227-243.
- Vahtré, S. 1990. Muinasaja loojang Eestis. Vabadusvõitlus 1208-1227. Tallinn, 197 lk.
- Vahtré, S. 1992. Kiovan Venäja ja Viro 1030-1061. Suomen varhaishistoria. Toim. K. Julku. Rovaniemi, 622-630. (Studia historica septentrionalia; 21).
- Vahtré, S. 1995. Chilian Rauscherti elutee ja elutöö. Keel ja Kirjandus, 1, 29-40; 2, 103-110.
- Vahtré, S. 1996. Die Geschichtskunde und die Historiker in Estland in den kritischen Jahren 1918/1919 und 1987/1989. The Intependence of the Baltic States. Ed. by E. Demm, R. Noël, W. Urban. Chicago, 131-137.
- Vahtré, S. 1998. Jüriöö ülestõus Marburgi Wigandi kroonikas : tekstikriitiline arutus. Akadeemia, 12, 2477-2502.
- Vahtré, S. 2001. Meie vanema historiograafia uurimisseisust ja ülesannetest. Ajalooline Ajakiri, 3(114), 5-26.
- Антифеодальная борьба вольных шведских крестьян в Эстляндии XVIII – XIX вв. : сборник документов. 1978. Сост. С. Вахтре, Пийримяе, Эйнпауль; Под ред. Ю. Мадиссона. Таллинн, 464 с.

Teaduspreemia täppisteaduste alal tööde tsükli
“MAGNEESIUMDIBORIIDI ÜLIJUHTIVUSE MEHCHANISM”
eest



Teet Örd (esimene vasakult)

Sündinud 18.06.1954 Tartus

1973 Tartu I Keskkool

1978 Tartu Ülikool, füüsika (teoreetiline füüsika)

1984 füüsika-matemaatikakandidaat, Eesti TA Füüsika Instituut

1978–1996 Eesti TA Füüsika Instituut: aspirant, nooremteadur, teadur, vanemteadur. Alates 1996 Tartu Ülikooli teoreetilise füüsika instituudi dotsent.

Avaldanud üle 50 teaduspublikatsiooni.

Eesti Füüsika Seltsi asutajaliige.

Nikolai Kristoffel (teine vasakult)

Sündinud 5.03.1932 Rakveres

1950	Rakvere Eesti Keskkool
1955	Tartu Ülikool, füüsika
1959	füüsika-matemaatikakandidaat, Tartu Ülikool
1965	Eesti teaduspreemia
1967	füüsika-matemaatikadoktor, Leningradi Riiklik Ülikool
1976	professor, teoreetiline füüsika
1985	Eesti teaduspreemia
1997	Euroopa Teaduste ja Kunstide Akadeemia liige
1997	Tartu Ülikooli Suur Medal
2000	Eesti Füüsika Seltsi aastapreemia

Alates 1955. aastast Eesti Teaduste Akadeemia Füüsika ja Astronoomia Instituut (1973. aastast ETA Füüsika Instituut, 1998. aastast TÜ Füüsika Instituut): aspirant, nooremteadur, vanemteadur, sektorijuhataja, laboratooriumijuhataja, erakorraline vanemteadur (alates 1998). Kohakaas-luse korras Tartu Ülikoolis: 1958-1968 assistent ja vanemõpetaja, 1968-1992 professor, 1993–1997 erakorraline professor, alates 1998 emeriit-professor

Külalisprofessor ja uurija Stuttgarti (korduvalt), Karlsruhe, Milano, Kenti ülikoolides ja M. Plancki Tahkiseuuringute Instituudis (Stuttgart, korduvalt), Dubna Tuumaurimisinstituudis.

Eesti Füüsika Seltsi asutajaliige.

Avaldanud üle 300 teaduspublikatsiooni.

SISSEJUHATUS

Ülijuhtivuse näol on tegemist printsiipiaalset tähtsust ja laia tähendust omava nähtusega. Siin avaneb ka täie selgusega orgaaniline side baasfüüsika ja selle tehniliste rakenduste vahel. Ülijuhtivus tähendab takistuseta elektrivoolu võimalikkust metallses tahkises. Seal ergastatud voolu õnnestub säilitada aastaid. Efektseks illustratsiooniks oli ülijuhtiva vooluringi lennutransport Hollandist Londonisse Kuningliku Füüsikahingu koosolekule.

Ülijuhtivus avastati H. Kammerlingh-Onnese poolt 1911. aastal ja see pärjati Nobeli preemiaga 1913. aastal. Tegemist on faasisiirdega, mille käigus piisavalt madalal temperatuuril muutub aine elektritakistus hüppeliselt nulliks. Avastus osutus võimalikuks tänu vedela heeliumi saamisele 1908. a. Viimane keeb tavarõhul 4,4 K juures. Esmaeksperimentis uuritud elavhõbeda siirdetemperatuuriks oli $T_c = 4,15$ K (ligikaudu -270° C). Peagi lisandus ülijuhtide nimekirja mitmeid mõne Kelvini suurusjärgus T_c -ga lihtmetalle. Täheledatai esmapilgul ootamatut asjaolu – toatemperatuuril hästi juhtivad metallid osutusid halbadeks ülijuhtideks ja vastupidi. Selle fakti sügavam tähendus selgus oluliselt hiljem seoses ülijuhtivuse mikromehhanismi kindlakstegemisega.

Takistuseta elektrivoolu ja selle poolt indutseeritud tugevate magnetväljade võimalikkus seostas kogu valdkonna oluliste tehniliste lootustega. Ilmnesid ka puhtfüüsikalised üllatused, nagu magnetvälja väljatõrjumine massiivsest ülijuhist (Meissner-Ochsenfeldi efekt, 1933). Väline magnetväli varjestatakse ülijuhil indutseeritud pindmiste vooludega. Kriitilist piiri ületav magnetväli aga lõhub ülijuhtivuse.

Ülijuhtide elektromagnetiliste omaduste kirjeldamisse andsid olulise panuse vendade Londonite tööd 1930ndail aastail. Nähtuse sisu mikroskoopiliselt avamata õnnestus ülijuhtivust komplekselt kirjeldada Ginzburg-Landau fenomenoloogilise teooria abil selle faasisiirdelis-korrastusliku aspekti foonil. Asja-
ne 2003. a Nobeli preemia V. L. Ginzburgile hindas ka seda panust. Teooria võrdlemine katseandmetega andis voolu ülekandva osakese laenguks kahekordse elektroni laengu (L. D. Landaule olevat see olnud vastumeelt). Tegelikult oli see vihje nähtuse sügavamale mikroskoopilisele sisule, nagu hiljem selgus. Avastati ka isotoopefekt – aatomi massi muutuse kajastumine siirdetemperatuuris. See oli selgeks osutuseks kristallvõre võnkumiste osalusele ülijuhtivuse tekkemehhanismis. Meenutagem, et tugevam seos elektronide ja võnkekvantide-foononite vahel tähendab halvemat elektrijuhtivust normaalfaasis (ja lootust kõrgemale T_c -le).

Tänu J. Bardeeni, L. Cooperi ja J. Schrifferi tööle (BCS teooria, Nobeli preemia 1972) jõuti 1954. a ülijuhtivuse mikromehhanismi mõistmiseni. Nähtuse põhjustajaks osutus elektron-foonon tõmbeinteraktsioon, mis seob elektronid (Cooperi) paarideks. Summaarse nullspinniga paarid võivad aga kondenseeruda ülivoolavasse seisundisse analoogselt bosonitega (Bose statistikale alluvad osakesed, näiteks ^4He). Ülijuhtiv faas osutus makroskoopiliseks kvantseisundiks. Partnerid Cooperi paarides vahetuvad pidevalt, kuid kogu paaride kvantvedelik käitub korreleeritult. Paari keskmist läbimõõtu iseloomustab nn koherentsuse pikkus ning ülijuhi käitumine magnetväljas oleneb oluliselt selle parameetri väärtusest.

Ülijuhi energiaspektris tekib energiapilu, mis määrab paari lõhkumiseks vajaliku energia. Pilu olemasolul spektris ei saa elektronid loovutada kui tahes väikeseid energiakoguseid ja seega aeglustuda. Temperatuuri tõusuga pilu väheneb, kuni lõpuks kaob T_c juures. Paarid lõhutakse soojusergastuse toimel ja mängu tulevad tavalised elektritakistust põhjustavad elektronide hajumisprotsessid. Paare ülijuhis eraldi pidurdada ei saa. Mõjutada tuleks kogu koherentset ülijuhtivat elektronide kollektiivi, mis aga lõhuks ülijuhtiva seisundi.

KÕRGTEMPERATUURNE ÜLIJUHTIVUS

Aastatepikkused pingutused kõrgemate siirde temperatuuridega ülijuhtide leidmiseks peatusid 20. sajandi teisel poolel 23 K-sel rekordil Nb_3Ge jaoks. Raken-duste seisukohast polnud edu siin eriti suur. Nüüd võinuks küll kasutada jahutamiseks vedelat vesinikku, mis on aga ülimalt plahvatusohtlik. Samal ajal näitasid BCS-teooria alusel tehtud hinnangud, et lootust ületada 30 K lähedast piiri T_c jaoks on vähe. Aga kõrgtemperatuurse ülijuhtivuse probleem püsis. Si-hiks oli süsteemide leidmine, mille siirde temperatuur ületaks lämmastiku keemistemperatuuri 77 K. Ideaaliks oluks muidugi T_c toatemperatuuri piirkonnas. Vaatamata vähesest edust pikema aja kestel toidetud skeptitsismist väitis V. L. Ginzburg järjekindlalt, et Loodus pole asetanud piiranguid kõrgtemperatuursete ülijuhtide olemasolule. Ilmne oli vajadus mõelda uutele elektronide paaristumise mehhanismidele või tingimustele, kus teadaolev mehhanism viinuks siiski kõrgematele siirde temperatuuridele.

Kauaoodatud sensatsioon saabus 1986. aastal Šveitsi füüsikute A. Mülleri ja G. Bednorzi tööga [1988]. Avastati ülijuhtivus ~40 K juures dopeeritud (x) kupraatühendil $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ (Nobeli preemia 1987. a). Järgnes peadpööriv edu selles ühendite klassis tänapäevase rekordina $T_c = 150$ K elavhõbedat, baariumi, kaltsiumi, vaske ja hapnikku sisaldaval ühendil. Teatud juhiseks otsingute alustamisel selles keerulises oksiidide klassis oli neis esinev omapärane polaronefekt tugeva Cu^{2+} elektronseisundeid segundava elektron-foooninteraktsiooni mõjul. Sarnasteks ühenditeks on ka ferroelektrikud. Spontaanse elektrilise polarisatsiooni seletamiseks neis töötasid Tartu füüsikud välja nn vibroonse teooria [Kristoffel, Konsin, 1988]. Vastavalt sellele viib kristalli valentsi- ja juhtivustsooni dünaamiline hübriidiseerumine võre võnkumiste (!) toimel ferroelektrilise seisundi tekkele.

Alanud kupraatide ülemaailmne uurimislaine puudutas nii kondenseerunud aine teoreetilisi põhiprobleeme kui ka rakendusküsimusi. Vaevalt on mõni teine avastus tahkisefüüsikas viimasel ajal võimaldanud luua sellisel hulgal uusi töökohti ja finantseerida olemasolevaid. Paradoksaalselt, osaliselt seoses uute ülijuhtide keeruka ehitusega, jääb aga siin töötav mikromehhanism saladuskatte alla, kuigi pakuti välja väga erinevaid lähenemisi ja paaristumismehhanisme. Autorite osalusel arendati kupraatide ülijuhtivuse seletamiseks kahe-tsoonilist mudelit. Vastav üldskeem oli varem teada [Moskalenko, 1959; Suhl jt, 1959]. Kasutamaks seda kõrgtemperatuurse ülijuhtivuse korral, stimu-leeris "topoloogiline" analoogia mainitud ferroelektri vibroonse teooriaga. Kahetsoonilises mudelis on oluliseks paardusmiskanaliks Cooperi paaride virtuaalne ülekande elektronalamsüsteemide vahel. Suurimaks eeliseks on nüüd paardumise võimalus tsoonidevahelise tõukeinteraktsiooni abil ja kõrgete siirde temperatuuride kujunemine impulssruumi suure aktiivse piirkonna tulemusel. Kahetsoonilist lähenemist kupraatide ülijuhtivusele varasemal etapil pee-

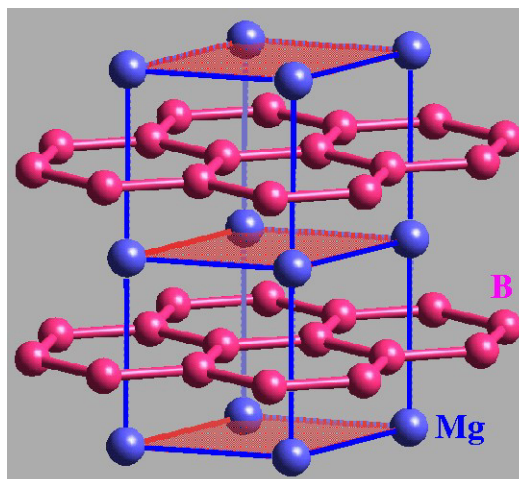
geldab ülevaade [Kristoffel jt, 1994] ja arengut tööd [Kristoffel, Rubin, 2002; 2004] koos viidetega neis.

Eksootiliste ülijuhtide klass täienes 1990ndate aastate alguses ka süsinikühendite baasil. Nii leiti fulleriidil Rb_3C_{60} ülijuhtivus 30 K juures ning ülijuhtivusprobleemid said kiiresti areneva süsinikklastrite füüsika pärisosaks. Algetapil väljapakutud valentsi- ja juhtivustsooni interaktsiooni olulisus fulleriidide ülijuhtivuses [Kristoffel, Örd, 1993] püsib kaasaegsetes teooriates [Suzuki jt, 2003].

MAGNEESIUMDIBORIIDI ÜLIJUHTIVUS

Kupraatide jätkuva intensiivse uurimise taustal põhjustasid sensatsioonid Jaapani teadlased, avastades 2001. a jaanuaris ülijuhtivuse intermetallilisel ühendamisel MgB_2 [Akimitsu, Murakana, 2003]. Leitud siirdetemperatuur 39 K oli ootamatult kõrge nii lihtsa ühendi jaoks. Küsiti muidugi, kas on tegemist BCS-mehhanismi piirpõrkestusega. Mitmekülgsete uurimuste preprintid hakkasid ilmuma internetis pea iga päev.

Magneesiumdiboriidi struktuur on toodud joonisel 1. Grafiitstruktuurseid boori aatomite võrkusid eraldavad magneesiumi aatomite heksagonaalse sümmeetriaga tasandid. Kaasaegsed meetodid lubasid kiiresti arvutada MgB_2 elektronispektri. Boori aatomite vahel toimivad $p_{x,y}$ elektronide vahendatud tugevad σ -valentssidemed. Erinevate tasandite vahelised sidemed pärinevad p_z elektronidest. MgB_2 ühendis toimub elektronide ränne $Mg \rightarrow 2B$ ning magneesium jääb ioonsesse kujju Mg^{2+} . Valentsielektronidest jääb osa ühtlaselt jaotatult aatomite vahele. σ -sidemete oluline deformeeritavus optiliste võnkumiste poolt võinuks olla aluseks BCS-tüüpi ülijuhtivusele. Ent sellest ei piisanud. Veelgi enam, ilmnesid kvalitatiivselt uued eksperimentaalandmed. Punktkontakt- ja tunnelsepektroskoopia näitasid kahe ülijuhtivuspilu olemasolu MgB_2 -s. Samast rääkisid ka fotoemissiooni, kombinatsioonhajumise ja soojusmahtuvuse temperatuurse käigu andmed. Ilmnes sügav kooskõla elektronispektri arvutustega. Leiti, et ülijuhtivuse jaoks aktuaalses piirkonnas lõikuvad Fermi energianivooga (elektronide asumise piirenergia nulltemperatuuril) kaks dubletset elektronsooni. Need pärinevad boori p-elektronide σ - ja π -sidemetest. Kahe mõõtmeliste σ -tsoonidele vastab aukjuhtivus, seevastu elektrontüüpi π -tsoonid on kolmemõõtmelised.



Joonis 1.
Magneesiumdiboriidi
kristallstruktuur.

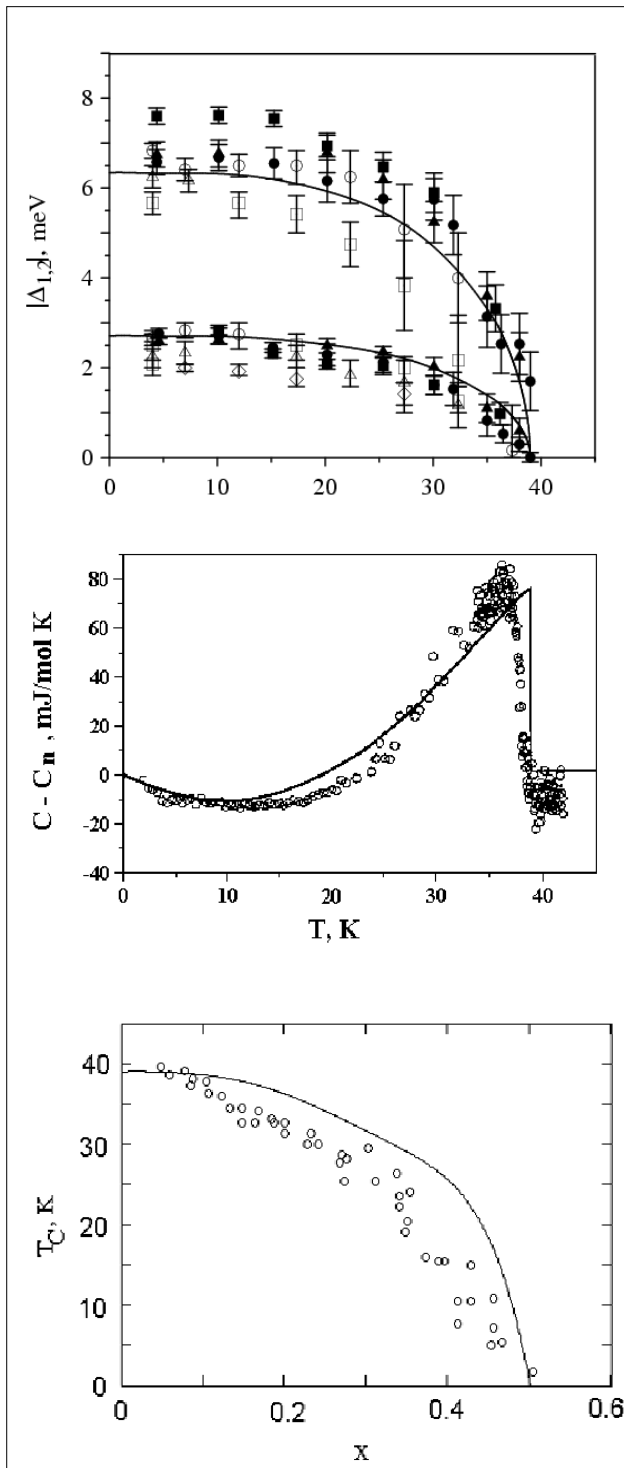
Märgitud kogemused stimuleerisid autoreid käsitlema MgB_2 -te kui kahetsoonilise mehhanismiga ülijuhti [Örd, Kristoffel, 2002a; 2002b; Kristoffel jt, 2002; 2003; Örd jt, 2003a; 2003b]. Lisaks BCS tüüpi σ -sisesele elektron-foonontõmbele tuli arvestada ka elektronide kulonilise interaktsiooni tsoonisest ja, mis eriti oluline, tsoonidevahelist (koos vastava elektron-foononse lisaga) panust. Seega hõlmas autorite skeem viit paardumiskanalit efektiivsetel σ - ja π -tsoonidel. Kahedimensionaalses σ -tsoonis mõjuvad elektron-foonon tõmme Debye kihis ja kuloniline tõuge kogu energiavahemikus. Analoogsed π -tsooni sisened panused võis kõrvale jätta. Printsipiaalne tähendus on σ - π tsoonidevahelise paariülekanne arvestamisel. Seejuures koosnevad paarid sama tsooni osakekest. Teoorias on kaks ülijuhtivuspilu $\Delta_{\sigma,\pi}$. Just tänu tsoonidevahelise seosele kaovad need pilud ühises faasisiirde punktis T_c . Seda omadust kontrolliti spetsiaalses töös [Tsuda jt, 2003], mõõtes mõlemat pilu ühtses eksperimendis. Väiksem pilu Δ_π tekib tänu tsoonidevahelisele interaktsioonile ja selle korral pole BCS “universaalsuse nõue” ($2\Delta/kT_c = 3,5$) täidetud. See-eest tuleneb $B^{10} \rightarrow B^{11}$ isotoopefekti (T_c vähenemine) σ -tsoonisisesest elektron-foononinteraktsioonist. Arvestatud interaktsioonid mõjuvad erinevates energiapiirkondades ja ülijuhtivuspilud osutuvad sõltuvaks elektroni energiast. Tavaliselt peetakse silmas pilude väärtusi Fermi pinnal. Mõlemad korrastusparameetrid-pilud vastavad MgB_2 kahele ülijuhtivuskondensaadile ja on s-laine sümmeetriaga. Tsoonidevahelise seose tõukeiseloomu tõttu on nad erimärgilised. See asjaolu võib mängida rolli ka MgB_2 omaduste anisotroopia käsitlemisel.

Siinkohal võiks kirjeldada uue korrastuse tekke “topoloogiat” kahe interaktee-ruva komponendi süsteemis. Komponente “segundav” interaktsioon tõukab nende energiad laiali (\pm ruutjuur). Ühe renormeeritud seisundi energia väheneb. Samas hakkab segundava agendi fluktuatsioonide sagedus efektiivse interaktsiooni tugevnemisega vähenema. Selle nulliks saamisega kaasneb süsteemi stabiilsuse kadumine. Stabiilsuse taastamiseks tuleb interaktsiooni “laine” (struktuuri moonutus ferroelektrikes; elektronvedeliku paardumine ülijuhisi) “külmutada” objekti. Uue sümmeetriaga uus struktuur osutub jälle stabiilseks.

Kirjeldatud vastasmõjusid koos σ - ja π -tsooni omaenergiatega sisaldav hamiltoniaan diagonaliseeriti keskmise välja lähenduses ning leiti ülijuhi elementaarergastustele vastavate kvaasiosakeste energiad. Järgnevalt tuletati MgB_2 vabaenergia funktsionaal, millest järgnesid analüütilised võrrandid ja avaldised olulisemate ülijuhtivusega seotud karakteristikute jaoks.

Kvantitatiivsete tulemuste saamiseks tuli leida teooria parameetrite optimaalne süsteem. Mõned lihtsamad andmed olid võtta tsoonstruktuuri arvutustest. Interaktsioonikonstantide määramiseks arvutati siirdetemperatuurile vastav diagramm σ -tsoonisisesest elektron-foononinteraktsiooni, erisoojuse hüppe ja ülijuhtivuspilude suhte ruumis. Tulemusena saadi kooskõllaliselt eksperimenti edastavad suured teatud tsoonidevahelise interaktsiooni tugevuse korral. Kõik edasised teoreetilised tulemused MgB_2 omaduste kohta polnud enam seotud sobitusparameetritega, võimaldades teooria hinnangut katseandmete kompleksil. Kooskõla teooria ja eksperimendi vahel osutus heaks. Ülijuhtivuspilude ja soojusmahtuvuse jaoks illustreerivad seda joonised 2 ja 3.

Ka ülemise kriitilise magnetvälja sõltuvus temperatuurist kordab selle mõõdetud käiku. Selleski peegeldub tsoonidevahelise interaktsiooni olemasolu. Seoses Cooperi paaride raadiuse väiksusega MgB_2 -s on tegemist nn teist liiki



Joonis 2.
 MgB_2 ülijuhtivuspilude
sõltuvus temperatuurist
[Kristoffel jt, 2003].
Kõverad – teoria;
punktid – katseandmed.

Joonis 3.
 MgB_2 soojusmahtuvuse
sõltuvus temperatuurist
[Kristoffel jt, 2003].
Kõverad – teoria;
punktid – katseandmed.

Joonis 4.
Siirdetemperatuuri
vähenemine
seguühendis
 $\text{Mg}_{1-x}\text{Al}_x\text{B}_2$ [Kristoffel
jt, 2003]. Kõver –
teoria; punktid –
katseandmed.

üljuhiga, milles kahe kriitilise magnetvälja vahemikus läbib magnetvoog ülijuhti normaalfaasi keeriste näol. Boori isotoopefekti arvatud eksponent $\alpha_{\square} = 0,34$ sobib mõõdetud väärtusega $\alpha_{\square} = 0,32$. Efekti nõrgenemine võrreldes BCS tulemusega $\alpha = 0,5$ (ainult tsoonidesisene elektronfoonontõmme) on tin-gitud tsoonisisesest kulonilisest vastasmõjust.

Magneesiumdiboriidil on rida sugulusühendeid. Ent nende siirdetemperatuurid osutusid oluliselt madalamateks või puudus neil ülijuhtivus hoopiski. Arvutus näitas, et MgB_2 siirdetemperatuuri sõltuvus keemilisest potentsiaalist muutmatul struktuuril on lameda katusega maja profiili tüüpi. Puhas MgB_2 , asudes selle kõvera keskel, osutub optimaalselt “dopeerituks”. Seega võib oodata MgB_2 ülijuhtivuse kadumist nii elektron- kui ka aukdopeerimisel. Nii see ongi vastavalt segühendite $Mg_{1-x}Al_xB_2$ ja $Mg_{1-x}Li_xB_2$ korral, vt joonis 4. Dopeerimine rikub elektrontsoonide asetuspildi, millele toetub käsitletud mikromehhanism.

Kokkuvõttes edastab tsoonidevahelist paardumisinteraktsiooni arvestav teooria MgB_2 ülijuhtivuskarakteristikud kvantitatiivses kooskõlas katseandmetega. Visandub tõepärane pilt vastavast füüsikast. Analoogetele ja lähedastele tulemustele jõudsid ka teised uurimisrühmad, näiteks [Liu jt, 2001; Bouquet jt, 2002; Golubov jt, 2002]. Käesolevaks hetkeks on MgB_2 kujunenud (õieti esimeseks) üldaktsepteeritud kahetsoonilise ülijuhi näiteks. Teoreetiline uurimistöö on siin oluliselt edasi läinud peenemate omaduste käsitlemiseks.

Seoses MgB_2 -alaste tulemustega on hoogustunud ka kupraatide käsitlemine kahetsoonilise stsenaariumi alusel. Nähtavasti tuleb siin toetuda dopeerimis-menetlusega kujundatud elektronspektritele. Näitena võib tuua skeemid, mis toetuvad bipolaronide ja baasfermionide interaktsioonile [Micknas jt, 2003] või dopeerimisega loodud defektsooni ja valentsitsooni vahelisele paariülekandele [Kristoffel, Rubin, 2002; 2004].

Ülijuhtivusfüüsika areneb ka uutes seostes. Kvant-Halli efektis tulevad ilmsiks omapärased ülijuhtivusaspektid, seostudes maailmaehituse põhiprintsiipidega. Avanevad uued võimalused laborieksperimentideks põhifüüsikas.

Jätkuvad uuringud MgB_2 -l ja sugulusühenditel stimuleerivad uusi arengusuundi kondenseeritud aine teoorias ja füüsikalis-keemilises eksperimendis. MgB_2 sünteesimise probleem on lahendatud. Milligrammilise kaaluga kristalle saadakse boori reageerimisel magneesiumi auruga $900^\circ C$ juures. Võimalike MgB_2 ülijuhtivuse rakendusvõimalustena märgitakse kõrgemate kriitiliste voolude ja magnetväljade kasutamist, kergemate ja odavamate magnetite ja kaablite saamist, võrreldes tööstuslikega. Kõrgtemperatuursete ülijuhtide rakendusväli hõlmab ülitundlikke magnetomeetreid, kaovabu ja kiirlülitusega mälulemente kuni ülitugevate magnetväljade kasutamiseni hiigelkiirendusringides ja levitatsiooniringides. Ja muidugi – kadudeta energiaülekanne! Kuna suurem osa kõrgtemperatuurset ülijuhte on halvasti töödeldavad, on leiutatud vaimukaid tehnoloogiaid neist traatide, lintide ja teiste nõutavate struktuuride valmistamiseks.

Autorid märgivad heameelega MSc Küllike Rägo osalust käesoleva valdkonna uurimistöös. Seda tööd on toetanud Eesti Teadusfondi grant nr. 4961.

KIRJANDUS

Akimitsu, J., Murakana, T. 2003. Superconductivity in MgB_2 . *Physica C*, 388-389, 98-102.

Bednorz, J. G., Müller, K. A. 1988. Perovskite-type oxides – the new approach to high T_c superconductivity. *Rev. Mod. Phys.*, 60, 585-600.

Bouquet, F. et al. 2002. Specific heat of single crystal MgB_2 : A two-band superconductor. *Phys. Rev. Lett.*, 89, 2570011-4.

Golubov, A. A. et al. 2002. Multiband model for penetration depth in MgB_2 . *Phys. Rev. B*, 66, 0545241-5.

Kristoffel, N., Konsin, P. 1988. Vibronic theory of structural phase transitions and displacive ferroelectrics. *Phys. Stat. Sol. (b)*, 149, 11-40.

Kristoffel, N., Konsin, P., Örd, T. 1994. Two-band model for high-temperature superconductivity. *Rivista Nuovo Cimento*, 17, 1-41.

Kristoffel, N., Rubin, P. 2002. Cuprate superconductivity interband model with a doping-formed spectrum. *Eur. Phys. J. B*, 30, 495-500.

Kristoffel, N., Rubin, P. 2004. Superconducting gaps and pseudogaps in a composite model of two-component cuprate. *Physica C*, 402, 257-262.

Kristoffel, N., Örd, T. 1993. On the possibility of HTSC in a two-band model with a semiconducting gap (A_3C_{60}). *Phys. Stat. Sol. (b)*, 175, K9-K12.

Kristoffel, N., Örd, T., Rågo, K. 2002. Mechanism of MgB_2 superconductivity with interband pair-transfer interaction. *Intern. J. Modern Phys. B*, 16, 1585-1589.

Kristoffel, N., Örd, T., Rågo, K. 2003. MgB_2 two-gap superconductivity with intra- and interband couplings. *Europhys. Lett. B*, 61, 109-115.

Liu, A. Y., Mazin, Y. Y., Kortus, Y. 2001. Beyond Eliashberg superconductivity in MgB_2 . *Phys. Rev. Lett.*, 87, 0870051-4.

Micknas, R., Robaszkiewicz, S., Bussman-Holder, A. 2003. On the superconductivity in the induced pair model. *Physica C*, 387, 58-64.

Moskalenko, V. A. 1959. Superconductivity of metals with the account of energy bands overlap. *Fiz. Met. Metalloved.*, 8, 503-513.

Suhl, H., Matthias, B. T., Walker, L. R. 1959. Bardeen-Cooper-Schriffer theory of superconductivity in the case of overlapping bands. *Phys. Rev. Lett.*, 3, 552-554.

Suzuki, S., Chida, T., Nakao, K. 2003. Electron correlation and Jahn-Teller effect in alkali-metal-doped C_{60} . *Advances in Quantum Chem.*, 44, 535-553.

Tsuda S. et al. 2003. Definitive experimental evidence for two-band superconductivity in MgB_2 . *Phys. Rev. Lett.*, 91, 127001-4.

Örd, T., Kristoffel, N. 2002a. Modeling MgB_2 two-gap superconductivity. *Physica C*, 370, 17-20.

Örd, T., Kristoffel, N. 2002b. A two-band approach to MgB₂ superconductivity. Annett, J. F., Kruchinin, S. (eds.). *New Trends in Superconductivity*. Kluwer, Netherlands, 235-243.

Örd, T., Kristoffel, N., Rågo, K. 2003a. MgB₂ superconductivity properties in two-gap model. *Modern Phys. Lett.*, 17, 667-673.

Örd, T., Kristoffel, N., Rågo, K. 2003b. A description of MgB₂ superconductivity including σ - π bands coupling. *J. Supercond.*, 16, 517-519.

Teaduspreemia keemia ja molekulaarbioloogia alal tööde tsükli
“UUED ASÜMMEETRIILISED REAKTSIOONID JA NENDE
KATALÜSAATORID” eest



Margus
Lopp
Kollektiivi juht

Sündinud 11.septembril 1949. a. Kuressaares

1957 Kingissepa Keskkool

1968 Tartu Ülikool, orgaaniline keemia

1981 keemiakandidaat, TA Keemia Instituut

Aastatel 1973-1997 TA Keemia Instituut: vaneminsener, nooremteadur, vanemteadur, juhtivateadur, osakonnajuhataja.

1994 Helsinki Ülikooli dotsent.

Alates 1997. aastast Tallinna Tehnikaülikooli orgaanilise keemia professor, orgaanilise keemia õppetooli juhataja, alus- ja rakenduskeemia instituudi (2003. aastast keemiainstituudi) direktor.

Täiendanud end 1978 ja 1981 Ungari TA Keemia Keskinstituudis ja 1989-1990 Suurbritannia East Anglia ülikoolis.

1987 Eesti Riiklik Preemia autorite kollektiivi liikmena prostaglandiinide sünteesi alal.

Eesti Keemia Seltsi asepresident.

Avaldanud üle 100 teaduspublikatsiooni.



Anne Paju (teine vasakult)

Sündinud 02.03.1950 Tartus

1957 Põltsamaa Keskkool
1968 Tartu Ülikool, orgaaniline keemia
1992 MSc, keemia, Tartu Ülikool
2001 PhD loodusteaduste alal, Tallinna Tehnikaülikool

1973-1980 Eesti TA Termofüüsika ja Elektrofüüsika Instituudi insener.
1980-1984 Eesti TA Orgaanilise Sünteesi ja Biopreparaatide Katsetehase katsetootja. Alates 1984 Eesti TA Keemia Instituut (praegu TTÜ keemiainstituut): nooremteadur, teadur, vanemteadur.

Avaldanud üle 30 teaduspublikatsiooni.

Tõnis Kanger (kolmas vasakult)

Sündinud 6. mail 1959 Tallinnas

1977 Tallinna Reaalkool
1982 Tartu Ülikool, orgaaniline keemia
1990 keemiakandidaat, Eesti TA Keemia Instituut

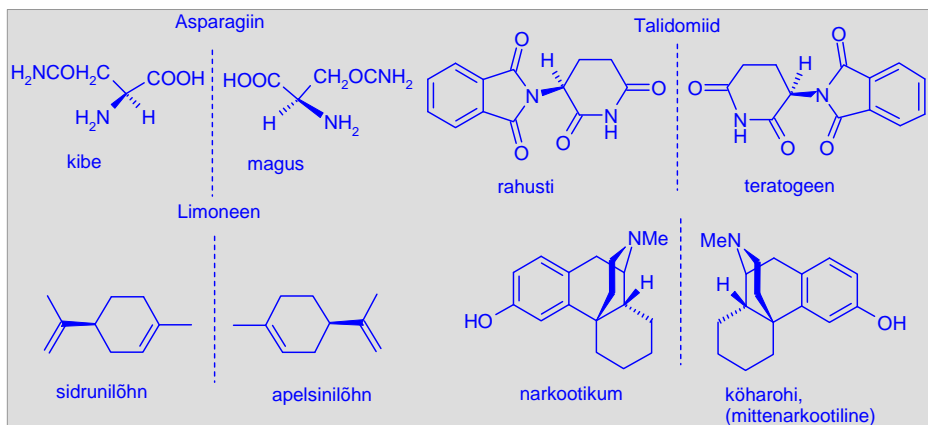
1982-1997 Eesti TA Keemia Instituut (praegu TTÜ keemiainstituut): nooremteadur, teadur, vanemteadur. Töötanud stažöörina Varssavi Orgaanilise Keemia Instituudis (1988) ja postdoktorandina P. ja M. Curie Ülikoolis (Pariis, 1993).

Alates 1997. a TTÜ orgaanilise keemia dotsent.

Avaldanud üle 40 teaduspublikatsiooni.

ASÜMMEETRILISE ELUSLOODUSE MÜSTEERIUM

Meid ümbritsev elusloodus ja meie ise oleme ehitatud põhiliselt asümmeetrilistest molekulidest. Üks looduse müsteeriume seisneb selles, et tema elutähtsad molekulid on homokiraalsed. Teame juba koolipõlvest, et suhkrud moodustavad *D*- ehk “parema käe” ridasid ja et aminohapped on suures enamusel *L*- ehk “vasakukäelised”. Teadus püüab avastada looduse asümmeetria allikat, kust on pärit meie maailma mittesümmeetriline loomus, kuid senini edutult. Nii peame leppima paratamatult teadmiselega, et tuntud elu vormid ei saa eksisteerida ilma oma ehituskivide (suhkrute, aminohapete jne) ühese ja kindla käelisusega. Selline vältimatult vajalik ühekäelisus (või kindla käelisuse, kas parema või vasaku käe eelistamine) on täheldatav kõigis elu funktsioneerimisega kaasnevates protsessides ja endastmõistetavalt ka elusa materia enda kohta käiva informatsiooni kodeerimisel, hoidmisel ja paljundamisel. Nii on lisaks käelistele koostisosadele ka DNA polümeer paremakäelise kruvina spiraaliks kokku keerdunud. Seepärast ei ole üllatav, et käelise molekuli isomeerid, mis erinevad üksteisest ainult selle poolest, et nende peegelpildid ei ühita originaaliga (peegelisomeerid e enantiomeerid), võivad täielikult erineda bioloogiliste omaduste poolest (joonis 1).



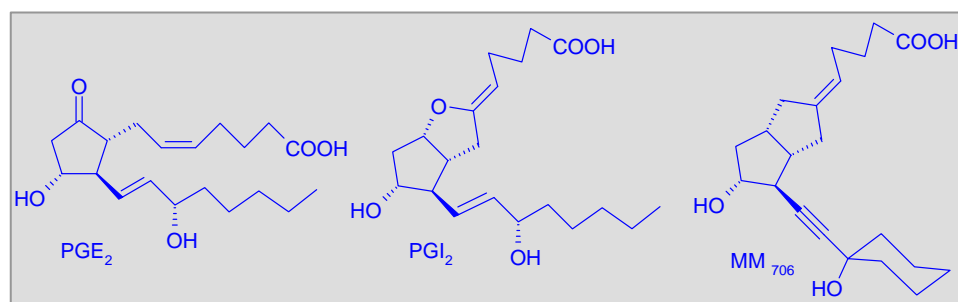
Joonis 1. Peegelisomeeride omadused.

Sellest järeldub aga endastmõistetavalt, et meditsiinis kasutatavad kiraalsed bioaktiivsed ühendid peavad olema enantiomeerselt puhtad. Kuigi keemiliste ühendite käelisuse omaduse avastas Pasteur juba 1848. a viinhappe enantiomeeridel, ja see põhjendati van't Hoffi ja Le Bel'i poolt 1874. a süsiniku tetraeedrilise ehitusega, jõudis arusaamine kiraalsete ravimite stereoisomeerse puhtuse vajadusest inimkonna üldisesse teadvusesse alles mõnikümmend aastat tagasi, ja siis läbi looduse valusa õppetunni. Nimelt lasti eelmise sajandi kuuekümnendatel aastatel turule rahustava toimega ravim talidomiid ratseemilise seguna (st kahe võrdses koguses enantiomeeri seguna, joonis 1). Selgus nimelt, et selline ratseemiline segu, mis oli loomkatsetes ohutu, põhjustas rasedatel loodete väärarenguid. Hiljem selgitati välja, et üks enantiomeeridest omab soovitud rahustavat toimet, samal ajal kui teine, nn “mitteaktiivne” enantiomeer, põhjustas suurt tragöödiat ja kahju. Ravim keelustati 1982. a. Sellest

ajast jõudis lõplikult pärale teadmine, et elusmaailma sümmeetria ja asümmeetria ei ole pelgalt klaaspärlimäng teadlaste käes, vaid looduse karm reaalsus. Inimesel ei ole kunagi mõistlik toppida vale kätt looduse kootud teise käe kindasse! (Talidomiidi isomeeride bioloogiline toime on aga jätkuvalt aktuaalne: nimelt on selgunud, et ka teine “aktiivne” enantiomeer on teratogeenne. Lisaks ratsemiseerub ühend happelistes tingimustes kiiresti, nii et organismis on igal juhul alati olemas mõlemad enantiomeerid. Nii, et uurimine kestab!). See kõik muudab põhjalikult meie ettekujutust bioloogiliselt aktiivsete ühendite sünteesist: kõik vajalike uute kiraalsete molekulide saamismeetodid erinevad oluliselt klassikalistest meetoditest ja üldjuhul tuleb nad luua uuesti. Nii sündis orgaaniline süntees, mida loeti juba klassikaliseks, ”lõpetatud” teaduseks, uuesti, nüüd asümmeetrilise keemilise sünteesina, ja keemikud-süntetikud ning -analüütikud hakkasid arutlema sümmeetria ja asümmeetria, vasak- ja parempoolsete molekulide, pooli valivate selektiivsete sünteesikatalüsaatorite jt asümmeetrilise sünteesi meetodite ning mõistete üle ning looma uusi kiraalseid bioaktiivseid ühendeid.

ÄÄDIKHAPPEST KÄELISTE BIOAKTIIVSETE MOLEKULIDE ASÜMMEETRILISE SÜNTEESINI

Looduslike ühendite sünteesil on Eestis kaugelt üle saja aasta pikkune ajalugu: juba 1868. a toodeti Tallinnas R. Mayeri tehastes kahte loodusühendit - äädikhapet ja oblikhapet. Tõsi, neid aineid ei saa pidada erilist bioaktiivseteks, ega ole nad ka käelised. Loodusühendite sünteesini tänapäevases mõistes jõuti alles eelmise sajandi seitsmekümnendatel aastatel professor Koit Lääte juhtimisel, kui töötati välja mitmete putukate signaalühendite (feromoonide) ning hormoonide analoogide (juvenüülhormoonide) sünteesimeetodid. Esimene kiraalne, enantiomeerselt puhas ja kõrgelt bioaktiivne molekul saadi aga alles 1975. a Eesti Teaduste Akadeemia Keemia Instituudi prostaglandiinide uurijate poolt prof Ülo Lille juhtimisel. Esmaseks enantiomeeride sünteesimeetodiks oli biosünteesiline, ensüümkatalüüsil põhinev meetod [Lille jt, 1979]. Sellele esimesele pääsukesele järgnesid varsti ka täissünteesilised prostaglandiinid ja nende analoogid [nt Lopp jt, 1992; Kanger jt, 1992], millel olid huvitavad bioaktiivsed omadused [Ragazzi jt, 1995] (joonis 2).



Joonis 2. TA Keemia Instituudis sünteesitud enantiomeersed prostaglandiinid: esimene kiraalne PGE₂, looduslik vere agregatsiooni inhibiitor PGI₂ ja tema sünteesiline analoog MM 706.

Märkimist väärib, et mingi teadussuuna edukaks arenguks ei piisa ainult ühe uurimisgrupi edusammudest ja tulemustest, sageli on vaja erinevate teadus-

harude ühiseid pingutusi uue taseme saavutamiseks. Nii olid asümmeetrilise sünteesi areng ja edusammud looduslike ühendite sünteesis otseselt seotud tulemustega näiliselt keemilisele sünteesile väga kauges teadusvaldkonnas – tuumafüüsikas. Tallinnas tehtav asümmeetriline süntees tugines ühendite struktuuri määramisele tuumamagnetresonants-spektroskoopia abil ^1H ja ^{13}C tuumadel Lippmaa instituudi (KBFI) Dr Tõnis Pehki keemilise füüsika laboris [Pehk, 1993; Pehk jt, 2003].

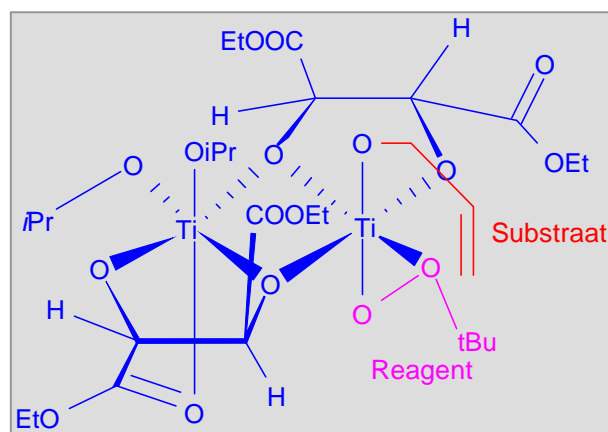
On kaks põhilist võimalust kiraalsete ainete puhaste enantiomeeride saamiseks: eraldada olemasolevad looduse poolt valmistatud ühendid looduslikest objektidest, vajadusel neid edasiselt muutes, või sünteesida vajaminev ühend keemilisel või biokeemilisel teel. Esimese võimalus on piiratud ainult nende põhistruktuuridega, mis looduses eksisteerivad. Teisel juhul sellised piirid üldjuhul puuduvad – kõik, mida on võimalik sünteesida, ka sünteesitakse. Kui valida ühendite täiskeemilise sünteesi tee, siis oleme jälle valiku ees: kas valmistada kahe peegelisomeeri ratseemiline segu, millest siis enantiomeerid omavahel lahutada, või sünteesida kohe ainult üks vajaminev enantiomeer. Esmapilgul tundub esimene võimalustest lihtsam ja odavam, kuna saab kasutada kõiki tuntud klassikalise sünteesi meetodeid. Lähemal vaatlusel aga selgub, et selline lähenemine on väga ebaefektiivne – vähemalt pool sünteesitud aine kogusest läheb lihtsalt raisku, ja täiendavalt lisandub kallis enantiomeeride lahutamise protsess. See kõik muudab jõumeetodil enantiomeeride saamise hoopis kulukaks ning keskkonnaaenuks – tuleb toota palju mittevajalikku jääki ja kulutada ohtralt ressursse. Teise lähenemise aluseks on asümmeetriline süntees, mille puhul vajalikud kiraalsed molekulid saadakse lihtsatest mittekiraalsetest ühenditest. Sel moel on parimal juhul võimalik muuta kogu lähteaine vajalikuks produktiks. Seepärast ei ole ime, et viimasel kahekümnel aastal on toimunud ja jätkub asümmeetrilise sünteesi tormiline areng. Selle tulemusena on loodud kümneid uusi kiraalsete ühendite saamise tehnoloogiaid, uusi kiraalseid katalüsaatoreid ja protsesse. Sellist arengut kinnitavad ka orgaanilise sünteesi ja asümmeetrilise sünteesi alal antud Nobeli preemiad: Elias Corey, Nobeli preemia 1990; Barry Sharpless, Ryoji Noyori ja William S. Knowles, Nobeli preemia 2001.

KUIDAS MUUTA KEEMILISI REAKTSIOONE VEKTORIAALSETEKS PROTSESSIDEKS

Kui konventsionaalset orgaanilist sünteesi võime vaadelda skalaarse protsessina, siis asümmeetrilist sünteesi vaadeldakse vektoriaalse protsessina – erinevatelt vektori suundadelt on molekuli omadused erinevad, samuti on erinevad ka tekkivad reaktsiooniproduktid. Molekulide külgede st vektorite suundade eristamiseks kasutatakse kiraalseid reagente ning katalüsaatoreid, mis omakorda on kas asümmeetrilised või madala sümmeetriaga kiraalsed ained. Substraadi ja kiraalse reagenti või katalüsaatori tasakaalulised interaktsioonid määravad ära reaktsiooni selektiivsuse (vektori suuna). See seos on harilikult keeruline mittelineaarne multi-parameetriline funktsioon ainete struktuurist, konformatsioonilistest parameetritest, elektroonsetest faktoritest, keskkonnast, temperatuurist jne. Iga väike struktuurimuutus või mingi teise faktori energeetiliselt väike muutus võib põhjustada väga suuri vahesid reaktsiooni selektiivsuses (vektori suunas). Protsess on kirjeldatav mittelineaarse matemaatika võrranditega. Seepärast on soovitud vektoriaalse protsessi jaoks sobivaid substraadi ja käelise mõjuri kombinatsioone väga raske või lausa võimatu ennustada. Ometi

võimaldavad teoreetilised molekuli geomeetria arvutused aidata aru saada üksikute faktorite mõjust ja nii suunata uute mõjurite ja katalüsaatorite konstrueerimist.

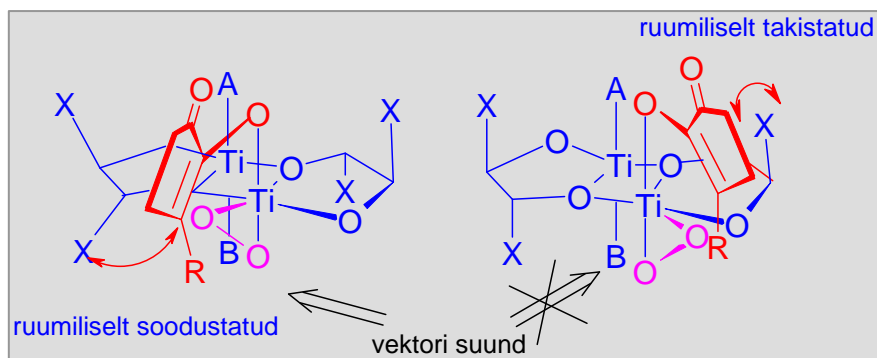
Asümmeetriline oksüdatsioon kuulub kiraalsete ühendite kõige keerulisemate sünteesi meetodite hulka. Meil tuleb rangelt kontrollida nii kõrge aktiivsusega hapnikuaatomite liitumise suunda (reaktsiooni vektoriaalset suunda) kui ka samaaegselt liituvate hapnikuaatomite arvu. Probleem on keeruline, kuna üldiselt võime oksüdatsioonireaktsioone vaadelda kui aine “põletamist”. Meil tuleb kontrollida, et “põletamine” toimuks ainult ühelt vektori suunalt ja ainult ühe või kahe hapnikuaatomi kaupa. See on tõeline väljakutse keemikutele. Kaua aega tundus selle probleemi lahendus võimatu unistusena. Ometi leiti lahendus – nii substraat kui ka reagent seotakse ühte ja samasse kiraalsesse kompleksi. Selle kompleksi termodünaamiliselt eelistatud konformatsioon määrab ära vektoriaalse protsessi suuna. Sellist titaani alkoholaadi (isopropanool), oksüdeerija (tBuOOH) ja substraadi (allüülalkohol) kompleksi, kus asümmeetriliseks mõjuriks (vektori määrajaks) on kõigile tuntud ja venitööstuses tekkiv viinhape, nimetatakse tema leiutaja nime järgi “Sharplessi kompleksiks” [Katsuki, Sharpless, 1980]. Selline kompleks (joonis 3) imiteerib looduslikke kiraalseid katalüsaatoreid – ensüüme ja sellise kompleksiga saab muundada alküülalkoholi kaksiksideme enantiomeerseks epoksiidiks.



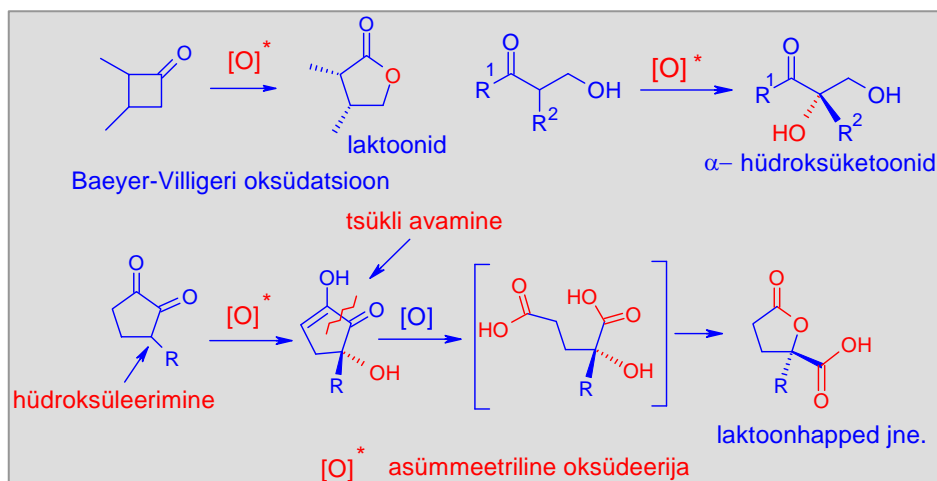
Joonis 3. Sharplessi kompleks allüülalkoholide asümmeetriliseks epoksüdeerimiseks.

Keemikute igapäevased teadustöö vajadused ei piirdu kindlasti allüülalkoholi oksüdeerimisega. Meie gruppi hakkas huvitama probleem, kas ja kuidas saab Sharplessi kompleksi unikaalseid omadusi kasutada teiste keemiliste molekulide oksüdeerimiseks. Nii leidsime, et mõned suhteliselt “tasapinnalised” orgaanilised molekulid (nagu tsüklobutanoonid, β -hüdroksüketoonid, 1,2-diketoonid jt) on head substraadid Sharplessi kunstlikule ensüümile (keemikud-süntetikud on sõnavara biokeemikutelt laenanud, kasutades muundatava aine jaoks mõistet “substraat”, siit ka paralleel, et katalüsaator on kunstlik ensüüm, kuigi tal ensüümidega peale reaktsioonide katalüüsümise midagi ühist ei ole) (joonis 4) [Paju jt, 2003b].

Selgus, et erinevad ketoonid käituvad oksüdatsioonireaktsioonis erinevalt. Nii oksüdeeruvad tsüklobutanoonid Baeyer-Villigeri järgi laktoonideks (joonis 5) [Lopp jt, 1996; Kanger jt, 1998]. Toodud reaktsioon on senini üks vähestest Baeyer-Villigeri reaktsiooni asümmeetrilistest variantidest [Bolm jt, 1995]. Samal katalüsaatoril ja lähedastel tingimustel muunduvad β -hüdrosüketoonid hea saagise ja väga kõrge stereoselektiivsusega α , β -dihüdrosüketoonideks. [Lopp jt, 1997; Paju jt, 2002a].



Joonis 4. Uued substraadid katalüütilises kompleksis. Reaktsiooni vektori määramine ruumiliste faktoritega.



Joonis 5. Ketoonide asümmeetrilise oksüdatsiooni produktid erinevate substraatide korral.

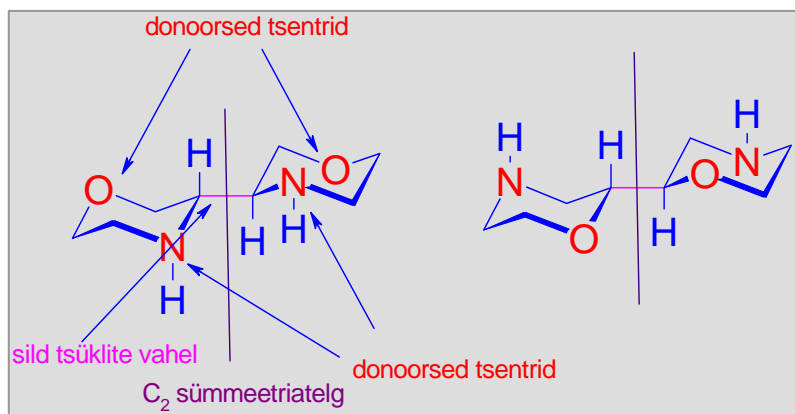
See uus reaktsioon avab hõlpsa ligipääsu riboosi alküleeritud süsinikanaloo- gidele. Tsüklilised 1,2-diketoonid käituvad katalüütilises protsessis jälle ise-

moodi – oksüdeeruvad väga hea saagise ja kõrge selektiivsusega hüdroksüleeritud laktoonideks [Paju jt, 2000; 2002b; 2003ab]. See viimati mainitud võimalus on eriti huvipakkuv bioaktiivsete ühendite sünteesi seisukohalt, sest pakub väga palju praktilisi kasutusvõimalusi.

KUNSTLIKUD ENSÜÜMID - TÜÜRITAVATE OMADUSTEGA METALLKATALÜSAATORID

On endastmõistetav, et oksüdatsioonireaktsiooni stereoselektiivsus on seotud kompleksi katalüsaator/substraat/reagent struktuuriga. Sellistes asümmeetrilistes kompleksides sõltub reaktsiooni vektor (stereoselektiivsus) väga oluliselt substraadist.

Üldjuhul vajab iga substraat ainult talle sobivat kompleksi struktuuri (analoogiliselt ensüümidega, mis on tihti väga substraatspetsiifilised). Katalüütilise metallkompleksi struktuuri saame tüürida kõigepealt kiraalse mõjuri kaudu. Katalüütilises kompleksis on kiraalne mõjur seotud metalliga oma elektrodoonorsete rühmade kaudu. Sharplessi kompleksis on doonorseteks rühmadeks karbonüülsed ja hüdroksüülsed hapnikud. Nende abil komplekseeruvad nii reaktsiooni substraadid, reagentid kui ka produktid. Harilikult on tekkivate produktide komplekseerumisvõime suurem kui substraadidel. Siit ka kompleksi põhiline puudus – reaktsiooni käigus katalüütiline kompleks produktide mõjul inaktiveerub ja vajatakse substraadiga ekvimolaarset kogust katalüsaatorit (see tähendab, et loodud “kunstlik ensüüm” teeb ainult ühe katalüütilise tsükli). “Unelmate katalüsaator” võiks töötada palju katalüütilisi tsükleid ning olla häälestatav igale konkreetsele substraadile.



Joonis 6. C_2 -sümmeetrilised bimorfoliinid – uued kiraalsete katalüsaatorite ligandid.

Selle ülesande lahendamiseks tuleb leida viinhappe asemel katalüütilisse kompleksi tugevamini komplekseeruvaid kiraalseid ligande. Sellise kompleksi “häälestamine” konkreetsele substraadile võiks olla lahendatav ligandite doonoraatomite vahekauguse muutmisega ja kasutatava metalliiooni raadiuse varieerimisega. Selline manipuleerimine (häälestamine) võimaldab muuta sujuvalt katalüütilise kompleksi geometriat ja omadusi. Selle lähenemise realiseerimiseks oleme pöördunud lämmastikku-sisaldavate kiraalsete tsükliliste

ühendite poole, kuna just lämmastik on teadupärast hapnikust paremate elektrodoonorsete omadustega element. Meie poolt töötati välja üldine meetod C_2 -sümmeetriliste kiraalsete bimorfoliinide saamiseks [Kanger jt, 2002; 2003; Kriis jt, 2003]. Loodud uutel kiraalsetel katalüsaatorite liganditel on neli erinevate omadustega doonorset tsentrit: kaks hapnikul ja kaks lämmastikul. Selliste tsükliliste ühendite metallikomplekside geomeetria sõltub väga olulisel määral kasutatud metalliiooni raadiusest.

Nii astuti oluline samm “unelmate katalüsaatori” – tüüritavate omadustega asümmeetriliste katalüsaatorite loomise suunas.

ELUSLOODUSE MÕISTMISEST PRAKTILISTE RAKENDUSTE SUUNAS

Looduse käelisuse mõistmine ja sellega arvestamine on eriti oluline uute bioloogiliselt aktiivsete ainete – potentsiaalsete ravimite loomisel. Kiraalse struktuuriga ravimite sissetoomine meditsiini võimaldab saavutada ravimite suuremat spetsiifilisust ja kõrgemat efektiivsust. Seetõttu püütakse kõik uued kiraalsed ravimid reeglina sünteesida juba ühe vajaliku enantiomeerina. See tähendab, et ühiskonna ootused asümmeetrilise sünteesi vahendite ja võimaluste suhtes on suured. Meie poolt loodud ja välja arendatud uued efektiivsed ja selektiivsed asümmeetrilise sünteesi meetodid peavad täitma neid ootusi. Nii näiteks võimaldab meie poolt leitud uus ketoonide otsese asümmeetrilise oksüdatsiooni reaktsioon sünteesida paljusid hapnikkuisaldavaid ühendeid, nagu α -hüdroksüketoonid, laktoonid, laktoonhapped jne. Sarnase struktuuriga ained on looduslike bioaktiivsete ühendite hulgas laialt levinud. Nende põhjal tehtud looduslike ühendite struktuurianaloogid (näiteks suhkrute alküül- ja süsinik-analoogid) on osutunud väga olulisteks alles hiljuti, seoses nende võimaliku kasutusega viiruse- (HIV) ning vähivastastes ravimites. Kui loodus kasutab suhkruid riboosi ja 2-desoksüriboosi nukleotiidides informatsiooni säilitamisel ja töötlemisel, siis analoogide korral on looduselt “laenatud” ainult üldine suhkrute nukleosiidide ja nukleotiidide kasutuse idee. Naturaalsete suhkrute asemel aga kasutatakse suhkrute analooge, mille süntees muutus suhteliselt lihtsaks ja paindlikuks tänu ketoonide asümmeetrilise oksüdatsiooni uutele meetoditele. Selle tulemusena on praegu võimalik sünteesida uusi spetsiifilise toimega analooge, mille toime erineb oluliselt loodusliku prototüübi omast. Loodame, et mõni neist ühenditest leiab kasutust tulevikuravimites.

Lisaks iseseisva kasutuse võimalusele on saadud kiraalsed molekulid kasutada ka keeruliste molekulide ehitamisel “ehituskividena” (või tervete “ehitusfragmentidena”). On küllalt tõenäoline, et loodud meetodeid hakatakse rakendada ka uute ravimite valmistamise tehnoloogiates nii uurimislaborites kui tootmises.

KIRJANDUS

Bolm, C., Schlingloff, G., Weickhardt, K. 1994. Optically active lactones from a Baeyer-Villiger-type metal-catalyzed oxidation with molecular oxygen. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 33, 1848-1849.

Kanger, T., Ausmees, K., Müürisepp, A.-M., Pehk, T., Lopp, M. 2003. A comparative study of the synthesis of C_2 -symmetric chiral 2,2'-biaziridinyls. *Synlett*, 7, 1055-1057.

- Kanger, T., Kriis, K., Paju, A., Pehk, T., Lopp, M. 1998. Asymmetric oxidation of cyclobutanones: modification of the Sharpless catalyst. *Tetrahedron: Asymmetry*, 9, 4475-4482.
- Kanger, T., Kriis, K., Pehk, T., Müürisepp, A.-M., Lopp M. 2002. Asymmetric synthesis of novel C_2 -symmetric bimorpholines. *Tetrahedron: Asymmetry*, 13, 857-865.
- Kanger, T., Lopp, M., Müraus, A., Lõhmus, M., Kobzar, G., Pehk, T., Lille, Ü. 1992. Synthesis of a novel, optically active 15-nonstereogenic carbaprostacyclin. *Synthesis*, 10, 925-927.
- Katsuki, T., Sharpless, K. B. 1980. The first practical method for asymmetric epoxidation. *J. Am. Chem. Soc.*, 102, 5974.
- Kriis, K., Kanger, T., Müürisepp, A.-M., Lopp, M. 2003. C_2 -symmetric bimorpholines as chiral ligands in the asymmetric hydrogenation of ketones. *Tetrahedron: Asymmetry*, 14, 2271-2275.
- Lille, Ü., Männik, A., Jagomägi, A., Samel, N., Saks, T. 1979. On preparative biosynthesis of prostaglandins E and F, using synthase as the acetone powder. *Proc. Eston. Acad. Sci. Chem.*, 28, 145-150.
- Lopp, M., Kobzar, G., Bergmann, M., Pehk, T., Lopp, A., Välimäe, T., Viigimaa, M., Lille Ü. 1992. Synthesis and Anti-aggregation activity of novel ω -achiral carba-analogues of prostacyclin. *Eur. J. Med. Chem.*, 27, 155-159.
- Lopp, M., Paju, A., Kanger, T., Pehk, T. 1996. Asymmetric Baeyer-Villiger oxidation of cyclobutanones. *Tetrahedron Lett.*, 37, 42, 7583-7586.
- Lopp, M., Paju, A., Kanger, T., Pehk, T. 1997. Direct asymmetric α -hydroxylation of β -hydroxyketones. *Tetrahedron Lett.*, 38, 28, 5051-5054.
- Paju, A., Kanger, T., Niitsoo, O., Pehk, T., Müürisepp, A.-M., Lopp, M. 2003a. Asymmetric oxidation of 3-alkyl-1,2-cyclopentanediones. Part 3. Oxidative ring cleavage of 3-hydroxyethyl-1,2-cyclopentanediones: synthesis of α -hydroxy- γ -lactone acids and spiro- γ -dilactones. *Tetrahedron: Asymmetry*, 14, 2393-2399.
- Paju, A., Kanger, T., Pehk, T., Lindmaa, R., Müürisepp, A.-M., Lopp, M. 2003b. Asymmetric oxidation of 3-alkyl-1,2-cyclopentanediones. Part 2. Oxidative ring cleavage of 3-alkyl-1,2-cyclopentanediones: synthesis of 2-alkyl- γ -lactone acids. *Tetrahedron: Asymmetry*, 14, 1565-1573.
- Paju, A., Kanger, T., Pehk, T., Lopp M. 2000. Asymmetric oxidation of 1,2-cyclopentanediones. *Tetrahedron Lett.*, 41, 6883-6887.
- Paju, A., Kanger, T., Pehk, T., Lopp M. 2002a. Direct asymmetric α -hydroxylation of 2-hydroxymethyl ketones. *Tetrahedron*, 58, 7321-7326.
- Paju, A., Kanger, T., Pehk, T., Müürisepp, A.-M., Lopp, M. 2002b. Asymmetric oxidation of 3-alkyl-1,2-cyclopentanediones. Part 1. 3-Hydroxylation of 3-alkyl-1,2-cyclopentanediones. *Tetrahedron: Asymmetry*, 13, 2439-2448.
- Pehk, T. 2003. Kiraalsete molekulide tuumamagentspektroskoopia. *Eesti Vabariigi Teaduspreemiad*, 42-51.

Pehk, T., Lippmaa, E., Lopp, M., Paju, A., Borer, B. C., Taylor, R. J. K. 1993. Determination of the Absolute Configuration of Chiral Secondary Alcohols: New Advances Using ^{13}C – and 2D NMR spectroscopy. *Tetrahedron: Asymmetry*, 7, 1527-1532.

Ragazzi, E., Chinellato, A., Lille, Ü., Lopp, M., Doni, G., Fassina, G. 1995. Pharmacological Properties of MM-706 a New Prostacyclin Derivative. *Gen. Pharmacology*, 26, 703-709.

Teaduspreemia tehnikateaduste alal töö
"FAASISIIRDEFRONDID MARTENSIITSETES TAHKISTES"
est



*Arkadi
Berezovski*

Sündinud 18.07.1948 Bijskis Venemaal

1966 Koteiski 6. Keskkool Venemaal
1971 Novosibirski Riiklik Ülikool, mehaanika
1978 füüsika-matemaatikakandidaat, Leningradi Polütehniline Instituut
1981 dotsent, rakendusmatemaatika

1971–1981 Kaug-Ida Polütehniline Instituut, Vladivostok: assistent, vanemõpetaja, kateedrijuhataja. 1981–1988 Rakendusgeofüüsika Instituudi Läänemere osakonna (Tallinn) vanemteadur. Alates 1988 TTÜ Küberneetika Instituudi vanemteadur.

Külalisteadlane Berliini Tehnikaülikoolis (1997), Pariisi 6 Ülikoolis (1998).

Avaldanud üle 60 teaduspublikatsiooni.

MUUTUVATE OMADUSTEGA MATERJALID

MATERJALID KAASAEGSES TEHNOLOOGIAS

Inimkonna areng on olnud lahutamatult seotud igapäevaste materjalidega. Ajaloolased isegi klassifitseerivad ajastuid kasutusel olnud materjalide järgi: kiviaeg, pronksiaeg, rauaaeg Omal ajal olid hinnas looduslikud materjalid, tänapäeval seob tehnoloogiline protsess meid ikka rohkem ja rohkem tehismaterjalidega. Mitte ainult meie füüsiline eksistents – riided, ehitised, sõidukid ja loendamatud muud asjad, vaid ka meie vaimsed ja kultuurisaavutused tuginevad materjalidele.

Kahekümnenda sajandi viimast poolt iseloomustab teadmiste ja oskuste kiire kasv. See väljendub ka oskuses luua selliseid uusi materjale, millest varem, ütleme 100 aastat tagasi, ei osatud unistadagi. Me räägime tänapäeval materjaliteadusest, mille väljundid on suure kaaluga paljudes valdkondades. Alljärgnevalt mõned näited.

ELUKESKKOND. Looduskeskkonna olukord sunnib efektiivsemalt kasutama meie käsutuses olevaid maavarasid ja energiaallikaid. Materjaliteadus aitab meil luua uusi materjale energiatootmise tehnoloogiate tarbeks, suurema kasuteguriga seadmeid ja taaskasutatavaid, vähem loodust saastavaid materjale.

TERVISHOID. Haiguste ravi ja meditsiiniline hoolitsus on inimkonna heaolus esmase tähtsusega. Materjaliteadus koos biotehnoloogiaga võib pakkuda lahendusi nendele probleemidele, näiteks luues tehisorganeid, rakendades ohutuid ravimisskeeme, ehitades ökonoomseid veepuhastussüsteeme jne.

SIDE. Maailma globaliseerumine nõuab aina kiiremaid ja usaldusväärsemaid sidevahendeid. Infotehnoloogia ja sellega otseselt seotud arvutustehnika kiire areng sõltub oluliselt uute elektrooniliste, optiliste ja magnetiliste omadustega materjalide kasutuselevõtmisest.

TARBEKAUBAD. Tarbijad on harjunud eeldama, et kaubad ja teenused jõuavad nendeni kiiresti mõistlike hindadega. Materjaliteadus aitab parendada mitte üksnes kaupade kvaliteeti, vaid ka nende käsitlemise (näiteks pakendid) viise, mis tagavad kiirema kaubakäibe ja toote kõrgema kvaliteedi.

TRANSPORT. Olgu tegemist töö, puhkuse või kosmoseuringutega, materjaliteadust on vaja, et luua pikaajalisi ja tugevaid materjale, mis teevad meie reisimise kiiremaks, ohutumaks ja mugavamaks. Nimekiri on pikk: kerged alumiiniumist autode korpused, kiirrongide pidurdussüsteemid, vaiksemad lennukid, kosmosesüstikute soojuskaitseplaadid jne.

VÄLJAKUTSE ALUSUURINGUTELE. Materjale seostatakse tavapäraselt ikka tootearendusega, ometi on oluline mõista eelkõige nende fundamentaalseid omadusi. Eriti oluline on aru saada materjalide mikrostruktuuri mõjust makrotasandil. See tähendab aga, et tuleb ühendada arusaamad, mis toimub aatomiskaalas, arusaamadega materjali vastupidavusest, purunemisest ja oleku stabiilsusest. Eksperimentide kõrval on oluliseks abivahendiks kujunenud matemaatilise modelleerimise meetodid, mis paljus tuginevad numbriliste arvutustele. Selline lähenemine on kasutatav nii traditsiooniliste materjalide (nt teras) kui ka uute, nn “nutikate” materjalide puhul. “Nutikas” materjal muudab

oma omadusi, kui välistingimused muutuvad. See on tegelikult uus paradigma materjaliteaduses. Loomulikult on selliste materjalide tundmaõppimiseks ja sünteesiks vaja tõsiseid alusuuringuid, mis reeglina ei too kohest, rahaliselt mõõdetavat kasu. Oskus vaadata tulevikku on aga läbi aegade olnud edasi-viivaks jõuks teaduses. Seega on materjaliteaduses kindlasti vaja toetada ka alusuuringuid, seda eriti uuringute interdistsiplinaarse iseloomu tõttu – vaja on füüsikute, keemikute, inseneride, matemaatikute ja ka bioloogide kogemuste ja teadmiste ühendamist. Kindel teadmiste alus on eelduseks materjalide efektiivsele kasutamisele, olgu valdkonnaks nanotehnoloogia või biomaterjalid, standardised või “nutikad” materjalid.

MATERJALITEADUS TÄNAPÄEVAL. Kui heita pilk minevikku, siis uus materjal sündis tavaliselt katse-eksituse meetodil. See “tehnoloogia” aga muutus, kui hakati aru saama materjalide struktuurist ja selle seostest makro-omadustega. Tänapäeval on materjaliteaduse üheks eesmärgiks just sünteesida mingi rakenduse tarbeks kõige sobivam materjal, millel on sobiv keemiline koostis, sobiv mikrostruktuur ja selle olekud. Taoline arusaam ei sündinud aga üleöö, vaid kujunes praktiliselt välja viimase viiekümne aasta jooksul. Eelmise sajandi keskkel oli materjaliteadus kindlalt inseneride pärusmaal. Tahkiste füüsika ja keemia edusammud lähendasid materjalide loomise aga loodusteadustele. Erinevates valdkondades oli areng siiski erineva kiirusega. Pooljuhtide kasutuselevõtmine toimus kiiresti tahkiste füüsika arengu tõttu. Edukas oli polümeeride keemia ja materjaliteaduse sümbioos. Konstruksioonimaterjalide arendamisel sündis protsesside keerukus uurima materjalide omadusi üle laia skaala – mikroskoopilisest skaalast (tänapäeval juba nanoskaalast) kuni makroskoopilise skaalani. Oli vaja ka täiesti uusi matemaatilisi kontseptsioone, nagu näiteks renormalisatsiooniteooria faasimuutuste kirjeldamiseks, J-integraali kontseptsioon purunemismehaanikas, fraktaalgeomeetria klastrite kasvu ja kolloidsüsteemide kirjeldamiseks jne. Ühesõnaga – tänapäeva materjaliteadus on kujunenud füüsika, keemia, matemaatika ja tehnikateaduste lõikepunktiks.

MATERJALIDE MODELLEERIMINE. Matemaatiline modelleerimine eeldab kõigepealt füüsikaliste protsesside piisavalt täpset kirjeldust. Aatomite, s.o kristallstruktuuri tasandil on füüsikalised mudelid tõepoolest hästi kirjeldatud. Elastsus- ja plastsusteooria, purunemismehaanika, termodünaamika, elektromagneetiline väljateooria jne moodustavad modelleerimise vundamendi. Teiselt poolt on olemas rida matemaatilisi meetodeid, haaramaks pidevuskontseptsioone ja numbrilisi meetodeid materjalide käitumise simuleerimiseks. Mõlemad suunad kokkuvõetuna on andnud olulise tõuke materjaliteaduse arengule. Võiks visandada ideaalse modelleerimise kontseptsiooni, mis haarab kogu parameetrite ruumi materjali sünteesist ja töötlemisest kuni komponentide toime ja omadusteni – kõik matemaatiliste meetodite abil. Kuigi oleme sellest veel kaugel, näitavad kõik märgid, et sellise teoreetilise modelleerimise tähtsus järjest suureneb.

Kui lühidalt summeerida sellise modelleerimise põhijooni, siis võiks tuua esile järgmist:

- materjalide tootmine modelleeritakse igal etapil füüsikaliste/keemiliste seaduspärasuste baasil sihipäraselt lõppomadusi silmas pidades;
- omaduste ennustamine on kvantitatiivselt usaldusväärne;

- eri teadusvaldkondade sünergia loob uue kvaliteedi ja võimaldab oluliselt laiendada vajalikke skaalasid (kvantmehaanikast pideva keskkonna teoriani).

MODELLEERIMISE TEHNIKA. Tinglikult võiks tehnika ulatuda “visualiseerimisest” kuni “täpsete” meetoditeni. Pole olemas universaalset meetodit, sest efektiivseim on modelleerimine, kus keerukuse aste vastab püstitatud ülesannetele. Omal ajal oli põhieesmärgiks saavutada materjalide stabiilne kristallstruktuur. Täna võib eesmärk olla seotud stabiilsete olekute muutusega (vt allpool). Makronäitajad, nagu mahumoodul näiteks, ei tekita modelleerimisel probleeme, tähelepanu on eelkõige mikro- ja makroskaalas ilmnevate omaduste sünteesil. Hinnatakse ideid, mis loovad paremaid (kergemaid, tugevamaid, vastupidavamaid jne) materjale. Tihti eeldatakse väikimisi, et modelleerimist piirab arvutite võimsus. Ilmselt see nii siiski ei ole, sest määravaks on teadmised ja kogemused, mitte aga tarkvara. Alustada tuleb ikkagi olulisest – eesmärgist, detailsuse astmest ja täpsusest. Sellele järgneb tulemuste interpreteerimine ning siis mudeli piirangute teadvustamine. Tegelikult on vaja jälgida matemaatilise modelleerimise põhinõudeid. Mõõtmiste täpsus ja füüsikaliste omaduste määramise meetodika on tehnoloogias, kaasa arvatud eksperimentaalsed uuringud, pidevalt paranenud. Tuleb rõhutada, et konstruktsioonide elemendid või seadmed muutuvad järjest väiksemaks (nt nanotorud), mis nõuab füüsikaliste piiride täpsemat arvestamist. Õeldu valguses on eriti oluline teoreetiliste uuringute (ka modelleerimise) ja eksperimentide sümbioos. Kindel on see, et korralik teoreetiline mudel ja selle abil tehtavad arvutused võimaldavad vähendada kulukate eksperimentide arvu. Eriti oluline on selline kokkuhoid plahvatuslikult kasvanud tehnoloogiliste nõudmiste tõttu, mis vajavad materjale väga laias skaalas.

Nii tuleks eristada:

- (a) materjali tüüpe – metallid ja nende sulamid, keraamika ja klaas, pooljuhid, nanostruktuurid, polümeerid ja neil baseeruvad komposiitmaterjalid, kermised, vedelkristallid, kolloidsed materjalid jm;
- (b) füüsikalisi omadusi – magnetilised, elektrilised (dielektrikud, isolatsioonmaterjalid, pooljuhid, ülijuhid), optilised, termilised (soojusjuhtivus, soojustakistus), mehaanilised (elastsusmoodul, voolavustugevus, kõvadus) jne;
- (c) mõõtmete skaalat – nanoskaalat (nm) ja mikroskaalat (μm) kuni makroskaalani (mm, m);
- (d) ajaskaalat – femtosekundist kuni sekundini, aastatest kuni geoloogiliste ajastuteni.

Modelleerimisel on erilise tähtsuse omandanud arvutusmeetodid. Kasutusel on isegi termin “arvutuslik materjaliteadus”. Eriti oluline on see, kui tegemist on mõõtmete skaalade läbipõimumisega.

NÄITEID FÜÜSIKALISTEST PROBLEEMIDEST. Laialt kasutatav teras pole sugugi lihtne materjal. Ei maksa unustada, et vajalikud mehaanikalised omadused saavutatakse alles pärast terase termilist töötlemist, mis kutsub esile keerukad faasimuutused. Nende muutuste jaotus toote mahus ja mikrostruktuuri optimeerimine on aluseks protsesside mõistmisel ja juhtimisel. Tunda on vaja faasimuutuste kineetikat ja termodünaamilisi tingimusi, viimased on olulised nii tootes tervikuna kui ka liitepindadel ja vabadel pindadel.

Juba selle näite põhjal võib esitada küsimuse materjali oleku tasakaaluolekust. Materjali mikrostruktuur (kristalne või amorfne, anorgaaniline või orgaaniline, ka bioloogiline) võib olla ju ka mittetasakaalulises dünaamilises seisundis. Seega on oluline materjalide käitumise kineetikat uurida, kvantefektidest kuni purunemiseni.

Kahtlemata suureneb aatomkilesadestatud ja nanomaterjalide tehnoloogiline tähtsus. Võiks öelda, et miniaturiseerimine lõpeb alles siis, kui ilmuvad ühe elektroni/molekuli suurused “transistorid”. Tuleb tunnistada, et meie teadmised on ikka veel puudulikud ja vaja on süvauuringuid. Mikrostruktuuride liitepindade kirjeldamiseks ei piisa näiteks ainult kristallograafia kontseptsioonidest, vaja on spetsiifilisi teisenduspiiranguid nt pinnadeformatsiooni invariantisust. Samuti on vaja aru saada liitepinna mobiilsuse ning seal tekkivate termodünaamiliste jõudude seostatusest kineetikaga.

Hübriidmaterjalid – anorgaanilised/metallilised, orgaanilised/bioloogilised materjalid on huvitavate omadustega, mille kasutusala on tehiskudedest kuni “nutikate” seadmeteni. Omaduste mittehomoogeensus, s.o muutumine ühes või teises suunas suurendab materjalide optimaalset kasutamist. Selliseid materjale nimetatakse funktsionaalselt skaleerituks. Juba nimetus ütleb, et eesmärgiks on olnud luua funktsionaalselt sobivaid materjale teatud töötamistingimusteks. Mitmed juhtivad tööstusriigid (Jaapan, USA, Saksamaa) on algatanud rahvuslikke uurimisprogramme taoliste materjalide paremaks tundmaõppimiseks ja sünteesiks. Küsimus on seotud ka tehnoloogia odavamaks muutmiselega. Ja jälle on võtmeküsimuseks faasidevahelised seosed, nende struktuur ja sümmeetria, allutatud termodünaamikale.

MARTENSIITSETE FAASISIIRDEFRONTIDE LEVIKU TERMOMEHAANILINE MODELLEERIMINE JA NUMBRILINE SIMULEERIMINE TAHKISTES

“NUTIKAD MATERJALID”. Üheks uurimisvaldkonnaks, mis muudab oluliselt meie arusaama sünteetilistest materjalidest, aga samuti meie suhtumist ümbritsevasse, on “nutikad” (või “intelligentsed”) materjalid. Erinevalt normaalsetest, inertsetest materjalidest on “nutikad” materjalid loodud reageerima välistele mõjudele ja kohanema keskkonnaga, et tõsta konstruktsiooni efektiivsust, pikendada kasulikku elutsükli, säästa energiat või olla lihtsalt mugavam inimese jaoks. Luuakse materjale, mis on isekopeeruvad, iseparanduvad või isehävituvad, sõltuvalt vajadusest, vähendades nii saastumist ja suurendades efektiivsust. “Nutikaid” materjale kasutatakse kombinatsioonis erinevate tavaliste materjalidega (metallid, keraamika, biomaterjalid) keerulistes süsteemides (näiteks purunemistundlikud andurid ja tehislihased). Kombineerides aatomiskaala (nanomaterjalide) loomise tehnoloogiaid bioloogiliste süsteemide jäljendamisega (biomimeetika), on uute ja paremate materjalide loomise võimalused äärmiselt laiad.

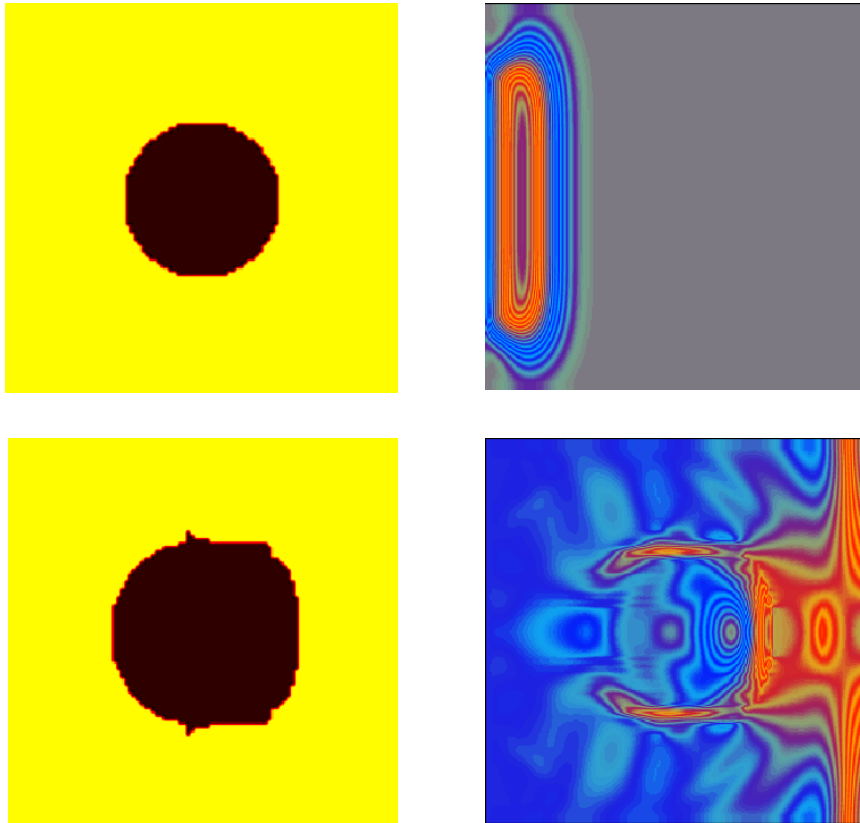
KUJUMÄLUGA SULAMID JA MARTENSIITSED MUUTUSED. “Nutikate” materjalide näiteks on kujumäluga sulamid. Sõltuvalt koormusest ja temperatuurist võib nende sulamite juures märgata ebaharilikke efekte nagu kujumälu või superelastsus. Need nähtused on tingitud kristallvõre martensiit-austeniit faasisiirdest ja martensiitsest kahestumisest [Funakubo, 1984; Otsuka, Wayman, 1998]. Martensiitne faasisiire on kristallvõret moonutav, virtuaalselt difusioonivaba ja pööratav struktuuriline muutus, mis kutsutakse esile teatud

metallsulamites kas temperatuuri muutuse või välisjõu mõjul. Faasisiirde ajal moodustub austeniitses maatriksis uus struktuur, mida nimetatakse martensiidiks, mis ajas oma piire võib muuta. “Nutikate” materjalide käitumine on kutsunud esile uute tehniliste rakenduste tulva nii biomeditsiinis kui ka tehnilistes seadmetes (energiamuundurid, võnkeenergiasummutid jne). Oluliseks probleemiks on “nutikate” struktuuride aktiveerimine. Selliste rakenduste konstrueerimine nõuab lisaks kujumäluga sulamite käitumise põhimõtete heale tundmisele ka korralikke matemaatilisi mudeleid nende käitumise kvantitatiivseks ennustamiseks. Viimase kahekümne aasta jooksul on loodud suur hulk selliseid erineva keerukuse astmega mudeleid [Fischer jt, 1994; Birman, 1997; Bernardini, Pence, 2002; Oidwai, Lagoudas, 2000; Abeyaratne jt, 2001].

KINEETIKA. Kristalliliste tahkiste martensiidsete faasisiirete kui huvitava füüsikalise protsessi edukas kasutamine on mõeldav, kui osatakse seda protsessi juhtida. Kõigepealt on vaja saada aru faasisiirete frondi termomehaanilisest käitumisest dünaamilistel koormustel. See eeldab teadmisi faasisiirdefrontide dünaamikast, kus probleemiks on frondile mõjuva jõu seostatus liikumisega. Tõsi, on olemas hulk kineetilisi mõõtmisi, kuid puuduvad üldistused. Seega, materjalide mikrostruktuuri kujunemine nõuab detailset kineetika uurimist.

FAASISIIRDEFRONDI LEVIMINE. Faasisiirdefrondi leviku kirjeldamiseks on käesoleva uuringu raames esitatud uus meetod [Berezovski, Maugin, 2002b], mis tugineb pideva keskkonna mehaanika arendustel [Maugin, 1993; Kienzler, Hermann, 2000; Gurtin, 2000], diskreetsete süsteemide termodünaamikal [Muschik, 1993] ja jäävusseaduste esitamise numbrilistel meetoditel [LeVeque, 2002; LeFloch, 2002]. Erilise tähelepanu all on pingelainetest põhjustatud faasisiirded. Hiljuti on loodud kanooniline formalism termodünaamiliste kitsenduste kirjeldamiseks selliste katkevusfrontide, nagu lööklained ja faasifrondid termoelastsetes tahkistes [Maugin, 1993; Kienzler, Hermann, 2000; Gurtin, 2000]. See kanooniline formalism niinimetatud pseudo- ja kanooniliste momentide tasakaalu kasutamisega võimaldab üldistada mitmeid keeruliste süsteemide kontseptsioone. Termodünaamika teise seaduse täpsed ja pidevusnõudeid täitvad vormid ning kanooniliste momentide tasakaal liitepinnal seletavad entroopia kasvu frondil.

Lainete ja faasisiirdefrontide levik termoelastses keskkonnas allub samadele välja- ja olekuvõrranditele (vähemalt integraalses esituses). Lihtsaima mudeli, nagu lineaarse termoelastse keskkonna korral taanduvad need võrrandid klassikalisteks hüperboolseks lainevõrrandiks ja paraboolseks soojusvõrrandiks. Probleemid kerkivad termoelastsete lainete ja frontide levikul mittehomogeenses keskkonnas. Praktilisest vaatepunktist on need probleemid eelkõige seotud sobivate numbriliste algoritmide konstrueerimisega. Kiired muutused vaadeldavate materjalide omadustes ning samaaegne surve- ja nihkelainete olemasolu nõuab algoritmides vähemalt teist järku täpsust. Sellised kõrge täpsusega ja suure efektiivsusega algoritmid on konstrueeritud nn lõpliku-mahu skeemidena [LeVeque, 2002; LeFloch, 2002]. Vastavad numbrilised meetodid baseeruvad kehtivate võrrandite integreerimisel üle kontrollmahu, mis haarab võrguelementi ja ajasammu. See tähendab, et tulemusena saadud numbriline skeem väljendub võrguelemendi keskmiste väljamuutujate ja piiride keskmiste voogude kaudu. Keskkonna olekuvõrrandid kehtivad samuti keskväärtuste suhtes. Kõrgema täpsuse saavutamiseks on muutujate astmeline jaotus asendatud tükati lineaarse (või isegi mittelineaarse) jaotusega üle võrgu [LeVeque, 2002].



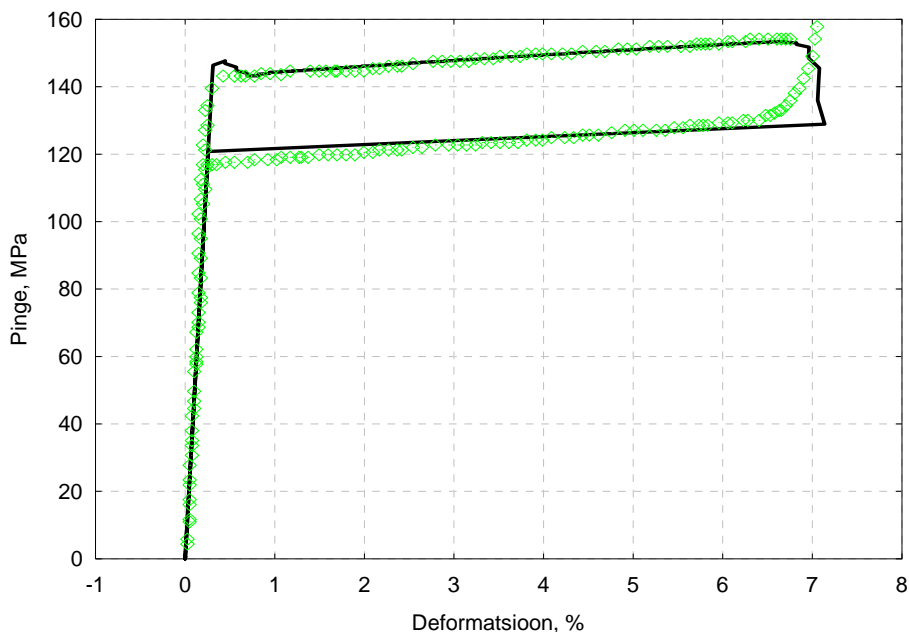
Joonis 1. Kahedimensionaalne martensiitstruktuuri muutus (vasakul) pärast pingelaine toimet (paremal). Ülemised skeemid – protsessi algus, alumised skeemid – protsessi lõppstaadium.

tes maha ebatõesed östsillatsioonid. Ometi pole termodünaamika vaatepunktist selline skeem hea, sest see hävitab kohaliku tasakaalu võrguelemendis. Järelikult pole kehtiv olekuvõrrand ja isegi termodünaamiliste muutujate (näiteks temperatuur ja entroopia) tähendus on küsitav. Samuti ei kehti tasakaalutingimused faasipiiril, vähemalt faasimuutuse alguses. Pinge poolt esilekutsutud faasimuutus termoelastses tahkises on rangelt mittetasakaaluline protsess, liitepiiride leviku tõttu materjalis.

MITTETASAKAALULINE KIRJELDUS. Probleemi lahendus on leitud võrguelementides oleva mittetasakaalulise oleku kirjeldamisega diskreetsete süsteemide termodünaamika raames [Berezovski, Maugin, 2002b]. On eeldatud, et mittetasakaalulised termodünaamilised tingimused faasipiiridel kirjeldavad faasisiirde frontide liikumist kristallilistes tahkistes [Berezovski, Maugin, 2004]. Kriiti-

liseks hüpoteesiks on seos vastasmõju energia ja niinimetatud kontaktsuuruste vahel, mis kirjeldavad diskreetsete süsteemide mittetasakaalulisi olekuid. Neid saab määrata mittetasakaalulistest termodünaamilistest tingimustest, mis on erinevad entroopiat tootvate ja mittetootvate protsesside jaoks. Viimane kaalutlus dikteerib pidevustingimuste kasutamise: üks on kasutusel mahus (termoelastsete lainete korral), teine faasipiiril (kus toimub entroopia lisandumine). Faasimuutuste tekke alguse kriteerium tuleneb mõlema termodünaamilise tingimuse rahuldamisest faasipiiril [Berezovski, Maugin, 2002a; Berezovski jt, 2003a; 2003b; Berezovski, Maugin, 2003a; 2003b]. Tekitatud jõu kriitiline väärtus määratakse faasisiirde protsessi algtingimustest.

NUMBRILINE SIMULATSIOON. On loodud termodünaamiliselt lõplike mahtude numbriline meetod termoelastsete lainete ja frontide kirjeldamiseks [Berezovski jt, 2000; Berezovski, Maugin, 2001]. Selline formuleering lubab kasutada Godunovi tüüpi numbrilisi skeeme, mis põhinevad väljamuutujate keskväärustel mittetasakaaluliste olukordade kirjeldamiseks. Numbriliste simulatsioonide tulemused [Berezovski, Maugin, 2002a; Berezovski jt, 2003a; 2003b; Berezovski, Maugin, 2003a; 2003b] näitavad, et pakutud mudel langeb kokku eksperimentaalsete tulemustega, mis tulenevad teoreetilistest ennustustest, vaatamata protsessi idealiseerimisele mudelis. Tüüpiline näide faasifrontide dünaamikast on näidatud joonisel 1. Pildi vasak osa kujutab martensiitse lisandi kuju enne ja pärast pingelaine toimet, mis on näidatud paremal. Ühemõõtmelisel juhul on võimalik võrrelda numbrilise simuleerimise tulemusi katsetulemustega. Joonisel 2 on esitatud arvatud hüstereetilise pingedeformatsiooni seose võrdlus Cu-Zn-Al monokristallilise kujumäluga sulami jaoks eksperimendiga [Goo, LExcellent, 1997].



Joonis 2. Pinge-deformatsioonikõver faasipiiril austeniitstruktuuri taastumisel
 □ – eksperiment, pidev joon – arvutatud.

KIRJANDUS

Abeyaratne, R., Bhattacharya, K., Knowles, J. K. 2001. Strain-energy functions with local minima: Modeling phase transformations using finite thermoelasticity. Fu, Y., Ogden, R. W. (eds.). *Nonlinear Elasticity: Theory and Application*. Cambridge University Press, Cambridge, 433-490.

Berezovski, A., Engelbrecht, J., Maugin, G. A. 2000. Thermoelastic wave propagation in inhomogeneous media. *Arch. Applied Mech.*, 70, 694-706.

Berezovski, A., Engelbrecht, J., Maugin, G. A. 2003a. Numerical simulation of thermoelastic wave and phase-transition front propagation. Cohen, G. C., Heikkola, E., Joly, P., Neittaanmäki, P. (eds.). *Mathematical and Numerical Aspects of Wave Propagation*. Springer, Berlin, 759-764.

Berezovski, A., Engelbrecht, J., Maugin, G. A. 2003b. Numerical simulation of waves and fronts in structured materials: a thermodynamic approach. *Proc. Estonian Acad. Sci. Phys. Mat.*, 52, 30-42.

Berezovski, A., Maugin, G. A. 2001. Simulation of thermoelastic wave propagation by means of a composite wave-propagation algorithm. *J. Comp. Physics*, 168, 249-264.

Berezovski, A., Maugin, G. A. 2002a. Thermodynamics of discrete systems and martensitic phase transition simulation. *Technische Mechanik*, 22, 118-131.

Berezovski, A., Maugin, G. A. 2002b. Thermoelastic wave and front propagation. *J. Thermal Stresses*, 25, 8, 719-743.

Berezovski, A., Maugin, G. A. 2003a. Dynamics of impact-induced phase transition fronts. *J. de Physique IV*, 112, 167-170.

Berezovski, A., Maugin, G. A. 2003b. Simulation of wave and front propagation in elastic and thermoelastic heterogeneous materials. *Computational Materials Science*, 28, 478-485.

Berezovski, A., Maugin, G. A. 2004. On the thermodynamic conditions at moving phase-transition fronts in thermoelastic solids. *J. Non-Equilib. Thermodyn.*, 29, 37-51.

Bernardini, D., Pence, T. J. 2002. Shape memory materials: modeling. Schwartz, M. (ed.). *Encyclopedia of Smart Materials*. Wiley, New York, 964-980.

Birman, V. 1997. Review of mechanics of shape memory alloy structures. *Appl. Mech. Rev.*, 50, 629-645.

Fischer, F.D., Berveiller, M., Tanaka, K., Oberaigner, E. R. 1994. Continuum mechanical aspects of phase transformations in solids. *Arch. Appl. Mech.*, 64, 54-85.

Funakubo, H. (ed.). 1984. *Shape Memory Alloys*. Gordon and Breach, London.

Goo, B. C., LExcellent, C. 1997. Micromechanics-based modeling of two-way memory effect of a single-crystalline shape-memory alloy. *Acta Mater.*, 45, 727-737.

- Gurtin, M. E. 2000. *Configurational Forces as Basic Concepts of Continuum Physics*. Springer, New York.
- Kienzler, R., Hermann, G. 2000. *Mechanics in Material Space*. Springer, Berlin.
- LeFloch, P. G. 2002. *Hyperbolic Systems of Conservation Laws*. Birkhäuser, ETH Zürich.
- LeVeque, R. J. 2002. *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Maugin, G. A. 1993. *Material Inhomogeneities in Elasticity*. Chapman and Hall, London.
- Muschik, W. 1993. *Fundamentals of non-equilibrium thermodynamics*. Muschik, W. (ed.). *Non-Equilibrium Thermodynamics with Application to Solids*. Springer, Wien, 1-63.
- Qidwai, M. A., Lagoudas, D. C. 2000. On thermomechanics and transformation surfaces of polycrystalline NiTi shape memory alloy material. *Int. J. Plasticity*, 16, 1309–1343.
- Otsuka, K., Wayman, C. M. (eds.). 1998. *Shape Memory Materials*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Teaduspreemia arstiteaduse alal uuringutsükli
**“PSÜHHOFARMAKOLOOGILINE JA GEENITEHNOLOO-
GILINE LÄHENEMISVIIS NEGATIIVSETE EMOTSIOONIDE
NEUROBIOLOOGILISTE MEHHANISMIDE
SELGITAMISEKS” eest**



*Eero
Vasar*
Kollektiivi juht

Sündinud 17.09.1954 Tartus

1973 Tartu 5. Keskkool
1979 Tartu Ülikool, arstiteaduskond
1983 meditsiinikandidaat, Tartu Ülikool
1992 meditsiinidoktor, Tartu Ülikool
2001 Punase Risti III klassi teenetemärk

Tartu Ülikool: 1983–1991 ÜMPI psühhofarmakoloogia laboratooriumi juhataja, vanemteadur; alates 1991 füsioloogia instituudi juhataja, aastast 1992 füsioloogia korraline professor.

Euroopa Neuropsühhofarmakoloogia Kolledži liige; Euroopa Käitumisfarmakoloogia Seltsi liige; Eesti Füsioloogia Seltsi president.

Eelretsenseeritavates rahvusvahelistes ajakirjades on avaldanud 85 artiklit.



Sulev Kõks (esimene vasakult)

Sündinud 20.01.1971 Pärnus

1989 Pärnu IV Keskkool
 1995 Tartu Ülikool, arstiteaduskond
 1999 doktorikraad molekulaarse bio-
 meditsiini erialal
 2003 Euroopa Psühhoneurofarmkoo-
 loogia Kolledži (ECNP) tea-
 dustöö auhind

Alates 1993 TÜ füsioloogia instituut:
 laborant, teadur, vanemteadur.

Rahvusvahelise Ajuuuringute Ühin-
 gu (IBRO) liige.

Avaldanud üle 30 teaduspublikatsiooni.

Vallo Volke (neljas vasakult)

Sündinud 30.04.1971 Tapal

1989 Tapa 1. Keskkool
 1995 Tartu Ülikool, arstiteadus-
 kond
 1999 meditsiinidoktor, Tartu Ülikool

Alates 1996 Tartu Ülikooli füsio-
 loogia instituut: teadur, vanem-
 teadur.

Eesti Arstide Liidu eestseisuse lii-
 ge.

Avaldanud 21 teaduspublikatsiooni
 rahvusvahelistes teadusajakirjades.

Vootele Võikar (teine vasakult)

Sündinud 26. aprillil 1969 Põlvas

1987 Põlva Keskkool
 1994 Tartu Ülikool, arstiteaduskond

1994–1998 TÜ füsioloogia instituudi assistent. 1998–2002 Helsingi Ülikooli
 biotehnoloogia instituudi külalisteadur, teadur. Alates 2003 Helsingi Ülikooli
 Närviteaduse Keskuse teadur.

IBANGS (International Behavioral and Neural Genetics Society) liige.

Avaldanud 12 teaduspublikatsiooni eelretsenseeritavates ajakirjades.

ÄREVUSE NEUROBIOLOOGIA – MOLEKULAARNE VAADE HINGEPEEGLISSE

Ärevus kuulub negatiivsete emotsioonide hulka ning füsioloogilistes piirides aitab ta isendil kohastuda olukordades, kus organismis peituvate varujõudude mobiliseerimine on hädavajalik. Ärevus on emotsioon, mis on tihedalt seotud organismi vastusega mitmesugustele stressogeensetele teguritele, sõltumata sellest, kas need on füüsilist või psüühilist laadi. Lähtudes ohustavate faktorite reaalsest või potentsiaalsest olemasolust on võimalik ärevusseisundeid jagada kaheks – hirmuks ja ärevuseks. Hirnu emotsioonist räägitakse, kui on tegemist otseselt ähvardava ohuga. Ärevuse puhul ei ole tegemist otsese ohuga, ohustav tegur on potentsiaalne ja ta on välditav. Mõnikord kaotab ärevus oma kohastumusliku tähenduse ja muutub inimese elukvaliteeti oluliselt häirivaks haiguslikuks seisundiks. Seda juhul, kui ärevusega kaasnevad reaktsioonid on ülemäärased (paanikahäire) või ärevusseisund kestab liiga kaua (generaliseerunud ärevushäire). Järelikult ei ole patoloogilise ja füsioloogilise ärevuse erinevus mitte kvalitatiivset laadi vaid see kannab kvantitatiivset iseloomu.

Ärevushäired on psühhiaatrilistest haigustest kõige levinumad. Umbes üks kolmandik inimestest jõuab oma elu jooksul seisundini, kus on tegemist patoloogilise ärevusega. Suurenenud ärevus on sageli oluliseks depressiivsete seisundite süptoomiks. Vaatamata olulistele saavutustele ärevuse neurobioloogilise tausta mõistmisel on patoloogiliste ärevusseisundite molekulaarne taust siiski ebaselge. Kaasaegne arusaam ärevuse molekulaarsetest mehhanismidest põhineb suuresti teatud ravimite efektiivsusel ärevushäirete ja depressiooni ravis. Keemilised ühendid, mis interakteeruvad närvirakkude pidurdust esilekutsuva virgatsaine γ -aminovõihappe (GAVH) A-alatüübi retseptoritega (GAVH_A), on efektiivsed ravimid ärevushäirete ravis.

Ravimid, mis valikuliselt pidurdavad serotoniini ja noradrenaliini tagasihaaret närvirakkude poolt, on leidnud laialdast kasutamist depressiivsete seisundite ja patoloogilise ärevuse ravis. Siiski peab nentima, et need ravimid ei ole ideaalsed, sest neil on olulised kõrvaltoimed. Bensodiasepiini retseptorite agonistid, mis suurendavad GAVH_A retseptorite tundlikkust endogeense GAVH suhtes, põhjustavad kroonilisel kasutamisel sõltuvust ja sellepärast on need ravimid uimastite nimekirjas.

Antidepressandid, mis pidurdavad serotoniini tagasihaaret, võivad suurendada ärevust kui alustada ravi suurte annustega. Kaasaegsed uuringud viitavad, et neid aineid ei saa kasutada noorukitel, sest nende toimel suureneb noorukite hulgas suitsiidide sagedus. Sellepärast on vaja edasi minna alusuuringutega, mis aitaksid paremini mõista ärevuse molekulaarseid mehhanisme. Sisuliselt tähendab see tungimist inimhinge sügavusse. Selline lähenemisviis aitab selgitada uusi molekulaarseid sihtmärke, mille kaudu oleks võimalik ärevusseisundeid mõjustada. Kindlasti aitab see kaasa uute senisest selektiivsemate ärevusevastaste ainete loomisele. Molekulaarse psühhofarmakoloogia ülesandeks ei ole inimeste vabastamine füsioloogilisest ärevusest kui võimsast bioloogilisest kohastumuslikust mehhanismist, vaid senisest efektiivsem hingepiinade ravi. Hingevaevuste leevendamise kõrval ei saa tähtsusetuks pidada ärevushäirete ja depressiivsete seisundite profülaktikat, sest lihtsam on haigust ära hoida kui seda ravida. Ärevushäiretega seotud molekulaarsete sihtmärkide kirjeldamine loob põhimõtteliselt uusi võimalusi ka siin, sest kasutades alus-

uuringutest pärinevat informatsiooni on võimalik identifitseerida neid inimesi, kellel on oluliselt suurenenud risk haigestuda ärevushäiretesse. Pelgalt arstlike ettekirjutuste järgimisega, mis aitavad neil inimestel hoiduda situatsioonidest, kus nende kohanemisvõime ei ole piisav, on võimalik vältida haigestumist ärevushäiretesse ja depressiooni.

Tartu Ülikooli Füsioloogia instituudi neurofüsioloogia uurimisgrupp (Eero Vasar, Sulev Kõks, Vallo Volke ja hetkel Helsinki Ülikoolis töötav Vootele Võikar) on seadnudki põhiliseks eesmärgiks ärevuse molekulaarsete mehhanismide selgitamise, et leida uusi ärevusega seotud molekulaarseid sihtmärke. Nimetatud uurimisgrupp alustas oma tegevust psühhofarmakoloogia valdkonnas, kuid viimaste aastatega on huvikeskmesse tõusnud geenitehnoloogiliste lähenemisviiside rakendamine neurobioloogias ja psühhofarmakoloogias. Nimetatud lähenemisviis lubab senisest enam tungida üksikute ajustruktuuride tasemel toimuvate närviprotsesside molekulaarsetesse mehhanismidesse. Nende uuringute käigus on kasutusele võetud terve rida Eesti tingimustes uusi kaasaegseid uurimismeetodeid: transgeenne tehnoloogia geneetiliselt modifitseeritud katseloomade loomiseks, diferentsiaalkloneerimise rakendamine erinevate geenide ekspressiooni analüüsiks ajustruktuuride tasemel, geenikiipide tehnoloogia ühenukleotiidsete geeni polümorfismide ja geeni ekspressiooni analüüsiks. Uuringud on teostatud tihedas rahvusvahelises koostöös Nantesi (prof M. Bourin), Kobe (prof T. Matsui), Kuopio (prof P. T. Männistö), Aarhushi (prof R. Rosenberg) ja Helsinki (prof H. Rauvala) Ülikoolide teadlastega.

KAASAEGSETE GEENITEHNOLOOGILISTE MEETODITE RAKENDAMINE ÄREVUSEGA SEOTUD MOLEKULAARSETE SIHTMÄRKIDE SELGITAMISEKS AJUS

Leidmaks uusi sihtmärke ärevuse ja emotsionaalsete häirete molekulaarsete mehhanismide käsitlemiseks rakendati katseloomadel, kelleks olid Wistar liini isased rotid, loomulikke ärevust esilekutsuvaid situatioone. Rottide eksponeerimine kassilõhna suhtes kutsus esile nendel katseloomadel tardumisreaktsiooni ja liikumisaktiivsuse täieliku kadumise, mis on rottidel liigiomased käitumuslikud reaktsioonid ärevusseisundite korral. Teiseks mudeliks on ülestõstetud pluss-puuri mudel (*elevated plus-maze*), farmakoloogiliselt hästi valideeritud katsesituatsioon ärevuselaadse käitumise uurimiseks. Nii rottide kui hiirte populatsioonid käituvad väga erinevalt ülestõstetud pluss-puuri mudelis. Osa loomi jääb peitu suletud õlgadesse, teised aga uudistavad aktiivselt katseseadeldise avatud osi. Selle alusel on võimalik katseloomi jagada ärevateks ja mitteärevateks. Nii kiskjalõhna kui ka pluss-puuri mudelites analüüsiti diferentsiaalse kloneerimise abil muutusi erinevate geenide ekspressioonis negatiivsete emotsioonidega seotud ajustruktuurides (periaikveduktaalne hallaine, mandelkeha ja otsmikukoor). Kassilõhna mõjul toimub terve rea geenide ekspressiooni suuremine roti mandelkehas, ühes kesksemas ärevuse ja hirmu regulatsiooniga seotud ajustruktuuris. Suurenes mitmete närviülekanedega seotud geenide ekspressioon (karboksüpeptidaas E, türosiini 3-monooksügenaas/trüptofaani 5-monooksügenaas, wolframiin, Rho GTP-aas, neurokondriin, Ca/kalmoduliin-sõltuv proteiini kinaas ja Na⁺/K⁺ ATPaasi alfa (+) isovormi katalüütiline alaühik).

Samuti leiti, et vähenes mitmete geenide ekspressioon mandelkehas, mis avaldavad antagonistlikku toimet mitmetele ülaltoodud geenidele (niskariin ja Rab geranüülgeranüüli tranferaas). Seega õnnestus meil kirjeldada uusi ärevusega

seotud signaaliülekanne radasid närvirakkudes. Nii kassilõhna kui ka pluss-puuri eksperimendis õnnestus näidata limbilise süsteemiga seotud membraani valgu (LSAMP) üleekspressiooni. Kassilõhna eksperimendis oli see täheldatav mandelkehas ja pluss-puuri uuringus periakveduktaalses hallaines. Wolframiin ja LSAMP on valitud meie järgnevate uuringute sihtmärkideks, et selgitada nende valkude rolli ärevuse mehhanismides ja üldse närvisüsteemi talitluses.

L-ARGINIINI/LÄMMASTIKMONOOKSIIDI (NO) SÜSTEEM KUI UUTE PERSPEKTIIVSETE ANKSIOLÜÜTILISTE JA ANTIDEPRESSIIVSETE RAVIMITE MÄRKLAUD

Lämmastikmonooksiidi (NO) kui aju virgatsaine avastamisest on möödunud 13 aastat. Täna on veenvalt kirjeldatud NO osalemine mitmetes olulistes protsessides, nagu õppimine ja mälu, valu, toitumiskäitumine, neurodegeneratsioon. Meie teadusgrupp on olnud NO uuringutesse haaratud juba varakult, mis on võimaldanud kirjeldada esimeste seas NO mõningaid olulisi funktsioone ajus. Kasutades erinevaid etoloogilisi, neurofüsioloogilisi ja biokeemilisi meetodeid oleme uurinud NO sünteesi mõjustavate ainete toimet katseloomade käitumisele, NO sünteesi aktiivsusele ja teiste virgatsainete tasemele ajus ärevuse ja depressiooni kontekstis. Meie uuringud on kindlalt tõestanud, et NO osaleb ärevuse ja hirmu regulatsioonis, olles ärevust suurendavaks virgatsaineks. Meie grupp näitas esimesena, et selektiivselt ajus NO sünteesi pärssivatel ainetel (7-nitroindasool ja TRIM) on ärevust vähendav toime pluss-puuri mudelis. Sellist toimet on kinnitanud ka teiste uurijate tulemused. Oleme suutnud ka tõestada, et kahest ajus leiduvast NOS-i vormist on just neuronaalne alavorm peamine märklaud ärevuse- ja depressioonivastase toime saavutamisel. Samuti on õnnestunud näidata, et NO ja cGMP tasemete samaaegne suurendamine ajus põhjustab hiirtel ärevuse taseme tõusu. Nii põhjustas L-arginiini (NO prekursor) ja sildenafili (5ndat tüüpi fosfodiesteraasi inhibiitor) koosmanustamine ärevuse taseme märgatava tõusu pluss-puuri mudelis. Antud uuring näitab peale NO olulise rolli ärevuse kontekstis esmakordselt ka cGMP osalemist.

Üheks keerulisemaks probleemiks NO uurimisel on täpse meetodi puudumine mõõtmaks NO ülimalaid hulki organismis. Meie grupp on kirjeldanud NO sünteesi aktiivsuse määramiseks mikrodialüüsil baseeruva meetodi, kus määratakse NO sünteesi kõrvalprodukti hulka, mis on võrdne tekkiva NO hulga. Kasutades antud meetodit oleme näidanud, et erinevatesse gruppidesse kuuluvad antidepressiivsed ravimid pidurdavad NOS-i aktiivsust hipokampuses pärast ravimite lokaalset manustamist. Serotoniini (5-HT) manustamine ei mõjustanud NOS-i aktiivsust hipokampuses. Kuna antidepressandid ei mõjustanud NOS-i aktiivsust *in vitro* tingimustes, tekib NOS-i pidurdamine ajus ilmselt mingi kaudse mehhanismi kaudu.

NO ei funktsioneeris ajus isoleeritult, vaid täidab teatud funktsioone ka läbi vastasmõjude teiste virgatsainetega. Sellepärast oleme me uurinud NO toimeid klassikaliste virgatsainete tasemele. Selleks mõõtsime muutusi serotoniini ja dopamiini tasemes ajus pärast NO sünteesi suurendamist või pärssimist. Tulemused näitavad, et NO pidurdab serotoniini ja dopamiini vabanemist hipokampuses, kusjuures nende virgatsainete vabanemine on ka tavaolukorras NO negatiivse kontrolli all. Manustades katseloomale NO sünteesi tõstvat ainet, serotoniini tase langeb, NO sünteesi pärssivad ained põhjustavad aga serotoniini hulga suurenemise. Viimane leid on eriti tähelepanuväärne, kuna

NOS-i inhibiitorite toime serotoniini tasemele on analoogne klassikaliste depressioonivastaste ravimitega ja seega võib olla bioloogiliseks aluseks NOS-i inhibiitorite depressioonivastasele toimele.

PSÜHHOFARMAKOLOOGILISE JA GEENITEHNOLOOGILISE
LÄHENEMISVIISI RAKENDAMINE NEUROPEPTIID
KOLETSÜSTOKINIINI ROLLI SELGITAMISEKS EMOTSIONAALSE
KÄITUMISE REGULATSIOONIS

Neuropeptiid koletsüstokiniini (CCK) uuringud on töörühma tähelepanu keskmes olnud juba rohkem kui kaksikümmend aastat. Selles valdkonnas on Tartu Ülikoolis kaitstud terve rida meditsiinikandidaadi ja meditsiinidoktori väitekirju (Andres Soosaar, Jaanus Harro, Aavo Lang, Sulev Kõks, Vallo Volke, Jakov Šlik ja Alar Veraksitš). CCK näib funktsioneerivat virgatsainena, mis omab olulist tähendust loomade kohanemisel uudes situatsioonis. Psühhhofarmakoloogilistes uuringutes õnnestus meil näidata, et CCK anksiogeenne toime avaldub ainult uudes ja aversiivses keskkonnas ning selle efekti vahendajaks on CCK teist tüüpi (CCK₂) retseptorid ajus. CCK anksiogeenset toimet potentsiibrid olulisel määral naloksoon, opioidid retseptorite antagonistid. Seega ei interakteeru opioidid peptiidid ja CCK mitte ainult valutundlikkuse regulatsioonis, vaid opioidid peptiidid on ka CCK anksiogeense toime antagonistideks.

Lisaks sellele leidsime farmakoloogilistes uuringutes, et serotoniini tagasihaarde inhibiitori paroksetiini väikeste annuste ärevustpõhjustav toime on vahendatud CCK₂ retseptorite poolt. See efekt on kõrvaldatav selektiivse 5-HT_{1A} retseptorite agonisti 8-OH-DPAT, aga mitte 5-HT_{2C} retseptorite antagonistid deramtsiklaani poolt. Deramtsiklaan on potentsiaalne anksiolüütilise toimega ravim, mida on TÜ füsioloogia instituudi neurofüsioloogia uurimisgrupp uurinud koostöös Soome ja Ungari teadlastega. Nende uuringute tulemused on võetud kokku ülevaateartiklisse, kus vaagitakse deramtsiklaani kliinilise kasutamise võimalusi ja jõutakse järeldusele, et see aine võiks parimat toimet avaldada generaliseerunud ärevushäire korral.

Teostatud alusuuringutes õnnestus meil näidata, et rottide ärevuskäitumine sõltub aastaegadest. Rotid on tunduvalt ärevamad suvel ja väiksema ärevusega talvel, sellega kaasneb CCK₂ ja 5-HT₂ retseptorite suurem tihedus ajukooses suvel võrreldes talvega. See leid võib olla seotud asjaoluga, et vabas looduses elavad laborirottide eelkäijad pidid ja peavad olema valmis oma eksistentsi eest võitlemiseks enam suvel kui talvel. Oluliseks edusammuks CCK seotud uuringute juures on transgeense tehnoloogia rakendamine. Füsioloogia instituudis on nimelt viimase viie aasta vältel uuritud CCK₂ retseptori puudulikkusega hiirt kui võimalikku mudelit koletsüstokiniini rolli selgitamiseks emotsionaalse käitumise regulatsioonis. Uue uurimistehnoloogia kasutuselevõtmisel on osutunud vajalikuks erinevate metodoloogiliste eksperimentide läbiviimine. Nii on koostöös Helsingi Ülikooliga uuritud kahe olulise transgeense tehnoloogia otsustavatel rakendatava hiireliini C57Bl/6 ja 129Sv käitumuslike iseärasusi.

Uuringutest selgus, et need hiireliinid erinevad üksteisest käitumuslike iseärasuste tõttu ja seda esmajoones ärevuskäitumise osas. 129Sv liini hiired on tunduvalt ärevamad C57Bl/6 hiirtega võrreldes. Seda asjaolu tuleb arvestada, kui üritatakse iseloomustada geneetiliselt modifitseeritud loomade käitumist, sest mõlema vanemliini geneetiline taust võib tingida sedavõrd olulisi käitumuslike nihkeid, et neid võidakse trakteerida kui geneetilisest manipulatsioonist

nist tingitud. CCK₂ retseptori puudulikkusega hiirte uurimisel on olulisemaid tulemusi saadud liikumisaktiivsuse, valutundlikkuse ja ärevuse osas. Nime- tatud hiired reageerivad oluliselt tugevamini dopamiini agonisti amfetamiini manustamisest tingitud mootorika aktivatsioonile. Samuti on nende katseloo- made juttkehas (*corpus striatum*) tunduvalt rohkem dopamiini retseptoreid võrreldes “metsikut” tüüpi liigikaaslastega, kellel CCK₂ retseptori defekti ei esine. Nende uuringute põhjal on võimalik väita, et CCK₂ retseptorite puudu- likkusega hiirtel esineb märkimisväärne dopamiini retseptorite ülitundlikkus.

Huvitav on asjaolu, et dopamiinergilise süsteemi ülitundlikkus esineb ainult isastel CCK₂ retseptori puudulikkusega hiirtel. Isastel geneetiliselt modifit- seeritud hiirtel on vähenenud ka valutundlikkus plantaar-analgeesia ja “kuuma plaadi” testides ning mehaaniline tundlikkus Von Frey testis võrreldes “met- sikut” tüüpi liigikaaslastega. Huvitavaks leiuks on, et nendel katseloomadel ei teki hüperalgeesiat istmikunärvi harude ligeerimisel. Seega võib antud genee- tilise defektiga isaste hiire uurimisel saada olulist informatsiooni neuropaatilise valu molekulaarsete mehhanismide mõistmiseks. CCK₂ retseptori puudulikku- sega hiirte juttkehas (*corpus striatum*) on suurenenud μ -opioidi, ajus morfiini toimet vahendavate, retseptorite tihedus.

Nende uuringute alusel võib väita, et CCK₂ retseptori geneetiliselt indutseeri- tud kahjustamine põhjustab opioidse süsteemi aktiivsuse suurenemist ajus, mil- lest ongi tingitud olulised muutused valutundlikkuses. Emastel CCK₂ retseptori puudulikkusega hiirtel on vähenenud ärevus etoloogilistes mudelites. Samuti hoiab CCK₂ retseptorite väljalülitamine ära isolatsioonist tingitud ärevuse suu- renemise emasloomadel. Sotsiaalset isolatsiooni peetakse depressiivsete sei- sundite mudeliks hiirtel ja rottidel. Nendest katsetest võib järeldada, et CCK₂ retseptoritel on oluline tähendus ärevuse ja depressiivsete seisundite tekkimises emastel hiirtel. Seoses oluliselt vähenenud ärevusega on bensodiasepiini ago- nisti diasepaami anksiolüütiline toime nõrgem nendel katseloomadel võrreldes “metsikut” tüüpi liigikaaslastega. Lisaks käitumuslikele nihetele leiti nimetatud katseloomade väikeajus bensodiasepiini sidumiskohtade suurenemine võrreldes “metsikut” tüüpi liigikaaslastega.

Läbiviidud katsed lubavad oletada põhilise pidurdusmediaatori GAVH-i funktsiooni tugevnemist CCK₂ retseptorite geneetilise väljalülitamise tagajärjel. Teostatud uuringud osutavad sellele, et CCK₂ retseptorite väljalülitamine põh- justab erinevaid muutusi isaste ja emaste hiirte käitumises. Isasloomadel on märkimisväärsed muutused mehaanilises ja valutundlikkuses ning liikumisak- tiivsuses, emasloomadel on esiplaanil nihked ärevuse vähenemise suunas. Sellepärast sobibki nimetatud geneetiliselt modifitseeritud hiir valutundlikkuse ja ärevuse molekulaarsete mehhanismide uurimiseks. Uurimisgrupi edusam- mude hulka tuleb lugeda ka hiire loomist, kelle ajus toodetakse võrreldes liigi- kaaslastega tunduvalt enam neuropeptiidi CCK ja esimesed uuringud lubavad väita, et nimetatud transgeenne hiir käitub vastupidiselt CCK₂ retseptori puudulikkusega hiirele.

KOKKUVÕTTEKS

Meie olulisemad alusuuringutest saadud tulemused on järgmised:

1. Kasutades liigispetsiifilisi ärevuse mudeleid rottidel oleme leidnud mit- meid uusi ärevusega seotud sihtmärke. Kaks neist (wolframiin ja LSAMP)

- on meie järgnevate uuringute objektideks, kasutades selleks nii transgeensete tehnoloogiat kui ka geneetiliste polümorfismide uurimist inimesel.
2. On õnnestunud tõestada ajus esineva NO olulist tähendust ärevuse regulatsioonis. Selektiivsed neuronaaalse NO süntetaasi inhibiitorid on meie uuringute põhjal potentsiaalsed ärevusevastased ja antidepressiivsed ravimid inimesel.
 3. Töötasime välja originaalse lähenemisviisi transgeensete katseloomade fenotüübi iseloomustamiseks. Kasutades seda metodoloogiat oleme jõudnud oluliste tulemusteni neuropeptiidi koletsüstokiniini teist tüüpi (CCK₂) retseptori puudulikkusega hiire fenotüübi kirjeldamisel. Märkimist väärrib, et see geneetiline modifikatsioon põhjustab erinevaid muutusi isastel ja emastel loomadel. Ärevusega seotud fenotüübi muutus esineb ainult emastel loomadel. CCK₂ retseptori geneetiline väljalülitamine vähendab neil oluliselt ärevust. Samuti hoiab see geneetiline modifikatsioon ära isolatsioonist tingitud ärevuse suurenemise emasloomadel, mis viitab CCK₂ retseptorite olulisele rollile ärevusseisundite puhul. Saadud tulemused tõusevad uude valgusesse, kui arvestame, et ka inimeste puhul on ärevushäired oluliselt sagedasemad naistel.

Teaduspreemia geo- ja bioteaduste alal tööde tsükli
"MITMEKOMPONENDILISTE LOODUSLIKE VETE
OPTILISED OMADUSED JA VEEALUNE VALGUSVÄLI" eest



Helgi
Arst

Sündinud 23.12.1931 Tallinnas

1950 Tallinna 7. Keskkool

1955 Tartu Ülikool, geofüüsika

1962 füüsika-matemaatikakandidaat, Tartu Ülikool, atmosfäärifüüsika

1991 geofüüsika doktor, Tartu Ülikool

1957–1973 Eesti TA Füüsika ja Astronoomia Instituut: aspirant, nooremteadur, vanemteadur. 1973–1975 Eesti TA Astrofüüsika ka Atmosfäärifüüsika Instituudi vanemteadur. 1975–1990 Eesti TA Termofüüsika ja Elektrofüüsika Instituut: vanemteadur, mereoptika sektori juhataja. 1990–1992 Eesti TA Ökoloogia ja Mereuuringute Instituudi kaugseire sektori juhataja. 1992–2002 Eesti Mereinstituudi vanemteadur. 2002–2004 TTÜ Meresüsteemide Instituudi vanemteadur. Alates 2004 märtsist TÜ Eesti Mereinstituudi vanemteadur.

Avaldanud üle 120 teadusartikli ja ühe monograafia, nelja monograafia kaasautor.

Meie koduplaneedi Maa loodus on kaunis ja mitmekesine: kirju pildina vahelduvad mäed ja orud, kõrbed ja vihmametsad, suured maismaa-alad ja väikesed saared, ookeanid, jõed ja järved. Ookeanid ja mered hõlmavad Maa pindalast 71%, seega on veekogud looduskosmoses väga oluline osa. Kolossaalset mõju Maa kliimale ja ilmastikule avaldavad ookeanid, mis on palju aastaid olnud mereteadlaste põhiliseks uurimisobjektiks, kusjuures materjali on kogutud nii bioloogia, geoloogia, füüsika, keemia kui ka ökoloogia valdkonnas. Viimastel aastakümnetel on suuri edusamme tehtud veekosmoses uurimisel optiliste meetoditega. Optiliste seadmete paigutamine satelliitidele võimaldab saada operatiivset informatsiooni globaalsetes mõõtmetes. Tänapäeval on aga jõutud tõdemiseni, et väga oluline on uurida ka sisemerete, rannavete ja järvede ökoloogilist seisundit. Need on alad, kus vete omadused muutuvad kiiresti nii ruumis kui ajas, ja antropogeenne koormus on eriti suur.

Erinevate veekogude omadused on seotud nende limnoloogilise ja/või optilise tüübiga, vees sisalduvate lisaainetega, aastaegade, veekosmoses bioloogilise aktiivsuse tsüklilise muutumisega ja inimtegevusega. Ei optiliste ega ka muude omaduste põhjal pole võimalik asetada veekogusid lineaarsele skaalale, kus ühes otsas on suure läbipaistvusega veed ja teises otsas peaaegu läbipaistmatud veed. Rääkides optilistest omadustest, on tähtis see, et vette tunginud valgus ei nõrgene sügavusega mitte ainult vee enda mõjul, vaid põhiliselt vees sisalduvate optiliselt aktiivsete ainete valgust neelava ja hajutava mõju tõttu. Harilikult võib ookeani vaadelda nn "ühekomponendilise" süsteemina, kus peale vee enda on valgust nõrgendavaks aineks fütoplankton. Sisemeretes, jõgedes, ranna- ja järvevetes on aga oluline veel kahe teise optiliselt aktiivse aine mõju, milleks on lahustunud orgaanilise aine "värvuskomponent", nn kollane aine, ja hõljum (tahked mineraalsed või surnud orgaanilised osakesed). Seega on antud juhul tegu mitmekomponendilise optilise süsteemiga. Inimtegevuse mõjul võib lisanduda ka muid optiliselt aktiivseid komponente, näiteks naftareostus, kus veepinnal lebab naftakile ja naftaemulsioon vees võivad oluliselt mõjutada veekogu optilisi omadusi.

Mida ütleb sõnauhend "vee optiline kvaliteet"? Siin ei pruugi olla üks-ühest vastavust joogivee kvaliteedile või vee kõlblikkusele suplemiseks. Kui joogiveele lisada mingit mürkainet, mis pole aga optiliselt aktiivne, siis vee OPTILINE kvaliteet ei muutu, kuigi vesi ei ole enam joomiseks kõlblik. Teiselt poolt, pruuniveeliste rabajärvede läbipaistvus (seega ka optiline kvaliteet) on madal, kuid ometi ei kujuta see vesi suplejatele mingit ohtu. Kui aga vee optilise kvaliteedi muutus on põhjustatud veekogu eutrofeerumise suurenemisest, heitvete merrelaskmisest või naftareostusest, siis võib see olla hoiatussignaal, mis kas fikseerib/prognoosib vetikavohangut või vee saastumist inimtegevuse mõjul.

Optiliste uuringute tegemiseks peab alati olema mingi kiirgusallikas, sest muidu pole võimalik uurimisobjekti vastavaid omadusi (kiirguse peegeldumine, neeldumine, hajumine) tuvastada. Tänapäeval on veekogude optiliste omaduste uurimisel kasutusel kaks põhimeetodit – "aktiivne" ja "passiivne". Aktiivse meetodi puhul kasutatakse tehiskiirgusallikat (näiteks lasersüsteemi), passiivse meetodi puhul on kiirgusallikaks Päike (sinna rubriiki kuulub ka käesolev uurimus).

Looduslikes vetes neeldunud päikesekiirguse arvel muutub vee temperatuur, vesi "salvestab" neelatud energiat, mida siis sügisel järk-järgult atmosfääri tagasi annab (see on üheks faktoriks merelise kliima kujunemisel). Lõbusaks näiteks on siin juhtum, kus päikesepaistelisel päeval kuumal rannaliival mängiv laps küsib isalt/emalt: "Miks on liiv nii kuum, aga veepind palju jahedam, neile paistab ju samasugune päike?" Sellele küsimusele peaks oskama vastata iga lapsevanem, olgu ta siis füüsik või keeleteadlane. Mainin veel ühe huvitava (kuigi küllalt ebareaalne) nähtuse: oletame, et on tekkinud hiiglaslik naftareostus ja laiadel aladel lebab veepinnal paks naftakile, mis neelab tugevalt päikesevalgust. Selline olukord põhjustaks hiiglaslikud muutused nii mere kiirguskui ka temperatuurirežiimis.

Praktiliselt kõik veealused organismid vajavad oma elutegevuseks päikesevalgust (tuntuim on fütoplanktoni rakkudes toimuv fotosüntees, mille tulemusena tekkiv primaarproduktioon on veekogude "toitumisahela" esimene lüli). Põhjataimestik (mida loetakse veekogude ökoloogilise seisundi indikaatoriks) ei saa areneda ega säilida, kui ta ei saa vajalikku valgushulka. Sügavus, milles on säilinud veel 1% veepinnale langevast kiirgusest on vee ökoloogilise seisundi üks näitajatest. Nagu juba öeldud, näitab vee optilise kvaliteedi halvenemine tihti ka veekogu ökoloogilise seisundi halvenemist (sh vetikavohangud).

Veealune valgusväli võib muutuda ka seoses tuulte ja hoovustega. Siin on tegu peamiselt vees olevate optiliselt aktiivsete ainete edasikandumisega ühelt alalt teisele, samuti veemassi segunemisega. Sadamaehituste kaevetöödel ja kaadamisel ülespaiskunud põhjasetted (hõljum) võivad tuulte ja hoovuste mõjul kanduda kaevetööst kaugemale, kusjuures nende kontsentratsioon võib mõnda aega olla vertikaalselt ebahütlane, kuid siis vee segunemisel ühtlustuda. Loomulikult halvendab selline hõljumi lisandumine vee läbipaistvust, kusjuures erilise tähelepanu all peaks olema kaldaligidases madalas vees kasvava põhjataimestiku valgustustingimuste muutumine.

Premeeritud töödetsükli olid järgmised PÕHIEESMÄRGID:

- Koguda andmebaas Läänemere regiooni idaosale tüüpiliste järve- ja rannavete omaduste (optiliste karakteristikute ja optiliselt aktiivsete ainete kontsentratsioonide) kohta. Saadud tulemuste põhjal analüüsida karakteristikute varieerumist järvelt järvele ja sesoonset muutlikkust. Määrata korrelatiivsed seosed eri parameetrite vahel. Hinnata erinevate veekogude vee optilist kvaliteeti.
- Välja arendada ning verifitseerida veealuse kiiritustiheduse poolempiiiriline mudel, mis võimaldaks lihtsalt teostatavate mõõtmiste alusel piisava täpsusega iseloomustada veealuse kiirgusvälja ajalis-ruumilist muutlikkust. Mudel peab võimaldama arvutada ka primaarproduktiooni hindamiseks vajalikke kvantkiirguse kiiritustiheduse väärtusi.
- Analüüsida optilise kaugseire rakendusvõimalusi ja vastava pöördülesande lahendamise meetoodikat mitmekomponendiliste vete jaoks nii jäävabal kui ka talveperioodil.
- Töötada välja mudelid veepinnal asuva õhukese naftakile optiliste omaduste arvutamiseks nii sileda kui ka lainetava pinna puhul eesmärgiga hinnata optilise kaugseire mõõtmistulemuste muutumist naftareostuse mõjul. Hinnata naftakile mõju merepinna temperatuurirežiimile.

OPTILISED KARAKTERISTIKUD JA OPTILISELT AKTIIVSED AINED

Loetleme nüüd oma andmebaasi peamisi karakteristikud, milledest igapäev (ja kõik koos) võimaldab iseloomustada uuritavaid veekogusid. Fütoplanktoni ja hõljumi kontsentratsioonid määrati veeproovide põhjal laboratooriumis, kollase aine hulka iseloomustati tema valgustneelava toime kaudu, mõõtes filtreeritud veeproovidest suunatud kiirguse nõrgenemiskoeffitsiendi spektreid. Need spektrid mõõdeti ka filtreerimata veeproovidest, tulemused iseloomustavad kõikide optiliselt aktiivsete ainete koosmõju valguse nõrgenemisel vees. Mõlemal juhul tehti spektraalsed mõõtmised intervalli 400–700 nm jaoks, mis kujutab endast fotosünteesilist aktiivset spektripiirkonda, milles olevad valguskvandid tarbitakse fotosünteesiks (rahvusvaheline tähistus on PAR, *photosynthetically active region*). Kollase aine karakteristikuks valiti välja valguse nõrgenemiskoeffitsiendi väärtus filtreeritud vees lainepikkusel 380 nm. Filtreerimata vee jaoks arvutati integraalne karakteristik, keskmistades PAR piirkonnas mõõdetud nõrgenemiskoeffitsientide spektrid. Üheks oluliseks optiliseks karakteristikuks meie andmebaasis oli veel traditsiooniline *Secchi ketta* näit, mille abil iseloomustatakse vee relatiivset läbipaistvust (mõõtmistulemuseks on siin sügavus, kus inimsilm ei eralda enam vettelastud valge ketta kontuure). Lisaks mõõdeti hulgaliselt veeluse kvantkiirguse (PAR piirkonnas) vertikaalseid profiile, neid tulemusi ei kasutatud aga andmebaasi statistilisel analüüsil, vaid veelust valgusvälja ja optilist kaugseiret käsitlevates osades.

Andmebaasi kogumist alustati juba 1992. a, viimased andmed saadi 2002. a, mil viidi läbi ka tervikanalüüs [Arst jt, 1996; 1999; Erm jt, 2001; 2002; Sipelgas jt, 2003; Arst, 2003]. Lõppkokkuvõttes koosnes analüüsitava andmebaasi 885 üksiktulemusest iga karakteristikuga jaoks (573 väärtust saadi pinnakihi tehtud mõõtmistest, ülejäänud sügavamatest kihtidest). Erandiks oli *Secchi ketta* näit, mille jaoks oli 428 tulemust (mõnel juhul polnud *Secchi* mõõtmisi võimalik teha, kuid põhiline osa teiste karakteristikute lisatulemustest saadi sügavusprofiilide baasil). Uurimisobjektideks olid 23 Eesti ja 7 Soome järve (750 seeriat), merealadest Liivi ja Pärnu lahed (135 seeriat). Kõik need mõõtmised viidi läbi jäävabal perioodil. Järveuuringud toimusid küllalt suures osas koostöös Helsinki Ülikooliga, mõõtes erinevaid karakteristikuid osalt Eesti, osalt Soome teadlastele kuuluva aparatuuriga. Nii mõõdeti veel veeluse päikesekiirguse spektraalset koosseisu ja vete esmaseid optilisi parameetreid.

Kui vaadelda kogu andmebaasi ühe tervikuna, siis uuritavate karakteristikute väärtused varieerusid väga laiades piirides. Fütoplanktonit iseloomustav klorofüll *a* minimaalne kontsentratsioon oli 1800 korda väiksem kui maksimaalne, heljumi oma 100 korda väiksem, kollast ainet iseloomustava valguse nõrgenemiskoeffitsiendi ääreväärtused erinesid 140 korda ja PAR piirkonna jaoks keskmistatud suunatud kiirguse nõrgenemiskoeffitsiendi omad 270 korda. *Secchi ketta* näit oli piires 0,1–7 m, erandiks Äntu Sinijärv, kus ta oli umbkaudu vahemikus 13–15 m (kuna põhi paistis läbi, saadi tulemus kaudsete meetoditega). Need läbipaistvuse väärtused on väga madalad võrreldes ookeaniveega, kus võib kohata isegi arve üle 50 m. Läänemere avaosa vete läbipaistvus on 5–8 korda väiksem kui keskmiselt avaookeani vetel ja umbes 2 korda väiksem, kui Taani väinade põhjaosas (viimane on lähedane Äntu Sinijärve omale), Ülemiste järve läbipaistvus on suveperioodil 15 korda väiksem kui Äntu Sinijärvel, Nohipalu Mustjärve vee läbipaistvus on omakorda umbes 2 korda väiksem Ülemiste omast. Uuritud 30 järvest oli 8, kus *Secchi ketta* näit jäävabal perioo-

dil polnud kordagi suurem kui 2 m (Linajärv, Ülemiste, Võrtsjärv, N. Mustjärv ja Harku Eestis ning Lohjanjärvi, Valkeakotinen ja Tuusulanjärvi Soomes). Suhteliselt selgeveelistest järvedest võiks peale Äntu Sinijärve nimetada veel Paukjärve ja Koorküla Valgjärve Eestis ja Päijännet ja Puujärvit Soomes, kus enamikel juhtudel olid Secchi ketta näidud 5 m ümbruses. Nohipalu Valgjärv (20 ekspeditsiooni aastatel 1992–2001) on aastate jooksul kaugenenud oma varasemast oligotroofse järve seisundist ja veeõitsengu perioodidel ei ületa Secchi ketta väärtused seal 3 m.

Vaadeldes ülaltoodud karakteristikute muutlikkuse struktuuri, tuleb eristada muutusi “järvelt järvele” ja sesoonseid ning ruumilisi muutusi mingil üksikul järvel. Suured kontrastid on üksikute järvede vahel, näiteks oligotroofsel Päijännel (Soome) on valguse nõrgenemiskoeffitsient $0,8\text{--}2\text{ m}^{-1}$ piires, hüpertroofsel Harku järvel aga $8\text{--}55\text{ m}^{-1}$. Kuna nõrgenemiskoeffitsiendi väärtus kujuneb mitme optiliselt aktiivse aine koosmõjul, siis on huvitav otsida, milline aine on domineeriv ja millises spektriosas on see mõju maksimaalne. Ka siin on märgatavad erinevused, näiteks Lammi Pääjärvil (Soome) ja Nohipalu Mustjärvel on märgata ülitugevat kollase aine mõju (osakaal valguse summaarse neeldumiskoeffitsiendi väärtuse formeerumisel $85\text{--}95\%$). Puhtaveelisel Päijännel on kollast ainet iseloomustava nõrgenemiskoeffitsiendi mediaan küll ainult 4 m^{-1} , mis on väike võrreldes Pääjärvi (12 m^{-1}) ja N. Mustjärve (65 m^{-1}) omaga, kuid kollase aine osakaal summaarses neeldumiskoeffitsiendis on siin siiski tervelt 70% . Teiselt poolt on eutroofsetel ja hüpertroofsetel järvedel (Ülemiste, Võrtsjärv, Tuusulanjärvi (Soome), Harku) domineerivad fütoplankton ja hõljum (väga tihti ilmneb nende koosmõju, kuna hõljum formeerub küllalt suurel määral surnud fütoplanktoni rakkudest).

Viie aasta jooksul jälgiti optiliselt aktiivsete ainete ja optiliste karakteristikute sesoonset käiku neljal Eesti järvel (Paukjärv, Maardu, Ülemiste ja Harku). Vaadeldud erinevused vastasid enam-vähem järve tüübile. Oligotroofses Paukjärves väljendus sesoonne käik nõrgalt ja süsteemilt. Maardu järv, mis paarikümmend aastat tagasi liigitati eutroofsete hulka Secchi ketta näiduga alla 2 m, on tänapäeval muutunud oluliselt selgeveelisemaks (paiguti oli isegi raskusi mõõta Secchi ketta näitu, kuna $3,5\text{ m}$ sügavune põhi paistis läbi). Huvitav on fakt, et Maardul toimub intensiivne veeõitseng, kuid peamiselt kevadel (aprilli lõpp–mai esimene pool) ja hilissuvine õitseng on vaid vaevumärgatav. Seevastu on hilissuvine veeõitseng vägagi intensiivne Ülemistel ja Harkul (eriti võimas oli vetikavohang Harkul 1999. a juulist hilissügiseni, kus klorofüll a väärtused õitsengu tippajal ületasid 500 mg m^{-3} ja Secchi ketta näit oli $0,1\text{ m}$). Klorofüll a väärtuste suurenemist oktoobris–novembris oli mitmel aastal märgata kõigil Tallinna lähedal asuval kolmel järvel. Seevastu kollane aine käitus “ebahuvitavalt”, olles kevadest sügiseni vähe muutuv, vaid Harkus täheldati tema olulist vähenemist maist novembrini. Vee omaduste horisontaalset muutlikkust uuriti põhjalikult ainult Ülemiste järve jaoks (korduvad mõõtmised viies mõõtejaamas), kuid varieeruvus oli väga väike. Kahjuks polnud meie uurimisobjektiks Peipsi järv, kus (arvestades järve suurust) tõenäoliselt esineb vee omaduste märgatav horisontaalne muutlikkus. Kokku võttes võib öelda, et Eesti ja Soome järvede optiline/bioloogiline mitmekesisus on suur, kusjuures leidub vägagi ekstreemaalsete omadustega järvi – näiteks suvel rohelist värvi ülisuure primaarproduktiooniga Harku ja tumepruuni veega Nohipalu Mustjärv.

Liivi ja Pärnu lahe kohta on andmebaasis mõõtmistulemused, mis saadud aastatel 1992–1993 ja 2000–2001. Paarkümmend aastat tagasi oli osa Pärnu lahe kaldalähedasest territooriumist saastatud linna reoveest, mille tagajärjel oli seal halb ka vee optiline kvaliteet. Teine Pärnu lahe vee läbipaistvuse vähendaja oli (ja on senini) Pärnu jõe poolt lahte kantav suur kollase aine hulk, mis on aga pigem looduslik, mitte antropogeenne tegur. Hilisemad mõõtmised näitasid, et praegu on Pärnu lahe antropogeenne saastatus väga oluliselt vähenenud. Oleme teinud mõõtmisi/vaatlusi ka Eesti lääneranniku kilomeetraliuses veeribas (praeguse Varbla valla piirkonnas). Kolhoosikorra lõpuaastail tekkis lootusetu tunne, et kraavide kaudu suurel hulgal merre voolav kunstväetis rikub lõplikult vee ökoloogilise tasakaalu – rannajoone vahetus läheduses oli madalas vees katkematu laia ribana rohekaspruun mädanevate vetikate mass. Bio-optilised mõõtmised näitasid, et nii fütoplanktoni ja hõljumi hulk kui ka valguse nõrgenemiskoeffitsient kaldavees ja umbes kilomeeter kaldast eemal erinesid kümneid kordi. Loodus on aga täis elujõudu – umbes 5–6 aastat pärast väetisesaaste lõppemist hakkas järk-järgult taastuma madala rannavee normaalne looduslik seisund, kus vaid kividel olid üksikud vetikate puhmad, edelatuultega tuli randa aga adru, mis vahepeal täiesti kadunud oli.

Korrelatsioonianalüüsi esimese sammuna uuriti korrelatsiooni Secchi ketta näidu ja PAR piirkonna jaoks keskmistatud valguse nõrgenemiskoeffitsiendi vahel. Mõlemad karakteristikud iseloomustavad vee optilist kvaliteeti ja nende väärtused formeeruvad vees sisalduvate optiliselt aktiivsete ainete mõjul. Nii ühe kui teise kasutamisel vee seisundi indikaatorina on omad positiivsed ja negatiivsed küljed. Secchi ketas on väga kaua olnud põhiline vee läbipaistvuse näitaja, enamik mereuuringuid sisaldab oma andmebaasis tema väärtusi, mis võimaldab võrrelda erinevate autorite tulemusi ja hinnata trende. Teiselt poolt sõltub Secchi ketta näit inimsilma omadustest ja pealelangeva kiirguse nurkjaotusest, samuti pole võimalik teha mõõtmisi tugeva lainetuse ajal ja öösel. Valguse nõrgenemiskoeffitsiendi määramiseks on vaja võtta vaid veeproove (mida saab teha ka hämaruses), kusjuures saame erinevatelt sügavustelt võetud veeproovide abil määrata ka vee optilise kvaliteedi vertikaalset profiili. Leiti, et nende kahe karakteristikuga omavahelist seost kirjeldab hästi astmefunktsioon, kusjuures korrelatsioonikoeffitsient $R = 0,95$ ($N = 428$). Saadud korrelatsioonigraafik näitab ilmekalt, et kumbki karakteristik sobib mõõtmiseks erineva läbipaistvusega vetes. Kui Secchi ketta näit on alla 1 m, siis isegi tugev optiliselt aktiivsete ainete hulga suurenemine mõjutab vähe Secchi ketta näitu (jäädes isegi mõõtmisvigade piiridesse), kuid kajastub hästi valguse nõrgenemises. Näiteks kui Secchi muutub 1 kuni 0,2 m, siis valguse nõrgenemiskoeffitsient kasvab vastavalt 7–35 m^{-1} . Teiselt poolt, kuna valguse nõrgenemiskoeffitsiendi mõõdetakse võrreldes looduslikku vett destilleeritud veega, esinevad siin selgete vete puhul suured relatiivsed vead. Järeldus on, et Secchi näidu puhul alla 1 meetri peaks vee omadusi kirjeldama valguse nõrgenemiskoeffitsiendi abil, kui aga Secchi näit on üle 5 m, siis on just tema eelistatavam karakteristik.

Kogu andmebaasi alusel saadud regressioonvõrrandite korrelatsioonikoeffitsiendid olid 0,82–0,93 piires, kui klorofüll *a* või hõljum olid korreleeritud kas Secchi ketta näidu või valguse nõrgenemiskoeffitsiendiga. Ka klorofüll *a* ja hõljumi omavaheline korrelatsioonikoeffitsient oli kõrge, $R = 0,81$. Seevastu kollase aine puhul on vastavad korrelatsioonikoeffitsiendid palju väiksemad, 0,44–0,56. Muidugi formeeruvad nii Secchi ketta näidu kui ka valguse nõrgenemiskoeffit-

siendi väärtused kõigi kolme optiliselt aktiivse aine koosmõjul, seega ei saa oodata väga kõrgeid R väärtusi iga aine jaoks eraldi. Seetõttu määrati ka mitmene regressioonvõrrand valguse nõrgenemiskoeffitsiendi ja kõigi kolme optiliselt aktiivse aine vahel. Sel juhul saadi $R = 0,96$. Lisaks määrati veel regressioonvõrrandid valguse nõrgenemiskoeffitsiendi ja kolme optiliselt aktiivse aine vahel kuue järve jaoks, vaadeldes igat järve eraldi. Need järved olid Harku, Lohjanjärvi, Maardu, Paukjärv, Lammi Pääjärvi ja Ülemiste (mõõtepunkte vastavalt 21, 14, 25, 21, 26 ja 65). Tulemused olid huvipakkuvad: enamikel juhtudel olid regressioonvõrrandid küllaltki palju erinevad nendest, mis saadi kogu andmebaasi põhjal. Kui hõljumi jaoks andsid kõik kuus järve positiivse R väärtuse, siis klorofüll a puhul oli Lammi Pääjärvis ja Pääjännel R negatiivne. Kollase aine jaoks oli R negatiivne Harku järvel. Eelnevast koorub välja oluline järeldus, et üldistatud regressioonvõrrandeid ei saa tuletada mingi ühe üksiku veekogu isegi pikaajalisel jälgimisel, vaid baasiks peab olema paljude eri tüüpi veekogude jaoks saadud andmestik.

VEEALUNE KIIRGUSREŽIIM

[Arst jt, 1997; 1999; 2000; 2002; Reinart jt, 2000; 2001; 2003; Leppäranta jt, 2003; Arst, 2003].

Veealune valgusväli iseloomustab elukeskkonda veekogudes, tema kvantitatiivsed väärtused ja spektraalne koostis eri sügavustes on selle keskkonna omaduste indikaatoriteks. Sagedamini kasutatakse/mõõdetakse karakteristik on veealuse valguse kiiritustihedus (spektraalse kiirguse ühikuks $W m^{-2} nm^{-1}$). Merebioloogias on aga vajalikud nn skalaarse kvantkiirguse kiiritustiheduse andmed, mille alusel on võimalik määrata fütoplanktoni rakule igast suunast langeva kiirguse koguhulka ja selle neelamist raku poolt. Integraalset PAR piirkonna kvantkiirgust on võimalik arvutada, kui on teada energeetilise kiiritustiheduse spektraalne jaotus. Teiseks üldkasutatavaks karakteristikuks on valguse difuusne nõrgenemiskoeffitsient, mis (erinevalt ülalpool vaadeldud suunatud valguskiire nõrgenemiskoeffitsiendist) näitab valguse nõrgenemist, kui veepinnale langeb korraga nii Päikese otse- kui ka hajuskiirgus. Difuusset nõrgenemiskoeffitsienti saab määrata, kui on teada kiiritustiheduse spektraalsed väärtused eri sügavustes. Teiselt poolt, kui on teada spektraalne nõrgenemiskoeffitsient ja pealangeva kiirguse spekter, siis saab arvutada veealuse kiiritustiheduse spektraalseid väärtusi.

Veealuse päikesekiirguse monitoring on kallis ning tehniliselt komplitseeritud, mistõttu eksisteerib akuutne vajadus veealuse kiirgusvälja kvaasioperatiivsete mudelite järele. Premeerimiseks esitatud tööde tsükliks on välja arendatud ning verifitseeritud veealuse kiiritustiheduse poolempiiriline mudel, mille algandmeteks on aluspinnale langeva päikesekiirguse registreerimistulemused ja episoodiliselt võetud veeproovidest määratud valguse nõrgenemiskoeffitsiendi spektrid. Mudel võimaldab lihtsalt teostatavate mõõtmiste alusel piisava täpsusega iseloomustada veealuse valgusvälja ajalis-ruumilist muutlikkust, sh arvutada primaarproduktsiooni hindamiseks vajalikke kvantkiirguse kiiritustiheduse väärtusi.

Eesmärgiks oli leida võimalus määrata veealuse kiiritustiheduse tunnisummade, päevasummade ja kuusummade ligikaudsed väärtused eri sügavustes pikema ajavahemiku (näiteks kogu suve) jooksul. See lubab hinnata veealuste organismide "varustatust" päikeseenergiaga lühemateks või pikemateks perioodideks. Eelduseks oli, et mis tahes veekogu optiliste karakteristikute muutumi-

ne on suhteliselt aeglane, nii et nende ajalise käigu kirjeldamiseks piisab veeproovide võtmisest keskmiselt iga 10 päeva tagant. Teiselt poolt on veealune kiiritustihedus tugevalt sõltuv veepinnale langeva päikeseenergia ajalisest käigust, mis on kiirelt muutuv (päikese kõrguse muutumine päeva jooksul, vahelduv pilvisus), ja seepärast on vaja seda päev-päevalt pidevalt registreerida. Veeproovide võtmise ajaline intervall võib põhjustada, et jääb arvestamata (või arvestatakse ülearu) mõni lühiajaline veekogu bioloogilise aktiivsuse elavne mine, kuid saadud viga kuusummades ei tohiks olla suur. Võttes arvesse, et hindame päeva- ja kuusummasid, pole oluline, et pealelangeva kiirguse mõõte seade asuks uuritava veekogu kohal, piisab, kui ta on kaldal, kusjuures kaugus veepiirist võib olla isegi kilomeetrites (vahelduva pilvisuse puhul saame eba kõla hetkväärtustes, kuid päevasumma peaks tulema tõepärane).

Mudeli verifitseerimiseks kasutati firma LI-COR veealust spektroradiomeetrit LI-1800 UW, millega mõõdeti veealuse kiiritustiheduse spektraalseid väärtusi ja arvutati siis vastavad difuussed nõrgenemiskoefitsiendid. Võrreldes neid tulemusi samade järvede jaoks mudeli põhjal arvutatud väärtustega saadi korrelatsioonikoefitsient 0,96 (andmed olid 7 Eesti ja 7 Soome järve kohta, kokku 70 spektrit). Mudeli abil saadud difuusete nõrgenemiskoefitsientide põhjal oli võimalik siis arvutada veealuse kiiritustiheduse spektraalseid ja integraalseid väärtusi.

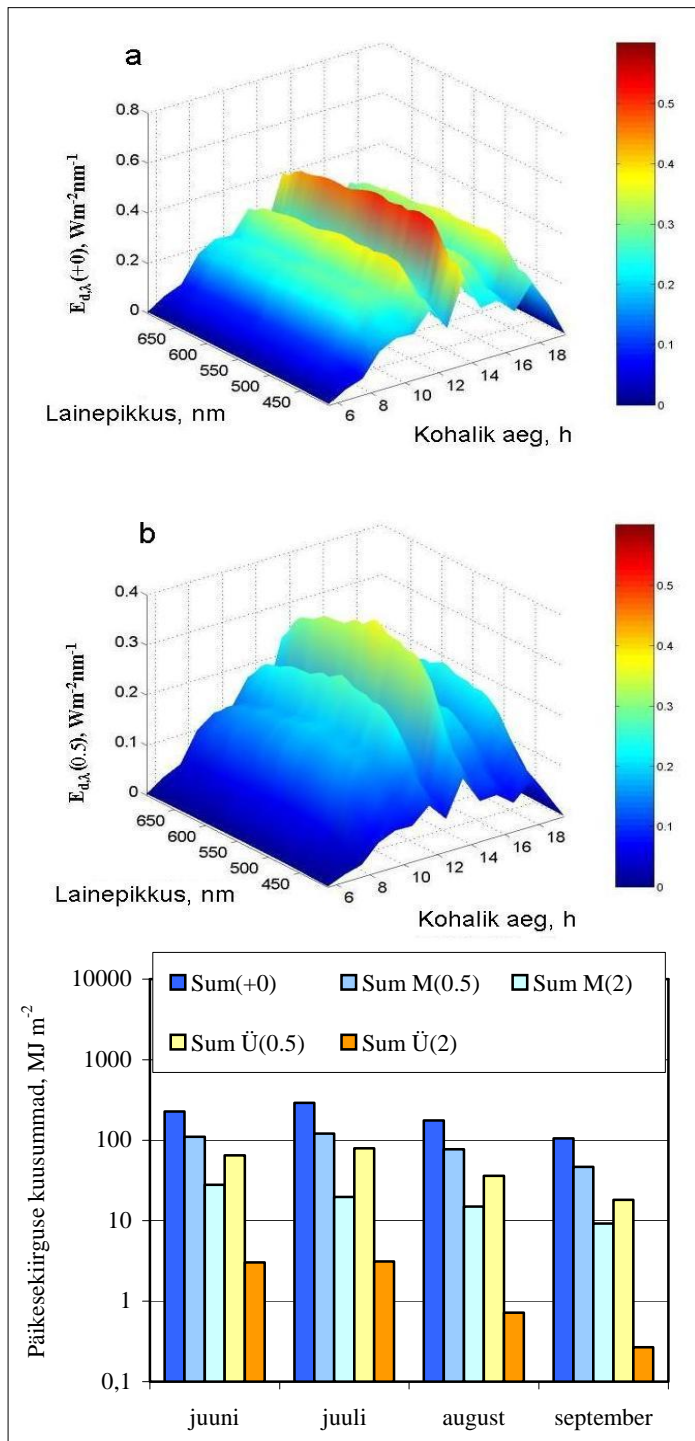
Joonisel 1 (a, b) on toodud näide mudelarvutuste vahetulemuste kohta, (n-ö hinnangute "algrakuke", üks päev). Näha on Muuga lahele langeva kiirguse kiiritustiheduse sõltuvus valguse lainepikkusest ja kellaajast, joonise teises osas on samad karakteristikud 0,5 m sügavusel vees. Joonisel 2 on näide mudeli abil arvutatud päikeseenergia kuusummade kohta Maardu ja Ülemiste järvel eri sügavustes. Võib loota, et selle mudeli abil saadud andmed võivad olla tõhusaks panuseks veealuse kiirguskliima uuringutel.

Koostöös Soome kolleegidega uuriti ka veekogude jääkatte füüsikalisi ja optilisi omadusi ning jääaluse kiiritustiheduse vertikaalseid profiile. Näidati, et põhilise kiirguse neelajaks on jää peal asuv lumikate. Võrreldes jääkatte valgustneelavaid omadusi Santala lahes (Soome) ja Eesti järvedes, leiti, et soolast veest moodustunud jää on palju tugevam neelaja (sellises jääs on vertikaalsed kanalid, kus areneb fütoplankton, mis ongi suurenenud neeldumise põhjustaja). Määrati ka pinna albeedo väärtused, alates värskest sadanud lumest kuni sulava jääni, äärmised tulemused erinesid teineteisest 4,5 korda.

OPTILINE KAUGSEIRE

[Arst jt, 1990; Kutser jt, 1995; 1998; 2001; Erm jt, 2001; Arst, 2003]
Nagu teada, võimaldavad optilised mõõtmised satelliitidelt saada operatiivset ja regulaarset infot suurte territooriumite kohta. Käesolevas töödetsükliis pöörati erilist tähelepanu optilise kaugseire informatiivsusele ja rakendusvõimlustele mitmekomponendiliste vete jaoks, kasutades nii veesõidukitelt ja lennuvahenditelt kui ka satelliitandmete töötlusel saadud tulemusi. Veekogude optiline kaugseire osutub võimalikuks tänu sellele, et veest tagasihajunud kiirguse spektraalne koostis erineb märgatavalt pealelangeva kiirguse omast. Põhjuseks on, et erinevad optiliselt aktiivsed ained omavad neeldumismaksimume spektri erinevates osades (näiteks kollane aine neelab valgust väga tugevalt violetses ja sinises spektriosas, klorofüll *a* omab kaks põhilist neeldumismaksimumi, üks sinises ja teine punases spektriosas, sinivetikal on oma neeldumismaksimum

Joonis 1.
Allasuunduva päikesekiirguse kiir-
tustiheduse ($E_{d,\lambda}$)
spektraalne ja ajaline
muutlikkus Muuga
lahes 13.08.2001.
a) Veepinnale langev
kiirgus (vertikaalne
koordinaat $z = +0$),
b) sügavusel $z = 0,5$ m.



Joonis 2.
Päikeseenergia kuu-
summad, hinnatud
poolempiirilise mu-
deli abil 2001. a
juunist septembrini
Maardu (M) ja Üle-
miste (Ü) järvel.
Tähis +0 vastab pea-
langelvale kiirgu-
sele, lisaks on tule-
mused veel sügavus-
te 0,5 ja 2 m kohta.

jne). Nii püütaksegi lahendada nn “optilise kaugseire pöördülesanne”, proovides ülesuunduva valguse kirkuse spektraalsete väärtuste põhjal identifitseerida vees sisalduvaid optiliselt aktiivseid aineid ja hinnata nende kontsentratsioone. See ülesanne on eriti keerukas mitmekomponendilistes vetes, kus mingi ühe aine valgustneelav toime võib “varjutada” teise aine oma. Optilise kaugseire tulemusi võib interpreteerida nii kvantitatiivse kui ka kvalitatiivse analüüsi abil. Esimese baasiks on mõõdetud kirkuse spektraalväärtused koos vajalike paranditega, teisel juhul tehakse hinnangud spektrite kuju (spektraalväärtuste relatiivse erinevuse) põhjal. Eelkõige on aga mõõdetud väärtused vaja normeerida: kuna pealelangeva kiirguse väärtuste suurenemine kutsub esile ka veest tagasihajunud kiirguse suurenemise, siis mõõdetud kirkuse väärtused jagatakse pealelangeva kiirguse kiiritustihedusega. Tulemuseks on karakteristik, mida nimetatakse mere heleduskoeffitsiendiks. Selline lihtne lähenemine on võimalik vaid laeva pardalt või helikopterilt tehtava kaugseire puhul. Kahjuks kirjeldatud normeerimine ei väldi vigu, mis tekivad lauspilvisuse mõjul. Meie hinnangutel (laevamõõtmised Läänemeres) on täispilves ilmaga heleduskoeffitsiendi väärtused 1,8–3,5 korda suuremad kui selge ilma korral. Satelliitmõõtmiste töötusel kasutatakse erilisel keerukaid matemaatilisi protseduure, mis kvantitatiivse meetodi puhul võtavad arvesse ka selle, et veepinnalt ülesuunduv kiirgus nõrgeneb atmosfääris ja satelliitvastuvõtjasse satub lisaks veel atmosfäärist endast tagasihajunud päikesekiirgus. Seda protseduuri nimetatakse “atmosfääri korrigeerimiseks”. Kahjuks selgus, et ookeanide jaoks väljatöötatud (põhiliselt USAs) atmosfääri korrigeerimise algoritmid ei sobi kasutamiseks mitmekomponendilistes vetes (eeldused ei kehti nende vete puhul).

Veepinnalt ülesuunduv päikesekiirgus sisaldab endas kaht põhikomponenti: a) veemassist tagasihajunud kiirgus, b) lainetavalt veepinnalt peegeldunud kiirgus. Kui eesmärgiks on uurida veemassi omadusi, siis teine komponent on segav ja ta tuleks elimineerida. Lihtsaim eeldus on, et näiteks nadiiri suunas teostatud mõõtmiste puhul on “peegeldunud” komponent võrdne 2%ga seniidisuunast pealelangenu kirkusest. See on aga tõepärane oletus vaid nõrga tuule või väga madala päikese puhul. Meie hinnangud näitasid, et päikese kõrguse 50° puhul tuule kiirus 6 m s⁻¹ suurendab peegeldunud komponenti 2–3 korda (sõltuvalt valguse lainepikkusest) ja see suurenemine jätkub kuni tuule kiiruseni 12–15 m s⁻¹. Üldjuhul on peegeldunud komponendi väärtus mitte ainult tuule kiirusest ja päikese kõrgusest, vaid ka tuule suunast ning nurgast mõõtmis-suuna ja päikese ketta suuna vahel.

Oluline optilise kaugseire karakteristik on nn “nõrgenemissügavus”, mis näitab veekihi paksust, millest pärineb 90% kaugseire sensori poolt vastuvõetavast signaalist. Selle sügavuse ja tema spektraalse muutlikkuse määramine erinevate veekogude jaoks aitab valida sobivat kaugseire sensori mõõtekanalit. Nõrgenemissügavust on võimalik ligikaudselt hinnata valguse difuusse nõrgenemiskoeffitsiendi spektrite alusel. Puhtas ookeanivees on nõrgenemissügavuse maksimaalne väärtus umbes 50 m. Rannavetes ja vaadeldud järvedes on see meie hinnangul enamasti 2–5 m, väga väikese läbipaistvusega vetes vaid 0,3–0,5 m. Vee läbipaistvuse vähenemisega nihkuvad nõrgenemissügavuse maksimaalsed väärtused suuremate lainepikkuste poole.

Võrreldes optilise kaugseire erinevate interpretatsioonimeetodite efektiivsust mitmekomponendiliste vete korral, osutus ootamatult informatiivseks mõõdetud spektrite (või nende põhjal arvutatud mingi kahe spektraalväärtuse suhte)

kvalitatiivne analüüs. Igal veetüübil on talle iseloomulik heleduskoefitsiendi spekter, puhta ookeanivee korral väheneb heleduskoefitsient sujuvalt suuremate lainepikkuste suunas, kollane aine vähendab kardinaalselt heleduskoefitsiendi väärtusi violetses ja sinises spektriosas, tekitades maksimumi piirkonnas 560–610 nm. Fütoplanktoni (sh sinivetikate) olulist hulka näitavad heleduskoefitsiendi spektrimiinimumid 680 ja 630 nm ümbruses. Satelliit MODIS-Terra andmete töötlus (ilma igasuguse atmosfääri korrigeerimise) näitas, et jagades satelliitinfo numbrilised väärtused gruppideks (igal grupil erinevat värvi tähistus) oli võimalik ilmekalt kujutada 2002. a kevadise ja hilissuvised veeõitsengu horisontaalset jaotust Läänemeres, samuti eriliselt puhtaveelisi alasid. Sama kehtib ka Läänemere jääolude kirjeldamise kohta, kus satelliitpildi järgi on võimalik eristada jää seisundit ja tüüpe ning saada tervikpilt jääkattega ja jäävabade piirkondade jaotumisest kogu mere ulatuses.

Võiks arvata, et satelliituuringute abil on alati võimalik lahendada kõiki probleeme. See pole aga kaugelgtki nii, infot on võimatu koguda näiteks pilves ilmades puhul (Läänemere regioonis on selliseid päevi 60% aastast). Nägime, et satelliitandmete kvantitatiivseks interpreteerimiseks on vajalik antud veetüübile sobiv atmosfääri korrigeerimise algoritm ja kaugseire on võimeline infot ammutama ainult vee pinnakihi (selle paksus sõltub vee läbipaistvusest). Mõnikord erinevad selle pinnakihi omadused allpool asuvast veest (näiteks vetikavohangute perioodil). Väga oluline on ka, et ikka veel jätab soovida satelliitmõõtmiste ruumiline ja radiomeetriline lahutusvõime, mis teeb võimatuks saada adekvaatset infot väiksemõõtmeliste veealade kohta. Seega omab tähtsust ka traditsiooniliste *in situ* meetodite kasutamine ja arendamine, lisaks on paljudel juhtudel otstarbekas teostada kaugseiret helikopteri või lennuki pardalt, vältimaks pilvisuse takistavat mõju.

VEEPINNAL ASUVA NAFTAKILE MÕJU VEEKOGU KIIRGUS- JA TEMPERAATUURIREŽIIMILE

Veekogude naftareostus on olnud tõsiseks ökoloogiliseks probleemiks juba aastakümneid ja on seda ka tänapäeval. Naftareostuse mõju uurimisel peab meeles pidama, et enamasti on tegu erinevate keemiliste ja optiliste omadustega ainetega. Naftaproduktid jagunevad “kergeteks” ja “rasketeks”, samuti sõltuvad nende omadused ka leiukohast. Tihti on vette sattunud reostus mitme naftatüübi segu. Kui mingi kogus naftat satub vette, siis see hakkab horisontaalselt levima igas suunas, moodustades esialgu pinnal lebava kile (paksus võib olla algul mõned sentimeetrid, hiljem, kui juba suurel alal on veepinnal naftakile, siis mõõdetakse tema paksust mikronites). See kile võib kiiremini või aeglasemalt õheneda ja/või puruneda, viimane toimub tuule mõjul. Kile õhene-mist põhjustavad ka järgmised protsessid: 1) osa naftat “vajub” sügavamale vette, tekitades emulsiooni; 2) osa naftat (eriti “kerget” fraktsioonid) aurub; 3) toimub looduslik “isepuhastumine”, mis kujutab endast füüsikaliste, biokeemiliste ja hüdrobioloogiliste protsesside kompleksi. Naftareostus toob tihti kaasa veealuste organismide mürgitamise ja vähendab nende eluvõimelisust. Veepinnal olev naftakile takistab vee ja atmosfääri vahelist gaasidevahetust, summutab kapillaarlaineid, muudab veepinna soojusbilanssi ja takistab päikesekiirguse tungimist vette. Kui aga naftat satub vette väga suures koguses, siis terendab lausa looduskatastroof (kleepuva musta lõgaga kaetud surevad linnud, mustad klombid rannajoonel ja veeala üldine mürgitamine). Sellisel juhul näeme hulgaliselt inimesi, kes neid musti klompe rannaliival kottidesse korjavad

ja surevaid linde päästa püüavad. Ekslik on aga arvata, et silmnähtava reostuse likvideerimine ongi veeala endise seisundi taastamine. Üliõhuke naftakile või naftaemulsioon vees võivad lühemaks või pikemaks ajaks alles jääda ja teha oma loodustkahjustava töö.

Nafta valgustpeegeldavad omadused on teistsugused kui veel (nafta kui aine peegelduskoefitsient on suurem), samuti muutuvad naftakile mõjul lainetuse karakteristikud (siledamad lained). Seega on oluline ülesanne naftaproductidega reostatud lainetava veepinna valgust peegeldavate ja neelavate omaduste kindlakstegemine. Töötati välja mudelid veepinnal asuva õhukese naftakile optiliste omaduste arvutamiseks [Arst jt, 1990; Arst, 2003]. Demonstreeriti, kuidas veepinnalt ülesuunduva valguse kirkus sõltub Päikese asendist, tuuletõugimustest, mõõtmisvõrgust, valguse lainepikkusest ning naftakile paksusest ja tüübist. Sõltuvalt nendest faktoritest võib naftakilega kaetud pinna kirkus olla nii suurem kui ka väiksem puhta vee omast. Naftakile muudab kaugseire vastuvõtjasse tulevat signaali ja tulemuste interpreteerimisel on vaja teada selle muutlikkuse iseloomu. Naftakile poolt neelatud päikesekiirguse hulk sõltub valguse lainepikkusest, kusjuures kõige tugevam neeldumine on violetses ja sinises spektris. Koostati mudel päikesekiirguse neeldumiskoefitsiendi arvutamiseks eri tüüpi ja eri paksusega naftakiledes. Näiteks raske Bakuu nafta 50 mikroni paksune kile neelab kogu kiirguse piirkonnas 400–600 nm ja 90% selt kiirguse piirkonnas 600–700 nm, mistõttu juba vahetult naftakile all asuvas vees on fotosünteesiliselt aktiivne kiirgus (400–700 nm) praktiliselt kadunud. Näidati, et ka kergemat tüüpi nafta ja õhem kile võib oluliselt takistada päikesekiirguse jõudmist põhjataimestikuni. Naftakile omab mõju ka veepinna temperatuurile. Selle mõju allikateks pole üksnes naftakile poolt neelatud päikesekiirgus, vaid ka nafta veest erinev soojusjuhtivus, soojusmahtuvus ja muutused pinnalt õhku aurunud vee hulgas. Reaalsetes ilmastikutingimustes (tuule kiirus 6–8 m/s) vähendab naftareostus vee aurumist erinevate autorite hinnangul 50–60%. Meie poolt tehtud hinnangute kohaselt on naftaga kaetud veepind keskpäeval alati soojem kui puhas veepind, öösel aga (juhul kui õhutemperatuur on madalam veetemperatuurist), jahtub naftakile ülemine pind rohkem kui puhas veepind (nafta soojusjuhtivus on väiksem). Öösel on naftakile nagu tekk veepinnal ja vahetult tema all olev vesi on soojem kui oleks vaba vee puhul. Naftakile ülemise pinna ööpäevane amplituud ületab 3–6 korda vee oma ja temperatuuri maksimum ja miinimum esinevad umbes tund aega varem kui puhta vee puhul (arvutused tehtud raske nafta 50 mikroni paksusega kile jaoks).

Pärast teaduspreemia saamist on minult pidevalt küsitud: “Millist majanduslikku kasu toovad kaasa sinu mereoptilised uurimused?” Küsijad polnud ilmselt rahul, kui seletasin, et need uuringud aitavad hinnata meie ranna- ja sisevete ökoloogilist seisundit, selgitada seoseid optiliste karakteristikute, veealuse valgusvälja ja vees toimuvate bioloogiliste protsesside vahel ning aitavad kaasa optilise kaugseire mõõtmistulemuste interpretatsioonimudelite koostamisel ja verifitseerimisel. Palju rohkem edu olen saanud seletades, et optilised uuringud võivad olla olulised mitmesugustes keskkonnaekspertiisides, näiteks nendes, mis on seotud kas kaevetöödega sadamaehitustel või kiirlaevade poolt üleskergitatud põhjasetete hulga hindamisel.

Lõpuks tahaksin tänada kõiki kolleege-mereoptikuid, kellega koos ma olen need tööd teinud. Palju tänu ka rahalise uuringutoetuse eest, mida on andnud

Eesti Teadusfond (grandid Nr 252, 751, 1804 ja 3613) ning Eesti ja Soome Teaduste Akadeemiad seoses Soome-Eesti ühisprojektiga "SUVI".

KIRJANDUS

Arst, H. 2003. Optical properties and remote sensing of multicomponental water bodies, Springer, Praxis Publishing, Chichester, UK, 231 p.

Arst, H., Erm, A., Hussainov, M., Kutser, T., Mäekivi, S., Reinart, A., Herlevi, A. 1999. Investigation of Estonian and Finnish lakes by optical measurements in 1992-97. Proc. Estonian Acad. Sci., Biology, Ecology, 48/1, 5-24.

Arst, H., Erm, A., Reinart, A., Sipelgas, L., Herlevi, A. 2002. Calculating irradiance penetration into water bodies from the measured beam attenuation coefficient II: Application of improved model to different types of lakes. Nordic Hydrology, 33, 2, 207-226.

Arst, H., Herlevi, A., Lukk, T., Mäekivi, S. 1997. Calculating irradiance penetration into water bodies from the measured beam attenuation coefficient. Limnol. Oceanogr., 42, 379-385

Arst, H., Mäekivi, S., Kutser, T., Reinart, A., Blanco-Sequeiros, A., Virta, J., Nõges, P. 1996. Investigation of different types of lakes in Estonia and Finland by optical methods. Lakes and Reservoirs: Research and Management, 2, 187-198.

Arst, H., Pozdnyakov, D., Rosenstein, A. 1990. Optiline kaugseire okeanoloogias, Tallinn : Valgus, 444 lk. (vene keeles)

Arst, H., Reinart, A., Erm, A., Hussainov, M. 2000. Influence of the depth-dependence of PAR region diffuse attenuation coefficient on the computation results of the downward irradiance in different type of water bodies. Geophysica, 36(1-2), 129-139

Erm, A., Arst, H., Nõges, P., Nõges, T., Reinart, A., Sipelgas, L. 2002. Temporal variations in bio-optical properties of four North Estonian lakes in 1999-2000. Geophysica, 38, 1-2, 89-111.

Erm, A., Arst, H., Trei, T., Reinart, A., Hussainov, M. 2001. Optical and biological properties of Lake Ülemiste, a water reservoir of the city of Tallinn I: Water transparency and optically active substances in the water. Lakes and Reservoirs: Research and Management, 6, 63-74.

Kutser, T., Arst, H., Miller, T., Käärman, L., Milius, A. 1995. Telespectrometrical estimation of water transparency, chlorophyll *a* and total phosphorus concentrations on Lake Peipsi. Int. J. Remote Sensing, 16, 3069-3085.

Kutser, T., Arst, H., Mäekivi, S., Kallaste, K. 1998. Estimation of the water quality of the Baltic Sea and some lakes in Estonia and Finland by passive optical remote sensing measurements on board a vessel. Lakes and Reservoirs: Research and Management, 3, 53-66.

Kutser, T., Herlevi, A., Kallio, K., Arst, H. 2001. A hyperspectral model for interpretation of passive optical remote sensing data. Science of Total Environment: Lake water Monitoring by Means of Remote Sensing, Elsevier, 268, 47-58.

Leppäranta, M., Reinart, A., Erm, A., Arst, H., Hussainov, M., Sipelgas, L. 2003. Investigation of ice and water properties and under-ice light field in fresh and brackish water bodies. *Nordic Hydrology*, 34, 3, 245-266.

Reinart, A., Arst, H., Erm, A., Trei, T., Hussainov, M. 2001. Optical and biological properties of Lake Ülemiste, a water reservoir of the city of Tallinn II: Light climate in Lake Ülemiste. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 6, 75-84.

Reinart, A., Arst, H., Nõges, P., Nõges, T. 2000, Comparison of euphotic layer criteria in lakes. *Geophysica*, 36(1-2), 141-159.

Sipelgas, L., Arst, H., Kallio, K., Erm, A., Oja, P., Soomere, T. 2003. Optical properties of dissolved organic matter in Finnish and Estonian lakes. *Nordic Hydrology*, 34, 4, 361-386.

Teaduspreemia põllumajandusteaduste alal tööde tsükli
"METSÄÖKOSÜSTEEMI DÜNAAMIKA JA OKASPUUDE
ÖKOFÜSIOLOOGILINE SEISUND LOODUSLIKES JA
ANTROPOGEENSETES STRESSITINGIMUSTES" eest



Malle
Mandre
Kollektiivi juht

Sündinud 10.09.1938 Tartus

1957 Tartu I Keskkool
1962 Tartu Ülikool, bioloog-taimefüsioloog
1971 bioloogiakandidaat (taimefüsioloogia, taimede immunoloogia),
Eesti Põllumajandusülikool

1965–1990 Eesti TA Tallinna Botaanikaaed: aspirant, teadur, vanemteadur,
ökofüsioloogia ja taimede immuuniteedi osakonna juhataja. 1990–1998 TPU
Ökoloogia Instituudi ökofüsioloogia osakonna juhataja. Alates 1998. aastast
EPMÜ Metsandusliku Uurimisinstituudi ökofüsioloogia osakonna juhataja.

Avaldanud üle 250 teaduspublikatsiooni.



Henn Pärn (esimene vasakult)
 Sündinud 03.04.1939 Viljandimaal,
 Öisus
 1957 Abja Keskkool
 1963 Tallinna Polütehniline Insti-
 tuut, täppismehaanika apa-
 raadid
 1975 Eesti Põllumajandusülikool,
 metsamajandus
 1996 bioloogiakandidaat (ökoloo-
 gia), Venemaa TA Uurali osa-
 konna Taime- ja Loomaöko-
 loogia Instituut, Jekaterinburg
 1961–1969 Tallinna Kontrollmõõdu-
 riistade Katsetehase konstruktor.
 1969–1974 Tallinna RV Metsama-
 jandi metsäülem. 1974–1991 Eesti
 TA Tallinna Botaanikaiaia teadur,
 vanemteadur. 1991–1999 TPÜ Rah-
 vusvahelise Keskkonnabioloogia
 Keskuse vanemteadur. 1999–2000
 Euroülikooli keskkonnakaitse tea-
 duskonna dekaan. Alates 2000 EPMÜ
 MUI ökofüsioloogia osakonna va-
 nemteadur.
 Avaldanud üle 50 teaduspublikat-
 siooni.

Katri Ots (neljas vasakult)
 Sündinud 23.05.1971 Tallinnas
 1989 Tallinna 44. Keskkool
 1993 Eesti Põllumajandusülikool,
 metsamajanduse insener
 1996 metsandusmagister metsa-
 kasvatuseserialal, Eesti Põllu-
 majandusülikool
 2002 põllumajandusdoktor metsan-
 duseserialal, EPMÜ
 1993–1998 TPÜ ÖI: vaneminsener,
 teadur. Alates 1998 EPMÜ MUI
 teadur, vanemteadur.
 Avaldanud üle 40 teaduspublikatsiooni.

Jaan Klõšeiko (kolmas vasakult)
 Sündinud 9.04.1965 Tallinnas
 1983 Tallinna 43. Keskkool
 1993 Tartu Ülikool, bioloog-taime-
 füsioloog
 1998 bioloogiamagister, Tallinna
 Pedagoogikaülikool
 2003 põllumajandusdoktor metsan-
 duseserialal, EPMÜ
 1993–1998 TPÜ ÖI insener, teadur.
 Alates 1998 EPMÜ MUI teadur.
 Avaldanud üle 10 teaduspublikatsiooni.

Metsa funktsioon planeedil Maa ei seisne mitte ainult hapniku ja orgaanilise aine tootmises, veerežiimi ja kliima regulatsioonis, vaid metsad on meie planeedi rohelisteks sanitariks, puhastades keskkonda ja akumulleerides inimese tööstusliku tegevusega toodetud kahjulikke ühendeid. Mets on olnud inimesele koduks, toitjaks ja kaitsjaks ning metsale saavad loota ka meie tulevased põlvkonnad. Seetõttu kuni tänaseni ja ka tulevikus on metsaga seonduvad probleemid olulisel kohal nii majandustegevuses kui ka teaduslikes uurimistöodes.

Taimed oma ontogeneesi vältel on mõjutatud paljudest keskkonnateguritest, millest osa soodustavad arengut ja kasvu, osa biootilisi ja abiootilisi tegureid mõjuvad aga taimedele kahjulikult. Seejuures on igal organismil geneetiliselst determineeritud ja fülogeneetiliselst omandatud unikaalne füsioloogilise vastupidavuse diapasoon, mille piirides iga looduslikus keskkonnas organismile mõjuv tegur on talutav. Väljaspool neid piire on organismi metabolismil vaja käivitada täiendavaid energeetilisi ning füsioloogilis-biokeemilisi mehhanisme ebasoodsate tingimuste üleelamiseks. Sel juhul räägitakse taimede stressist ja stressifaktoritest.

Tänapäeval mõistetakse stressi all bioloogilise süsteemi reaktsiooni ekstreemsete keskkonnafaktorite suhtes, mis sõltuvalt tugevusest, intensiivsusest ja kestusest võivad põhjustada olulisi muutusi süsteemis [Levitt, 1982; Nilsen, Orcutt, 1996; Godbold, 1998]. Taimede stressi teoreetiliste aluste uurimine on motiveeritud paljudest rakenduslikest eesmärkidest metsanduses, põllumajanduses, keskkonnakaitses ja sotsiaalses valdkonnas. Taimede stressi ja nende vastupidavuse füsioloogilis-biokeemiliste mehhanismide uurimine ja mõistmine on aluseks ökosüsteemide tasakaalu säilitamisele ja nende efektiivseks majanduslikuks kasutamiseks.

Auhinnatud tööde tsükkel käsitleb metsaökosüsteemi dünaamika ja erinevate puuliikide stressitolerantsuse ökofüsioloogilisi ja morfoloogilisi aluseid ning mehhanisme, mille mõistmine võimaldaks reguleerida metsaökosüsteemi produktiivsust ja kvaliteeti ning rajada püsikindlaid puistuid looduslikes või inimtegevusest mõjutatud ebasoodsates keskkonnatingimustes.

Uurimisgrupi tööde pearõhk on olnud biodiversiteedi määramisel ning organismide füsioloogilistel autökoloogilistel uurimustel. Kontsentreeruti liigisestest ja liikidevahelistest interaktsioonide ning biosüsteemile mõjuvate looduslike (toitainete ja vee defitsiit, nt luidetel) ja antropogeensete (kvalitatiivselt erinevate õhusaastekomplekside toimel disbalansseerunud toitesubstraat, keskkonna ja sademete leelistumine Kirde-Eestis) stressifaktorite toime uurimisele.

Puistute ja puude ökofüsioloogilise, biokeemilise ja morfoloogilise seisundi võrdlev analüüs süsteemis puu-kasvukeskkond võimaldas teha teoreetiliselt põhjendatud järeldusi metsaökosüsteemi aineringest ja produktsioonidünaamikast erinevates edaafilistes, kliimaatilistes, geomorfoloogilistes ning õhu ja keskkonna saastumise tingimustes. Töö tulemusena on selgitatud puude primaarsete funktsionaalsete protsesside (süsivesikute metabolism, fotosünteesis osaleva pigmentsüsteemi kvantitatiivne dünaamika, mineraaltoitumine) [Mandre jt, 1999; 2000; Mandre, 2000; 2003; Klõšeiko, Mandre, 2002; Mandre, Ots, 2002; Mandre jt, 2002b] ja sekundaarainevahetuse (puude puitumine e lignifikatsioon, okastel vahakihi moodustumine jt) [Mandre, 2000; 2002; Mandre jt, 2002a; Mandre, Korsjukov, 2002; Mandre jt, 2002b] suhetes kuju-

nevid muutusi stressitingimustes ja sellest tulenevalt mõju puude biomassi formeerumisele ning bioproduksioonile [Mandre, Ots, 1999; 2002; Ots jt, 2000; Ots, Rauk, 2001; Ots, Mandre, 2002; Ots, 2003; Pärn, 2001; 2002; 2003a, b, c].

Uurimistöo on toimunud kolmel üksteist täiendaval tasandil: mudelkatsetes kasvuhooes või laboratooriumis, transektuuringutena looduslikes puistutes Kirde-Eesti tööstuspiirkonnas ja Edela-Eesti luitestik. Mudelkatsetes tehtud uuringud on olnud kontrolliks ja aidanud interpreteerida looduslikes tingimustes saadud tulemusi puude ökofüsioloogia valdkonnas.

Tööde tulemusena on selgunud, et taimorganismi funktsionaalse terviklikkuse säilitamine ja vastupidavus nii looduslike kui ka antropogeensete tegurite toimete sõltub taime geneetilisel kinnistunud metabolismi tüübist ja füsioloogilise biokeemiliste vastusreaktsioonide iseloomust ning amplituudist, mis garanteerivad taimede ellujäämise stressitingimuste korral.

Vastusreaktsioonide iseloom baseerub suurel määral organismi regulatiivsetel ümberkorraldustel, mis seisnevad muutustes ensümaatilistes protsessides ja aktiivsuses, kvalitatiivselt ja kvantitatiivselt uute seoste (nt süsivesikute metabolismi ja mineraalse kompositsiooni vahel) tekkes jne. Üheks nähtuseks inimtegevusest tingitud leelistunud kasvukeskkonnas või vee ja toitainete defitsiidi korral luuditel on komplikatsioonid mineraalses toitumises ja disbalansseerunud toitainete sisaldus organismis. Vastusreaktsioonina erinevates stressitingimustes kasvanud puudes täheldati nii toitainete kui ka assimilatsioonide jaotuvuse muutusi organismis. Näiteks leeliselise õhusaaste tingimustes väheneb assimilatsioonide translokatsioon juurtesse. Süsivesikute vaegus juurtes pidurdab kasvu ja biomassi formeerumist, mis omakorda komplitseerib mineraalelementide omastamist ja maapealsete organite varustatust toitainetega. Primaarainevahetuse muutustega kaasneb rida sekundaarainevahetuse muutusi: suurenevad fenoolainevahetuses osalevate ühendite (tanniinid, katehiinid) hulgad kudedes ja lignifikatsioon, väheneb okkaid ebasoodsate välistegurite eest kaitsev epikutikulaarse vaha kontsentratsioon okastel. Puude võime säilitada ainevahetuslikku tasakaalu, sisemist regulatiivsust ning rakendada kompensatsioonimehhanisme tagab vastupidavate liikide kasvu ja produktiivsuse ka ekstreemsetes kasvutingimustes.

Meie uuringud puude stressitolerantsuse alal said alguse Tallinna Botaanikaaias 1985. aastal, mil tolleaegsetest keskkonnaoludest tingitult tekkis vajadus selgitada puude seisundit Kirde-Eesti tööstuspiirkonna metsades. Aasta-aastalt probleemid laienesid, sest saadud uurimistulemused püstitasid uusi probleeme ning tingisid uute aspektide arvestamist. Metsaökosüsteemi mitmekülgse (muld–mullavesi–sademed–õhusaaste–puu) uurimise tulemusena on käesolevaks ajaks selgitatud looduslikes metsaökosüsteemides ja katsestandustes erinevate okaspuuliikide tolerantsust kvalitatiivselt ja kvantitatiivselt erinevate leeliseliste polükomponentsete õhusaastekomplekside suhtes ning töötati välja soovitused nende kasutamiseks linnahaljastuses ja tööstuspiirkonnas mitmekesiste ja püsikindlate puistute kasvatamiseks [Mandre jt, 1992; 1994; 1999; Mandre, 1995; Mandre, Tuulmets, 1995; Mandre, Klõšeiko, 1997; Mandre, Ots, 1999].

Autasustatud tööde tsükkel on hetkeseisundi fikseerimine, sest probleemi keerulisus ja stressifaktorite mitmekesisus tingib täiendavaid uuringuid puude stressitolerantsuse üldteoreetiliste seisukohtade kujundamiseks. Lõppjärgelduse-teni on veel pikk tee käia, kuid see, et ökofüsioloogide huvi puude stressitolerantsuse vastu on jätkuvalt suur ja isegi tõusnud nii eesti teadlaste hulgas [Kull jt, 1996; Kull, Niinemets, 1998; Niinemets jt, 1998; Pensa, 2002; Kull jt, 2003] kui ka kogu maailmas [Dubey, 1997; Garg jt, 2002; Munns, 2002; Ashraf, Harris, 2003; Wimmer jt, 2003], innustab ka meid. Meie uurimistöid on mitmete uurimisprojektide finantseerimise kaudu toetanud EV Haridus- ja Teadusministeerium (sihtteemad nr. 0170130s98, 0432153s02), Eesti Teadusfond (grandid nr. 3234, 3705, 4725) ja koostöös mitmete teiste maade teadlastega Euroopa Komisjon (QLK5-CT-2001-00527). Märkimisväärse panuse auhinnatud tööde tsükli valmimisele on aga osutanud meie kolleegid EPMÜ Metsandusliku Uurimisinstituudi ökofüsioloogia osakonnast Kersti Poom, Liivi Tuulmets, Reet Korsjukov ja Verge Bogdanov, mille eest neile suur tänu.

KIRJANDUS

Ashraf, M., Harris, P. J. C. 2003. Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. *Plant Sci.*, 166, 3–16.

Dubey, R. S. 1997. Photosynthesis in plants under stressful conditions. Pessarakli, M. (ed.). *Handbook of Photosynthesis*. New York : Marcel Dekker, 859-875.

Garg, A. K., Kim, J. K., Owens, T. G. Ranwala, A. P., Choi, Y. D., Kochian, L. V., Wu, R. J. 2002. Trehalose accumulation in rice plants confers high tolerance levels to different abiotic stresses. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 99 (25), 15898-15903.

Godbold, D. L. 1998. Stress concepts and forest trees. *Chemosphere*, 36, 4-5, 859-864.

Klõšeiko, J., Mandre, M. 2002. Effect of wood ash on hexose content in Scots pine needles. Mandre, M. (ed.). *Responses of Conifers to Stress Factors*. Tallinn, 82-94. (Forestry Studies / Metsanduslikud uurimused ; 36).

Kull, O., Niinemets, Ü. 1998. Distribution of leaf photosynthetic properties in tree canopies: comparison of species with different shade tolerance. *Funct. Ecol.*, 12, 472-479.

Kull, O., Söber, A., Coleman, M. D., Dickson, R. E., Isebrands, J. G., Gagnon, Z., Karnosky, D. F. 1996. Photosynthetic responses of aspen clones to simultaneous exposures of ozone and CO₂. *Can. J. For. Res.*, 26, 639-648.

Kull, O., Tulva, I., Vapaavuori, E. 2003. Influence of elevated CO₂ and O₃ on *Betula pendula* Roth crown structure. *Ann. Bot.*, 91, 559-569.

Levitt, J. 1982. Stress terminology. Turner, N. C., Kramer, P. J. (eds.). *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress*. New York : Wiley-Interscience, 437-439.

Mandre, M. 1995. Effects of dust pollution on carbohydrate balance in conifers. Mandre, M. (ed.). *Dust Pollution and Forest Ecosystems. A Study of Conifers in an Alkaline Environment*. Tallinn, 78-95. (Publ. Inst. Ecol.; 39).

- Mandre, M. 2000. Stress induced changes in lignin and nutrient partitioning in *Picea abies* L. *Baltic Forestry*, 6, 1, 30-36.
- Mandre, M. 2002. Relationships between lignin and nutrients in *Picea abies* L. under alkaline air pollution. *Water Air Soil Pollut.*, 133, 1/4, 363-379.
- Mandre, M. 2003. Ecophysiological study of suitability of *Picea mariana* L. for afforestation in alkalized territories in Northeast Estonia. *Oil Shale*, 20, 2, 143-160.
- Mandre, M., Annuka, E., Tuulmets, L. 1992. Response reactions of conifers to alkaline dust pollution. Changes in the pigment system. *Proc. Estonian Acad. Sci. Ecol.*, 2, 156-173.
- Mandre, M., Bogdanov, V., Rahi, M. 2002a. Impact of alkaline air pollution and alkalisation of the environment on the structure and quantity of epicuticular waxes on needles of *Picea abies*. Mandre, M. (ed.). *Responses of Conifers to Stress Factors*. Tallinn, 107-119. (Forestry Studies / Metsanduslikud uurimused; 36).
- Mandre, M., Klõšeiko, J. 1997. Changing carbohydrate partitioning in 6-year-old coniferous trees after prolonged exposure of cement dust. *Z. Naturforschung*, 52c, 586-594.
- Mandre, M., Klõšeiko, J., Ots, K. 2000. The effect of cement dust on growth, content of nutrients and carbohydrates in various organs of five conifer species. *Baltic Forestry*, 6, 2, 16-23.
- Mandre, M., Klõšeiko, J., Ots, K., Tuulmets, L. 1999. Changes in phytomass and nutrient partitioning in young conifers in extreme alkaline growth conditions. *Environ. Pollut.*, 105, 209-220.
- Mandre, M., Korsjukov, R. 2002. Responses of the pigment system of Norway spruce and Scots pine to alkalisation of the environment. Mandre, M. (ed.). *Responses of Conifers to Stress Factors*. Tallinn, 95-106. (Forestry Studies / Metsanduslikud uurimused; 36).
- Mandre, M., Ots, K. 1999. Growth and biomass partitioning of 6-year-old spruces under alkaline dust impact. *Water Air Soil Pollut.*, 114, 13-25.
- Mandre, M., Ots, K. 2002. Influence of industrial air pollutants on growth and physiological state of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) in Estonia. *Indian J. Agric. Sci.*, 72, 5, 263-266.
- Mandre, M., Tullus, H., Klõšeiko, J. 2002b. Partitioning of carbohydrates and biomass of needles in Scots pine canopy. *Z. Naturforsch.*, 57c, 3/4, 296-302.
- Mandre, M., Tuulmets, L. 1995. Biochemical indication of dust impact on forest. Mandre, M. (ed.). *Dust Pollution and Forest Ecosystems. A Study of Conifers in an Alkaline Environment*. Tallinn, 150-157. (Publ. Inst. Ecol.; 3).
- Mandre, M., Tuulmets, L., Rauk, J., Ots, K., Okasmets, M. 1994. Response reaction of conifers to alkaline dust pollution. Changes in growth. *Proc. Estonian Acad. Sci. Ecol.*, 4, 79-95.

- Munns, R. 2002. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell Environ.*, 25, 239-250.
- Niinemets, Ü., Kull, O., Tenhunen, J. D. 1998. An analysis of light effects on foliar morphology, physiology, and light interception in temperate deciduous woody species of contrasting shade tolerance. *Tree Physiol.*, 18, 681-696.
- Nilsen, E. T., Orcutt, D. M. 1996. *The Physiology of Plants under Stress: Abiotic Factors*. New York : John Wiley & Sons, 689 pp.
- Ots, K. 2003. Impact of emission from oil shale fueled power plants on the growth and foliar elemental concentrations of Scots pine in Estonia. *Environ. Monit. Assess.*, 85, 293-308.
- Ots, K., Mandre, M. 2002. Needle biomass across a pollution gradient in Estonia. *Oil Shale*, 19, 4, 425-438.
- Ots, K., Rauk, J. 2001. Defoliation of Scots pine and Norway spruce under alkaline dust impact and its relationship with radial increment. *Oil Shale*, 18, 3, 223-237.
- Ots, K., Rauk, J., Mandre, M. 2000. The state of the forest ecosystem in an area of oil shale mining and processing. II. Morphological characteristics of Norway spruce. *Oil Shale*, 17, 2, 168-183.
- Pensa, M. 2001. Needle longevity and foliar nitrogen content of Scots pine in *Vaccinium* and pine bog forests. Mandre, M. (ed.). *Responses of Conifers to Stress Factors*. Tallinn, 32-38. (Forestry Studies / Metsanduslikud uurimused; 36).
- Pärn, H. 2001. Variations of element concentrations in tree rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the vicinity of an oil shale-fired power plant. *Oil Shale*, 18, 1, 57-71.
- Pärn, H. 2002. Impact of oil shale fly ash emitted from a power plant on radial growth of Scots pine in North-East Estonia. *Oil Shale*, 19, 3, 307-319.
- Pärn, H. 2003a. A boreal-temperate transect in Europe: History of pine site reconstructed from the radial growth of trees. *Polish J. Ecol.*, 51, 4, 413-420.
- Pärn, H. 2003b. Radial growth response of Scots pine to climate under dust pollution in Northeast Estonia. *Water Air Soil Pollut.*, 144, 343-361.
- Pärn, H. 2003c. The rate of changes in the radial growth of pine trees along the latitudinal transect between 50–70° N. *Polish J. Ecol.*, 51, 4, 557-559.
- Wimmer, M. A., Mühling, K. H. Läubli, A. Brown, P. H., Goldbach, H. E. 2003. The interaction between salinity and boron toxicity affects the subcellular distribution of ions and proteins in wheat leaves. *Plant Cell Environ.*, 26, 1267-1274.

Teaduspreemia sotsiaalteaduste alal tööde tsükli
**“POSTSOTSIALILSTLIKU SIIRDE MÕJUD EESTI
ÜHISKONNAS” eest**



*Mikko Kari
Lagerspetz*

Sündinud 23.02.1963 Turus

1981 Turu Normaalgümnaasium
1989 poliitikateaduste magister sotsioloogia erialal, Turu Ülikool
1989–1992 õpingud kompositsiooni erialal, Eesti Muusikaakadeemia
1996 poliitikateaduste doktor, Turu Ülikool

Alates 1990. aastast Eesti Humanitaarinstituut: õppejõud, 1997. aastast sotsioloogia korraline professor, 1998–2001 rektor. 1994. aastal Põhjamaade alkoholi- ja uimastiuuringute nõukogu uurimisassistent. 1997. aastast Turu Ülikool, sotsioloogia, eriti Eesti ja Ida-Euroopa uuringute dotsent.

1998–2003 Eesti Sotsioloogide Liidu president. Alates 2004. aastast Euroopa Kultuurifondi Euroopa kultuuripoliitika uurimise auhinnakomisjoni liige.

Avaldanud umbes 60 teaduspublikatsiooni.

POSTSOTSIALISTLIKUST SIIRDEST UUE ÜHISKONNA- KORRA KONSOLIDEERUMISENI – JA EDASI?

POSTSOTSIALISMI SOTSIoloogilISEST UURIMISEST

Sotsioloogia kui iseseisev teadus tekkis 19. sajandi alguses koos industriaalühiskonnaga, eesmärgiga seletada toona aset leidnud kiiret muutust, ennetada sellega kaasnenud probleeme ning analüüsida tekkivaid uue ühiskonnakorralduse elemente. Majanduse muutus tõi endaga kaasa muutusi valitsevates normides ja väärtustes, klasside ja ühiskondlike rühmade vahelistes suhetes. Selle distsipliini kõige iseloomulikumaks uurimistemaatikaks ongi jäänud kõik *sotsiaalsete muutustega* seonduv. Sellest seisukohast pakuvad erilist huvi Kesk- ja Ida-Euroopa ühiskondade paari viimase aastakümne arengud: on ju tegemist ühe suurima ühiskondliku mullistusega Euroopa uuemas ajaloos. Eestis on muude muutustega kaasnenud veel iseseisva riigi taastamine; ka majanduse murrang on olnud järsem kui mitmes teises sama regiooni riigis. Selles mõttes on Eesti nüüdisarengu näol tegemist ühiskonna ülikiire muutuse tähelepanuväärse näitega, mis pakub mõndagi huvitavat ka nendele, kelle huviks ei ole ainult siin toimuv, vaid postsotsialistlik regioon üldisemalt. Kõige üldisemas mõttes on aga Eestis toimunu uue ühiskonnakorra tekke ja kinnistumise (ehk *konsolideerumise*) näiteks.

Kesk- ja Ida-Euroopa sotsiaalteaduslikes uuringutes võib täheldada viimastel aastatel toimunud nihet just sotsioloogiale omasemate vaatenurkade poole. 1990. aastate alguses oli analüüside tähelepanu keskmes Lääne ühiskondadele ja kapitalistlikule majandusele iseloomulike institutsioonide ja regulatsioonide juurutamine endistes sotsialistlikes maades. Vaatenurk oli pigem majandusteaduslik ja politoloogiline kui sotsioloogiline ja kultuuriline; see kuulus pigem eemalt vaatlejale kui sellele, kes vaadeldavaid ühiskondi ja sündmusi seestpoolt mõistab. Mõne aasta jooksul on aga selgunud, et uued institutsioonid vajavad enda ümber keskkonda, mis nende edukat toimimist toetab. Lisaks poliitilise demokraatia institutsionaalsele kestale on vaja demokraatlikku poliitilist kultuuri ja aktiivset kodanikuühiskonda; ka muutuste uurimine ei saa piirduda uuele korrale ülemineku ehk *siirde* vaatlemisega. Nüüd, pärast mõne aasta möödumist uue ühiskonnakorra institutsioonilise raamistiku loomisest, on juba võimalik täpsemalt vaadelda uute ühiskondade eripärasid ja hinnata, kui võrd need on jõudnud ennast kinnistada [Beyme, 1999].

SIIRE KUI TELEOLOOGILINE PROTSESS

Endiste nõukogude tüüpi ühiskondade arengu kirjeldamiseks võeti niisiis 1990. aastate alguses kasutusele “siirde” või “ülemineku” (*transition*) mõiste. Seda on kasutanud peale poliitikute, majanduseksperptide ja rahvusvaheliste organisatsioonide ka sotsiaalteadlased; selle mõistega on tähistatud nii poliitikas, majanduses kui ka teistel ühiskonnaelu aladel aset leidnud kiireid muutusi. Ka termin ise leiti kiiresti ja selle kasutuselevõtule ei eelnenud kuigi tõsist teoreetilist diskussiooni. Samas on mõistega seotud olulisi teoreetilisi taustaletusi, mida enamasti ei ole siiski nähtavale toodud.

Siirde mõiste on kõigepealt seotud oletusega, et Kesk- ja Ida-Euroopa riigid on sooritamas teekonda n-ö punktist A (mida võib tähistada kui sotsialismi, nõukogude tüüpi ühiskonda, totalitarismi jne) punkti B (kapitalism, Lääne tüüpi ühiskond, demokraatia jne). Seega on tegemist protsessiga, mille lõpptulemus

oleks justkui juba teada. Selle oletuse teleoloogilisusele ja väärtushinnangulisusele on Eestis osutanud nt Marju Lauristin [1997: 25]; samal põhjusel on Katherine Verdery [1996: 15; 204-228] kasutanud terminit tähenduses “siire *millestki*”, mitte “*millelegi*”, sest arengu tulemused ei pruugi esialgsetele lootustele vastata. Teiseks aga sisaldab muutuste kirjeldamine “siirdena” olulist poliitilist sõnumit: endiste sotsialistlike maade praegused raskused on eelkõige seotud üleminekuga. Uue majandusliku ja poliitilise korra juurutamisel esile kerkinud probleemid olevat seega enam-vähem möödapääsmatud ning nende lahendust võib loota saabuvat siis, kui siirdeprotses on läbitud. Seega on lahenduse võtmeks mitte poliitika suuna muutmine, vaid juba alustatud kursil jätkamine. Tegemist on niisiis ka poliitika legitimeerimise strateegia ühe komponendiga; huvitaval kombel tuletab see meelde viisi, kuidas eelmise riigikorra ajal “üksikute puudujääkide” esinemist välja vabandati. Ametliku ideoloogia kohaselt oli Nõukogude Liidu ühiskonna näol tegemist mitte kommunismiga, vaid “arenenud sotsialismiga”, mida defineeriti samamoodi kui tulevasele ühiskonnale eelnevat vältimatut üleminekufaasi.

POSTSOTSIALISTLIK MUUTUS KUI AVATUD PROTSESS

Kesk- ja Ida-Euroopas toimunud muutuste üksikasjalikum, empiiriline selgitamine aga nõuab arengute vaatlemist mitte ettemääratutena. Kindlalt võib öelda niipalju, et regiooni riikidest on saanud globaalse kapitalistliku majandusruumi osa, mis on sellesse lülitunud esialgu perifeeria või poolperifeeria staatuses [Wallerstein, 1983/1987]. Hetkel võib ka öelda, et areng on olnud vaevalisem kui esialgu arvati: ÜRO andmetel oli Kesk- ja Ida-Euroopa ainus regioon maailmas, kus sisemajanduse kogutoodang (SKT) 1990. aastate esimesel poolel kokkuvõttes langes [Human Development..., 1998]. Samas ei saa kapitalistlikku maailmamajandusse lülitumise faktist nende ühiskondade muu arengu osas veel kuigi palju järeldada. Nn Lääne tüüpi ühiskonda kui ühtset eeskuju ju olemas ei ole; USA liberaalne, mandri-Euroopa korporatistlik ja Põhjamaade sotsiaaldemokraatlik majandus- ja sotsiaalpoliitika mudel on üksteisest küllaltki erinevad kapitalistliku heaoluriigi vormid [Esping-Andersen, 1990]. Ka on võimalikud väga erinevad suunad poliitilise demokraatia ja kodanikuühiskonna arenemisel; nn arengumaade näitel võib öelda, et kumbki ei pruugi olla probleemitu ka kapitalistliku majandusega riigis. Uue ühiskonnakorra kujunemise analüüsil tuleb niisiis vaadelda erinevate kodu- ja välismaiste mõjutajate tegevust ning neid viise, kuidas nende eesmärgid ühes või teises valdkonnas realiseerimist leiavad. Oluline küsimus siinjuures on ka, kuidas saavutatakse ühiskonnaliikmete nõusolek erinevate reformidega või vähemalt see, et nad endale vastumeelseid reforme takistada ei püüa (või seda teha ei suuda). Viimatimainitud probleemiga ongi seotud suur osa minu uurimustöödest.

Suured, kogu ühiskonda haaravad muutused peidavad endas alati konflikti võimalust. Objektivselt vaadates pole sugugi iseenesestmõistetav, et kõik ühiskonnaliikmed (või kas või enamik) peaksid reformipoliitikat pooldama – ka mitte Eestis. Üksikindiviidi tasandil tähendas postsotsialistlik siire kohanemist uute majanduslike oludega, mis mõnikord oli vaevaline. 1980. aastatel alanud ja 1990. aastate esimesel poolel jätkunud, kõiki endisi sotsialistlikke maid hõlmanud majanduslik langus jõudis Eestis oma alumise punktini 1993. aastal, kui SKT vastas umbes 67%le 1989. aasta tasemest [Grennes, 1997:12-14]. 1990. aastate teisel poolel hakkas majandus jälle kosuma, aga muutunud oli nii

erinevate majandusharude osatähtsus kui ka sissetulekute ja omandi jagunemine ühiskonnas. Pärast nõukogude ühiskonnas valitsenud suhtelist majanduslikku võrdsust on saanud Eestist üks ebavõrdsema sissetulekute jaotusega riike Euroopas [Saar, 2003]. Paljudest teistest sama regiooni riikidestki teravamalt on majandusreformide tagajärjel tekkinud “võitjad” ja “kaotajad” – nii mõõdetavate majandusnäitajate mõttes kui ka selle järgi, kuidas inimesed oma olukorda subjektiivselt hindavad. Samas ei ole see vastuolu väljendunud poliitilises ebastabiilsuses, ka mitte ainsaski streigis (peale üksikute hoiatusstreikide) [Ibrus, 2002] ega ka kuni viimase ajani ainsaski ulatuslikumas protestiliikumises. Selles mõttes on Eesti uue poliitilise ja majanduskorra konsolideerumine olnud üllatavalt kiire [Lagerspetz, Vogt, 2004]. See tundub nõudvat seletust.

KONSOLIDEERUMISE EELDUSED

Eesti areng on näide sellest, et poliitilise või ühiskondliku aktiivsuse tekkimist või mittetekkimist ei saa seletada ainult n-ö objektiivsete asjaoludega. Välised näitajad (nt rühma majandusliku või õigusliku olukorra halvenemine) saavad olla ühiskondlikku muutust puudutavate nõuete ajendiks ainult nii palju ja sellisel kujul, nagu neid teadvustatakse. Nõuded ise saavutavad vastukaja ja mõju ühiskonnas sedavõrd, kui võrd on olemas nende edastamist võimaldavaid kanaleid ja nõuetele vastavat tegutsemist võimaldavaid struktuure. Olukorra analüüsil on vaja vaadelda nii ideoloogiaid ja diskursusi (kõneviise), mis inimeste teadvust mõjutavad, kui ka seda, kuidas toimivad riik ja avalikkus.

Eelnevalt juba mainisin “siirde” kui teleoloogilise protsessi kujundit poliitika legitimeerimise ühe komponendina 1990. aastatel. Riigi võimalikult väikest sekkumist majandusse ehk uusliberaalset majanduspoliitikat esitati kui selle protsessi mõõdapääsamatut osa. Selle nimel tuli majandusreformide kaotajatel oma nõudmisi edasi lükata kuni peaeesmärgi – majandusliku jõukuse saavutamiseni. Poola 1990. aastate alguse samuti uusliberaalse majanduspoliitika üks arhitekte, majandusteadlane Leszek Balcerowicz [1993] on toonitanud, et “siirdega” kaasnevad radikaalsed majandusreformid on oluline teostada nimelt selle mööduva ja erakorralisena tajutud perioodi jooksul. “Murrangulistele ajaloosündmustele” järgneb “erakorralise poliitika” (*extraordinary politics*) aeg, millal võimul oleva valitsuse käsutuses on “poliitilist kapitali”. Sellele on võimalik ebapopulaarsete otsuste tegemisel toetuda. Kui radikaalsed majandusreformid suudetakse läbi viia erakorralise poliitika perioodi jooksul, on kergem nendele saavutada ka selliste sotsiaalsete rühmade heakskiitu, kelle vahetud huvid saavad riivatud. Järgneval “normaalse poliitika” perioodil on see juba raskem. Eesti puhul aitas olukorda erakorralisena tajuda ka riigi geopoliitiline asend ehk raskesti ennustatavate ja potentsiaalselt ohtlike arengusuundadega Venemaa lähedus. See tegi kergemini vastuvõetavaks sellised poliitilised meetmed, millest loodeti abi võimalikult kiirel integreerumisel Lääne majanduslike, poliitiliste ja sõjaliste struktuuridega.

Uue poliitilise ja majanduskorra legitiimsust toetavaid diskursusi vaadeldes torkavad silma huvitavad paradoksid: rahvuslikule solidaarsusele apelleerides õigustati arenguid, mille vahetul tulemusel majanduslik ebavõrdsus lisandus ja rahvuslik ühtsus niisiis hoopis vähenes. “Läänelikkuse” püüdega põhjendati poliitilisi põhimõtteid, mis praegu vastanduvad paljudele Euroopa Liidu ja Põhjamaade ühiskondi kujundanud põhimõtetele [Lagerspetz, 2003]. Paradoks on seegi, et vabariigi valitsuse koosseisud on vahetunud üpris tihti ja erakon-

nad on oma retoorikas väljendanud kogunisti leppimatut vastasseisu, samas kui ühte valitsusse on ikkagi suutnud sobitada ka näiliselt üksteisest kaugel seisvad parteid, mis on ajanud üldjoontes muutumatut poliitikat. Selle põhisuuna komponentideks on olnud uusliberaalne majanduspoliitika ning eesmärk Euroopa Liidu ja NATO liikmeks saada.

Uue poliitilise ja majanduskorra kiire konsolideerumise on võimaldanud ka sellele vastanduvate jõudude puudus või nõrkus. Väljastpoolt vaadates on Eesti taasiseseisvumisele järgnenud poliitika vast kõige üllatavam fakt see, et rahvusrühmade vahel ei ole toimunud märkimisväärseid konflikte. On ju Eesti venelaste näol tegemist üsna suure hulga ühiskonnaliikmetega, kes on lühikese aja jooksul pidanud vägagi paljust loobuma ja kellelt seega oleks võinud oodata organiseerunud vastuseisu. Üks seletus peitub 1992. aasta kodakondsuseaduses, mis jättis venekeelsete elanike enamuse ilma kodakondsusest ja seega võimalusest riigi tasandil institutsionaalset poliitikat mõjutada. Nagu on märkinud Vello Pettai [1998], oli see väga oluline poliitilist stabiilsust taganud tegur. Samas on seda demokraatia seisukohast väga kerge arvustada.

Paljudele vaatlejatele on olnud hämmastav ka sotsiaalse iseorganiseerumise vähenene mõju pärast Kesk- ja Ida-Euroopa revolutsioone. Kutsusid ju ühiskonnakorra muutuse suures osas esile just sotsiaalsed liikumised; see jättis mulje tavatust kodanikuaktiivsusest ja organiseerumisvalmidusest. Tegelikult aga iseloomustas järgnenud aastaid riigist sõltumatu kodanikuühiskonna, sealhulgas ametiühingute nõrkus. Osaliselt võib põhjus seisneda nõukogudeaegses iseorganiseerumise traditsioonis, millesse kuulus personaalsete, vastastikku kasu võimaldanud võrgustike loomine, aga mitte avatud, formaalsete organisatsioonide rajamine üldiseks hüvanguks [Lagerspetz, 2001b]. Samas on nimelt kiire muutusega kaasnenud üldine ebastabiilsus, mis vähendab inimeste valmidust oma huvide või väärtuste kaitseks ühineda. Kiire ja indiviidi tasandil tihti raskesti ennustatavate mõjudega muutuse tõttu on inimestel raske oma huvides selgusele jõuda; ennustamatus olukorras tundub üldise, nt elukoha või töökollektiivi hüvangu eesmärk abstraktsena ja selle saavutamine liialt ebakindlana, et selle nimel koostööd teha.

KUHU EDASI?

Eesti demokraatia seisukohast võib 1990. aastate arenguid kokkuvõttes mõneti vastuolulisteks pidada. Loodud poliitiline süsteem osutas oma vastupidavust ja sagedaste valitsuse vahetuste kiuste ka võimet tagada poliitika põhisuundade stabiilsus. Selles mõttes saab seda pidada konsolideerunuks. Samas tähendab erakondade taoline suhteline üksmeel ka seda, et puudunud on institutsionaalne poliitiline kanal, mis oleks esindanud püüdeid, mis erinevad valitsevast suunast. Selle tulemusel on täheldatud poliitikast võõrandumist eriti maaelanike, algharidusega, väiksema sissetulekuga ning venekeelsete elanike hulgas – seega rühmades, mis erinevatel põhjustel kuuluvad uue ühiskonnakorra “kaotajate” hulka [Rikmann, Lagerspetz, 2003]. Iseloomulik oli ka kehtetute valimisedeliste suur hulk ja “uut poliitikat” lubanud partei jõuline esilekerkimine 2003. aasta Riigikogu valimistel. Viimase kiire lülitumine senisega sarnaneva poliitika teostajate hulka aga näitab selle põhisuuna immuunsust valimiste teel avaldatud protestile. Võibki küsida, kas poliitika taoliselt saavutatud stabiilsus ei käi vastu avatusele kui demokraatia ühele põhiomadusele. Demokraatlik konsolideerumine kui mõiste tundub sisaldavat kahte potentsiaalselt üksteisega vastuolus olevat komponenti [Lagerspetz, 2001a].

Mõned senise poliitika kesksed eesmärgid – eelkõige EL ja NATO liikmelisus – on tänaseks saavutatud. Üsnagi selge, et enam ei ole tegemist “erakorralise poliitika” perioodiga; seega võib eeldada ühiskonna erinevate huvigruppide senisest aktiivsemat esile kerkimist. Juhul, kui nende eesmärgid ei leia väljendust institutsionaalses poliitikas, on oodata parlamendiväliste protestiaktiivide teket. Näiteks Euroopa Liiduga ühinemise vastane liikumine kujunes suurel määral liikumiseks poliitilise eliidi vastu üldse [Vallaste, 2004]. 1990. aastate lõpust alates võib täheldada ka mittetulunduslike organisatsioonide üha kasvavat aktiivsust [Lagerspetz jt, 2003]. See väljendab ühelt poolt kiire muutuse tõttu nõrgenenud ühiskondliku sidususe taastumist, teiselt poolt on see näiteks viimasel ajal üha tavalisemaks saanud püüdest poliitikat ja valitsemist mõjutada otsese kodanikualgatuse kaudu. Uute mõju- ja koostöökanalite otsingutes võib näha “siirde” ebakindlaima perioodi lõpulejõudmise, ühiskonna suhtelise stabiliseerumise tulemust.

KIRJANDUS

Balczerowicz, L. 1993. Common Fallacies in the Debate on Economic Transition in Central and Eastern Europe. London : EBRD. (Working Paper No. 11).

Beyme, K. von. 1999. Osteuropaforschung nach der Systemwechsel: Der Paradigmawandel der ‘Transitologie’. Osteuropa, 49, 3, 183-200.

Esping-Andersen, G. 1990. The Three Worlds of Welfare Capitalism. Cambridge : Polity.

Grennes, T. 1997. The economic transition in the Baltic countries. J. of Baltic Studies, XXVIII, 1, 9-24.

Human Development Under Transition: Summaries of the 1997 National Human Development Reports (NHDRs) for Europe and the CIS. 1998. New York : UNDP.

Ibrus, K. 2002. Streik Eestis 1995-2001. aastal. – www.ehi.ee/yliopilased/lopetajad.htm (Bakalaureusetöö, Eesti Humanitaarinstituut).

Lauristin, M. 1997. Contexts of transition. Lauristin, M., Vihalemm, P., Rosengren, K. E., Weibull, L. (toim.). Return to the Western World: Cultural and Political Perspectives on the Estonian Post-Communist Transition. Tartu: Tartu University Press, 25-40.

Lagerspetz, M. 2001a. From ‘Parallel Polis’ to ‘The Time of the Tribes’: Post-socialism, social self-organization and post-modernity. J. of Communist Studies and Transition Politics, 17, 2, 1-18.

Lagerspetz, M. 2001b. Consolidation as hegemonization: The case of Estonia. J. of Baltic Studies, XXXII, 4, 402-420.

Lagerspetz, M. 2003. How many Nordic countries? The possibilities and limits of geopolitical identity construction. Cooperation and Conflict, 38, 1, 48-60.

Lagerspetz, M., Trummal, A., Ruutsoo, R., Rikmann, E., Liiv, D. 2003. Tundud ja tundmatu kodanikeühiskond. Tallinn : Avatud Eesti Fond.

- Lagerspetz, M., Vogt, H. 2004. Estonia. Berglund, S., Ekman, J., Aarebrot, F. (eds.). *The Handbook of Political Change in Eastern Europe*. Second Edition. Cheltenham, UK & Northampton, MA, USA : Edward Elgar, 57-93.
- Pettai, V. 1998. Emerging ethnic democracy in Estonia and Latvia. Opalski, M. (ed.). *Managing Diversity in Plural Societies. Minorities, Migration and Nation-Building in Post-Communist Europe*. Nepean, Ontario : Forum Eastern Europe, 15-32.
- Rikmann, E., Lagerspetz, M. 2003. Poliitiline osalus ja kodanikuidentiteet. Vetik, R. (toim.). *Eesti Inimarengu Aruanne 2003*. Tallinn : TPÜ RASI, 15-19.
- Saar, E. 2003. Sotsiaalne ebavõrdsus Eestis: tegelikkus ja inimeste hinnang. Vetik, R. (toim.). *Eesti Inimarengu Aruanne 2003*. Tallinn: TPÜ RASI: 52-57
- Vallaste, K. 2004. Euroopa Liiduga ühinemise vastane liikumine Eestis. Riigikogu Toimetised, 2004, 9. (Ilmumas)
- Verdery, K. 1996. *What Was Socialism, and What Comes Next?* Princeton, NJ : Princeton University Press.
- Wallerstein, I. 1983/1987. *Historiallinen kapitalismi*. Tampere : Vastapaino. (Alkuteos: Historical Capitalism).

*Teaduspreemia humanitaarteaduste alal uurimuse
"EESTI 18. SAJANDI AJALUGU" eest*



*Mati
Laur*

Sündinud 17.06.1955 Abja-Paluojaal

1973 Abja Keskkool
1978 Tartu Ülikool, ajalugu
1987 ajalookandidaat, Tartu Ülikool
2000 filosoofiadoktor, Tartu Ülikool
2002 Valgetähe IV klassi teenetemärk

Eesti esindaja Läänemere maade Ajaloolaste Alalisel Konverentsil. Tartu Ülikooli ajaloo eriala doktoritööde kaitsmise nõukogu esimees.

Alates 1979. aastast Tartu Ülikool: aspirant, nooremteadur, vanemõpetaja, dotsent, 1999. aastast üldajaloo õppetooli juhataja, 2003. aastast üldajaloo korraline professor. 1994–1995 külalisõppejõud Greifswaldi ülikoolis (Saksamaa).

Avaldanud ligi 100 ajaloo-alast trükist, sh kolm monograafiat.

“Liivimaa, Sa oled provints, kus kohtuvad barbaarus ja luksus, harimatus ja välja-
peetud maitse, vabadus ja orjus” [Eckardt, 1868:136]. Nii kirjeldas aastatel 1765–
1769 Riias vaimuliku ja kooliõpetajana töötanud noor Johann Gottfried Herder
oma teist kodumaad. Vene riigivõim, saksa ülemkiht siin valitseva protestantliku
kirikuga ning eestlastest ja lätlastest põliselanikkond löid üheskoos Põhjasõja-
järgse Baltikumi kireva ja vastuolulise pildi.

Ometigi jäi 18. sajandi Eesti ajaloo uurimine siinsete ajaloolaste jaoks perifeer-
seks teemaks. Baltimaade ajaloo teadusliku käsitluse avanud baltisaksa ajaloo-
kirjutus vaatles 18. sajandit kui tagasiminekut, seda eelkõige Põhjasõja laastavate
tagajärgede tõttu. Oma osa etendas 19. sajandi lõpu venestusaeg ja poliitiliste pin-
gete teravnemine, mis määras ära ka baltisaksa ajaloolaste suhtumise Vene võimu
18. sajandil. Põhjasõjale järgnenud poliitilist olustikku Baltikumis iseloomustati
kui väiklast rivaalitsemist ning üksteise umbusaldamist [Arbusow, 1918:229-
230]. Kuigi eesti rahvusliku ajalookäsitluse seisukohad läksid baltisaksa ajaloo-
laste vaadetest oluliselt lahku, ei puudutanud see hinnangut 18. sajandile ja sel-
le uurimisele. Villem Reiman tõi eesti ajalookirjutusse käsitluse *vanast heast
Rootsi ajast*, mis vastandus trööstitule 18. sajandile Vene võimu all. Rootsi aja
idealiseerimine koos kontseptsiooniga *kahest ajaloolisest vaenlasest* andis
Põhjasõjas toimunud võimuvahetusele katastroofi tähenduse [Reiman, 1920:
104]. Negatiivne üldhinnang 18. sajandi käsitlemisel jäi püsima ka edaspidi
[Laur, 2000a:150]. Mahukas “Eesti rahva ajaloo” iseloomustasid 18. sajandi
talurahva olukorda alapealkirjad “Eesti rahvas langeb pärisorjusesse ja Pärisorjuse
aeg” [Eesti rahva ajalugu, 1935:1309,1331]. 1946. aastal eksiilis välja antud
Eesti ajaloo ülevaade nimetas 18. sajandit “pimeduse sajandiks: Lahkumine
Põhja-, s.o ka Lääne-Euroopa kultuuripiirkonnast ja ühinemine pool-aasialiku
Venemaaga aitab küll uuesti jalule seada autonoomse aadliriigi, aga võetuna
Venemaa hõlma alla veereb elu selles tüki maad tagasi või jääb parimais
juhtumeis seisma” [Ojamaa jt, 1946:195].

Koos nõukogude okupatsiooniga muutusid ka hinnangud Vene ajale Eestis. 1955.
aastal ilmunud kolmeköitelise “Eesti NSV ajaloo” esimene osa käsitles Eesti
ala liitmist Venemaaga *Vene võimu taaskehtestamisena* kui vastutulekut eesti
rahva kauaaegsetele huvidele. Viidatakse ka Venemaa ajaloolisele õigusele
siinsele territooriumile. Balti erikorda vaadeldi kui “pärisorjusliku reaktsiooni
ja mahajäämuse kehastust” [Eesti NSV ajalugu..., 1952:109]. Positiivsena
rõhutati Vene võimu kehtestamisega alanud kahesaja-aastast rahupõlve.
Argumentide puudus sundis toetuspunkti leidma kas või väites, et tänu
ühendamisele Venemaaga sai eesti rahvas võimaluse käsikäes vene rahvaga
asuda võitlusse tsarismi vastu. Viimatinimetatud seisukohta võis kohata veel
1976. aastal ilmunud Eesti ajaloo kõrgkooliõpikus [Eesti NSV ajalugu,
1976:156]. Nõnda jäi 18. sajandi Eesti ajaloo uurimine pikaks ajaks sõltuvaks
poliitilistest tõmbetuultest.

Pean tunnistama, et ka minu kokkupuuted 18. sajandi ajalooga tekkisid alles
pärast ülikooli lõpetamist. Diplomitöö kirjutasin talude päriksostmise algu-
sest 19. sajandi keskpaiga Mulgimaal ning lootsin selle teemaga jätkata ka as-
pirantuuris. Võimalik, et taoline teema ei olnud tollastes poliitilistes oludes
vastuvõetav. Ka oli mu tulevaseks õppejõu kohustuseks kavandatud NSV Liidu
ajaloo vanema perioodi ajaloo lugemine, kuhu 19. sajand enam ei mahtunud.
Nii tegigi prof Sulev Vahtre kandidaaditöö juhendajana ettepaneku võtta käsile
toosama *tundmatu sajand* ning valgustatud absolutismi temaatika, mis oli aktu-

aalne nii Lääne ajalookirjutuses kui ka toonases Nõukogude Liidus, kus selles valdkonnas tavatuna olid puhkenud teaduslikult täiesti arvestatavad diskussioonid. Siit tõstatus probleem, kas ja mil määral võib Venemaa poliitikat 18. sajandi teisel poole Baltikumis seostada üleeuroopalise valgustatud absolutismi poliitikaga.

Ajaloolaste ringkondades puudus pikka aega ühtne arusaam valgustatud absolutismi poliitika põhjustest ja eesmärkidest. Pärast Teist maailmasõda levis arusaam valgustatud absolutismist kui demagoogiast, mida valitsejad kasutasid oma võimu kindlustamiseks ja laiendamiseks. Prantsuse ajaloolase Georges Lefèbvre'i sõnul "pakkus füsiokraatide ja filosoofide valgustatud absolutism valitsejatele ideid, mida nad ühendasid oma traditsioonilise poliitikaga vaid sel määral, kui need näisid sobivat nende riikide rikkuse ja nende eneste võimu suurendamiseks" [Lefèbvre, 1974:81]. Ka saksa ajaloolane Fritz Hartung nimetas valgustatud absolutismi õpetust vaid "huvitavaks ideemänguks", mille praktiline mõju jäi tähtsusetuks [Hartung, 1955]. Hea vastuvõtu leidis see tees nõukogude ajalookirjutanduses, kus keisrinna Katariina II reforme iseloomustati kui manipuleerimist avaliku avamusega.

Valitsemispraktikas seondu valgustatud absolutism mitmes Euroopa riigis (Preisimaa, Austria, Venemaa) 18. sajandi keskpaigas ja teisel poolel läbiviidud ulatuslike ümberkorraldustega, mis integreeris senist seisuslikult ülesehitatud ühiskonda. Gerhard Oestreich on seda integratsiooniprotsessi iseloomustanud mõistega *Sozialdisziplinierung* [Oestreich, 1969:188]. See hõlmas nii riiki, kirikut, majandust, kooli kui ka sõjaväge alates ühiskonna ladvikust kuni kõige alamate ühiskonnakihtideni välja, olles suunatud mitte niivõrd inimese allutamisele, kui tema toetamisele ühiskonnas. Valgustatud absolutismi teoreetikud saksa kameralistid Samuel Pufendorf ja Christian Thomasius rõhutasid, et inimene saab õnnelikuks vaid ühiskonnas ning iga ühiskonna valitsemine peab taotlema üldise heaolu eesmärki. Halle ülikooli professor Christian Wolff pani aluse nn politseiteadusele, mille all 18. sajandil mõisteti õpetust ühiskonna elu seaduslikust korraldamisest. Wolffi sõnul kaasnes valitsejal koos õigusega valitseda ka kohustus valitseda, tagamaks alamate üldine hüveolu (*gemeine Wohlfahrt, vitae sufficientia*). Friedrich II nimetas monarhi riigi esimeseks teenriks (*Le Roi est le premier serviteur de l'État*) [Roscher, 1874:380]. Riik pidi hoolitsema oma alamate eest hällist hauani, selle eelduseks peeti hästi korraldatud seaduste süsteemi. Saksa kameralismiga saavutas riiklik reglementeerimine oma haripunkti. Ei olnud eluvaldkonda, mida poleks kõrgemalt poolt määratletud üksikasjaliste seaduste, korralduste või ettekirjutustega.

Vastupidiselt saksa kameralistika reglementatsioonile nõudsid prantsuse füsiokraadid majanduse liberaliseerimist. Füsiokraatide hüüdlauseks sai "Laske teha! Laske käia!" (*laissez faire, laissez passer*). Füsiokraadid nõudsid üksikisikule majanduselul vaba toimetamisõiguse andmist ning igasuguse riikliku sekkumise keelamist, uskudes, et üksikisikute egoism ja omakasupüüie tasakaalustavad isenesest majanduselu. Erinevalt kaubandusele ja töödusele peamist tähtsust osutavast merkantilismist pöörasid füsiokraadid peatahelepanu põllumajandusele, mis oli nende arvates ainus tõelist puhastulu andev majandussfäär ümbertöötlevate ja vahendavate majandusalade kõrval [Laur jt, 2003:158].

Vaatamata täiesti erinevale majandusnägemusele, jõudsid kameralistid ja füsiokraadid mitmetel puhkudel ühistele seisukohtadele. Mõlemad voolud pidasid olu-

liseks talurahva kaitset. Kui kameralistide tähelepanu pälvis talurahvas suurima ühiskonnakihina, siis füsiokraatide jaoks oli tegemist tootjate klassiga (*classe productive*), kelle heaolust sõltus ka teiste seisuste hüveolu. Sarnane oli ka kameralistide ja füsiokraatide nägemus riigivõimu osalusest majanduses. Seniste majandusprivileegide ja reglementatsioonide kaotamine ning maaomandi maksustamine (*impôt unique*) eeldas ka füsiokraatide jaoks tugevat majandusse sekkuvat riigivõimu.

Jälgides Eesti 18. sajandi ajalugu valgustatud absolutismi seisukohalt asetuvad Vene keskvalituse ja Balti kubermangude suhted sootuks uudsesse valgusesse. Vene impeeriumi koosseisus säilisid siinsel alal ulatuslikud erioigused, mis on tuntud Balti erikorra (*отзейский особый порядок, der baltische Landesstaat, status provincialis*) nime all. Eesti- ja Liivimaal jäi püsima luteri usk, kehtima senine õiguskorraldus ja saksakeelne asjaajamine. Vene võimu alla minek ei muutnud ka siinseid valitsemisstruktuure ning Põhjasõja-järgseid aastakümneid võib teataval määral vaadelda Rootsi aja jätkuna. See oli ajajärk, mida iseloomustas Vene ukaasides Baltikumi jaoks sisalduv märge *быть по сему как сие было при Свейском времени* – jäägu nii nagu see oli Rootsi ajal. Alates 1740. aastatest Balti privileegide laiendamine peatus. Kuigi juba olemasolevaid õigusi ei piiratud, esitati taotlusi nende reviderimiseks.

Olulisest suunamuutusest Balti poliitikas saame kõnelda alles pärast Katariina II troonile asumist 1762. aastal. Just sellel perioodil vastandusid kõige selgemalt kaks erinevat suunda siinses poliitikas: ühelt poolt baltisaksa aadli ja linnakodanikkonna püüd Balti erikorda säilitada ja laiendada, teiselt poolt Vene võimude soov integreerida Baltimaad senisest tihedamalt ülejäänud riigiga [Laur, 2000b:15]. Katariina II oli sunnitud juba õige pea tõdema Balti erikorrast tulenevaid takistusi. Nii lubas kehtiv kord rentida Eesti- ja Liivimaal kroonumaid üksnes Balti matrikلياadlile. Baltikumi linnadele antud privileegid tõkestasid keisrinna kaubanduspoliitikat. Eesti- ja Liivimaal kehtiv sisekubermangudest erinev maksukorraldus ei suutnud katta siin viibiva arvuka sõjaväe ülalpidamise kulusid. Kõigele lisaks tekitasid balti aadli privileegid kadedust Vene aadlis, kelle huvidega pidi keisrinna paratamatult arvestama. Pealegi oli Balti erikord juba olemuslikult vastuolus nii keisrinna absolutistlike valitsemistaotluste, kui ka eesmärgiga kehtestada uus, valgustuspõhimõtetest kantud kogu riiki hõlmav õiguskorraldus.

Katariina II valitsusajaks oli Balti küsimus muutunud välispoliitilisest sisepoliitiliseks. Kahtlus, kas Balti kubermangud jäävad kestvalt impeeriumi koosseisu, oli hajutatud. Üha rohkem tõusis päevakorda Läänemere provintside senise eriseisundi ebapraktilisus Vene riigis. Katariina II poliitika uudsus seisnes selles, et erinevalt oma eelkäijatest rakendas ta nii Balti kubermangud kui ka riigi teised autonoomsed piirkonnad kindlamalt kui kunagi varem impeeriumi teenistusse, tegemata “võõramaistele” provintsidele mingeid mõõndusi [Laur, 2002:97-100].

Senini oli nimetatud suhteid vaadeldud enamasti keskvalitsuse ühesuunalise survepoliitikana, mis asetas siinsed rüütelkonnad ja linnad tõrjuvasse kaitseisundisse [Wedel, 1944:115; Sacke, 1944:28]. Keskvõimu surve Balti erikorrale oli 1760ndatel aastatel siiski märksa ettevaatlikum ja kindlasti loominguilisem kui seda paarkümmend aastat hiljem asehalduskorra kehtestamisel. Iseloomulik on nende rootsiaegsete seaduste kasutamine Baltikumis, mis tugevdasid kesk- võimu, minemata vastuollu kinnitatud privileegidega [Laur, 1993:252]. Keis-

rinna ei olnud sealjuures huvitatud niivõrd Balti erikorra piiramisest kui valgustuslikest reformidest. Pinnas taolisteks ümberkorraldusteks oli Baltikumis märksa soodsam kui Venemaa sisekubermangudes. Eesti- ja Liivimaa olid oma ühiskonnakorralduselt lähedased Kesk-Euroopa riikidele, eelkõige Saksamaale, kellega Baltikum moodustas ühise kultuuripiirkonna. Kuigi uuendusi sooviv kiht, kes Katariina II poliitikaga kõhklematult kaasa läks, ei saanud ka siinses ühiskonnas olla kuigi arvukas, oli see siiski mõju omav ning näitas valmisolekut märksa radikaalsemateks ümberkorraldusteks kui seda kavandas keskvalitsus.

Kokkuvõtvalt võib väita, et 18. sajandi Eesti ajaloo senisest põhjalikum ning Euroopas toimunud protsessidega integreeritum uurimine on senist käsitlust kui ühest kõige tumedamast ja raskemast ajajärgust kogu ajaloos oluliselt korrigeerinud. Kuigi talupoegade isiklik sõltuvus mõisnikust kasvas, pole samas mingit alust näha mingit drastilist tagasiminekut ning talupoegade olukorda pärast Põhjasõda võib hinnata ligilähedaseks olukorraga, mis valitses enne Rootsi-aegset reduktsiooni. Valgustusliikumise üheks olulisemaks teeneks Baltikumis oli ärgitustöö talurahva olukorra parandamiseks [Laur, 2003:86]. Katariina II valgustuslike reformide tulemusena hakkas Baltikumis senise seisuslikult valitsetava ühiskonna asemele järk-järgult kujunema absolutistliku riigivõimu poolt valitsetav integreeritud alamate ühiskond. Koos talurahva emantsipatsiooniga algas ka Venemaa riigi ja baltisaksa aadli rivaalitsemine kohaliku talurahva poolehoiu pärast, mis tähistas eestlaste riigialama seisusse tõusmise järk-järgulist algust [Laur, 2002:117-118]. Liberaalse ühiskonnani jäi 18. sajandi lõpu Baltikumis veel pikk tee käia.

KIRJANDUS

Arbusow, L. sen. 1918. Grundriss der Geschichte Liv-, Est- und Kurlands. Riga, 372 lk.

Eckardt, J. 1868. Anno 1765. Eckardt, J. Die baltischen Provinzen Russlands : politische und culturgeschichtliche Aufsätze. Leipzig, 122-154.

Eesti NSV ajalugu. 1, Kõrgkoolide õpik. 1976. Toim. K. Siilivask. Tallinn, 316 lk.

Eesti NSV ajalugu kõige vanemast ajast tänapäevani. 1952. Toim. G. Naan. Tallinn, 483 lk.

Eesti rahva ajalugu. 3. kd. 1935. Toim. J. Libe, A. Oinas, H. Sepp, J. Vasar. Tartu.

Hartung, F. 1955. Der Aufgeklärte Absolutismus. Historische Zeitschrift, 180, 15-42.

Laur, M. 1993. Der Einfluß schwedischer Gesetze auf das politische Leben des Ostbaltikums im 18. Jh. Die schwedische Ostseeprovinzen Estland und Livland im 16-18. Jahrhundert. Hrsg. von A. Loit, H. Piirimäe. Stockholm, 251-256. (Acta Universitatis Stockholmiensis. Studia Baltica Stockholmiensia; 11).

Laur, M. 2000a. Deutschbalten in der estnischen nationalen Historiographie nach dem Zweiten Weltkrieg. Erfahrungen der Vergangenheit. Deutsche in Ostmitteleuropa in der Historiographie nach 1945. Lublin-Marburg, 147-152. (Tagungen zur Ostmitteleuropa-Forschung; 9).

- Laur, M. 2000b. Eesti ala valitsemine 18. sajandil (1710-1783). Tartu, 288 lk.
- Laur, M. 2002. Tsaaride aeg : Venemaa ajaloost 1917. aastani. Tallinn, 160 lk.
- Laur, M. 2003. Der Bauernlandverkauf in Livland - das entscheidende Kapitel der Bauernbefreiung im 19. Jahrhundert. Zeitschrift für die Ostmitteleuropaforschung 52, 1, 85-94.
- Laur, M., Pirsko, P. 2002. Die Aufhebung der adligen Bevormundung in Liv- und Estland. Eine Besonderheit der Bauernbefreiung im Russischen Reich. Beiträge zur Geschichte des Ostseeraumes. Hrsg. von H. Wernicke. Hamburg, 103-118. (Greifswalder historische Studien; 4).
- Laur, M., Tannberg, T., Piirimäe, H. 2003. Eesti ajalugu IV, Põhjasõjast pärisorjuse kaotamiseni. Tegevtoim. M. Laur; peatoim. S. Vahre. Tartu, 311 lk.
- Lefèbvre, G. 1974. Der Aufgeklärte Despotismus. Der Aufgeklärte Absolutismus. Hrsg. von K. O. Freiherrn von Aretin. Köln, 77-88. (Neue wissenschaftliche Bibliothek; 67).
- Oestreich, G. 1969. Geist und Gestalt des frühmodernen Staates. Berlin.
- Ojamaa, M., Varmas A., Varmas, T. 1946. Eesti ajalugu. Stockholm, 438 lk.
- Reiman, V. 1920. Eesti ajalugu. Toim. H. Sepp. Tallinn, 141 lk.
- Roscher, W. 1874. Geschichte der National-Ökonomik in Deutschland. München.
- Sacke, G. 1944. Livländische Politik Katharinas II. Quellen und Forschungen zur Baltischen Geschichte. 5, Riga-Posen, 26-72.
- Wedel, H. von. 1935. Die Estländische Ritterschaft vornehmlich zwischen 1710 und 1783. Das erste Jahrhundert russischer Herrschaft. Königsberg-Berlin.