

*Māris Zunde*

# PAR RADIOAKTĪVĀ OGLEKĻA ( $^{14}\text{C}$ ) DATĒŠANAS METODI UN TĀS PIELIETOŠANU ARHEOLOĢIJĀ

## IEVADS

Senāka laikmeta, t.i., akmens, bronzas un dzelzs laikmeta arheoloģisko objektu absolūtai datēšanai mūsdienās bieži izmanto radioaktīvā oglekļa ( $^{14}\text{C}$ ) datēšanas metodi. Arheoloģisko atradumu datēšanai šo metodi finansiālo iespēju robežās izmanto arī mūsu – Latvijas arheologi. Piemēram, nesen mēs varējām lasīt informāciju par 2010. gadā ar  $^{14}\text{C}$  metodi datētu Kurzemes pusē atrastu senu ziemeļbrieža raga priekšmetu – t.s. Lingbi cirvi, kurš, kā izrādās, attiecināms uz laikposmu no 10 500. līdz 10 047. g. pr. Kr.<sup>1</sup> Specializētas radioaktīvā oglekļa datēšanas laboratorijas Latvijā jau ilgāku laiku nav, tāpēc mūsdienās seno priekšmetu vecuma noteikšanai to materiāla paraugus nogādā uz kādu no radioaktīvā oglekļa datēšanas laboratorijām citās valstīs (piemēram, Igaunijā, Somijā vai Vācijā).

Vēsturiskajam priekšmetam noteikto datējumu laboratorija parasti atsūta īsas rakstiskas atskaites veidā. Atbilde var būt uzrādīta, piemēram, šādi (angļu valodā):

*$^{14}\text{C}$  age: 3200±60; dendrochron. cal. age: 3550±120; vai arī šādi:*

*Ta-2720: 3200±60BP*

*68.2% probability*

*1530BC (68.2%) 1410BC*

*95.4% probability*

*1620BC (93.7%) 1370BC*

*1340BC (1.7%) 1310BC.<sup>2</sup>*

Pirmo reizi saņemot šādu informāciju, šķiet, ne vienam vien ir radušies jautājumi: kāds galu galā ir nodotā parauga faktiskais datējums, un kāpēc uzrādītā atbilde ir tik plaša un it kā nenoteikta? Dažkārt vēl citas laboratorijas ir atsūtījušas savus reklāmas materiālus ar

piedāvājumu veikt "AMS vai radiometriskās datēšanas pakalpojumus". Ko šie metožu apzīmējumi īsti nozīmē? Latviešu valodā izdotajās zinātniskajās publikācijās tieši par arheoloģijas tēmu atbildes uz šiem jautājumiem nav izdevies atrast, toties tās plašā skaidrojumā ir sniegtas, piemēram, angļu un vācu, mazākā apjomā arī krievu valodā.

Pieņemot, ka atbildes uz minētajiem jautājumiem, kā arī īss skaidrojums par radioaktīvā oglekļa datēšanas metodes principiem varētu interesēt vēl citus Latvijas senās vēstures pētniekus, kuri šo izpētes lauku vēl tikai iepazīst vai apgūst, šo rindu autors ir centies daļu no publikācijās iegūtās informācijas apkopot šajā rakstā. Tātad tā mērķis ir a) palīdzēt Latvijas senvēstures pētniekiem labāk izprast šīs datēšanas metodes pamatus un iespējas, b) īsi paskaidrot par datējamo paraugu sagatavošanas prasībām, c) sniegt īsu skaidrojumu par iegūto datējumu kalibrēšanu un tās nepieciešamību, kā arī d) palīdzēt saprast no radioaktīvā oglekļa datēšanas laboratorijām saņemto informāciju un veikt tās interpretāciju.

Rakstā, iespējams, varētu trūkt radioaktīvā oglekļa datēšanas metodē ieviesto un iegūto jaunāko sasniegumu raksturojums. Tāpēc autors cer, ka šis raksts mudinās, piemēram, fizikas speciālistus par šo datēšanas metodi sagatavot plašāku un attiecībā uz tehniskiem un fizikāliem jautājumiem precīzāku publikāciju latviešu valodā.

## RADIOAKTĪVĀ OGLEKĻA DATĒŠANAS METODE UN TĀS PAMATPRINCIPI

Radioaktīvā oglekļa datēšanas metode ir nogulumu un arheoloģisko objektu absolūtā vecuma noteikšanas metode pēc radioaktīvā oglekļa izotopa  $^{14}\text{C}$  daudzuma oglekli saturošos materiālos, kā arī augu un dzīvnieku atliekās, piemēram, koksnē, oglēs, riekstu čaumalās, sēklās, kūdrā, kaulos, gliemju čaulās, kaļķakmens iežos, karbonizētos pazemes ūdeņos.<sup>3</sup> Metodi ir izstrādājis amerikāņu fizikālķīmiķis V. F. Libijs (*W. F. Libby*) 20. gs. 40. gadu otrajā pusē.

Lasītājus, kuri vairāk interesējas par Latvijas un citu valstu vēsturi, diez vai varētu saistīt, bez tam arī šajā žurnālā faktiski neiederētos metodes skaidrojuma daļa, kuras istā vieta drīzāk būtu kādā kodolfizikas mācību grāmatā. Tomēr raksta sākumā nepieciešams kaut pavisam īsi atgādināt skolā mācīto gan par oglekli, gan par tā izotopiem, jo bez šīm pamatzināšanām izprast radioaktīvā oglekļa datēšanas metodes principus nav iespējams.

Ogleklis (elementa simbols C) ir ķīmiskais elements, kurš dabā ir sastopams arī tīrā veidā (dimants un grafiīts), taču pārsvarā tas ir sastopams ķīmisko elementu savienojumos – visās organiskajās vielās, minerālos (karbonātos un hidrokarbonātos) un oglekļa dioksīdā. Tāpat kā vairākums dabā esošo ķīmisko elementu, arī ogleklis sastāv

no izotopu maisījuma. Izotopi ir attiecīgā ķīmiskā elementa atomi ar atšķirīgu atommasu, kuru nosaka atomu kodolā esošo neitronu skaits. Oglekļa atoma kodols sastāv no 6 protoniem (protonu skaits ikviena ķīmiskā elementa atomu kodolā ir konkrēts un nemainīgs, tas nosaka pašu ķīmisko elementu) un 6, 7 vai 8 neitroniem. Atkarībā no protonu un neitronu kopīgā skaita atoma kodolā, t.i., no tā atommasas, ir sastopami trīs oglekļa izotopi:  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  un  $^{14}\text{C}$ . To daudzums ogleklī ir atšķirīgs: no oglekļa izotopiem 99% veido  $^{12}\text{C}$ , ap 1% –  $^{13}\text{C}$ , bet mūs visvairāk interesējošais  $^{14}\text{C}$  veido tikai 1/10<sup>12</sup> daļu no visu oglekļa izotopu kopskaita. Šo daudzumu labāk ilustrē salīdzinājums, ka vienā tonnā oglekļa ir tikai 1 mikrograms  $^{14}\text{C}$  izotopu. Protonu un neitronu skaita attiecība nosaka, vai attiecīgais izotops ir stabils vai nestabils, t.i., radioaktīvs.  $^{12}\text{C}$  un  $^{13}\text{C}$  ir stabili izotopi, bet  $^{14}\text{C}$  – nestabils, tārad radioaktīvs izotops (tā radioaktivitāte gan ir ļoti vāja). Tāpēc šo oglekļa izotopu mēdz dēvēt arī par radioaktīvo oglekli jeb radiooglekli (angliski – *radiocarbon*), ievērojami retāk to angliski sauc arī par *carbon fourteen* (ogleklis 14). Kā jau norāda pats stabilo izotopu apzīmējums, to kodola uzbūve laika gaitā nemainās. Turpretim nestabilie izotopi, izstarojot enerģiju (pēc tam tā pārmainās citā enerģijas stāvoklī), savus pāri esošos neitronus zaudē, līdz ar to pārvešoties par stabilajiem izotopiem (konkrēti radioaktīvie  $^{14}\text{C}$  atomi pārveidojas par stabilajiem  $^{14}\text{N}$  atomiem). Ja attiecīgajā vidē netiek pievadīti klāt citi nestabilie izotopi, laika gaitā to skaits un līdz ar to arī šo izotopu skaita attiecība pret stabilo izotopu, piemēram,  $^{12}\text{C}$ , skaitu pakāpeniski samazinās.

Noskaidrots, ka nestabilo jeb radioaktīvo atomu izzušanas process noris ar visai konstantu ātrumu. Oglekļa radioaktīvo atomu sākotnējais skaits samazinās uz pusi aptuveni 5730 gados. Šo laikposmu apzīmē par oglekļa radioaktīvo *atomu pussabrukšanas periodu*.

Dabā starp  $^{14}\text{C}$  rašanos un izzušanu ir izveidojies aptuvenš, dinamisks līdzsvars. Izzudušo nestabilo izotopu vietā arvien veidojas jauni nestabilie  $^{14}\text{C}$  izotopi. Tie rodas atmosfēras augšējos slāņos, savstarpēji iedarbojoties ar enerģiju bagātā kosmiskā starojuma veidotajiem neitroniem un atmosfēras slāpekļa sastāvā esošajiem atomiem ( $^{14}\text{N}$ ). Pēc izveidošanās  $^{14}\text{C}$  atomi strauji savienojas ar skābekļa atomiem, veidojot oglekļa dioksīdu, kuru ķīmiski ir grūti atšķirt no oglekļa dioksīdiem, kas satur kādu no abiem pārējiem (stabilajiem) oglekļa izotopiem. Oglekļa dioksīds sajaucas ar atmosfēru, izšķīst okeānu ūdeņos un fotosintēzes procesā un pēc tam pa barības ķēdi ienāk visu augu, dzīvnieku un, protams, arī cilvēku organismā. Tādējādi arī to oglekļa radioaktīvo un stabilo atomu skaita attiecība, kurus sevī uzņēma augi, dzīvnieki un cilvēki, ir gandrīz konstanta.

Jebkurš organisms, pārstājot funkcionēt, līdz ar elpošanas un barības vielu uzņemšanas pārtraukšanu izbeidz uzņemt arī jaunus oglekļa

radioaktīvos izotopus. Vienpusēji turpinoties tikai iepriekš uzņemto  $^{14}\text{C}$  izotopu sabrukšanas procesam, faktiski no šī brīža sākas organisma dzīves laikā uzņemto  $^{14}\text{C}$  izotopu skaita pakāpeniska samazināšanās. Nosakot organisma paliekās atlikušo oglekļa nestabilo izotopu daudzumu, to salīdzinot ar šo izotopu koncentrāciju mūsdienu organismos un zinot oglekļa radioaktīvo atomu pussabrukšanas perioda ilgumu, var aptuveni aprēķināt organisma atmiršanas sākuma laiku, t.i., tā aptuvenu absolūto vecumu. Kā tiks parādīts tālāk, ar iepriekš ļoti vienkāršoti aprakstīto datēšanas metodi noteikto datējumu precizitāti būtiski ietekmē vairāki faktori. Ja šo faktoru ietekmes nebūtu, datēšanas principu varētu precīzi ilustrēt ar šādu piemēru: konstatējot, ka kāda sena organiskas izcelsmes materiāla paraugā izotopu  $^{14}\text{C}$  daudzums, to salīdzinot, piemēram, ar izotopu  $^{12}\text{C}$  daudzumu, laika gaitā ir samazinājies precīzi uz pusi, t.i., 50% apjomā, varētu secināt, ka šo radioaktīvo atomu sabrukšana sākusies pirms aptuveni 5730 gadiem, bet, ja izotopi  $^{14}\text{C}$  saglabājušies vairs tikai 25% apjomā no to sākotnējā daudzuma, tad no šī notikuma aizritējuši jau  $5730 \times 2 = 11\,460$  gadi. Varētu šķist, ka, nosakot organiskas izcelsmes materiālā saglabājušos izotopu  $^{14}\text{C}$  daudzumu, tā vecumu pēc šāda principa var pietiekami precīzi aprēķināt, izmantojot pat parasto galda kalkulatoru! Taču patiesībā šis aprēķins nav tik vienkāršs – un iegūtais datējums būtu neprecīzs: pieņēmums, ka izotopu attiecība  $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$  vai  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  ogleklī laika gaitā bijusi nemainīga, nav gluži pareizs, jo, kā jau iepriekš minēts un kā būs īsumā paskaidrots arī tālāk, gan šo attiecību, gan datējumu precizitāti kopumā ietekmē vairāki būtiski faktori.

## RADIOAKTĪVĀ OGLEKĻA MĒRĪŠANA

Pirms aplūkojam datējumu ietekmējošos faktoros, ir svarīgi īsumā iepazīt galvenās radioaktīvā oglekļa mērīšanas metodes. Radioaktīvā oglekļa datēšanas laboratorijas mūsdienās principā izmanto vienu no divām galvenajām radioaktīvā oglekļa mērīšanas metodēm, un klientiem, piemēram, arheologiem, pašiem ir jāizvēlas, kādas laboratorijas pakalpojumus, t.i., kādas radioaktīvā oglekļa mērīšanas metodes pielietojumu, viņi grib vai var atļauties izmantot. Iepazīstot šīs metodes, ikvienam būs arī labāk saprotami termini no citām radioaktīva oglekļa datēšanas laboratorijām saņemtajos reklāmu izdevumos.

Vecākā no abām metodēm ir t.s.  *$^{14}\text{C}$  konvencionālā mērīšanas metode* (nosaukums atvasināts no angļu valodas vārda *conventional* – vispārpieņemts, parasts). Šo radioaktīvā oglekļa mērīšanas metodi līdzīgā nosaukuma dēļ nedrīkst sajaukt ar radioaktīvā oglekļa datēšanas rezultātu – konvencionālo  $^{14}\text{C}$  vecumu, par kuru runa būs tālāk (102. lpp.). Lai šos terminus nejauktu, ir bijis ieteikums izotopu konvencionālo mērīšanas metodi dēvēt par radiometrisko mērīšanas metodi, taču

šo terminu plaši nelieto. Tam acīmredzot ir zināms pamatojums: pastāv cits ļoti līdzīgs termins – *radiometriskā datēšana* jeb *radioaktīvā datēšana*, ar kuru apzīmē visas datēšanas metodes, kuru pamatā ir attiecīgajā vielā atlikušo radioaktīvo izotopu daudzuma salīdzināšana ar to sākotnējo daudzumu (radioaktīvā oglekļa datēšanas metode ir viena no radiometriskās datēšanas metodēm). Tātad reklāmas izdevumos uzrādītais piedāvājums veikt radiometrisko datēšanu varētu nozīmēt, ka attiecīgā laboratorija veic ne tikai organiskas, bet arī dažu neorganiskas izcelsmes materiālu datēšanu. Šo materiālu radioaktīvo izotopu ļoti ilgā pussabrukšanas perioda dēļ to datējums galvenokārt varētu interesēt ģeologus.

Pēc  $^{14}\text{C}$  konvencionālās mērīšanas metodes radioaktīvo izotopu līdzšinējās sabrukšanas pakāpi materiālā nosaka, noskaidrojot šo izotopu turpmāko sabrukšanas gadījumu skaita noteiktā laikposmā (nosaka beta daļiņu skaitu, kas rodas,  $^{14}\text{C}$  sabrukšanas procesam turpinoties). Pēc šī skaita aprēķina parauga atlikušās radioaktivitātes intensitāti jeb aktivitāti un, to savukārt salīdzinot ar zināmo aktivitāti, kas noskaidrota jaunam – mūsdienu organiskā materiāla paraugam, nosaka senā parauga vecumu. Lai pēc iespējas izvairītos no fona radiācijas un cita radioaktīvā piesārņojuma, kas nelabvēlīgi ietekmē datēšanas rezultātu precizitāti, laboratorijas savulaik no cietā oglekļa radioaktīvo izotopu noteikšanas pakāpeniski pārgāja uz gāzveida, vēlāk arī uz šķīdumā (scintilatorā) esoša oglekļa radioaktīvo izotopu daudzuma noteikšanu. To zināt ir lietderīgi tāpēc, ka parauga sagatavošanas veids ne vien zināmā mērā ietekmē datēšanas precizitāti, bet no tā ir atkarīgs datēšanai sagatavojamais paraugu daudzums (svars) un arī datēšanas izmaksas. Piemēram, aptuveni pirms 20 gadiem (to-reizējā metodes attīstības fāzē) bija nepieciešams, lai paraugs, kuru sadedzinot iegūst gāzi vai arī oglekli iesaista šķīduma sastāvā, saturētu aptuveni 5–10 g oglekļa (atbilstošais parauga svars, kas atkarīgs no materiāla un kurā ietilpst minētie 5–10 g oglekļa, parādīts tabulā). Tanī pašā laikā dažas laboratorijas jau bija izveidojušas *maza apjoma paraugu datēšanas* sistēmas, taču tajās parauga radioaktīvā oglekļa noteikšanas laiks palielinājās no parasti nepieciešamās vienas vai divām dienām līdz apmēram vienam – diviem mēnešiem. Mūsdienās šis laika posms gan varētu būt īsāks.

Otra radioaktīvā oglekļa mērīšanas metode, kas ir jaunāka (radīta 20. gs. 80. gados) un reizē modernāka, ir *akselatora maspektrometrija (AMS)*. Šī metode ļauj tieši noteikt  $^{14}\text{C}$  atomu skaitu vai tā proporciju attiecībā pret  $^{13}\text{C}$  un  $^{12}\text{C}$  atomiem. Salīdzinājumā ar iepriekš minēto  $^{14}\text{C}$  konvencionālo mērīšanas metodi šī metode ir precīzāka, turklāt ar to aptuveno absolūto vecumu var noteikt ievērojami mazākiem paraugiem (tab.). Tas nozīmē, ka no maza priekšmeta, kurš būtu iznīcināts, to datējot ar  $^{14}\text{C}$  konvencionālo mērīšanas metodi,

AMS datēšanas metodes vajadzībām daudzos gadījumos var sagatavot pietiekamas kvalitātes paraugu, lielāko daļu priekšmeta saglabājot nebojātu. Tas ir īpaši svarīgi, datējot vērtīgas senlietas un mākslas priekšmetus.  $^{14}\text{C}$  mērīšanai ar AMS metodi ir arī visai augsta ražība: vienas vai divu dienu vietā procesa izpildlaiks aizņem tikai dažas stundas. Par šīs metodes trūkumu varētu uzskatīt iekārtas iegādes un uzstādīšanas lielās izmaksas (nepieciešams visai dārgais masspektrometrs), kā arī salīdzinoši augstās tās lietošanas un apkopes izmaksas. Turklāt ļoti precīzai jābūt paraugu pirmapstrādei, lai izvairītos pat no zema līmeņa piesārņojuma: tas var izraisīt ievērojamas kļūdas datējumā. Pirmapstrādes procesā jāiegūst atsevišķa organiskā viela, kura jāreducē līdz tīram ogleklim.

Tabula

DAŽĀDĀM  $^{14}\text{C}$  DATĒŠANAS METODĒM NEPIECIEŠAMO  
DAŽĀDA MATERIĀLA PARAUGU DAUDZUMA SALĪDZINĀJUMS<sup>4</sup>

Materiāls	Konvencionālā metode (g)	Maza apjoma paraugu datēšana (g)	AMS (g)
Koksne (vesela)	10–25	0,1–0,5	0,05–0,1
” (celuloze)	50–100	0,5–1,0	0,2–0,5
Kokogle (un citi pār-ogļojušies materiāli)	10–20	0,1–0,5	0,01–0,1
Kūdra	50–100	0,5–1,0	0,1–0,2
Tekstilija	20–50	0,05–0,1	0,02–0,05
Kauls	100–400	2,0–5,0	0,5–1,0
Gliemju čaula vai gliemežvāks	50–100	0,5–1,0	0,05–0,1
Nogulumi, augsne	100–500	2,0–10,0	0,5–25

Ļoti senos organiskas izcelsmes materiālos izotopi  $^{14}\text{C}$  var būt saglabājušies tik niecīgā skaitā, ka tos konstatēt un fiksēt ir ļoti grūti vai pat neiespējami (tos grūti izšķirt no fona, kuru rada, piemēram, mūsaiķu dabiskās radiācijas piesārņojums). Tādējādi pastāv seno organisko materiālu absolūtā vecuma robeža, līdz kurai radioaktīvā oglekļa datēšanas metodes pielietojums vispār ir iespējams. Iz-mantojot  $^{14}\text{C}$  konvencionālo mērīšanas metodi, šī vecuma robeža ir aptuveni 40 000 gadu pirms mūsdienām. Lietojot AMS metodi, datējamā objekta vecuma robeža var atvirzīties pagātnē līdz pat aptuveni

50 000 gadiem pirms mūsdienām. Tiesa, mūsdienās vēl ir izstrādāts izotopu “bagātināšanas” (*isotopic enrichment*) paņēmieni, ar kuru iespējams datēt pat līdz 75 000 gadus senus objektus. Šis gan ir darbietilpīgs un visai dārgs paņēmieni, kura izmantošanai nepieciešams sagatavot salīdzinoši lielu datējamo paraugu. Organiskas izcelsmes materiāliem vecuma robežu, līdz kādai tos ar  $^{14}\text{C}$  datēšanas metodi var datēt, nosaka šī izotopa minimālā koncentrācija. Šī robeža ir sasniegta tad, kad izotopu  $^{14}\text{C}$  daudzums ogleklī samazinājies līdz  $1/10^{15}$  daļai jeb kad  $^{14}\text{C}$  koncentrācija sasniedz  $1/1000$  daļu no tās sākotnējā apjoma dzīvā organismā. Līdz tādām daudzumam šie izotopi samazinās pēc gandrīz 10 pussabrukšanas periodiem jeb aptuveni 55 000 gados. Organiskas izcelsmes materiālu datēšanai, kuri jaunāki par aptuveni 300 gadiem, radioaktīvā oglekļa metodi parasti vairs neizmanto.

### RADIOAKTĪVĀ OGLEKĻA DATĒŠANAS REZULTĀTUS IETEKMĒJOŠIE FAKTORI

Ja laboratorijā ir konstatēts, ka, piemēram, 2010. gadā atklāta sena organiskas izcelsmes materiāla paraugā saglabājusies tieši puse no oglekļa nestabilo izotopu sākotnējā skaita, tad, kā jau iepriekš minēts, tas tomēr nenozīmē, ka attiecīgajam paraugam būs norādīts vecums 5730 BP (*Before the Present* – pirms mūsdienām; šis starptautiski pieņemtais saīsinājums turpmāk lietots arī šeit, taču, domājams, arī to varētu latviskot, piemēram, “p.md.”) un ka attiecīgais organisms gājis bojā ap 3721. gadu pr. Kr. (jeb BC – *Before Christ*; rezultāts aprēķināts pēc vienādojuma  $(2010 - 1) - 5730 = -3721$ . Tajā no 2010 gadiem iepriekš atņemts viens, t.i., 0. gads, kurš vēsturē reāli nav pastāvējis). Atšķirībai starp materiāla vecumu, kas noteikts ar radioaktīvā oglekļa datēšanas metodi, un attiecīgā organisma bojāejas faktisko kalendāro laiku ir vairāki iemesli, no kuriem iepazīsim galvenos.

1) atšķirība starp oglekļa nestabilo izotopu praktiski ievēroto un faktisko pussabrukšanas perioda ilgumu. Oglekļa radioaktīvo izotopu pussabrukšanas periods aptuveni 5730 gadu ilgumā tika no jauna aprēķināts pēc tam, kad jau zināmu laiku bija valdījis nedaudz kļūdains priekšstats par mazliet īsāku (par aptuveni 3%) periodu. Šī neprecizitāte tika atklāta, uzkrājoties papildus zināšanām un izmantojot aizvien vairāk pilnveidotas mērierīces. Sākotnēji V. F. Lībija vadībā tika noteikts, ka oglekļa izotopa  $^{14}\text{C}$  pussabrukšanas periods ilgst īsāku laiku – aptuveni 5568 gadus. Līdz ar to runa ir par a) senāko t.s. Lībija  $^{14}\text{C}$  pussabrukšanas periodu (aptuveni 5568 g.) un b) pēc tam precizēto Kembridžas  $^{14}\text{C}$  pussabrukšanas periodu (aptuveni 5730 g.). Tā kā līdz Kembridžas  $^{14}\text{C}$  pussabrukšanas perioda ilguma atklāšanas brīdim bija jau publicēti daudzi datēšanas rezultāti, kuru aprēķinos bija ņemts vērā Lībija  $^{14}\text{C}$  pussabrukšanas perioda ilgums,



lai nodrošinātu iepriekš datēto un turpmāk datējamo objektu absolūtā vecuma datu salīdzināšanas iespējas un tās rezultātu objektivitāti, zinātnieki vienojās, ka Lībija  $^{14}\text{C}$  pussabrukšanas perioda ilgumu ar datēšanu saistītajos aprēķinos ievēros arī turpmāk, bet iegūtā radioaktīvā oglekļa datējuma nepieciešamo korekciju izdarīs vēlāk, veicot šī datējuma pārrēķināšanu faktiskajā kalendārajā laikā jeb *kalibrēšanu* (sk. 106. lpp.). Tas nozīmē, ka mūsdienās radioaktīvā oglekļa datēšanas laboratorijas kā datēšanas sākotnējo rezultātu parasti norāda parauga nekoriģēto datējumu, kurš ir aprēķināts, pieņemot, ka izotopu  $^{14}\text{C}$  pussabrukšanas periods ilgst 5568 gadus. Šo vecumu, kura atskaites laiks ir mūsdienas (BP), apzīmē par *konvencionālo  $^{14}\text{C}$  vecumu*. Gadījumā, ja kāda laboratorija parauga vecumu tomēr būtu aprēķinājusi, ņemot vērā 5730 gadus ilgo  $^{14}\text{C}$  pussabrukšanas periodu, tad šis vecums tomēr būtu jāpārrēķina atbilstoši saīsinātajam 5568 gadus ilgajam  $^{14}\text{C}$  pussabrukšanas periodam. Tā būtu jādara tāpēc, ka specializētajās konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma kalibrēšanas datorprogrammās jau ir iekļauta funkcija – datējuma pārrēķināšana atbilstoši 5730 gadus ilgajam  $^{14}\text{C}$  pussabrukšanas periodam. Praktiski to veic, konvencionālo  $^{14}\text{C}$  vecumu reizinot ar skaitli 1,029 (jo  $5730 : 5568 = 1,029$ ). Ja patiesais Kembridžas  $^{14}\text{C}$  pussabrukšanas perioda ilgums ņemts vērā, nosakot jau sākotnējo radioaktīvā oglekļa datējumu, tad kalibrēšanas programma nosacīti pareizo radioaktīvā oglekļa datējumu, to automātiski reizinot ar 1,029, pārveido par nepareizu.

Šeit jāprecizē, ko saistībā ar radioaktīvā oglekļa datēšanu nozīmē iepriekš minētais jēdziens “mūsdienas” (BP). Pēdējos gadsimtos izotopu  $^{14}\text{C}$  procentuālā daudzuma pārmaiņas atmosfērā aizvien būtiskāk ietekmējis antropogēnais faktors. Piemēram, industrializācijas attīstība atmosfērā izraisīja  $^{14}\text{C}$  daudzuma samazināšanos: sadedzinot lielos daudzumos fosilos kurināmos (akmeņogles, brūnogles, naftu, arī deggāzi), kuros oglekļa nestabilie izotopi saglabājušies vairs tikai niecīgā daudzumā, ar to gāzēm un tvaiku atmosfērā relatīvi vairāk ievadīja tieši oglekļa stabilos izotopus ( $^{12}\text{C}$  un  $^{13}\text{C}$ ). Radioaktīvo izotopu  $^{14}\text{C}$  daudzums atmosfērā visbūtiskāk izmainījās, turklāt pretējā virzienā, laikposmā starp 1945. un 1963. gadu, kad izmantoja un vēlāk turpināja izmēģināt kodolieročus. Šo izmēģinājumu dēļ minētajā laikposmā  $^{14}\text{C}$  īpatsvars atmosfērā savukārt ļoti ievērojami palielinājās, un līdz ar to 50. gadu vidū radās problēmas pat ar precīzu oglekļa daudzuma noteikšanu. Tāpēc zinātnieki vienojās par konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma atskaites laiku uzskatīt vienu konkrētu – 1950. gadu, kad oglekļa izotopu proporcijas izmaiņas atmosfērā vēl nebija tik būtiskas. Tas nozīmē, ka konvencionālais  $^{14}\text{C}$  vecums faktiski nozīmē gadu skaitu pirms 1950. gada (protams, izlaižot atsevišķi neizdalīto 0. gadu starp laika periodiem pirms un pēc Kristus dzimšanas). Tātad radioaktīvā oglekļa datēšanas metodē ar vārdu “mūsdienas” ir apzīmēts 1950. gads,



un saskaņā ar šo pieņēmumu, piemēram, datējums 350 BP būtībā ir attiecināts uz 1600. gadu pēc Kr. (jeb AD – *Anno Domini*).

Šeit būtu jāpievērš pastiprināta uzmanība jēdzieniem “vecums” un “datējums”. Skaidrības labad jēdzienu “vecums” vajadzētu lietot tikai tad, kad ir runa par kāda objekta pastāvēšanas ilgumu kopš kāda laika atskaites punkta (biežāk – no mūsdienām vai, runājot par  $^{14}\text{C}$  datēšanas metodi, no 1950. gada), bet “datējums” – par konkrētu gadu vai garāku laikposmu, kopš kura objekts pastāv. Taču ar konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma apzīmējumu vismaz latviešu valodā varētu būt zināmi pārpratumi. Piemēram, iepriekš minēto apzīmējumu “350 BP” var lasīt kā “trīs simti piecdesmit gadi pirms mūsdienām (pirms 1950. gada)”, un tādā gadījumā tas ir uztverams kā tāda objekta *vecums*, kuram precīzi nosakāms datējums. Savukārt, lasot “trīs simti piecdesmitais gads pirms mūsdienām (pirms 1950. gada)”, šis apzīmējums ir uztverams tieši jau kā objekta *datējums*.

2) radioaktīvo un stabilo oglekļa izotopu proporcijas izmaiņas atmosfērā laika gaitā. Organiskas izcelsmes objekta faktiskais vecums, kurš iepriekš aprakstītajā vienkāršajā veidā aprēķināts no tam noteiktā konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma, būtu patiesi tikai tad, ja oglekļa izotopu  $^{14}\text{C}$  un  $^{12}\text{C}$  proporcija atmosfērā visā laikposmā, sākot ar noskaidrojamo laiku pagātnē līdz pat mūsdienām, būtu bijusi vienmēr konstanta. Patiesībā, kā to pirmoreiz 1958. gadā atzīmēja nīderlandiešu fiziķis H. de Vriss (*Hessel L. de Vries*), oglekļa nestabilo un stabilo izotopu daudzuma attiecība atmosfērā vienmēr ir nedaudz mainījusies (bijusi pakļauta fluktuācijām). Šo pārmaiņu cēloņi ir Saules aktivitātes maiņa, kas savukārt ietekmē procesus Zemes atmosfērā un Zemes magnētisko lauku, vulkānu darbība, iespējams, dažu mūsu planētai tuvāk esošo supernovu eksplozijas gadījumi, kā arī vēl citi faktori.

Doma par radioaktīvo un stabilo oglekļa izotopu proporcijas iespējamām fluktuācijām un to ietekmi uz datēšanas rezultātiem sākotnēji radās, kad zinātnieki konstatēja, ka Senās Ēģiptes organiskas izcelsmes priekšmetu datējums, kas noskaidrots ar radioaktīvā oglekļa datēšanas metodi, izrādījās pat par vairākiem gadsimtiem jaunāks par šķietami tā paša laika seno priekšmetu domājamo aptuveno datējumu, kurš bija noskaidrots ar citām metodēm, kā arī vadoties pēc raksturīgām pazīmēm. Minēto cēloni šim datējuma nesaskaņām 20. gs. 60. gadu pirmajā pusē izdevās skaidri pierādīt, pateicoties nozīmīgajiem panākumiem, kas jau bija gūti *dendrohronoloģijā* – tolaik relatīvi jaunajā zinātnes nozarē, kas datē koku gadskārtas, analizē to parametru ikgadējās pārmaiņas un pēc tām nosakāmo informāciju. Kā zināms, Zemes mēreno joslu mežu zonās augušo koku stumbrā veģetācijas sezonā, t.i., katrā kalendārajā gadā, parasti izveidojas viena jauna koksnes kārtā – gadskārtā. Koksnes veidošanās procesā ļoti būtiska loma ir tieši ogleklī: tas aizņem aptuveni 45–50% no absolūti sausas

koksnes organiskās daļas. Augi, to skaitā arī kokaugi, oglekli uztver tieši no atmosfēras, caur lapām uzņemot oglekļa dioksīdu ( $\text{CO}_2$ ). No oglekļa dioksīda un no ūdens zaļajās, hlorofilu saturošajās lapās gaismā fotosintēzes procesā kā galaprodukts veidojas organiskie savienojumi – ogļhidrāti, kas ir galvenais augu šūnu materiāls. Caur lapām līdz ar oglekļa dioksīdu kokaugi ik gadus no atmosfēras uzņem gan stabilos, gan nestabilos oglekļa izotopus, turklāt gandrīz tādā proporcijā, kādā šie izotopi ir atmosfērā to piesaistīšanas brīdī. Dendrohronoloģijas speciālisti var ļoti precīzi (ar viena gada precizitāti) noteikt katras gadskārtas absolūto vecumu ne vien mūsdienās, bet arī pagātnē augušie koki, kuru stumbra koksne saglabājusies līdz mūsdienām pietiekami labā kvalitātē. Izmantojot vēl augošu, bet ļoti vecu koku (piemēram, Amerikas rietumdaļā augošās senās (*Pinus longaeva*) un akotainās (*Pinus aristata*) priedes, no kurām vecākās pārsniegušas pat 4800 gadu vecumu), kā arī Īrijā un Vācijā ūdenī ļoti ilgstoši gulējušu senu ozolu un priežu stumbru koksnes paraugus, izveidota precīzi un absolūti datētu gadskārtu kolekcija–kalendārs 12 500 gadus ilgam laikposmam, sākot no mūsdienām (šobrīd zinātnieki vēl strādā pie tā pagarināšanas). Nosakot oglekļa izotopu  $^{14}\text{C}$  un  $^{12}\text{C}$  daudzumu gadskārtās, kuras vienā un tanī pašā kalendārājā gadā veidojušas vairāku vai pat daudzu koku stumburā, var noskaidrot abu veidu izotopu skaita vidējo aptuveno proporciju, kādā tos oglekļa dioksīda molekulu sastāvā koki ir uzņēmuši no atmosfēras attiecīgajā gadā. Pēc oglekļa izotopu  $^{14}\text{C}$  skaita, ko zinātnieki noteica secīgās koku gadskārtās vai to nelielās grupās, viņi pārliecinājās, ka izotopu  $^{14}\text{C}$  un  $^{12}\text{C}$  proporcija atmosfērā pa gadiem tiešām bijusi nevis pastāvīga, bet gan ir mainījusies fluktuāciju veidā. Tas nozīmē, ka arī virzienā no senākām uz jaunākām cita citai sekojošās gadskārtās, kuras attiecināmas uz vairākiem gadsimtiem, oglekļa radioaktīvo izotopu daudzums palielinās nevis vienmērīgi un pakāpeniski, bet gan fluktuējot, t.i., pa gadiem dažādā mērā kļūstot te lielāks, te mazāks. Šī iemesla dēļ, kā to pierādīja gadskārtās konstatēto oglekļa izotopu skaita proporcijas salīdzināšanas rezultāti, dzīvie organismi oglekļa abu minēto veidu izotopus precīzi tādā pašā proporcijā pēc kāda laika var uzņemt atkārtoti. Izriet, ka radioaktīvā oglekļa datešanas laboratorijā noteiktais kāda sena organiska materiāla izotopu  $^{14}\text{C}$  skaits un tādējādi arī konkrētā  $^{14}\text{C}$  un  $^{12}\text{C}$  proporcija var atbilst nevis vienam, bet gan diviem vai pat vairākiem dažādiem īsiem vēsturiskiem laikposmiem.

3) izotopu frakcionēšanās efekts. Oglekļa izotopi augu šūnās tomēr nenonāk precīzi tādā proporcijā, kādā tie ir atmosfērā. Runa ir par t.s. *izotopu frakcionēšanos*: izotopi ar relatīvi mazāku atommasu kustas straujāk, līdz ar to tie ķīmiskajās reakcijās tiek iesaistīti ātrāk un tāpēc arī – mazliet vairāk nekā relatīvi smagākie izotopi. Ja izotopu  $^{14}\text{C}$  skaits, salīdzinot ar skaitu, kādā tiem attiecībā pret vieglākajiem

$^{13}\text{C}$  vai  $^{12}\text{C}$  izotopiem vajadzētu būt pareizā proporcijā, konstatēts kaut nedaudz mazāks, tad rezultātā iegūst nepatiesu, t.i., attiecīgi senāku, datējumu. Piemēram, koksnē (pēc tās gadskārtās esošo oglekļa izotopu proporcijas izstrādā arī  $^{14}\text{C}$  datēšanas kalibrēšanas liknes) relatīvi vieglākā izotopa  $^{13}\text{C}$  daudzums ir neproporcionāli palielināts par vidēji 25‰ (jeb 2,5%), un tas var izraisīt senas koksnes vai kūdras datējuma novirzi no patiesā pat par 400 un vēl vairāk gadiem. Lai no šīs kļūdas izvairītos, izotopa  $^{13}\text{C}$  koncentrāciju ( $\delta^{13}\text{C}$ ) datējamās koksnes paraugā jāsamazina par 25‰. Ja pēc labošanas  $^{13}\text{C}$  daudzuma palielinājumu nav izdevies pilnībā neitralizēt, tad katra atlikusī, neizlabotā novirze tikai par 1‰ datējuma izmaiņu ietekmē attiecīgi par aptuveni 16 gadiem. Citiem organiskas izcelsmes materiāliem vai augiem labojamā  $\delta^{13}\text{C}$  vērtība ir mazāka.

4) baseina (rezervuāra) efekts. To zināmā mērā var uzskatīt par piesārņojuma efektu. Runa ir par galvenokārt vēl senāk sabrukšanas procesam pakļautu oglekļa izotopu nokļūšanu no to sākotnējās vides dzīvajos vēlāk datējamajos organismos. Tāda ietekme var būt, piemēram, no cieta ūdens, kas radies saskarē ar kaļķakmeni vai dolomītu, no vulkānu gāzēm, kā arī no dziļāko jūru un okeānu apakšējo slāņu ūdens, kur vielu aprīte noris lēnāk. Dzīvajos organismos nonākot “svešiem” oglekļa radioaktīvajiem izotopiem salīdzinoši samazinātā skaitā, pastāv risks, ka šādiem organismiem var noteikt senāku datējumu, nekā tas ir patiesībā.

5) atmosfēras oglekļa izotopu maisījuma atšķirības Zemes ziemeļu un dienvidu puslodes daļās. Par cēloni šīm atšķirībām uzskata okeānu platības nevienādo sadalījumu abās Zemes puslodēs: dienvidu pusē okeānu kopējā platība un līdz ar to ietekme uz atmosfēras sastāvu ir lielāka. Oglekļa izotopu  $^{14}\text{C}$  un  $^{12}\text{C}$  proporciju atšķirības dēļ ar radioaktīvā oglekļa metodi iegūtie datējumi dienvidu puslodē salīdzinājumā ar ziemeļu puslodi sistemātiski ir par apmēram 30 vai pat 40 gadiem senāki. Jāpiezīmē, ka aptuveni pēc 1850. gada, jādodomā, galvenokārt industriālo dūmgāzu ietekmes dēļ, šī atšķirība starp Zemes puslodēm ir samazinājusies.

6) neizbēgamās kļūdas nestabilo izotopu uzskaitē. Izotopu daudzuma un to proporcijas noteikšanas procesā nenovēršamas ir kaut salīdzinājumā nelielas sistemātiskās un statistiskās kļūdas. Šīs kļūdas un to ietekme lielā mērā ir atkarīga no konkrētajā laboratorijā lietotā aprīkojuma un metodes.

7) vēl citi faktori.

Var rasties pamatoti jautājumi: kāda tad galu galā ir parauga konvencionālā vecuma precizitāte, un kā ir nosakāms objektīvs tā kalendārais datējums, ja to ietekmē tik daudzi un dažādi faktori?

Te beidzot jāatgriežas pie iepriekš pieminētā jēdziena –  $^{14}\text{C}$  konvencionālā vecuma un datējuma *kalibrēšanas*.

## RADIOAKTĪVĀ OGLEKĻA DATĒJUMU KALIBRĒŠANA

Vismaz dažu iepriekš minēto faktoru ietekmi uz seno organiskas izcelsmes materiālu datējumu ir izdevies novērtēt un aptuveni izteikt skaitļos, līdz ar to mūsdienās šo faktoru ietekmi var ātri vai nu gandrīz novērst, vai vismaz būtiski samazināt. Pilnīgi likvidēt visu ietekmju sekas nevar. Te nav runa vēl par citiem radioaktīvā oglekļa datējumu ietekmējošiem faktoriem, kurus nevar iepriekš paredzēt un kuru ietekmes sekas nevar precīzi novērtēt (sk. 114. lpp.).

Organiskas izcelsmes materiāla konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma kalibrēšana ir tam atbilstošā *kalibrētā kalendārā datējuma* noteikšana, ņemot vērā un pēc iespējas samazinot noteiktā laika novirzi no patiesā. Novirzi izraisījušas oglekļa un tā izotopu  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  proporcijas zināmas pārmaiņas (fluktuācijas) atmosfērā, saīsinātā, t.i., Lībija  $^{14}\text{C}$  pussabrukšanas perioda ilguma ievērošana konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma noteikšanas procesā, kā arī dažu citu faktoru ietekme. Piemēram, ietekmi, ko izraisījusi oglekļa izotopu frakcionēšanās vai oglekļa izotopu sastāva atšķirības Zemes dienvidu un ziemeļu puslodē, var izlabot jau iepriekš, aprēķinot konvencionālo vecumu, bet vajadzības gadījumā šo ietekmju sekas var gandrīz pilnībā likvidēt vienlaikus ar konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma kalibrēšanu. Kalibrējot konvencionālo  $^{14}\text{C}$  vecumu, rēķinās arī ar izotopu uzskaites un mērījumu neizbēgamām neprecizitātēm un kļūdām.

$^{14}\text{C}$  datējumu kalibrēšanā pamatā izmanto skaitļu tabulas, kurās starp radioaktīvā oglekļa konvencionālo  $^{14}\text{C}$  vecumu un kalibrēto kalendāro vecumu ir uzrādīta iepriekš aprēķināta atbilstība. Šī atbilstība noteikta tā, lai kalibrētais datējums a) atbilstu datējumam, kurš noteikts, ievērojot  $^{14}\text{C}$  pussabrukšanas periodu 5730 gadu garumā, b) būtu koriģēts, ievērojot, ka  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  proporcija, pēc kuras nosaka  $^{14}\text{C}$  vecumu, vienmēr ir bijusi pakļauta fluktuācijām un varēja pat pēc relatīvi neilga laika ar vienādu vērtību atkārtoties, un c) tiktu pēc iespējas samazināta datējuma novirze, kas radusies vēl dažu citu faktoru ietekmē, kā arī tiktu ievērota citu nelielu kļūdu un neprecizitāšu neizbēgamā klātesamība.

Mūsdienās konvencionālā vecuma kalibrēšana ir ātri un ērti veicama ar šim nolūkam izstrādātu datorprogrammu palīdzību (piemēram, CALIB, OxCal, CalPal, BCal, IOSACal u.c.). Kalibrēšanas principu, pēc kāda būtībā strādā arī šīs programmas, vieglāk ir paskaidrot un uztvert, ja tas attēlots grafiskā veidā.

Abu minēto vecumu atbilstību var uzskatāmi parādīt taisnleņķa koordinātu sistēmā, kurā uz vertikālās  $y$  (ordinātu) ass parasti ir atlikta konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma skaitļu skala, bet uz horizontālās  $x$  (abscisu) ass – konvencionālajam vecumam atbilstošo kalendāro datējumu skaitļu skala. Šīs koordinātu sistēmas plāknē atliekot iepriekš

minētajā skaitļu tabulā uzrādīto konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma un tam atbilstošā kalibrētā kalendārā datējuma vērtību koordinātas, iegūst punktus, kurus secībā savienojot ar līniju iegūst noteiktā virzienā orientētu, taču laužītas vai viļņotas formas līniju, kuru dēvē par *radioaktīvā oglekļa kalibrācijas līkni*. Tās nelīdzena forma ļoti uzskatāmi atspoguļo  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  proporcijas, kas noteikta precīzi datētajās koku gadskārtās, pārmaiņu (fluktuāciju) dinamiku laika gaitā.

Kad minētā koordinātu sistēma ar plaknē attēloto radioaktīvā oglekļa kalibrācijas līkni grafiskā veidā reiz ir sastādīta, jebkuras tālāk veicamās konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma kalibrācijas princips šķiet ļoti vienkāršs. Vispirms uz ordinātu ass ir jāsameklē punkts, kas attiecas uz noteikto konvencionālo  $^{14}\text{C}$  vecumu, un caur to jāvelk perpendikuls, līdz tas šķērso kalibrācijas līkni. Tā kā kalibrācijas līkne vietām ir gan kāpjoša, gan krītoša, var gadīties, ka vilktais perpendikuls to šķērso vairākās vietās. Tad no katra kalibrācijas līknes un iepriekš vilktā perpendikula kopīgā punkta savukārt jāvelk perpendikuls pret abscisu asi. Punkts vai punkti, kuros šis viens vai vairāki perpendikuli krusto abscisu asi, t.i., kalibrēto datējumu skalu, tad arī norāda attiecīgajam konvencionālajam  $^{14}\text{C}$  vecumam atbilstošo(s) kalibrēto(s) kalendāro(s) datējumu(s).

Konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma kalibrēšana, kas veikta pēc šāda vienkārša principa, uzrādītu pareizu(s) datējumu(s) tikai tadā gadījumā, ja pats konvencionālais  $^{14}\text{C}$  vecums būtu noteikts un norādīts ar viena gada precizitāti un ja būtu izslēgta datēšanas rezultāta jebkuras kļūdas vai neprecizitātes varbūtība, t.i., jebkura faktora ietekme. Patiesībā no dažādo faktoru ietekmes ir būtiski atkarīgs gan konvencionālais  $^{14}\text{C}$  vecums, gan arī  $^{14}\text{C}$  vecuma kalibrēšanas līkne. Tāpēc nedz konvencionālais  $^{14}\text{C}$  vecums, nedz kalibrācijas līknes punktu koordinātas nav uzrādītas absolūti precīzi, bet gan zināma ticamības intervāla robežās. No tā savukārt ir atkarīgs kalibrētais datējums. Lai gūtu priekšstatu par datēšanas rezultātu ticamības intervāla aprēķināšanu, izvēli un interpretāciju, šeit īsumā jāaplūko arī jautājums par radioaktīvā oglekļa datējumu un to kalibrēšanas rezultātu precizitāti un kļūdu pielaujamību.

Tā kā radioaktīvā oglekļa datēšanas rezultātu kalibrēšanas līknes punktu koordinātas uzrādītas ticamības intervāla robežās, pašas līknes faktiski sastāv nevis no vienas, bet no trim cita citai tuvu esošām paralēlām līnijām. Vidējo līniju iezīmē konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma un tam atbilstošo kalibrēto datējumu punktu koordinātas, bet abas malējās – šo punktu vērtībai aprēķinātā ticamības intervāla robežvērtību koordinātas. Kalibrēšanas līknes grafiskajos attēlos dažkārt ir attēlota tikai centrālā līnija vai gluži pretēji – tikai abas malējās līnijas.

Kalibrācijas līknes punktu koordinātas ir uzrādītas ticamības intervāla robežās divu galveno iemeslu dēļ. Pirmkārt, iepriekš minēto

faktoru dēļ, kuri ietekmē gan  $^{14}\text{C}$  daudzumu, gan tā uzskaiti, bez kļūdām  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  proporciju nevar noteikt arī dendrohronoloģiski precīzi datētajās koku gadskārtās. Jāņem vērā, ka arī šo gadskārtu  $^{14}\text{C}$  vecumu vispirms vajadzēja kalibrēt. Bez tam, nosakot atbilstību starp konvencionālo vecumu un kalibrēto datējumu, ņemtas vērā gadu skaitļu vērtības, kuras pašas ir uzrādītas zināmā ticamības intervālā. Otrkārt, visam aptuveni 12 500 gadu ilgajam laikposmam  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  proporcija atmosfērā pēc gadskārtām nav noteikta gluži katram gadam. Piemēram, senākajiem periodiem noteiktās  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  proporcijas attiecas tikai uz katru 10 vai pat 20 gadu ilgu laikposmu. Praktiski šo proporciju pēc kārtas noteica koksnes paraugiem ar attiecīgi 10 vai 20 gadskārtām un iegūtās vērtības pēc tam izmantoja slidošā vidējā vērtību aprēķināšanai katram, piemēram, 100 gadu ilgā laika intervālam. Tas darīts ne vien tāpēc, lai darba un laika ietilpīgie katram gadam atbilstošie mērījumi nebūtu jāveic tik ļoti lielā skaitā, bet arī tāpēc, ka liela vecuma kokiem, īpaši to mūža otrajā pusē, gadskārtas parasti ir ļoti šauras, tādējādi katras gadskārtas atdalīšana no pārējām un apstrāde kļūst apgrūtināta. Turklāt pēc kārtas katrā un pat divās–piecās gadskārtās noteiktās  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  proporcijas vērtības dažādos ģeogrāfiskos rajonos tajā pašā laikā parasti ir savstarpēji mainījušās atšķirīgi, t.i., to augstas frekvences fluktuāciju raksturs katrā teritorijā ir nedaudz atšķiries. Zemes ziemeļu puslodē šo teritoriālo atšķirību dēļ noteiktas radioaktīvā oglekļa vecums var atšķirties kopumā par līdz pat 20 gadiem. Lai samazinātu gan šo vērtību fluktuāciju biežumu, gan amplitūdu un panāktu, ka a) dažādās laboratorijās iegūtās  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  proporcijas vērtības būtu savstarpēji vieglāk salīdzināmas, b) tām būtu precīzāk nosakāmas kopīgās, t.i., globālā mērogā nozīmīgās, pārmaiņas un līdz ar to, c) lai arī korelācijas liknes dati būtu nozīmīgi ne vien vietējā, bet globālā mērogā, kalibrēšanas likne ir sastādīta no vairāk vai mazāk izlīdzinātām vērtībām un šo vērtību koordinātas uzrādītas zināmā ticamības intervālā.

Korelācijas liknes punktu koordinātu robežvērtības var sasniegt  $\pm 16$  gadus, bet dažreiz tās ir tikai  $\pm 3$  gadi.

Kā jau minēts, zināma ticamības intervāla robežās laboratorijas uzrāda arī noteikto konvencionālo  $^{14}\text{C}$  vecumu. Piemēram, organiskas izcelsmes atradumiem, kuri attiecas uz holocēna sākuma posmu, datējuma ticamības intervāla robežas no vidējās vērtības šķir pat 100–130 gadu ilgs laikposms, t.i., lai tik senam datējumam būtu pietiekami augsta varbūtība, tas var būt uzrādīts pat vairāk nekā 250 gadu ilgā laika periodā. Raksta sākumā minētajos piemēros aplūkotajam paraugam, kura pastāvēšanas laikā izotopu  $^{14}\text{C}$  skaits tajā samazinājies tieši uz pusi,  $^{14}\text{C}$  konvencionālo vecumu ticamības intervāla robežās laboratorijas reāli uzrādītu šādā pierakstā:  $5568 \pm 30$  BP.

No kā ir atkarīgs konvencionālajam  $^{14}\text{C}$  vecumam uzrādītais ticamības intervāls? Līdzīgi kā citos ar matemātisko statistiku saistītos eksperimentos, ja kādam organiskas izcelsmes priekšmetam  $^{14}\text{C}$  datējumu noteiktu daudzas reizes atkārtoti, vairums iegūto rezultātu savstarpēji kaut nedaudz atšķirtos, t.i., iegūtie dati būtu ar noteiktu izkliedi (atšķirību galvenie cēloņi minēti jau iepriekš). To sadalījumam attiecībā pret konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma laika skalu vajadzētu atbilst Laplasa un Gausa formulētajam nepārtraukti variējošu pazīmju varbūtību normālajam sadalījumam. Tas nozīmē, ka mēģinājumos iegūtās vērtības visbiežāk atbilstu vai būtu tuvu to vidējai vērtībai, bet, jo vairāk (lielākā amplitūdā) pozitīvā vai negatīvā virzienā iegūtās vērtības atšķirtos no to vidējā lieluma, jo attiecīgi mazāks būtu šo īpašo gadījumu skaits. Funkcija, kas izsaka varbūtību sadalījuma blīvumu, grafiski ir attēlojama kā simetriska zvana formas likne (tās vidusdaļa ir paaugstināta), un to sauc par *normālā sadalījuma* jeb *Gausa līkni*. Līdzīgi kā citas novirzes, arī laika vērtību novirzi no to vidējā lieluma visobjektīvāk raksturo *vidējā kvadrātiskā novirze* jeb *standartnovirze*, kuru apzīmē ar grieķu alfabēta burtu  $\sigma$  (sigma). Lielāka standartnovirze norāda uz iegūto datu tālāku izkliedi, un šādu datu sadalījumu grafiski ilustrē lēzenāka, zemāka likne ar vienu no otra tālāk atvirzītiem galiem. Saskaņā ar t.s. Laplasa funkciju jeb varbūtību integrāli (tuvāka informācija ir atrodama grāmatās, kurās skaidrota varbūtību teorija) normālā sadalījuma liknes ierobežojošā laukuma daļā, kura platumu nosaka no izkliedēto rezultātu vidējai vērtībai atbilstošās centrālās ass uz abām pusēm atlikta pa vienai standartnovirzes vērtībai (tātad  $+1\sigma$  un  $-1\sigma$  jeb kopā  $\pm 1\sigma$ ), koncentrējas 68,27% no visiem izkliedētajiem rezultātiem (aptuveni 34,14% rezultātu uz katru pusi no centrālās ass). Divreiz platākā laukumā, kura sānu malas attālumu no centrālās ass katrā pusē nosaka divas standartnovirzes (tātad  $\pm 2\sigma$ ), ietilpst 95,45% no izkliedētajiem rezultātiem, bet laukums sešu standartnoviržu platumā ( $\pm 3\sigma$ ) ietvertu gandrīz visas (99,73%) izkliedētās vērtības. Minētās procentos izteiktās izkliedēto vērtību daļas grafiski precīzi uzrādās kā  $\pm 1\sigma$  (vienai standartnovirzei),  $\pm 2\sigma$  un varētu uzrādīties arī kā  $\pm 3\sigma$  atbilstošās laukuma daļas platības attiecība (procentos) pret visa laukuma platību, kuru ierobežo normālā sadalījuma likne (2. att.). Konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma vienas standartnovirzes skaitlisko lielumu nosaka gan datējamā materiāla vecums, gan vēl citi ietekmējošie faktori.

Tātad konvencionālajam  $^{14}\text{C}$  vecumam uzrāda ticamības intervālu, kura robežvērtība atbilst šī rezultāta vienai standartnovirzei ( $\pm 1\sigma$ ). No iepriekš skaidrotā izriet, ka šādā ticamības intervālā uzrādīta konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma varbūtība ir 68,27% (aptuveni 68%). Kalibrējot šo konvencionālo  $^{14}\text{C}$  vecumu kopā ar tā ticamības intervālu, kalendāro datējumu iespējams noteikt nevis kā precīzu skaitli, bet gan kā laika

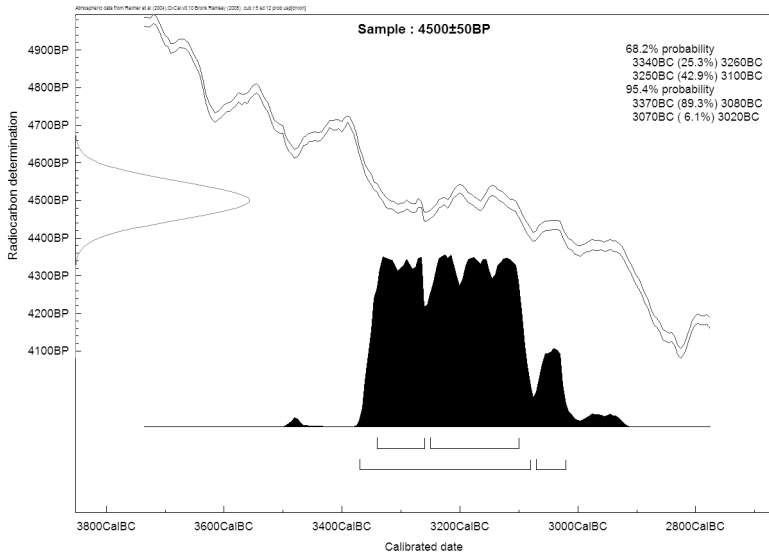


periodu (vai periodus), kuram patiesais datējums var būt piederīgs attiecīgi arī ar 68% varbūtību. Tas nozīmē, ka atlikušajos aptuveni  $100 - 68 = 32\%$  gadījumu faktiskais datējums šajā(-os) laikposmā(-os) var vispār neietilpt. Lai minēto varbūtību palielinātu, konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma kalibrācijas procesā papildus tiek noteikts arī kalendārā datējuma varbūtējais laikposms, kas attiecas uz plašāku, t.i., divām standartnovirzēm ( $\pm 2\sigma$ ) atbilstošu konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma ticamības intervālu. Piemēram, ja konvencionālais  $^{14}\text{C}$  vecums laboratorijā ir uzrādīts  $1000 \pm 30$  BP gadi, tad papildus nosaka arī kalibrēto datējumu, atbilstošu konvencionālajam vecumam  $1000 \pm 60$  BP gadi. Šajā gadījumā varbūtība, ka patiesais datējums ir attiecināms uz gadu, kurš ir ārpus kalibrēšanas procesā noteiktā kalendārā laikposma, kļuvusi pietiekami maza – tā ir tikai  $100 - 95,45 \approx 5\%$ .

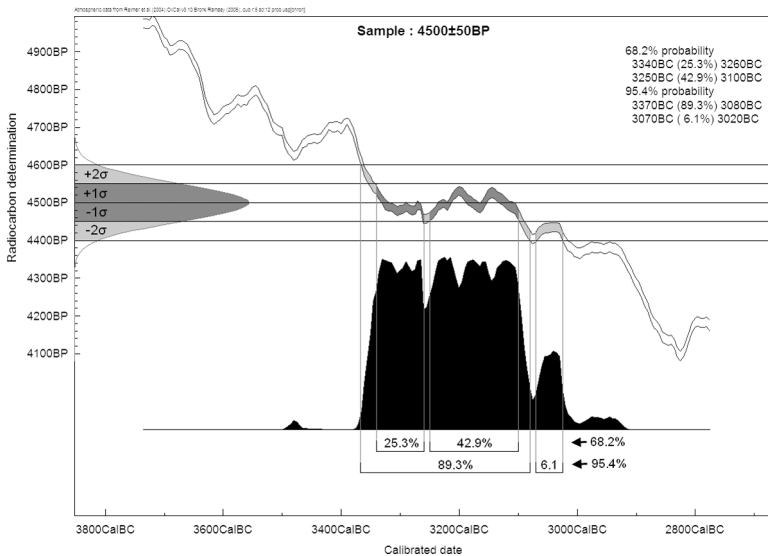
Izriet, ka, kalibrējot jebkuru konvencionālo  $^{14}\text{C}$  vecumu, kā kalibrēto datējumu var noteikt nevis kādu konkrētu kalendāro gadu, bet gan divus atšķirīga ilguma nepārtrauktus vai saliktus laika periodus, uz kuriem precīzais datējums ir attiecināms vai nu ar aptuveni 68%, vai 95% varbūtību. Abi atšķirīgā ilguma periodi var sastāvēt no diviem vai vairākiem ar starposmiem atdalītiem laikposmiem. Šie periodi vienlaikus viens no otra atšķiras ar to noteiktību. Piemēram, garākais veselais vai saliktais periods, uz kuru patiesais precīzais kalendārais datējums ir attiecināms ar lielāku varbūtību, faktiski ir datēšanas rezultāts ar mazāku noteiktību. Šajā periodā tiek iekļauti arī īsāki kalendārie laikposmi, par kuriem ticamība, ka uz tiem varētu attiekties faktiskais datējums, ir mazāka. Tātad pētniekam pašam ir jāveic izvēle starp datēšanas rezultātu ar lielāku varbūtību un rezultātu ar lielāku noteiktību. Būtībā viņam ir jāizšķiras starp kalibrētā datējuma noteikšanas drošākām kvantitatīvām un kvalitatīvām pazīmēm.

Iepriekš minēto var uzskatāmi ilustrēt ar tālāk sniegtu konkrēta konvencionāla  $^{14}\text{C}$  vecuma kalibrēšanas grafisku piemēru. Jāpiebilst, ka autors tam ar nolūku ir izvēlējis tādu konvencionālo  $^{14}\text{C}$  vecumu, kuram ir atbilstoši vairāki kalibrēšanas līknes punkti (1. att.).

Piemērā redzams koordinātu sistēmas grafiskais attēls, kāds iegūts, veicot konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma  $4500 \pm 50$  BP kalibrēšanu ar datorprogrammu OxCal V.3. Attēlā, kurā ir parādīts konvencionāla  $^{14}\text{C}$  vecuma kalibrēšanas rezultāts, bez diagonāli orientētā kalibrēšanas līknes posma vēl redzamas trīs informatīvas vienības. Tieši pretī ordinātu ass skalas punktam, kas uz konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma skalas apzīmē 4500 BP gadus, koordinātu plaknes virzienā ir uzzīmēta varbūtību sadalījuma funkcijas līkne. Attēla labajā augšējā stūrī norādītas 68,2% un 95,4% varbūtībai atbilstošo kalibrēto (kalendāro) datējumu intervālu robežvērtības. Savukārt zem kalibrēšanas līknes posma ir attēlots grafiks, kas uzskatāmi parāda gan minētos intervālus, gan tos



1. att. Konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma  $4500 \pm 50$  BP kalibrēšanas rezultāta grafiskais attēls, iegūts ar kalibrēšanas datorprogrammu OxCal V.3



2. att. Diviem varbūtības līmeņiem atbilstošo kalibrētā datējuma periodu noteikšanas princips

veidojošo laikposmu salīdzinājumu pēc ticamības, ka uz tiem varētu attiekties faktiskais datējums.

Princips, kā iegūts kalibrētais laika intervāls, parādīts 2. attēlā. Patiesībā tā ir iepriekšējā attēla kopija, kura skaidrošanas nolūkā papildināta ar līnijām, kuras parasti neuzrāda. Tās ir vilktas no ordinātu ass caur visiem pieciem punktiem, kas uz skalas apzīmē gan konvencionālajam  $^{14}\text{C}$  vecumam, gan abu līmeņu ticamības intervālu robežvērtībām atbilstošos gadskaitļus. Tātad līnijas ir vilktas no punktiem, kas apzīmē 4500 BP gadus (noteiktais konvencionālais  $^{14}\text{C}$  vecums), 4450 BP un 4550 BP gadus (abas robežvērtības ticamības intervāliem, kuri atbilst  $\pm 1\sigma$ ), kā arī 4400 BP un 4600 BP gadus (abas robežvērtības ticamības intervāliem, kuri atbilst  $\pm 2\sigma$ ). Kalibrēšanas līkni veidojošo visu trīs līniju posmi, kas atrodas precīzi starp  $\pm 2\sigma$  atbilstošām papildu līnijām, uz abscisu ass iezīmē laika periodus, uz kuriem patiesais kalendārais datējums attiecas ar 95,4% varbūtību. Savukārt tie kalibrēšanas līknes posmi (ieskaitot līknes ārējās līnijas), kurus precīzi ierobežo  $\pm 1\sigma$  atbilstošās papildu līnijas, uz abscisu ass iezīmē laika periodus, uz kuriem patiesais kalendārais datējums attiecas ar 68,2% varbūtību. Un, jo tuvāk centrālā papildu līnija, kas ir vilkta caur varbūtību sadalījuma funkcijas līknes virsotni, atrodas kalibrēšanas līnijai, jo ticamība, ka patiesais datējums varētu attiekties uz attiecīgo kalendāro laika posmu, ir lielāka. Tas ir vizuāli redzams pēc zem kalibrēšanas līnijas attēlotā grafika atsevišķo posmu augstuma.

Šajā piemērā uzrādītajam konvencionālajam  $^{14}\text{C}$  vecumam  $4500 \pm 50$  BP atbilstošie kalibrēto kalendāro gadu periodi, uz kuriem precīzo datējumu var attiecināt ar kopā 68,2% varbūtību, ir divi: no 3340. g. pr. Kr. līdz 3260. g. pr. Kr. (varbūtība, ka datējums attiecas uz šo periodu, ir 25,3%) un no 3250. g. pr. Kr. līdz 3100. g. pr. Kr. (varbūtība – 42,9%). Tātad uz abiem periodiem kopā precīzo datējumu var attiecināt ar  $25,3\% + 42,9\% = 68,2\%$  varbūtību, bet vēl pastāv 31,8% varbūtība, ka nosakāmais datējums varētu attiekties uz laika posmu starp šiem periodiem vai nedaudz pirms pirmā vai pēc otrā perioda. Šo datējuma neatbilstības varbūtību var samazināt līdz 4,6%, izvēloties divus citus kalibrēto gadu periodus, uz kuriem precīzo datējumu savukārt var attiecināt ar kopā 95,4% varbūtību. Pirmais no šiem kalendārajiem periodiem ir no 3370. g. pr. Kr. līdz 3080. g. pr. Kr. (varbūtība – 89,3%), bet otrs – no 3070. g. pr. Kr. līdz 3020. g. pr. Kr. (varbūtība – 6,1%). Varam pārliecināties, ka vislielākā ir varbūtība, ka precīzais datējums attiecas uz kalendāro periodu no 3370. g. pr. Kr. līdz 3020. g. pr. Kr. Taču šis periods salīdzinājumā ar pārējiem minētajiem ir visilgākais, tas aptver kopā 350 gadus, līdz ar to uz šo periodu attiecinātajam datēšanas rezultātam ir vismazākā noteiktība, kas dažos gadījumos var būt nepietiekama.

Kopā ar paskaidrojumu, ka datējums attiecas uz kādu konkrētu kalendāro periodu, datēšanas rezultāts ir nepārprotams. Tomēr bieži vien ar arheoloģiju saistītā publikācijā, rakstot par kāda priekšmeta vai lielāka objekta ar  $^{14}\text{C}$  datēšanas metodi noteikto absolūto vecumu, tas uzrādīts, piemēram, “3350 gadu pirms mūsdienām” jeb “3350 BP”. Šādos gadījumos varētu rasties pamatotas bažas par to, ka autors ir minējis konvencionālo  $^{14}\text{C}$  vecumu, to uzskatīdams par pareizo kalendāro datējumu. Lai šādu pārpratumu nebūtu, kalibrēto datējumu starptautiski papildus apzīmē ar “Cal” (no angļu valodas vārda *calibrated* – kalibrēts). Runa var būt attiecīgi par šādiem apzīmējumiem: Cal AD (kalibrētais gads pēc Kr.), Cal BC (kalibrētais gads pr. Kr.), kā arī Cal BP (kalibrētais gads pirms mūsdienām jeb pirms 1950. gada). Zinot to, ka senajiem organiskajiem materiāliem ar  $^{14}\text{C}$  datēšanas metodi var noteikt gan nekalkibrētu (konvencionālo), gan kalkibrētu vecumu, skaidrības labad pie kalkibrētajiem gadskaitļiem lieto apzīmējumu “Cal”.

Šajā skaidrojumā par konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma kalibrēšanu iepriekš ar nolūku nebija tuvāk apskatīts jautājums par tādu organiskas izcelsmes materiālu kalibrētā datējuma noteikšanu, kuri ir vēl senāki par laiku, kuram ir sastādītas koku gadskārtu absolūtās hronoloģijas (aptuveni 12 500 gadiem). Tik senu materiālu datēšana Latvijās arheoloģiem nav vairs aktuāla. Varētu būt vienīgi interesanti zināt, ka tik liela konvencionālā  $^{14}\text{C}$  vecuma kalibrēšanai izmanto kalibrēšanas līknes datus, kuri iegūti, nosakot  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  proporciju tādu organiskā materiāla paraugu kārtās, kurām var aptuveni noteikt absolūto datējumu, kā gliemeņu vāki, paraugi no koraļļiem, ezeru ikgadējo nogulumu un dziļo okeānu nogulumu urbumu serdeņi, ledus urbumu serdeņi no Zemes mūžīgā sasaluma zonām, stalaktīti un stalagmīti kaļķakmens un dolomītakmens alās. Protams, no šiem datiem sastādīto kalibrācijas līkņu precizitāte ir ievērojami mazāka nekā līknēm, kuras sastādītas, izmantojot precīzi datētās koku gadskārtās noteiktos  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  proporcijas datus. Piemēram, laikam ap 26 000 gadu BP kalibrēšanas līknes sastādīšanai izmantoto vērtību ticamības intervāls jau sasniedz  $\pm 163$  gadus.

#### PIEZĪMES PAR RADIOAKTĪVĀ OGLEKĻA DATĒŠANAS METODES LIETOJUMU ARHEOLOĢIJĀ

Acīmredzot vēsturiska objekta kalendārā vecuma noteikšana ar  $^{14}\text{C}$  datēšanas metodi, izmantojot tikai vienu paraugu, var dot visai aptuvenu rezultātu, kura noteiktību var ietekmēt arī subjektīva izvēle. Samērā plašo laika intervālu, kas uzrādīts kā kāda sena organiskas izcelsmes priekšmeta  $^{14}\text{C}$  kalibrētais datējums, domājams, bieži vien ir vieglāk attiecināt nevis uz pašu priekšmetu, bet gan kādu izdalīta

vēsturiska perioda posmu, uz kāda objekta pastāvēšanas laiku vai kāda vēsturiska procesa norises laiku, kuru šis priekšmets pārstāv. Daudzos gadījumos zināt šo periodu, objektu vai norišu laiku ir pat svarīgāk nekā zināt atsevišķā priekšmeta datējumu. Taču jāapzinās, ka no šāda atsevišķa priekšmeta  $^{14}\text{C}$  datējuma par interesējošā perioda kalendāro laiku dažreiz var gūt arī samērā neprecīzu, pat maldīgu priekšstatu. Cēlonis šādei neprecizītai var būt dažu faktoru ietekme, kuru vēlāk konstatēt un novērtēt ir grūti vai pat neiespējami.

Piemēram, nosakot  $^{14}\text{C}$  datējumu, paliek nenoskaidrota informācija par laikposma ilgumu starp attiecīgā organisma vai tā daļas bojāejas un tajā esošo oglekļa radioaktīvo izotopu sabrukšanas sākuma brīdi. Bieži vien nav arī zināms, cik ilgs laiks pagājis starp organisma bojāejas brīdi un šī organisma daļas (vai daļu) kā materiāla izmantošanas sākšanas laiku. Pētniekam varētu būt svarīgi zināt, vai datētais materiāls izmantots visā interesējošā periodā vai tikai kādā tā laikposmā. Dažreiz tas varētu pārstāvēt arī kādu senāku laikposmu, piemēram, materiāla atkārtotas izmantošanas gadījumā. Tomēr ir arī iespējams, ka materiāls par vidi ir jaunāks, piemēram, ja tas ir nokļuvis (pieņemsim, ierakts) kultūrslāņa attiecīgās kārtas līmenī kaut kad vēlāk.

Tāpēc, lai iegūtu precīzāku un drošāku rezultātu, ar radioaktīvā oglekļa metodi vēlams veikt nevis vienu, bet vairāku vienlaicīgas izcelsmes organiska materiāla priekšmetu paraugu datēšanu. Ja šo paraugu kalibrēto datējumu var attiecināt uz vienu kopīgu kalendāro laikposmu, kurš atbilst 68,2% varbūtības līmenim, tad to var uzskatīt par visvairāk iespējamo un salīdzinājumā precīzāko laikposmu, kura robežās nosakāmais datējums varēja reāli būt. Noteiktāku rezultātu var iegūt, arī atkārtoti datējot vienu un tā paša materiāla divus vai vairākus paraugus. Ir labāk, ja to dara dažādās laboratorijās, jo katra laboratorija atšķiras pēc datēšanas procesā radušos neizbēgamo kļūdu rakstura un lieluma. Mūsdienās viena parauga analīze salīdzinoši augstākas precizitātes  $^{14}\text{C}$  datēšanas laboratorijā var dot precīzāku rezultātu nekā parastākā laboratorijā vairāku paraugu izpēte.

Precīzāks datējums iegūstams arī, palielinot parauga lielumu un izotopu skaitīšanas laiku. To palielināšanu gan var veikt tikai zināmās robežās, jo, analizējot pārāk lielus paraugus vai izotopu skaitīšanai veltot pārāk ilgu laiku, turpina pieaugt darba apjoms un izpētes procesa izmaksas, toties rezultātu kvalitāte tālāk vairs neuzlabojas. Var arī gadīties, ka, izpildot gan vienu, gan otru iepriekš minēto ierosinājumu, datējuma vēlamo precizitāti nodrošināt tomēr nav izdevies.

Iepriekš minētais zināmā mērā norāda, ka būtiska nozīme ir datējamo paraugu pareizai izvēlei un sagatavošanai, par ko atbildīgs ir pats arheologs. Datējamie paraugi var attiekties uz kādreizējo dzīvo organismu ar relatīvi īsu vai garu mūžu, un tas nosaka datējuma teorētiski iespējamo precizitāti un noteiktību. Piemēram, labības graudi, riekstu

čaumalas, niedres, meldri, salmi, mazie zariņi izveidojas viena gada laikā, toties vecāka koka koksne var veidoties 200–300 gadu un vēl ilgāk. Tāpēc īsā laikposmā veidojušos organiskas izcelsmes materiālu kalibrētais  $^{14}\text{C}$  datējums parasti ir noteiktāks. Turklāt, ja datējamais koksnes paraugs ir no koka stumbra iekšējās, senākās daļas, tad tās faktiskais absolūtais datējums, salīdzinot ar kalendāro laiku, kad attiecīgais koks nocirsts (un vēl pat nav bijis izmantots objektam, kura datējuma noskaidrošana ir galvenais uzdevums!), var atšķirties jau par, piemēram, 150–180 līdz 250–280 gadiem. Tas nozīmē, ka, datējot koksni, ieteicams izmantot paraugu no jauna koka koksnes vai, ja koks bijis salīdzinoši vecāks, no tā stumbra ārējās daļas. Tiesa, bieži vien līdz mūsdienām ir saglabājusies tikai stumbra iekšējā, senākā daļa, un tādos gadījumos noteikt trūkstošo ārējo gadskārtu skaitu ir grūti vai pat neiespējami. Datējot šādas koksnes paraugus, iepriekš minētais par liela vecuma koku koksnes datējuma iespējamām atšķirībām noteikti ir jāņem vērā.

Lai gan, ar  $^{14}\text{C}$  datēšanas metodi nosakot absolūto vecumu ilgus gadus augušu senu koku koksnei, kā iepriekš minēts, var iegūt visai neprecīzu rezultātu, tā ļauj izmantot vismaz pāris īpašus datējamo paraugu izvēles paņēmienus, kurus pielietojot savukārt var iegūt pat precīzāku datējumu, nekā datējot materiālus, kas attiecināmi uz organismiem ar īsu mūžu. Tā, datējot koka priekšmetu, kura koksne vēl ir samērā daudz gadskārtu, var izdoties iegūt precīzāku rezultātu, ja sagatavo un datēšanai izmanto pa vienam koksnes paraugam vismaz no divām atsevišķām gadskārtām vai blakusesošu gadskārtu pavisam nelielām grupām, kurām ir skaidri zināms to relatīvais datējums. Piemēram, vispirms jāatzīmē kāda no koksnes ārējām gadskārtām un no tās stumbra serdes virzienā jānoskaita un jāatzīmē, piemēram, 100. vai, ja tas iespējams, pat 150. vai 200. gadskārta. Tātad datēšanai paraugus sagatavo vai nu no tikai abu atzīmēto gadskārtu koksnes, vai, ja šīs gadskārtas ir šauras, paraugos ietver ne vien iezīmētās, bet arī tās aptverošās 1–3 gadskārtas. Pēc datēšanas salīdzinot abu koksnes paraugu kalibrētos  $^{14}\text{C}$  datējumus (kalendārā laika periodus), to robežās būtu jāsameklē īsi laikposmi ar augstu ticamību, kuriem būtu savstarpēji jāatšķiras vai nu attiecīgi par 100, vai 150, vai 200 gadiem. Ja starp abu paraugu visticamākiem kalibrētiem datējumiem tiešām konstatē attiecīgo atšķirību (gados), tad to var uzskatīt par būtisku pazīmi vai pat pierādījumu, ka priekšmets ir datēts pareizi, turklāt salīdzinoši precīzi.

Citam, vēl precīzākam pieauguša vecuma koku koksnes absolūtās datēšanas paņēmienam specializētajos zinātniskajos rakstos, kas publicēti angļu valodā, ir dots apzīmējums *wiggle matching* jeb *carbon-14 wiggle-match dating* (*WMD*) (latviski to varētu netieši tulkot kā “izliekumu saderības jeb saskanības noteikšana”). Arī izmantojot

šo paņēmieni, ir nepieciešams  $^{14}\text{C}$  datējumu noteikt koksnes parauga konkrētām gadskārtām. Šajā gadījumā nepietiek, ka  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  proporciju nosaka tikai divām vai trim gadskārtām, tā jānoteic kādām 10 gadskārtām, piemēram, pēc kārtas katrai 10. vai 20. gadskārtai. Uz zinot  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  proporciju katrā izvēlētajā gadskārtā, ir pietiekami, ja konvencionālo  $^{14}\text{C}$  vecumu šajā gadījumā nosaka tikai pāris gadskārtām. Šoreiz nozīmīgāko informāciju veido noteiktās un hronoloģiski pareizā secībā sarindotās  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  proporcijas vērtības. Iegūto īso laikrindu nepieciešams salīdzināt ar  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  proporcijas vērtību laikrindu, no kurām ir sastādīta kalibrēšanas likne, un pēc tam šis laikrindas posmā, kurš, aptuveni datējot, lokalizēts jau iepriekš, jāsameklē pēc kārtas katram 10. vai 20. gadam atbilstošās vērtības, kuru laikrindas grafiskā forma būtu līdzīga īsās, datējamās laikrindas grafiskajai formai. Pēc abu īso laikrindu saderīgā savietojuma atrašanās parauga konkrēto gadskārtu kalibrēto datējumu ir iespējams attiecināt jau uz tik īsu kalendāro periodu, kas pēc ilguma parasti nepārsniedz kalibrēšanas liknes posmu sastādošo laika vērtību ticamības intervālu ( $\pm 16$  gadi). Tādējādi šis paņēmieni nodrošina salīdzinājumā augstu  $^{14}\text{C}$  datēšanas precizitāti, taču jāreķinās, ka tā izmantošanas izmaksas ir vairākas reizes lielākas nekā viena parauga parastās  $^{14}\text{C}$  datēšanas izmaksas. Gadījumā, ja koksnes paraugs nesatur koka ārējās gadskārtas un nav zināms trūkstošo gadskārtu skaits, t.i., ja koka ciršanas laiku tik un tā nevarēs precīzi noteikt, būtu jāapsver, vai aprakstīto paņēmieni atmaksājas izmantot.

Sīkākus paskaidrojumus par paraugu sagatavošanu vajadzētu lūgt no laboratorijas, kurā ir paredzēts tos datēt. Ir svarīgi saņemt iepriekšēju informāciju ne tikai par konkrētu organiskas izcelsmes materiālu datēšanas iespējām, ilgumu, izmaksām un paraugu vēlamo svaru, bet arī, piemēram, par to, uz kāda mitruma materiālu norādītais parauga svars ir attiecināts. Ir svarīgi zināt, vai attiecīgā laboratorija dod priekšroku mitriem vai izžāvētiem arheoloģiskās koksnes paraugiem. Pakāpeniskas žāvēšanas laikā koksne var sākt augt koksnes sēņu sēņotne, kas var būtiski piesārņot koksni ar mūsdienu oglekli. Svarīgs ir arī laboratorijas speciālistu viedoklis par paraugu iesaiņojumu un lietotajiem konservēšanas līdzekļiem. Faktiski tik pierasti iesaiņošanas materiāli kā, piemēram, papīrs, kartons, kokvilnas vate, audekls un aukla, arī polivinilacetāta (PVA) līme satur oglekli un tāpēc var būt potenciāli piesārņojuma avoti. Oglekļa piesārņojuma avots var būt arī uz datējamā parauga nejauši uzbiuruši tabakas pelni. Dažreiz ir izteikts viedoklis, ka senu materiālu paraugus ieteicams ievietot nevis polietilēna maisiņos (polietilēna sastāvā arī ir ogleklis!), bet gan alumīnija folijā. Šim ieteikumam ir arī pretarguments: no folijas ielocēm laboratorijā ir grūti dabūt laukā ļoti mazos paraugus, kuru datēšanā paredzēts izmantot AMS metodi. Visbeidzot, arheologs, pa-



rādot zināmu priekšstatu par <sup>14</sup>C datēšanas metodi, var painteresēties, vai un kā var sagatavot paraugus, lai iegūtie datēšanas rezultāti būtu ar pēc iespējas mazāku izkliedes intervālu, līdz ar to – noteiktāki.

Nobeigumā vēlreiz jāatzīmē, ka šajā rakstā par <sup>14</sup>C datēšanu sniegta tikai pamatinformācija, kas domāta galvenokārt labāka priekšstata gūšanai par šīs metodes principiem. Pat ja mūsdienās tiek ieviesti kādi metodes uzlabojumi, kuri te nav minēti, tie, visticamāk, tomēr pamatojas uz metodes pamatprincipiem. Plašu informāciju par metodes pielietojamību, par gūtajiem datēšanas rezultātiem, kā arī par meklējumiem un sasniegumiem metodes turpmākajā attīstīšanā var atrast gan izdotajās publikācijās, gan internetā. Interesentiem var ieteikt pašiem iepazīties ar rakstu krājumā “Radiocarbon” regulāri kopš 1959. gada publicēto profesionālo rakstu pilnajiem tekstiem (<http://www.radiocarbon.org> vai <https://journals.uair.arizona.edu/index.php/radiocarbon/issue/archive>). Vienas no informatīvi bagātākajām vietnēm internetā jautājumā par <sup>14</sup>C datēšanu ir <http://www.c14dating.com/> un <http://www.detectingdesign.com/carbon14.html>. Radioaktīvā oglekļa datēšanas laboratoriju potenciālajiem klientiem ieteicams iepazīties ar radioaktīvā oglekļa datēšanas laboratoriju sarakstu, kurš atrodams vietnē <http://www.radiocarbon.org/Info/lablist.html>. Šajā sarakstā sniegtā informācija, visticamāk, tomēr nav gluži pilnīga vai absolūti precīza, taču Latvijas vārda trūkums tajā, cik zināms, nav pavisam kļūdas dēļ. Latvijai šādas laboratorijas tiešām trūkst. Jācer, ka raksts palīdzēs arī objektīvāk izvērtēt <sup>14</sup>C datēšanas laboratorijas lietderību Latvijā.

#### ATSAUCES UN PIEZĪMES

- <sup>1</sup> *Zagorska I.* Jauna liecība par ziemeļbriežu medniekiem Latvijā // Latvijas Vēstures Institūta Žurnāls. – 2010. – Nr. 4. – 105.–112. lpp.
- <sup>2</sup> Piemērā minēto datējumu 2000. gadā bija noskaidrojuši un atsūtījuši Tartu Universitātes Ģeoloģijas institūta Radioaktīvā oglekļa datēšanas laboratorijas speciālisti. Tas noteikts ozolam, kura stumbru 1999. gadā atklāja Rīgā, atjaunojamā Melngalvju nama būvbedrē. Lielākā daļa no šī stumbra tagad saglabāta un izlikta apskatei Rātsnama (Rātes) pasāžā.
- <sup>3</sup> Latvijas padomju enciklopēdija. – 8. sēj. – Rīga, 1986. – 227. lpp.
- <sup>4</sup> *Sheridan B.* Interpreting the Past: Radiocarbon Dating. – Berkeley, Los Angeles, 1990. – P. 34 (table 3).

#### IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- Abrams I.* Mērījumu rezultātu matemātiskā apstrāde. – Rīga, 1983. – 39 lpp.
- Friedrich M., Remmele S., Kromer B., Hofmann J., Spurk M., Kaiser K. F., Orce C., Küppers M.* The 12,460-year Hohenheim oak and pine chronology

- from Central Europe – a unique annual record for radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstructions // *Radiocarbon*. – 2004. – Vol. 46, no. 3. – P. 1111–1122.
- Greene K. *Archaeology: An Introduction*. 4th edition. – London; New York, 2002. – P. 161–168.
- Krastiņš O. *Varbūtību teorija un matemātiskā statistika*. – Rīga, 1978. – 269 lpp.
- Kromer B. Radiocarbon and dendrochronology // *Dendrochronologia*. – 2009. – No. 27. – P. 15–19.
- Kromer B. Radiokohlenstoffdatierung // *Einführung in die Archäometrie / Hrsg. G. A. Wagner*. – Berlin; Heidelberg, 2007. – S. 3–10.
- Pearson G. W., Stuiver M. High-precision bidecadal calibration of the radiocarbon time scale, 500–2500 BC // *Radiocarbon*. – 1993. – Vol. 35, no. 1. – P. 25–33.
- Sheridan B. *Interpreting the Past: Radiocarbon Dating*. – Berkeley; Los Angeles, 1990. – 64 p.
- Stuiver M. A note on single-year calibration of the radiocarbon time scale, AD 1510–1954 // *Radiocarbon*. – 1993. – Vol. 35, no. 1. – P. 67–72.
- Stuiver M., Becker B. High-precision decadal calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950–6000 BC // *Radiocarbon*. – 1993. – Vol. 35, no. 1. – P. 35–65.
- Stuiver M., Pearson G. W. High-precision bidecadal calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950–500 BC and 2500–6000 BC // *Radiocarbon*. – 1993. – Vol. 35, no. 1. – P. 1–23.
- Stuiver M., Polach H. A. Discussion reporting of  $^{14}\text{C}$  data // *Radiocarbon*. – 1977. – Vol. 19, no. 3. – P. 355–363.
- Stuiver M., Reimer P. J. *CALIB User's Guide Rev. 3.0*. – Washington, 1993. – 23 p. + App.
- Vasiliev S. S., Bokovenko N. A., Chugunov K. A., Dergachev V. A., Sementsov A. A., Sljusarenko Ju., Zaitseva G. I. Tree-rings, “wiggles matching” and statistics in the chronological studies of Scythian age sites in Asia // *Geochronometria: Journal on Methods and Applications of Absolute Chronology*. – 2001. – Vol. 20. – P. 61–68.
- Radiocarbon dating. – [http://en.wikipedia.org/wiki/Radiocarbon\\_dating](http://en.wikipedia.org/wiki/Radiocarbon_dating)
- Radio carbon dating. – <http://wikipedia.qwika.com/de2en/Radiokohlenstoffdatierung>
- Radiokohlenstoffdatierung. – <http://de.wikipedia.org/wiki/Radiokohlenstoffdatierung>

*Māris Zunde*

ON THE RADIOCARBON ( $^{14}\text{C}$ ) DATING METHOD  
AND ITS APPLICATION IN ARCHAEOLOGY

Summary

In Latvia, too, archaeologists often make use of the radiocarbon ( $^{14}\text{C}$ ) dating method to determine the absolute age of finds, and this method is being applied more and more commonly. The services of  $^{14}\text{C}$  dating laboratories abroad are utilised, since Latvia currently has no such laboratory. The datings obtained from laboratories abroad sometimes differ from the expected results, and sometimes misunderstandings arise in interpreting the datings or comparing them with those given in earlier publications. Discussion of such issues can be found in specialist scientific literature published abroad, but there has been no such publication in Latvian, covering the radiocarbon dating method, its principles, potential applications, requirements with regard to archaeological samples etc. In view of this, the author has attempted to bring together in a paper in Latvian basic information from various sources on the most important questions relating to the radiocarbon dating method, which archaeologists should be familiar with in order to better understand the method. It is hoped that the article will give readers a better grasp of this dating method and that it may stimulate physicists to publish a more extensive and in some senses more precise treatment of this theme in the future.

Iesniegts 21.11.2011.