

VILNIAUS UNIVERSITETAS
Fizikos fakultetas
Mokomoji atomo ir branduolio fizikos laboratorija

Laboratorinis darbas Nr. 17

**ATMOSFEROS UŽTERŠTUMO RADIONUKLIDAIŠ IR
MEDŽIAGŲ TŪRINIO RADIOAKTYVIOJO UŽTERŠTUMO
TYRIMAS**

Parengė A. Poškus

2022-02-10

Turinys

Darbo tikslas	2
1. Užduotys.....	2
2. Kontroliniai klausimai	2
3. Darbo teorija.....	3
3.1. Atmosferos radioaktyvumo kilmė. Radioaktyviosios šeimos.....	3
3.2. Nuklidų RaB ir RaC mišinio skilimo kreivė.....	8
3.3. Radioaktyviųjų nuklidų koncentracijos ore skaičiavimas	10
3.4. Radioaktyvusis užterštumas nuklidu ¹³⁷Cs.....	11
3.5. Radioaktyvusis nuklidas ⁴⁰K.....	12
3.6. Tūrinio radioaktyviojo užterštumo normos	12
4. Atmosferos užterštumo radionuklidais tyrimo metodika.....	13
4.1. Darbo priemonės.....	13
4.2. Matavimo tvarka.....	14
5. Medžiagų tūrinio radioaktyviojo užterštumo tyrimo metodika	18
5.1. Darbo priemonės.....	18
5.2. Matavimo tvarka.....	19
6. Atmosferos radioaktyviojo užterštumo matavimo duomenų analizė.....	22
7. Medžiagų tūrinio radioaktyviojo užterštumo matavimo duomenų analizė.....	24

Darbo tikslas

Ištirti oro radioaktyvųjų užterštumą. Išmatuoti KCl miltelių tūrinį radioaktyvumą.

1. Užduotys

1. Išmatuoti aerosolinių dalelių filtre nusėdusių nuklidų $^{214}_{82}\text{Pb}$ (RaB) ir $^{214}_{83}\text{Bi}$ (RaC) mišinio skilimo kreivę.
2. Pagal matavimų rezultatus apskaičiuoti nuklidų RaB ir RaC koncentraciją ore.
3. Išmatuoti KCl bandinio masę ir savitąjį aktyvumą.
4. Pagal išmatotąjį KCl savitąjį aktyvumą apskaičiuoti radioaktyviojo kalio izotopo ^{40}K atomų dalį natūraliame kalyje.

2. Kontroliniai klausimai

1. Kokia yra atmosferoje esančių radioaktyviųjų medžiagų kilmė?
2. Apibrėžkite radioaktyviosios šeimos sąvoką. Kokios yra radioaktyviosios šeimos? Kas lemia radioaktyviųjų šeimų skaičių?
3. Išveskite (3.3.5) formulę.
4. Kodėl radioaktyviojo užterštumo tyrimuose dažniausiai susiduriama su nuklidu ^{137}Cs ?
5. Tūrinio ir savitojo aktyvumo sąvokos, jų matavimo vienetai.
6. Normavimo koeficiento sąvoka. Kodėl ^{40}K savitojo aktyvumo normavimo koeficientas yra daug didesnis už ^{137}Cs savitojo aktyvumo normavimo koeficientą?

Literatūra:

1. Širvaitis A. Rentgeno struktūrinė analizė ir branduolio fizika. – Vilnius, 1978, p. 246 – 265.
2. Широков Ю. М., Юдин Н. П. Ядерная физика. – М.: Наука, 1980, с. 203 – 217, 253 – 259.
3. Колпаков П. Е. Основы ядерной физики. – М.: Просвещение, 1968, с. 200 – 212.
4. Стыро Б. И. Вопросы ядерной метеорологии. – Вильнюс, 1959, с. 12 – 21, 114 – 121, 145 – 152, 156 – 169.
5. Райский С. М., Смирнов В. Ф. Физические основы метода радиоактивных индикаторов. – М.: Гос. Изд-во технико-теоретической литературы, 1956, с. 96 – 98.

3. Darbo teorija

3.1. Atmosferos radioaktyvumo kilmė. Radioaktyviosios šeimos

Atmosferos ore yra daug radioaktyvių medžiagų, kurias pagal kilmę galima suskirstyti į šias grupes:

1. Technogeninės – difunduojančios iš branduolinių reaktorių. Šiai grupei priklauso izotopai, kurių pusamžiai yra nuo kelių dešimčių dienų iki kelių dešimčių metų, pvz., ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{91}Y , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{99}Tc , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{129}Te , ^{131}J , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{143}Pr , ^{147}Nd .
2. Kosmogoninės – atsirandančios, sąveikaujant kosminiams spinduliams su atmosferos oro sudėtinėmis dalimis. Šiai grupei priklauso ^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{22}Na , ^{32}P , ^{35}S , ^{41}Ar ir kt.
3. Aerosolinės dalelės – Žemės uolienų mikroskopinės dalelės, kuriose yra ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th ir kiti radioaktyvieji nuklidai. Jos patenka į atmosferą su oro srautais.
4. Emanacinės kilmės radioaktyviosios medžiagos – radioaktyviosios dujos, kurios atsiranda, skylant Žemės uolienose esantiems radioaktyviems elementams, bei šių dujų radioaktyvieji skilimo produktai. Šios radioaktyvios medžiagos ir tiriamos šiame darbe.

Žemės uolienose yra ilgai gyvuojančių radioaktyviųjų izotopų $^{232}_{90}\text{Th}$, $^{238}_{92}\text{U}$, $^{235}_{92}\text{U}$, $^{237}_{93}\text{Np}$. Kiekvienas iš šių izotopų yra radioaktyviosios šeimos pradininkas. Radioaktyvioji šeima – tai visi radioaktyvieji izotopai, kurie susidaro duotojo pradinio izotopo skilimo grandinėje. Kiekviena radioaktyvioji šeima pavadinta vieno savo nario vardu: torio ($^{232}_{90}\text{Th}$), urano ($^{238}_{92}\text{U}$), aktinio ($^{227}_{89}\text{Ac}$; šeimos pradininkas – $^{235}_{92}\text{U}$), neptūnio ($^{237}_{93}\text{Np}$) šeimos. Skilimų grandinės kiekvienoje iš keturių radioaktyviųjų šeimų yra pavaizduotos 1 – 4 pav.

Natūraliųjų radioaktyviųjų elementų šeimos turėjo ypač didelę reikšmę pradiniam branduolio fizikos vystymosi etape, nes tada branduoliniai tyrimai buvo atliekami su natūraliaisiais radioaktyviais nuklidais, priklausančiais trimis pirmosioms šeimoms. Tais laikais kiekvienas toks nuklidas turėjo individualų pavadinimą, į kurį įėjo ir vieno iš pirmesniųjų nuklidų (toje pačioje šeimoje) pavadinimas arba visos šeimos pavadinimas. Pvz., izotopas ^{235}U buvo vadinamas aktinuraniu (AcU), ^{228}Th – radiotoriu (RdTh), ^{212}Pb – toriu B (ThB) ir t.t. 1 – 4 pav. pateikti ir tų senų, bet iki šiol dažnai vartojamų pavadinimų žymėjimai. Kiekvienas natūralios radioaktyviosios šeimos narys atsiranda iš pirmesnio, vykstant α arba β skilimui. Pirmosios trys šeimos baigiasi stabiliaisiais švino izotopais: torio šeima baigiasi $^{208}_{82}\text{Pb}$, urano šeima – $^{206}_{82}\text{Pb}$, aktinio šeima – $^{207}_{82}\text{Pb}$. Neptūnio šeima baigiasi bismuto izotopu $^{209}_{83}\text{Bi}$. Kadangi, vykstant α skilimui, branduolio masės skaičius sumažėja 4, o vykstant β skilimui, masės skaičius nepasikeičia, tai visų duotosios šeimos narių masės skaičiai dalinasi iš keturių su vienoda liekana. Pvz., visų torio šeimos narių masės skaičius galima išreikšti pavidalu $4n$ (čia n yra sveikasis skaičius), urano šeimos narių – $4n + 2$, aktinio šeimos narių – $4n + 3$, neptūnio šeimos narių – $4n + 1$.

Palyginus atskirų šeimų pradinių izotopų pusamžius su Žemės amžiumi, matyti, kad toris (^{232}Th) Žemėje beveik visas liko, uranas ^{238}U suskilo iš dalies, o ^{235}U suskilo didesnioji dalis (todėl Žemės plutoje jo yra 140 kartų mažiau, negu ^{238}U), o neptūnio izotopas ^{237}Np praktiškai visas suskilo. Labai maži neptūnio kiekiai uolienose buvo atrasti tik po to, kai šis izotopas buvo gautas dirbtiniu būdu.

Pirmųjų trijų šeimų skilimo grandinėse yra dujinės radioaktyvios medžiagos: torio šeimoje – toronas (^{220}Rn arba Tn), urano – radonas (^{222}Rn), aktinio – aktinonas (^{219}Rn arba An). Šios dujos difunduoja iš Žemės į atmosferą arba iš kambario sienų į jo ertmę (statybinėse medžiagose taip pat yra aukščiau minėtieji radioaktyvieji elementai), todėl jų esama atmosferos ore bei pastatuose. Jos sąlygoja ir kritulių radioaktyvumą. Kaip matyti 1 – 3 pav., suskilus šioms radioaktyviosioms

90 Th	Th ²³² , Th 1,39·10 ¹⁰ met		Th ²²⁸ , AdTh 1,90 met		
89 Ac	α ↓	Ac ²²⁸ , MsTh ₂ 6,13 val ↗ β	α ↓		
88 Ra	Ra ²²⁸ , MsTh ₁ 6,7 met	β ↗	Ra ²²⁶ , ThX 3,64 d		
87 Fr			α ↓		
86 Rn			Rn ²²⁰ , Tn 54,5 s		
85 At			α ↓		
84 Po			Po ²¹⁶ , ThA 0,158 s		Po ²¹² , ThC' 30·10 ⁻⁷ s
83 Bi			α (~100%) ↓	Bi ²¹² , ThC 60,6 min ↗ β (66,3%)	α ↓
82 Pb			Pb ²¹² , ThB 10,6 val ↗ β	α (33,7%) ↓	Pb ²⁰⁸ , ThD
81 Tl				Tl ²⁰⁸ , ThC'' 31 min ↗ β	

1 pav. Torio šeima (4n).

92 U	U^{238}, U_I 4,51·10 ⁹ met		U^{234}, U_{II} 248·10 ⁵ met				
91 Pa	α β	Pa^{234}, UX_1 1,18 min	β (99,85%) α (0,15%)				
		Pa^{234}, UZ 6,7 val	β				
90 Th	Th^{234}, UX_1 24,1 d		Th^{230}, I_0 7,52·10 ⁴ met				
89 Ac			α				
88 Ra			Ra^{226}, Ra 1622 met				
87 Fr			α				
86 Rn			Rn^{222}, Rn 3,825 d				
85 At			α	At^{218} 1,3 s			
84 Po			Po^{218}, RaA 3,05 min	β (0,02%) α	Po^{214}, RaC' 1,6·10 ⁻⁴ s	Po^{210}, RaF 138,4 d	
83 Bi			α (99,98%)	Bi^{214}, RaC 197 min	β (99,96%) α	Bi^{210}, RaE 5,01 d	β α
82 Pb			Pb^{214}, RaB 26,8 min	β α (0,04%)	Pb^{210}, RaD 22 met	β α (5·10 ⁻⁵ %)	Pb^{206}, RaG
81 Tl				Tl^{210}, RaC'' 1,32 min	β α (1,8·10 ⁻⁶ %)	Tl^{206}, RaE' 4,3 min	β
80 Hg					Hg^{206} 85 min	β	

2 pav. Urano šeima (4n + 2).

92 U	U^{235}, AcU $713 \cdot 10^8 \text{ met}$				
91 Pa		α	Pa^{231}, Pa $348 \cdot 10^4 \text{ met}$		
90 Th	Th^{231}, UY 25,6 val	β	$Th^{227}, RaAc$ 18,17 d		
89 Ac		α	Ac^{227}, Ac 22,0 met	β (98,8%)	α
88 Ra		α (1,2%)	Ra^{226}, AcX 11,7 d		
87 Fr		β	Fr^{223}, AcK 22 min	α	
86 Rn		α $4 \cdot 10^{-3} \%$	Rn^{219}, An 392 s		
85 At		β (3%)	At^{219} 0,9 min	α	At^{215} 10^{-4} s
84 Po		α (97%)	Po^{215}, AcA $1,83 \cdot 10^{-3} \text{ s}$	β ($5 \cdot 10^{-4} \%$)	α
83 Bi		β	Bi^{215} 8 min	α (~100%)	Bi^{214}, AcC 2,15 min
82 Pb		β	Pb^{214}, AcB 36,1 min	α (99,68%)	Pb^{214}, AcC' 0,52 s
81 Tl		β	Tl^{214}, AcC'' 4,79 min		Pb^{210}, AcD

3 pav. Aktinio šeima ($4n + 3$).

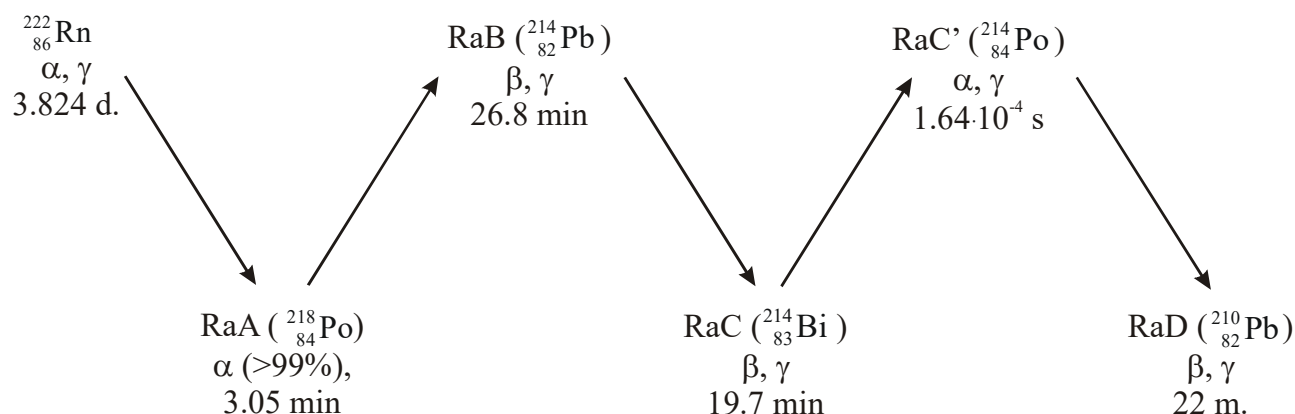
93 Np		Np ²³⁷ 2,20·10 ⁶ met				
92 U			U ²³³ 1,62·10 ⁵ met			
91 Pa		Pa ²³⁵ 27,0 d.				
90 Th			Th ²²⁹ 7340 met			
89 Ac				Ac ²²⁵ 10,0 d		
88 Ra			Ra ²²⁵ 14,8 d			
87 Fr				Fr ²²¹ 4,8 min		
86 Rn						
85 At				At ²¹⁷ 0,018 s		
84 Po					Po ²¹³ 4,2·10 ⁻⁶	
83 Bi				Bi ²¹³ 47 min		Bi ²⁰⁹
82 Pb					Pb ²⁰⁹ 3,3 val	
81 Tl				Tl ²⁰⁹ 2,2 min		

4 pav. Neptūnio šeima (4n + 1).

dujoms, susidaro nemažai radioaktyviųjų izotopų. Šių elementų atomai per kelių sekundžių laiką nusėda ant ore esančių aerosolinių dalelių. Todėl šiuos radioaktyvius izotopus galima nusodinti ant specialių medžiagų, kurios filtruoja aerosolines daleles iš oro. Žinant filtre sukauptų radioaktyviųjų izotopų skilimo pusamžius, pagal filtro aktyvumo priklausomybę nuo laiko (skilimo kreivę) galima apskaičiuoti įvairių radioaktyviųjų izotopų atomų skaičius filtre duotuoju laiko momentu, o žinant pro filtrą praėjusio oro kiekį – ir jų koncentracijas ore.

Šiame darbe matuojama radono izotopo $^{222}_{86}\text{Rn}$, kuris susidaro urano izotopo $^{238}_{92}\text{U}$ skilimo grandinėje (žr. 2 pav.), antrinių švino ir bismuto izotopų $^{214}_{82}\text{Pb}$ (senasis pavadinimas „radis B“, žymėjimas RaB) ir $^{214}_{83}\text{Bi}$ (senasis pavadinimas „radis C“, žymėjimas RaC) koncentracija ore. Priežastys, dėl kurių šių izotopų skilimo indėlių į pilnutinę bandinio (filtro) aktyvumą galima eksperimentiškai atskirti nuo kitų $^{222}_{86}\text{Rn}$ antrinių radioaktyviųjų izotopų indėlio, yra akivaizdžios 5 pav.:

- 1) skilimo pusamžiai: RaB ir RaC skilimo pusamžiai (atitinkamai, 26.8 min ir 19.7 min) yra daug mažesni už RaD skilimo pusamžį (22.3 metų) ir daug didesni už RaA skilimo pusamžį (3.05 min), todėl po filtravimo pabaigos filtre susikaupusių nuklidų RaB ir RaC skilimo indėlis į filtro aktyvumą yra daug didesnis už RaD skilimo indėlių, o RaA gali turėti įtakos tik kelių minučių trukmės pradinei skilimo kreivės daliai;
- 2) skilimo tipas: jeigu matavimų metu registruojamos tik β dalelės, tada α skilimai $\text{RaA} \rightarrow \text{RaB}$ ir $\text{RaC}' \rightarrow \text{RaD}$ nėra registruojami.



5 pav. $^{222}_{86}\text{Rn}$ skilimų grandinės pradinė dalis. Po kiekvieno izotopo pavadinimu nurodytas jo skilimo tipas, šio skilimo indėlis į pilnutinę skilimo spartą (jeigu egzistuoja kiti skilimo kanalai) ir skilimo pusamžis.

3.2. Nuklidų RaB ir RaC mišinio skilimo kreivė

Jeigu duotojo radioaktyvaus izotopo branduolių skaičius N_{br} kinta tik dėl to izotopo radioaktyvaus skilimo, tada jo priklausomybę nuo laiko nusako **pagrindinis radioaktyviojo skilimo dėsnis**: N_{br} pokytis dN_{br} laiko intervale nuo t iki $t + dt$ yra lygus

$$dN_{\text{br}} = -\lambda N_{\text{br}}(t)dt; \quad (3.2.1)$$

čia λ yra radioaktyviojo izotopo skilimo konstanta, t. y. branduolio skilimo tikimybė per laiko vienetą. Skilimo konstanta susijusi su branduolio vidutine gyvavimo trukme τ ir pusamžiu $T_{1/2}$ sąryšiais

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \approx \frac{0.693}{T_{1/2}}. \quad (3.2.2)$$

Tačiau tuo atveju, kai duotasis radioaktyvus izotopas yra kito (pirminio) radioaktyvaus izotopo skilimo produktas, tada jo branduolių skaičius kinta ne tik dėl jo paties skilimo, bet dar ir dėl pirminio izotopo skilimo. Pvz., nuklido RaC kiekis gali ne tik mažėti dėl jo skilimo, bet ir augti (tam tikrame laiko intervale), skylant pirminiam izotopui RaB.

Laikant, kad sistemoje nėra radioaktyvių izotopų, kurių skilimo produktas yra RaB, izotopų RaB ir RaC branduolių vidutiniai skaičiai, kaip laiko funkcijos, tenkina tiesinių homogeninių pirmosios eilės diferencialinių lygčių sistemą

$$\begin{cases} \frac{dN_B}{dt} = -\lambda_B N_B, & (3.2.3a) \\ \frac{dN_C}{dt} = \lambda_B N_B - \lambda_C N_C, & (3.2.3b) \end{cases}$$

kur N_B ir N_C yra atitinkamai RaB ir RaC atomų skaičiai, o λ_B ir λ_C – atitinkamai RaB ir RaC skilimo konstantos. (3.2.3a) yra kitu pavidalu užrašyta lygtis (3.2.1) (t. y. RaB kiekis kinta tik dėl jo paties skilimo), o lygties (3.2.3b) dešiniojoje pusėje, šalia RaC skilimą nusakančio dėmens $-\lambda_C N_C$, dar yra RaC kiekio augimą nusakantis dėmuo $\lambda_B N_B$, kuris yra to paties absoliutinio didumo, kaip ir lygties (3.2.3a) dešinioji pusė, tačiau priešingo ženklo. T. y. N_C padidėjimas dėl RaB skilimo lygus N_B sumažėjimui per tą patį laiko tarpą. Lygčių sistemos (3.2.3a,b) sprendinys, atitinkantis pradinę sąlygą

$$N_B(0) = N_{B0}, \quad N_C(0) = N_{C0}, \quad (3.2.4)$$

yra

$$\begin{cases} N_B(t) = N_{B0} e^{-\lambda_B t}, & (3.2.5a) \\ N_C(t) = N_{B0} \frac{\lambda_B}{\lambda_C - \lambda_B} e^{-\lambda_B t} + \left(N_{C0} - \frac{\lambda_B}{\lambda_C - \lambda_B} N_{B0} \right) e^{-\lambda_C t}. & (3.2.5b) \end{cases}$$

Šiame darbe izotopai RaB ir RaC nusodinami aerolinių dalelių filtre, siurbiant pro jį orą. Taigi, formulės (3.2.5a) ir (3.2.5b) nusako abiejų izotopų kiekių priklausomybę nuo laiko filtre, baigus filtravimą. Todėl laiko momentas $t=0$ atitinka filtravimo pabaigą (siurblio išjungimo momentą), o N_{B0} ir N_{C0} nusako abiejų izotopų kiekius filtre filtravimo pabaigoje. Norint rasti RaB ir RaC koncentracijas ore, reikia išmatuoti N_{B0} ir N_{C0} . Jeigu būtų įmanoma tiesiogiai išmatuoti priklausomybes $N_B(t)$ ir $N_C(t)$, tada N_{B0} ir N_{C0} būtų galima rasti, aproksimuojant matavimų duomenis teorinėmis funkcijomis (3.2.5a) ir (3.2.5b). Tačiau šiame darbe tiesiogiai matuojamas ne radioaktyviųjų branduolių skaičius, o jų *skilimų* skaičius per fiksuotą laiko tarpą. Be to, naudojant Geigerio ir Miulerio skaitiklį, neįmanoma nustatyti, ar užregistruotoji β dalelė atsirado dėl RaB skilimo, ar dėl RaC skilimo. Taigi, reikalinga lygtis, kuri susietų pilnutinę β dalelių registravimo spartą su ieškomaisiais pradiniais izotopų kiekiais N_{B0} ir N_{C0} . Ši lygtis tiesiogiai išplaukia iš pagrindinio radioaktyviojo skilimo dėsnio (3.2.1):

$$\frac{dn}{dt} = \varepsilon_B \lambda_B N_B + \varepsilon_C \lambda_C N_C; \quad (3.2.6)$$

čia dn/dt yra per laiko vienetą užregistruotų β dalelių skaičius (**registravimo sparta**), o ε_B ir ε_C yra atitinkamai RaB ir RaC skilimo registravimo efektyvumai. Duotojo izotopo **skilimo registravimo efektyvumas** – tai užregistruotų β dalelių skaičiaus ir jas išspinduliavusio izotopo skilimų skaičiaus santykis.

Išrašę N_B ir N_C išraiškas (3.2.5a) ir (3.2.5b) į (3.2.6), randame

$$\frac{dn}{dt} = A e^{-\lambda_B t} + B e^{-\lambda_C t}; \quad (3.2.7)$$

čia A ir B yra konstantos, kurios priklauso nuo ieškomųjų dydžių N_{B0} ir N_{C0} bei nuo parametrų λ_B , λ_C , ε_B , ε_C :

$$A \equiv \lambda_B N_{B0} \left(\varepsilon_B + \frac{\varepsilon_C \lambda_C}{\lambda_C - \lambda_B} \right), \quad (3.2.8a)$$

$$B \equiv \lambda_C \varepsilon_C \left(N_{C0} - N_{B0} \frac{\lambda_B}{\lambda_C - \lambda_B} \right). \quad (3.2.8b)$$

Pastarojoje formulėje matome, kad tuo atveju, kai N_{C0} yra pakankamai mažas, konstanta B yra neigiama. Tokiu atveju antrasis dėmuo reiškinyje (3.2.7) auga, ir pradiniu laiko momentu registravimo sparta dn/dt gali augti laike. Žinoma, vėliau ji pradeda mažėti, tačiau, kai $B < 0$, šis mažėjimas yra lėtesnis, negu funkcijos $A \cdot \exp(-\lambda_B t)$ mažėjimas. Taip yra dėl papildomo neigiamo

dėmens $Be^{-\lambda_C t}$, kuris įeina į registravimo spartos išraišką (3.2.7) (šis dėmuo didėja laike, todėl sulėtina registravimo spartos mažėjimą).

Konstantas A ir B galima rasti, aproksimuojant matavimų duomenis teorine funkcija (3.2.7). Jeigu skilimo konstantos ir registravimo efektyvumai yra žinomi, tada ieškamuosius dydžius N_{B0} ir N_{C0} galima apskaičiuoti pagal formules (3.2.8a) ir (3.2.8b). Tačiau šiuo atveju tokį tyrimo metodą sunku pritaikyti, nes skilimo konstantos λ_B ir λ_C yra palyginti artimos viena kitai ($\lambda_B = 0.0259 \text{ min}^{-1}$, $\lambda_C = 0.0352 \text{ min}^{-1}$), o matavimų trukmė yra palyginti maža (maždaug 1 val.), todėl abu eksponentiniai dėmenys lygties (3.2.7) dešiniojoje pusėje praktiškai „susilieja“ į vieną eksponentinę funkciją, kuri apibūdinama viena skilimo konstanta λ .

Supaprastintoje analizėje laikoma, kad izotopai RaB ir RaC yra nepriklausomi (t. y. neatsižvelgiama į nuolatinį RaC kiekio papildymą dėl RaB skilimo), o jų abiejų skilimo konstantos yra vienodos ir lygios **efektinei skilimo konstantai** λ_{ef} . Tada analizė yra tokia pati, kaip vieno radioaktyvaus izotopo atveju. Šio „efektinio“ radioaktyviojo izotopo kiekį žymėsime N , o jo skilimo registravimo efektyvumą žymėsime ε . Tada vietoj lygčių sistemos (3.2.5a,b) turime vieną lygtį

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda_{ef} t}, \quad (3.2.9)$$

o vietoj (3.2.6) turime

$$\frac{dn}{dt} = \varepsilon \lambda_{ef} N = K e^{-\lambda_{ef} t}, \quad (3.2.10)$$

$$K \equiv \varepsilon \lambda_{ef} N_0; \quad (3.2.11)$$

čia N_0 yra „efektinio“ izotopo pradinis kiekis, kuris apytiksliai lygus $N_{B0} + N_{C0}$. Dydžius λ_{ef} ir N_0 nesunku nustatyti, aproksimuojant išmatuotąją dn/dt priklausomybę nuo laiko teorine funkcija (3.2.10). Šitaip nustatytoji λ_{ef} gali būti mažesnė už abiejų izotopų skilimo konstantas λ_B ir λ_C (žr. pastabą po (3.2.8b)).

3.3. Radioaktyviųjų nuklidų koncentracijos ore skaičiavimas

Aukščiau aprašytuju būdu radus radioaktyviųjų branduolių skaičių filtre filtravimo pabaigoje N_0 bei jų efektinę skilimo konstantą λ_{ef} , galima apskaičiuoti ir radioaktyviųjų branduolių koncentraciją ore C . Per nykstamai mažą filtravimo trukmę dt filtre nusėdusių radioaktyviųjų atomų skaičius dN_1 priklauso nuo filtravimo spartos ω (t. y. pro filtrą per laiko vienetą praeinančio oro tūrio), filtro efektyvumo α (t. y. filtro užlaikomų aerozolinių dalelių dalies) ir ieškomosios koncentracijos C :

$$dN_1 = C \omega \alpha dt. \quad (3.3.1)$$

Tačiau šis dydis nėra lygus radioaktyviųjų atomų skaičiaus pokyčiui filtre per laiką dt , nes per tą patį laiką dN_2 branduolių skyla. Nykstamai mažą dydį dN_2 nusako pagrindinis radioaktyviojo skilimo dėsnis (3.2.1):

$$dN_2 = -\lambda_{ef} N dt; \quad (3.3.2)$$

čia N yra radioaktyviųjų branduolių skaičius filtre duotuoju filtravimo momentu t . Pilnutinis radioaktyviųjų branduolių skaičiaus pokytis filtre per laiką dt yra lygus $dN = dN_1 + dN_2$, t. y.

$$\frac{dN}{dt} = C \omega \alpha - \lambda_{ef} N. \quad (3.3.3)$$

Filtravimo pradžioje $N=0$. Išsprendę diferencialinę lygtį (3.3.3) su pradine sąlyga $N(0)=0$, randame radioaktyviųjų branduolių skaičių filtre filtravimo pabaigoje:

$$N_0 = \frac{C \omega \alpha}{\lambda_{ef}} (1 - e^{-\lambda_{ef} \theta}); \quad (3.3.4)$$

čia θ yra filtravimo trukmė. Vadinas, radioaktyviųjų atomų koncentracija ore lygi

$$C = \frac{\lambda_{ef} N_0}{\omega \alpha (1 - e^{-\lambda_{ef} \theta})}. \quad (3.3.5)$$

3.4. Radioaktyvusis užterštumas nuklidu ^{137}Cs

Cezis yra sidabro spalvos metalas; jo atominis numeris yra 55, o vidutinis atominis masės skaičius yra 132.9. Cezio lydymosi temperatūra yra 28.44°C . Žinomi 35 cezio elemento izotopai – nuo ^{114}Cs iki ^{148}Cs . Vienintelis natūralios kilmės cezio izotopas yra stabilusis nuklidas ^{133}Cs . Visi kiti cezio izotopai yra dirbtinės kilmės, atsiradę branduolinių bandymų arba branduolinių reakcijų metu.

Cezis Cs yra šarminis metalas. Periodinėje lentelėje jis priklauso I grupei. Taigi, Cs atomas turi vieną valentinį elektroną, kurį palyginti lengvai praranda, virsdamas teigiamuoju vienvalečiu jonu Cs^+ . Cezis yra labiausiai chemiškai aktyvus iš visų šarminių metalų. Nors cezio cheminės savybės yra panašios į kalio (K) savybes, cezis negali pakeisti kalio gyvųjų organizmų medžiagų apykaitos reakcijose. Manoma, kad to priežastis yra skirtingi teigiamųjų cezio ir kalio jonų spinduliai: K^+ jono spindulys yra 1.33 \AA , o Cs^+ jono spindulys yra 1.65 \AA . Todėl gyvieji organizmai daug sunkiau priima iš aplinkos ceziją, negu kalį, kuris yra reikalingas medžiagų apykaitai.

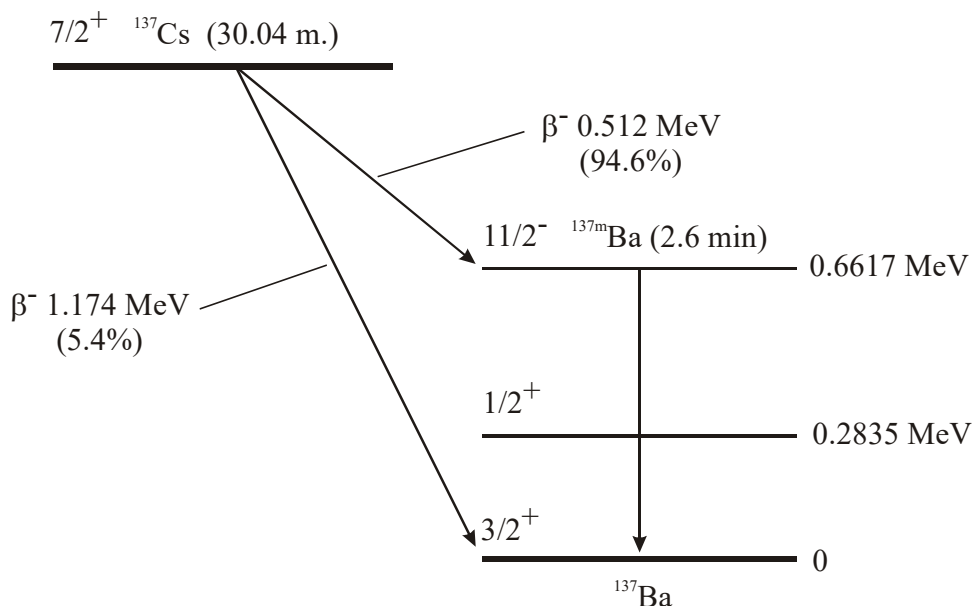
Radiacinėje biologijoje radioaktyvusis cezio izotopas ^{137}Cs yra svarbiausias iš visų radioaktyviųjų nuklidų. Taip yra dėl dviejų priežasčių:

- 1) skylant sunkiesiems branduoliams branduoliniuose reaktoriuose bei atominėse bombose, didelė dalis skilimo skeveldrų (maždaug 6 %) yra ^{137}Cs branduoliai;
- 2) ^{137}Cs skilimo pusamžis yra palyginti didelis (maždaug 30 m.).

Todėl dideli ^{137}Cs kiekiai pasklido atmosferoje, vykdant branduolinius bandymus XX a. šeštajame ir septintajame dešimtmečiuose, o taip pat po avarijos Černobylio atominėje elektrinėje 1986 m.

^{137}Cs branduolio skilimo schema pavaizduota 6 pav. ^{137}Cs branduolys β^- skilimo būdu virsta metastabiliosios sužadintos būsenos $^{137\text{m}}\text{Ba}$ branduoliu. ^{137}Cs aktyvumas nustatomas pagal γ spinduliuotės, kuri atsiranda, vykstant ^{137}Ba branduolių šuoliams į pagrindinę būseną, intensyvumą. Šios spinduliuotės fotono energija yra 0.662 MeV .

Radioaktyviojo užterštumo matavimuose atsižvelgiama ir į kitą radioaktyvųjį cezio izotopą – ^{134}Cs . Nuklidas ^{134}Cs β^- skilimo būdu virsta nuklidu ^{134}Ba . Didžioji dalis (maždaug 70 %) ^{134}Ba branduolių po ^{134}Cs skilimo atsiduria antrajame sužadintame energijos lygmenyje (kaip ir skylant ^{137}Cs). Tačiau iš šios būsenos vyksta šuolis ne į pagrindinę būseną, o į pirmąją sužadintąją būseną, iš kurios vyksta šuolis į pagrindinę būseną. Pirmojo šuolio metu išspinduliuojamas fotonas, kurio energija 0.795 MeV , o antrojo šuolio metu išspinduliuojamas fotonas, kurio energija 0.605 MeV . Nuklidas ^{134}Cs yra mažiau svarbus, negu ^{137}Cs , nes jo skilimo pusamžis yra tik 2.1 m, o kiekiai daug mažesni, negu izotopo ^{137}Cs . Tačiau tiksluose matavimuose į ^{134}Cs spinduliuotę tenka atsižvelgti, nes ją sunku atskirti nuo ^{137}Cs spinduliuotės: γ kvantų, kuriuos spinduliuoja ^{134}Cs , energijos yra labai artimos ^{137}Cs spinduliuojamų γ kvantų energijai (žr. aukščiau).



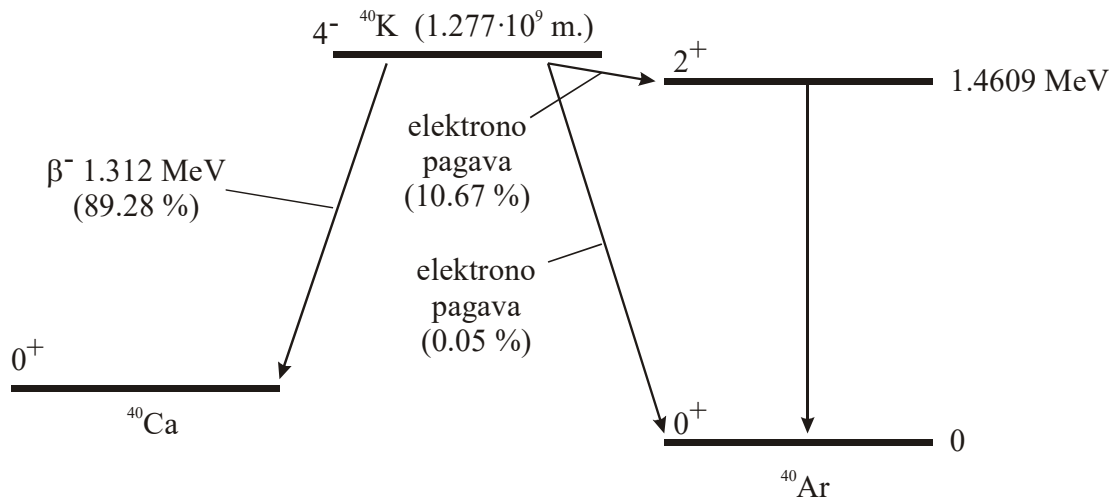
6 pav. Radioaktyviojo skilimo $^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137}\text{Ba}$ schema.

3.5. Radioaktyvusis nuklidas ^{40}K

Kalio (K) atominis numeris yra 19, o vidutinis atominis masės skaičius yra 39.098. Kalis, kaip ir cezis, yra šarminis metalas, todėl kalio cheminės savybės panašios į cezio chemines savybes. Gamtoje egzistuoja trys kalio izotopai: ^{39}K (93.26%), ^{41}K (6.73%) ir ^{40}K (0.0119%). Pastarasis izotopas yra radioaktyvus. Skirtingai negu radioaktyvieji cezio izotopai, radioaktyvusis kalio izotopas ^{40}K yra natūralios kilmės. Jis atsirado kartu su kitais elementais Žemės formavimosi metu. Dėl savo didelio skilimo pusamžio ($1.277 \cdot 10^9$ m.) ^{40}K izotopas iki šiol egzistuoja ant Žemės paviršiaus ir jos gelmėse.

Kalis yra gyvybiškai svarbus medžiagų apykaitai gyvuosiuose organizmuose. Nustatyta, kad žmogaus kūno viename grame vidutiniškai yra 0.0018 g kalio (čia turimi omenyje visi kalio izotopai). Kadangi visi kalio izotopai turi visiškai vienodas chemines savybes (jas lemia atomo elektronų sluoksniai, o ne branduolio masės skaičius), tai radioaktyvusis kalio izotopas ^{40}K dalyvauja medžiagų apykaitoje kartu su neradioaktyviaisiais izotopais ^{39}K ir ^{41}K . Nuklido ^{40}K aktyvumas sudaro 86% viso žmogaus kūne esančių radioaktyviųjų nuklidų aktyvumo (likusieji 14% – tai radioaktyviojo anglies izotopo ^{14}C aktyvumas). Žmogaus kūno vieno kilogramo vidutinis aktyvumas dėl jame esančio ^{40}K yra 56 Bq (t. y. 56 skilimai per sekundę). Taigi, 70 kg svorio žmogaus kūno aktyvumas dėl ^{40}K skilimo jame yra maždaug 4000 Bq = 4 kBq.

Nuklido ^{40}K skilimo schema pavaizduota 7 pav. Matome, kad egzistuoja du ^{40}K skilimo kanalai: β^- skilimas, susidarant kalcio izotopui ^{40}Ca , ir elektrono pagava, susidarant argono izotopui ^{40}Ar (elektrono pagava – tai toks atomo branduolio virsmas, kai branduolys pagauna vieną iš atomo orbitinių elektronų ir vienas branduolio protonas virsta neutronu). Didžioji dalis (beveik 90%) visų ^{40}K branduolių skyla β^- skilimo būdu. Tačiau, tiriant didelių bandinių tūrinį aktyvumą, naudingesnis yra antrosios rūšies skilimas (elektrono pagava), nes jo metu susidaro sužadintos būsenos branduolys. Vykstant šio branduolio šuoliui į pagrindinę būseną, išspinduliuojamas 1.461 MeV energijos γ kvantas. Kadangi γ spinduliuotė yra daug silpniau sugerama medžiagoje, negu β spinduliuotė, γ spinduliuotė labiau tinka radioaktyviojo nuklido koncentracijos medžiagoje matavimams.



7 pav. Nuklido ^{40}K skilimo schema.

3.6. Tūrinio radioaktyviojo užterštumo normos

Įvairių medžiagų radioaktyvusis užterštumas išreiškiamas tūrio vieneto arba masės vieneto aktyvumu. Tūrio vieneto aktyvumas vadinamas *tūriniu aktyvumu* ir matuojamas bekereliais litre (Bq/l), o masės vieneto aktyvumas vadinamas *savituoju aktyvumu* ir matuojamas bekereliais kilograme (Bq/kg). Be to, vietoj bekerelio dar naudojamas nesisteminis vienetas kiuris ($1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$) arba pikokiuris ($1 \text{ pCi} = 10^{-12} \text{ Ci} = 0.037 \text{ Bq}$). Tada vietoj Bq/l naudojamas pCi/l, o vietoj Bq/kg naudojamas pCi/kg.

JAV aplinkos apsaugos agentūros (Environmental Protection Agency) rekomenduojamas geriamojo vandens didžiausias leistinas ^{137}Cs tūrinio aktyvumo lygis yra 200 pCi/l = 7.4 Bq/l.

Lietuvoje šiuo metu galiojantys maisto produktų didžiausi leidžiamieji savitieji aktyvumai atitinka Europos Bendrijų Tarybos 1990 m. kovo 22 d. priimtą ir 2000 m. kovo 20 d. pakeistą reglamentą, pagal kurį didžiausias leistinas savitasis ^{137}Cs ir ^{134}Cs radioaktyvumo lygis yra:

- 370 Bq/kg pienui ir pieno produktams bei maisto produktams, specialiai skirtiems maitinti kūdikius per pirmuosius keturis – šešis gyvenimo mėnesius,
- 600 Bq/kg visiems kitiems produktams.

Pagal šį reglamentą visų koncentruotų ar džiovintų produktų didžiausi leidžiamieji užterštumo lygiai turi būti nustatomi ir taikomi atgamintiems ir jau vartoti paruoštiems produktams. Tai reiškia, kad šių normų negalima taikyti, pvz., džiovintiems grybams. Tačiau kai kuriose šalyse egzistuoja atskiros normos koncentruotiems ir džiovintiems produktams. Pvz., Baltarusijoje didžiausias leidžiamasis džiovintų grybų savitasis aktyvumas (1999 m. duomenimis) yra 2500 Bq/kg. Aišku, kad šviežių grybų savitasis aktyvumas normaliomis sąlygomis yra daug mažesnis, nes maždaug 90 % šviežių grybų masės sudaro vanduo, kurio savitasis aktyvumas dažniausiai būna labai mažas.

^{40}K kiekiai nėra reguliuojami jokiais normomis, nes šis nuklidas yra natūralios kilmės.

4. Atmosferos užterštumo radionuklidais tyrimo metodika

4.1. Darbo priemonės

Šio darbo pirmosios dalies matavimo įrangos bendrasis vaizdas pateiktas 8 pav.



8 pav. Darbo pirmosios dalies matavimo įrangos bendrasis vaizdas

Matavimo įranga:

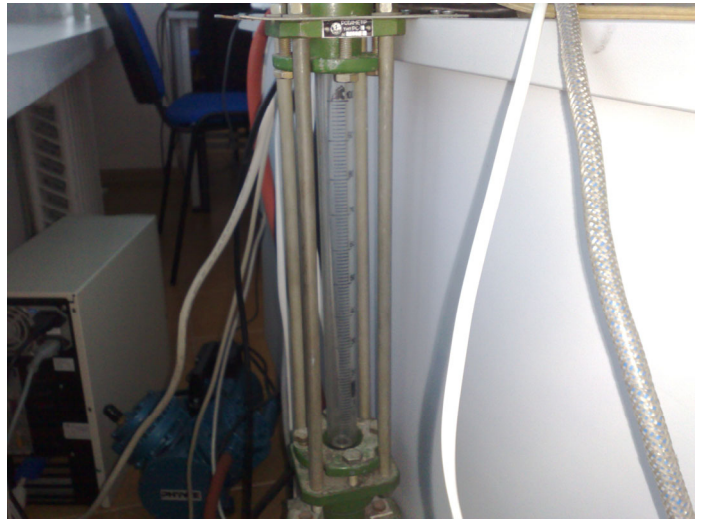
- a) Geigerio ir Miulerio skaitiklis YMΦ (matomas 8 pav. kairiajam apatiniame kampe),
- b) emiterinis kartotuvuvas (matomas 8 pav. dešiniajame krašte),
- c) impulsų skaičiavimo įrenginys su mikrokontroleriu (8 pav. tarp monitoriaus ir kartotuvo),
- d) personalinis kompiuteris,
- e) oro siurblys su siurbimo spartos indikatoriumi ir filtro laikikliu (jie pritvirtinti prie darbo stalo kairiojo krašto; 8 pav. matomas baltas siurblio gaubtas),
- f) autotransformatorius (8 pav. matomas tarp siurblio gaubto ir monitoriaus),
- g) filtras.

Geigerio ir Miulerio skaitiklis turi storą metalinį gaubtą, kuris skirtas aplinkos spinduliuotės įtakai sumažinti. Dėl to gaubto didelio svorio ir didelių matmenų skaitiklis statomas ne ant darbo stalo, o ant grindų šalia stalo. Skaitiklio korpuse yra bėgiai, kuriais galima slankioti gaubtą, tempiant jį už rankenos.

Emiterinis kartotuvus yra naudojamas todėl, kad Geigerio ir Miulerio skaitiklio išėjimo varža yra daug didesnė už impulsų skaičiavimo įrenginio įėjimo varžą. Todėl, tiesiogiai prijungus impulsų skaičiavimo įrenginį prie Geigerio ir Miulerio skaitiklio, didžioji išėjimo impulso įtampos dalis kristų skaitiklio išėjimo varžoje, o skaičiavimo įrenginio įėjimo impulso amplitudė būtų mažesnė už to įrenginio jautrio ribą. Emiterinio kartotuvo paskirtis – sumažinti išėjimo varžą, nekeičiant išėjimo įtampos (jo įėjimo varža yra didelė, o išėjimo varža yra maža). Geigerio ir Miulerio skaitiklio išėjimas sujungtas su emiterinio kartotuvo įėjimu, o impulsų skaičiavimo įrenginio įėjimas sujungtas su emiterinio kartotuvo išėjimu.

Filtrai – tai filtravimo medžiagos ФПП-15-1,7 diskas. Šios medžiagos filtravimo efektyvumas aerolinėms dalelėms $\alpha = 1$.

Siurbimo spartos indikatorius – tai vertikalus stiklinis vamzdelis, kuriame yra metalinis pasvaras. Pro vamzdelį pereinant oro srautui, pasvaras pakyla. Jo pakilimo aukštis yra tiesiog proporcingas oro siurbimo spartai. Siurbimo spartos indikatorius yra po siurbliu, kuris pritvirtintas prie darbo stalo kairiojo šono (nuotrauka yra 9 pav.).



9 pav. Siurbimo spartos indikatoriaus nuotrauka

4.2. Matavimo tvarka

Tiriant oro radioaktyvųjų užterštumą, reikia išmatuoti tris duomenų rinkinius:

- 1) fonas (fono vidurkis – tai pastovus dėmuo, kurį paskui reikės atimti iš filtro aktyvumo matavimo duomenų);
- 2) etaloninio radioaktyviojo šaltinio spinduliuotės matavimo duomenys (jie reikalingi skaičiuojant detektoriaus absoliutųjį efektyvumą ir neveikos trukmę);
- 3) filtro aktyvumo priklausomybė nuo laiko (tai yra svarbiausias darbo rezultatas, pagal kurį nustatomas oro radioaktyvusis užterštumas).

Fonas matuojamas maždaug 10 min (vieno matavimo trukmė – 1 s). Etaloninio šaltinio spinduliuotė matuojama filtravimo metu (t. y. tuo metu, kai yra įjungtas siurblys, kuris siurbia orą per aerolinę dalelių filtrą). Šiame etape vieno matavimo trukmė yra 0,1 s, o pilnutinė matavimų trukmė – maždaug 5 min. Filtravimo trukmė yra (20 ± 5) min. Filtro aktyvumo priklausomybė nuo laiko tiriama baigus filtruoti. Kadangi filtro aktyvumas mažėja lėtai, tai jį reikia matuoti kuo ilgiau (bent 1,5 val.). Šiame etape vieno matavimo trukmė yra 1 min. Kadangi impulsų skaičiavimo įrenginio valdymas ir duomenų kaupimas yra automatizuoti (naudojant kompiuterį), tai šiame etape galima atlikti antrąją šio darbo dalį (medžiagų tūrinio radioaktyviojo užterštumo tyrimą), kurioje naudojama visiškai kitokia įranga (žr. 5 skyrių).

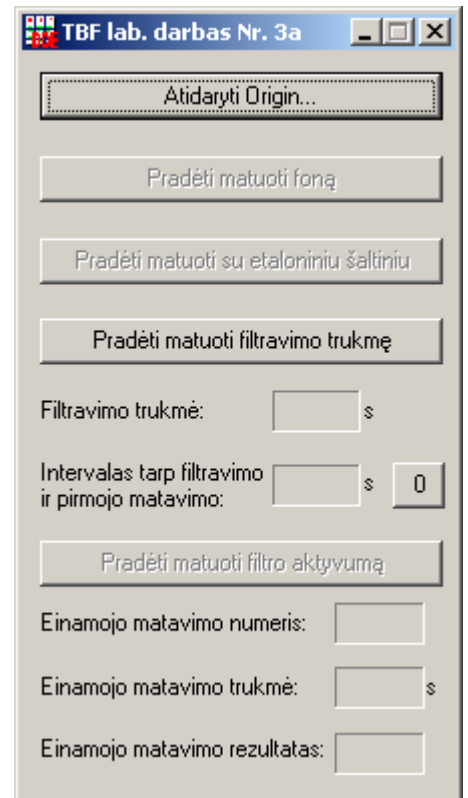
Kompiuterinė programa, kuri priima duomenis iš impulsų skaičiavimo įrenginio, realiu laiku siunčia tuos duomenis į programą „Origin 6“. Programa „Origin 6“ atvaizduoja duomenų lenteles ir grafikus.

Toliau aprašyta matavimo tvarka:

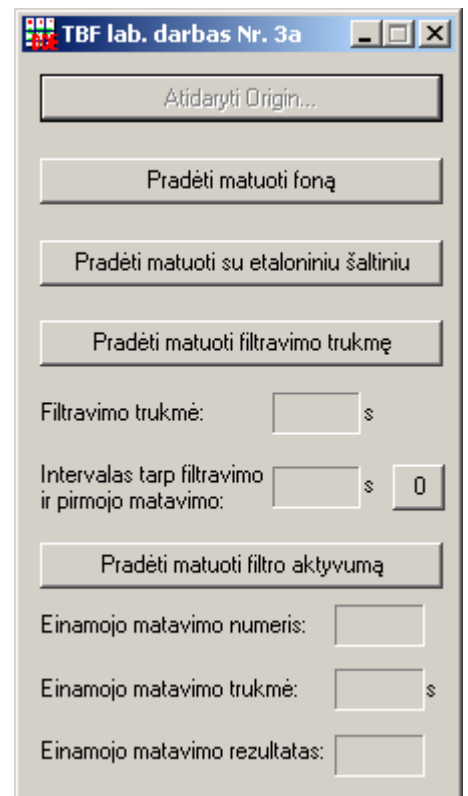
1. Įsitikinama, kad siurbimo spartą valdančio autotransformatoriaus rankenėlė yra kairiojoje kraštinėje padėtyje (t. y. atsukta prieš laikrodžio rodyklę iki galo). Įjungiami Geigerio ir Miulerio skaitiklis, autotransformatorius, emiterinis kartotuvus, skaičiavimo įrenginys ir

kompiuteris. Autotransformatorius ir emiterinis kartotuvus neturi atskiro elektros tinklo jungiklio (užtenka prijungti autotransformatoriaus elektros tinklo laidą ir emiterinio kartotuvo elektros tinklo adapterį prie ilgaklio). Geigerio ir Miulerio skaitiklio elektros tinklo jungiklis yra sunkiai prieinamas, todėl jis visą laiką turi būti įjungtoje padėtyje ir, įjungiant Geigerio ir Miulerio skaitiklį, taip pat užtenka tik įjungti ilgaklį, prie kurio jis prijungtas. Impulsų skaičiavimo įrenginio elektros tinklo jungiklis yra ant to įrenginio priekinės sienelės.

- Atidengiamas Geigerio ir Miulerio skaitiklis (t. y. metalinis gaubtas atitraukiamas nuo skaitiklio langelio). Filtravimo medžiaga padedama prieš skaitiklio langelį (dėti reikia atsargiai, kad nebūtų prisiliesta prie langelio, kuris yra labai trapus). Geigerio ir Miulerio skaitiklis uždengiamas, t. y. metalinis gaubtas pristumiamas prie skaitiklio langelio. **Dėmesio!** Gaubtą reikia pristumti iš lėto, kad gaubtas neatsitrenktų į skaitiklio korpusą (dėl gaubto didelės masės tokie atsitrenkimai gali sutrumpinti skaitiklio eksploatavimo laiką; be to, visas skaitiklis kartu su gaubtu gali pasislinkti). Tarp gaubto ir korpuso gali likti 1 – 2 cm tarpas.
- Startuojama programa „3a.exe“, kuri priima duomenis iš impulsų skaičiavimo įrenginio ir siunčia juos į programą „Origin 6.1“ (nuoroda į failą „3a.exe“ yra matoma „Windows“ darbastalyje). Programos „3a.exe“ lango pradinis pavidalas parodytas 10a pav.
- Jeigu programa „Origin“ yra atidaryta, ją reikia uždaryti. Paskui reikia spustelėti mygtuką „Atidaryti Origin...“. Tada atsirado dialogo langas „Open“, kuriame galima pasirinkti reikalingą „Origin“ duomenų failą arba sukurti naują failą. Norint sukurti naują failą, reikia dialoge „Open“ pasirinkti reikalingą katalogą, o paskui laukelyje „File name:“ surinkti norimą failo vardą (jis turi skirtis nuo visų kitų tame kataloge esančių „Origin“ failų vardų) ir spustelėti mygtuką „Open“. Tada programa „3a.exe“ tame kataloge sukurs ir atidarys tuščią failą, kurio formatas optimizuotas šiam laboratoriniam darbui. **Dėmesio!** Jeigu mygtuko „Atidaryti Origin...“ spustelėjimo momentu jau buvo atidaryta programa „Origin“, tada, nepriklausomai nuo to, koks failas buvo pasirinktas dialogo lange „Open“, tas failas nebus atidarytas, o duomenys bus siunčiami į jau atidarytą „Origin“ failą. Jeigu tuo metu buvo aktyvūs keli „Origin“ projektai, tada duomenys bus siunčiami į failą, kuris buvo atidarytas anksčiausiai.
- Jeigu programa „3a.exe“ sėkmingai užmezga ryšį su programa „Origin“, tada mygtukas „Atidaryti Origin...“ tampa neaktyvus, o trys mygtukai, kurie susiję su trim minėtaisiais matavimų etapais, tampa aktyvūs (mygtukas „Pradėti matuoti filtravimo trukmę“ yra aktyvus visada, išskyrus filtro aktyvumo matavimo etapą, nes filtravimas nėra susijęs su duomenų perdavimu į „Origin“). Tada reikia pradėti matuoti foną, t. y. pastoviąją impulsų skaičiavimo



(a)



(b)

10 pav. Programos „3a.exe“ lango pavidalas: (a) pradinis langas; (b) esant ryšiui su „Origin“

spartos komponentę, kurią paskui reikės atimti iš visų filtro aktyvumo matavimo dėmenų (fona sąlygoja filtro medžiagos savasis radioaktyvumas ir aplinkos spinduliuotė, kuri pereina pro Geigerio ir Miulerio skaitiklio gaubtą). Tam reikia spustelėti programos „3a.exe“ mygtuką „Pradėti matuoti foną“. Tada prasideda automatinis duomenų perdavimas į „Origin“ failo lentelę „Fonas“ (toje lentelėje yra dalelių skaičiai, kurie buvo detektuoti per 1 s trukmės matavimus). Atlikus 600 matavimų, programa pati sustabds duomenų perdavimą.

„Origin“ duomenų failas sudarytas iš 4 langų:

fono duomenų lentelės langas „Fonas“;

etaloninio šaltinio spinduliuotės matavimo duomenų lentelės langas „Kalibr“;

filtro aktyvumo laikinės priklausomybės matavimo duomenų lentelės langas „Filtrai – lentelė“;

langas su filtro aktyvumo laikinės priklausomybės grafiku „Filtrai_grafikas“.

Naudojantis „Origin“ meniu komanda „Window“, galima atidaryti bet kurį iš minėtų langų. Tai galima daryti ir matavimų metu: programa „3a.exe“ visada perduoda duomenis į teisingą lentelę, net jeigu tos lentelės langas nėra atidarytas.

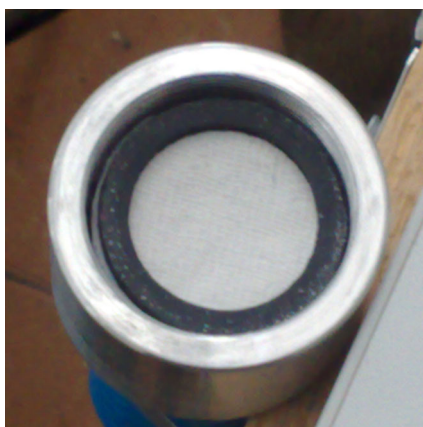
6. Filtravimo medžiaga įdedama į siurblio filtro laikiklį, kaip parodyta 11 pav. Filtras turi būti suspaustas tarp dviejų guminių tarpinių (tam naudojamas specialus varžtas). To reikia, kad kuo didesnė siurbiamo oro dalis eitų per filtravimo medžiagą ir kuo mažesnė oro dalis „apeitų“ filtrą pro jo kraštus (kadangi matuojamas *pilnutinis* oro srautas, o oro užterštumui reikia žinoti *pereinantį per filtrą* oro srautą, tai reikia, kad šie du srautai būtų kuo artimesni vienas kitam).



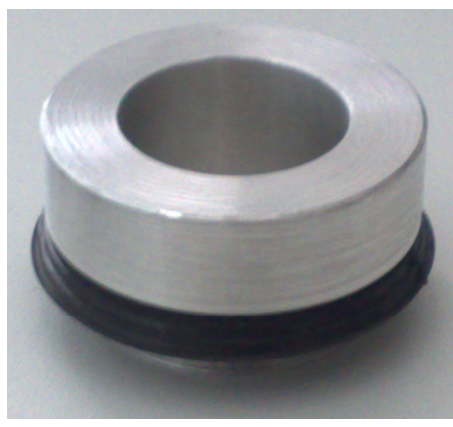
(a)



(b)



(c)



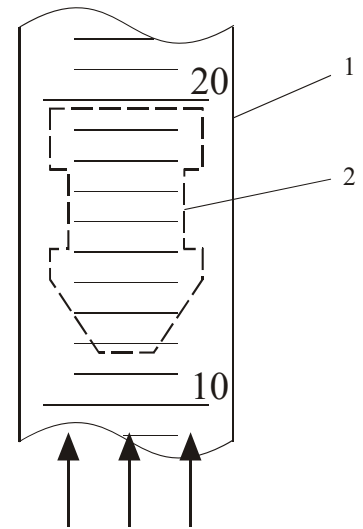
(d)



(e)

11 pav. Filtro įdėjimas į laikiklį: (a) metalinis tinklelis, ant kurio uždėta guminė tarpinė (ant tos tarpinės reikės uždėti filtrą); (b) filtras padėtas ant guminės tarpinės; (c) antroji guminė tarpinė uždėta ant filtro; (d) prispaudimo varžtas; (e) prispaudimo varžtas prisuktas prie filtro laikiklio

7. Lėtai sukant autotransformatoriaus rankenėlę, nustatoma siurbimo sparta $\omega = 20$ litrų/min. Ši sparta nustatoma pagal siurbimo spartos indikatorius skalę. Skaičiai, kurie užrašyti ant indikatorius vamzdelio (žr. 12 pav.), reiškia litrus per minutę. Siurbimo spartą parodo padala, kuri yra ties pasvaro viršutiniu kraštu. Todėl, norint užduoti 20 l/min, pasvaras turi būti tokioje padėtyje kaip parodyta 12 pav. Filtravimo trukmė $\theta = (20 \pm 5)$ min.
8. Nustačius siurbimo spartą, pradedama matuoti filtravimo trukmę. Tam reikia spustelėti programos „3a.exe“ mygtuką „Pradėti matuoti filtravimo trukmę“. Programa atvaizduoja einamąją filtravimo trukmę lauke „Filtravimo trukmė“ (žr. 10 pav.).
9. Filtruojant išmatuojamas skilimo registravimo efektyvumas ε . Tam prieš Geigerio ir Miulerio skaitiklio langelį padedamas žinomo aktyvumo („etaloninis“) ^{90}Sr bandinys. Radioaktyviojo šaltinio korpuso galas, kuriame yra radioaktyvioji medžiaga, turi būti ties laikiklio kraštu, kuris yra toliausiai nuo skaitiklio langelio (tada atstumas tarp ^{90}Sr bandinio ir skaitiklio langelio yra 93 mm). ^{90}Sr šaltinio konteinerį reikia panaudoti kaip laikiklio dalį (tas konteineris turi būti įkištas į putų polistireno žiedą, kuris yra prieš laikiklį). Įdėjus etaloninį šaltinį, atliekama 3000 matavimų po 0.1 s. Tam reikia spustelėti programos „3a.exe“ mygtuką „Pradėti matuoti su etaloniniu šaltiniu“. Tada prasideda automatinis duomenų perdavimas į „Origin“ failo lentelę „Kalibr“ (toje lentelėje yra dalelių skaičiai, kurie buvo detektuoti per 0,1 s trukmės matavimus). Atlikus 3000 matavimų, programa pati sustabdys duomenų perdavimą. Baigus šiuos matavimus, ^{90}Sr bandinį reikia ištraukti iš Geigerio ir Miulerio skaitiklio gaubto ir įdėti į apsauginį konteinerį (to šaltinio daugiau neprireiks).
10. Praėjus (20 ± 5) min nuo filtravimo pradžios, siurblys išjungiamas. Siurblio išjungimo momentu reikia spustelėti programos „3a.exe“ mygtuką „Baigti matuoti filtravimo trukmę“ (tada laikas, kuris rodomas lauke „Filtravimo trukmė“, nustoja augti, tačiau pradeda augti laikas lauke „Intervalas tarp filtravimo ir pirmojo matavimo“). Palaukus, kol siurblys sustos, filtras ištraukiamas iš laikiklio ir dedamas prieš skaitiklio langelį. Uždaromas skaitiklio gaubtas. Uždarius gaubtą, reikia spustelėti programos „3a.exe“ mygtuką „Pradėti matuoti filtro aktyvumą“. Tada prasideda automatinis duomenų perdavimas į „Origin“ failo lentelę „Filtravimas – lentelė“. Toje lentelėje yra dalelių skaičiai, kurie buvo detektuoti per 60 s trukmės matavimus, ir kiekvieno matavimo pabaigos momentai (tarp matavimų yra trumpos pauzės, todėl intervalai tarp matavimo momentų yra šiek tiek didesni už 60 s). Trečiajame stulpelyje yra kiekvieno rezultato standartinė paklaida (kvadratinė šaknis iš to rezultato).
11. Mažiausiai 1 val. kaupiami duomenys (tuo metu reikia atlikti kitą šio darbo dalį, kuri aprašyta 5 skyriuje). Jeigu yra galimybė, duomenis galima kaupti ir ilgiau (šiuo matavimų etape programa pati nestabdo duomenų perdavimo).
12. Matavimai baigiami, spustelėjus programos „3a.exe“ mygtuką „Baigti matuoti filtro aktyvumą“. Užsirašius (arba įsidėmėjus) filtravimo trukmę, kuri atvaizduojama lauke „Filtravimo trukmė“, programą „3a.exe“ galima uždaryti, nes ji daugiau nebus reikalinga. **Pastaba:** Laikas, kuris atvaizduojamas lauke „Intervalas tarp filtravimo ir pirmojo matavimo“, buvo reikalingas pataisant laiko vertes, kurio buvo perduodamos į „Origin“. Kadangi tą pataisą programa atliko automatiškai, tai šis laikas jau nėra reikalingas ir jo nereikia įsidėmėti.
13. Dabar reikia apskaičiuoti kelis vidurkius, kurie bus reikalingi analizuojant matavimo duomenis: fono vidurkį, etaloninio šaltinio dalelių skaičiaus vidurkį ir pastarojo skaičiaus dispersiją. Tam reikia atidaryti „Origin“ duomenų failo langą „Fonas“ ir spustelėti mygtuką „Apskaičiuoti fono



12 pav. Siurbimo spartos indikatorius. 1 – stiklinis vamzdelis, 2 – pasvaras. Rodyklės rodo oro judėjimo kryptį.

vidurkį ir dispersiją“, o lange „Kalibr“ spustelėti mygtuką „Apskaičiuoti vidurkį ir dispersiją“. Tada minėtieji dydžiai atvaizduojami lentelėse, kurios yra po tais mygtukais. Paskui reikia išsaugoti matavimo duomenis („Origin“ meniu komanda „File / Save Project“ arba „File / Save Project As...“). **Pastabos:** **1)** fono dispersija nėra reikalinga analizuojant matavimo duomenis, tačiau jos vertę galima panaudoti patikrinant ar fonas išmatuotas teisingai: jeigu dalelių skaičiavimo sistema veikė normaliai, tada fono dispersija turėtų būti labai artima fono vidurkiui (tai yra Puasono skirstinio savybė). **2)** etaloninio šaltinio dalelių skaičiaus dispersija turėtų būti pastebimai mažesnė už vidurkį, nes šiuo atveju dalelių skirstinys nėra Puasono. Taip yra dėl to, kad, esant didelėms skaičiavimo spartoms, dalelių skaičiavimo sistema veikia neoptimaliai (dalelės detektavimo tikimybė jau nėra konstanta, o priklauso nuo to, prieš kiek laiko buvo detektuota ankstesnioji dalelė, t. y. skirtingų dalelių detektavimo įvykiai jau nėra nepriklausomi). Todėl *detektuotų* dalelių skirstinio pavidalas yra kitoks negu *sąveikavusių su detektoriaus darbine medžiaga* dalelių skirstinio pavidalas (pastarasis skirstinys visada yra Puasono, kad ir koks didelis būtų dalelių srautas, nes dalelės sąveikos su detektoriaus darbine medžiaga tikimybė yra konstanta). Minėtojo neoptimalumo priežastis yra baigtinė detektoriaus neveikos trukmė. Pagal dispersijos nuokrypį nuo vidurkio paskui bus galima apskaičiuoti detektoriaus neveikos trukmę (kuri ir sąlygoja tą nuokrypį).

14. Atspausdinami filtro aktyvumo matavimo duomenys (neatėmus fono), fono vidurkis, etaloninio šaltinio dalelių skaičiaus vidurkis, pastarojo skaičiaus dispersija ir filtravimo trukmė. Tuos duomenis reikia perkelti į vieną lentelę, ją suformatuoti taip, kad ji būtų aiški, o paskui atspausdinti. Tai nebūtinai turi būti „Origin“ lentelė; duomenis galima nukopijuoti ir į kitą programą (pvz., „Excel“ arba „Word“). Dialogo lange, kuris atsidaro įvykdžius komandą „File/Print“, turi matytis spausdintuvas, kuris yra laboratorijoje. **Pastaba:** Spausdintuvas, kuris šiuo metu naudojamas laboratorijoje, nėra tinklo spausdintuvas. T. y. jis prijungtas ne tiesiog prie kompiuterinio tinklo, o prie kompiuterio, kuris prijungtas prie kompiuterinio tinklo. Jeigu sistema negali užmegzti ryšio su spausdintuvu, tai gali reikšti, kad tas kompiuteris arba spausdintuvas nėra įjungtas.
15. Ant lapų su atspausdintais duomenimis reikia užrašyti savo vardą ir pavardę. Atspausdintą duomenų lentelę reikia įklijuoti į darbo žurnalą. Po atspausdinta duomenų lentelė turi pasirašyti darbo vadovas arba laborantas (jeigu duomenų lentelę sudaro daugiau negu vienas lapas, tada darbo vadovas arba laborantas pasirašo ant kiekvieno lapo).
16. Kompiuteris ir impulsų skaičiavimo įrenginys išjungiami iš elektros tinklo. Išjungiamas ilgiklis, prie kurio prijungti Geigerio ir Miulerio skaitiklis, autotransformatorius ir emiterinis kartotuvai.

„Origin“ duomenų failą, kuriame yra matavimo duomenys, ir jame esančius „script“us“ galima panaudoti analizuojant matavimo duomenis bei braižant atitinkamus grafikus.

5. Medžiagų tūrinio radioaktyviojo užterštumo tyrimo metodika

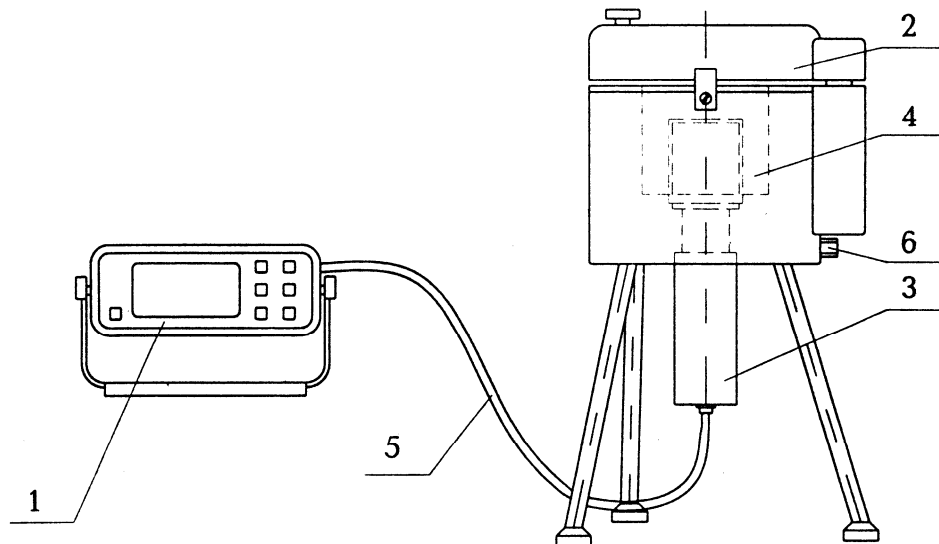
5.1. Darbo priemonės

1. Automatizuotas gama radiometras RKG-01A.
2. Elektroninės svarstyklės.
3. 0,5 l talpos indas su KCl milteliais.
4. Tuščias 0,5 l talpos indas.

Automatizuotas gama radiometras RKG-01A yra skirtas nuklidų ^{137}Cs ir ^{134}Cs mišinio su žinomu aktyvumu santykiu ir nuklido ^{40}K tūrinio arba savitojo aktyvumo skystuose arba susmulkintuose kietuose bandiniuose matavimams. Į šio radiometro sudėtį įeina scintiliacinis (blyksimasis) detektorius ir dviejų kanalų impulsų amplitudės analizatorius: pirmajame kanale registruojami 0.6 – 0.8 MeV energijos γ kvantai, kurie atsiranda skylant nuklidams ^{137}Cs ir ^{134}Cs , o antrajame kanale tuo pačiu metu registruojami maždaug 1.5 MeV energijos γ kvantai, kurie atsiranda, skylant nuklidui ^{40}K . Matavimų tikslumas yra didžiausias tada, kai tiriamasis produktas yra supiltas į vadinamąjį *Marineli indą*. Marineli indo geometrija yra optimizuota tūrinio

radioaktyviojo užterštumo matavimams. T. y. ši geometrija yra tokia, kad kuo daugiau γ kvantų, išspinduliuotų įvairiuose bandinio taškuose, pasiektų detektorių. Žinoma, neįmanoma pasiekti, kad visi γ kvantai būtų užregistruoti. Todėl, norint pagal užregistruotą per 1 s γ kvantų skaičių apskaičiuoti bandinio tūrinį arba savitąjį aktyvumą, reikia tą skaičių dauginti iš **normavimo koeficiento**, kuris priklauso nuo bandinio masės, tūrio ir nuo nuklidų ^{134}Cs ir ^{137}Cs aktyvumų santykio bandinyje. Radiometras tai atlieka automatiškai. Šiuo metu (praėjus daugiau kaip 20 m. nuo Černobylio atominės elektrinės avarijos) nuklidų ^{134}Cs ir ^{137}Cs aktyvumų santykis yra mažesnis už 0.01, todėl į nuklido ^{134}Cs įtaką galima neatsižvelgti. Tada, naudojant pilnai užpildytą 1 l talpos Marineli indą, normavimo koeficientas Cs kanalui yra $38 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{s}$ (pvz., registravimo spartą 100 s^{-1} atitinka tūrinis aktyvumas 3800 Bq/l). Tai yra standartinė normavimo koeficiento vertė. Jeigu būtų iš anksto žinoma, kad nuklidų ^{134}Cs ir ^{137}Cs aktyvumų santykis yra didesnis už 0.01, tada normavimo koeficientą reikėtų pataisyti, naudojant specialius perjungiklius, kurie yra ant radiometro (šiam darbe to daryti nereikės). Normavimo koeficientas K kanalui tomis pačiomis sąlygomis yra $700 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{s}$ (pvz., registravimo spartą 10 s^{-1} atitinka tūrinis aktyvumas 7000 Bq/l). Kaip matome, K kanalo normavimo koeficientas yra daug didesnis už Cs kanalo normavimo koeficientą. Taip yra dėl to, kad nuklido ^{40}K spinduliuojamų fotonų energija yra daug didesnė už nuklido ^{137}Cs spinduliuojamų fotonų energiją. Atitinkamai, daug didesnė ^{40}K spinduliuojamų fotonų dalis praeina pro detektorių, nesusidūrę nė su vienu atomu ir nesukėlę šviesos blyksnio scintiliatoriaus kristale. T. y. ^{40}K γ spinduliuotės registravimo efektyvumas yra daug mažesnis, negu ^{137}Cs γ spinduliuotės registravimo efektyvumas. β^- spinduliuotė, kuri taip pat atsiranda, skylant ^{137}Cs ir ^{40}K (žr. skilimo schemas 1 pav. ir 2 pav.), nėra registruojama, nes detektoriaus kristalas yra metaliniame korpuse, kuris nepraleidžia β dalelių.

Radiometro RKG-01A pagrindinės dalys pavaizduotos 13 pav. Detektavimo blokas 3 (DB) transformuoja kiekvieno užregistruoto gama kvanto energiją į elektrinį impulsą, kurio amplitudė proporcinga tai energijai. Radiometrinis informacijos apdorojimo blokas 1 (RIAB) atlieka tų impulsų amplitudės analizę, kaupia ir matematiškai apdoroja rezultatus, atvaizduoja juos skystųjų kristalų rodytuve, valdo radiometro darbo režimus, atlieka savikontrolę. Apsaugos blokas 2 (AB) yra skirtas aplinkos gama spinduliuotės fono sumažinimui ir indų su bandiniais talpinimui.



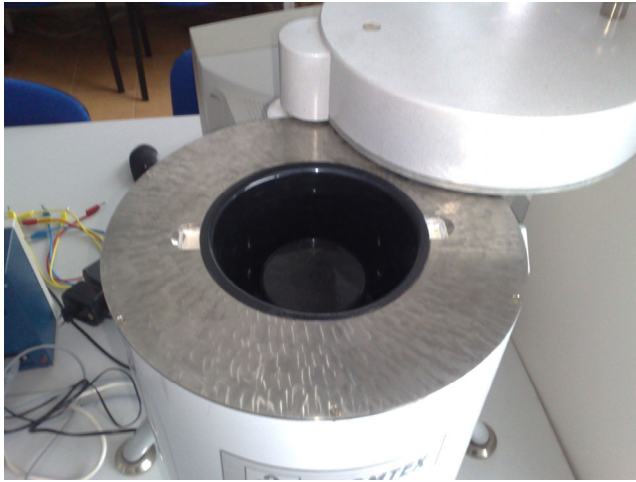
13 pav. Automatizuoto gama radiometro RKG-01A pagrindinės dalys: 1 – radiometrinis informacijos apdorojimo blokas (RIAB); 2 – apsaugos blokas (AB); 3 – detektavimo blokas (DB); 4 – Marineli indas; 5 – detektavimo bloko kabelis; 6 – įžeminimo varžtas.

5.2. Matavimo tvarka

Atliekant antrąją šio darbo dalį, visas matavimo procesas yra sudarytas iš dviejų dalių – fono matavimas ir bandinių savitojo aktyvumo matavimas.

I. Fono matavimas

1. Įjungiamas RIAB (mygtukas **БКЛ**).
2. AB atidengiamas. Tam reikia pasukti dangtį į dešinę (žr. 14a pav.). Kad būtų galima pasukti dangtį, turi būti atlaisvintas fiksatorius, kuris yra AB dešiniajame šone (žr. 14b pav.). Į AB įdedamas tuščias 0.5 l talpos indas ir uždaromas dangtis.



(a)



(b)

14 pav. Apsaugos bloko atidengimas: (a) pilnai atidengtas apsaugos blokas; (b) fiksatorius, kuris turi būti atlaisvintas, kad būtų galima atidengti apsaugos bloką

3. Nuspaudžiamas mygtukas **ФОН** ("Fonas"). Tada rodytuve atvaizduojamas simbolis "F" ir pasigirsta trumpas garso signalas (kad pasigirstų tas signalas, reikia laikyti nuspaudus mygtuką 2–3 s). Tai reiškia, kad radiometras perėjo į fono matavimo režimą. Ekране pasirodo ankstesniųjų fono matavimų duomenys: pirmąsias 3 s atvaizduojamas fonas Cs kanale, o kitas 3 s atvaizduojamas fonas K kanale. Paskui prasideda naujas fono matavimas. Rodytuve atvaizduojama nauja informacija: pirmojoje eilutėje – einamojo fono matavimo rezultatas Cs kanale ir jo dimensija " s^{-1} " (impulsai per sekundę), antrojoje eilutėje – fono Cs kanale santykinės matavimo paklaidos vertė procentais. Šie rezultatai atnaujinami kas sekundę; jų tikslumas nuolat auga (tai pasireiškia santykinės paklaidos mažėjimu);
4. Jeigu reikia atvaizduoti einamojo fono matavimo rezultatą ir jo santykinę paklaidą K kanale, reikia dar kartą nuspausti mygtuką **ФОН**. Apskritai, fono matavimo metu kiekvieną nelyginį mygtuko **ФОН** nuspaudimą atitinka fono Cs kanale atvaizdavimas, o kiekvieną lyginį nuspaudimą – fono K kanale atvaizdavimas. Radiometras visada matuoja šiuos du dydžius vienu metu, nepriklausomai nuo to, kuris iš jų yra atvaizduotas rodytuve.
5. Kai fono matavimo Cs kanale paklaida tampa mažesnė už 5%, pasigirsta trumpas garso signalas ir rodytuvo antrojoje eilutėje prieš simbolį "+/-" pasirodo signalas "!". Tai reiškia, kad fonas išmatuotas pakankamai tiksliai, ir fono matavimus galima baigti. Tada nuspaudžiamas mygtukas **СТОП** (kaip ir kitus radiometro mygtukus, jį reikia laikyti nuspaudus 2–3 s iki trumpo garso signalo). Radiometras įsimena fono vertes abiejuose kanaluose. Vėlesniuose savitojo aktyvumo matavimuose fonas bus automatiškai atimtas iš matavimo duomenų. Galutinę fono vertę kiekviename kanale reikia užsirašyti darbo sąsiuvinyje. Normaliomis sąlygomis fonas Cs kanale neturėtų viršyti $2.5 s^{-1}$, o fonas K kanale neturėtų viršyti $1.5 s^{-1}$. Kai nevyksta matavimas, tada, norint pakeisti kanalą, kurio matavimo rezultatas yra rodomas, reikia pakartotinai nuspausti mygtuką **СТОП**.

II. Savitojo aktyvumo matavimas

1. Prieš matuojant bandinio savitąjį aktyvumą, išmatuojama jo masė. Visų pirma reikia išmatuoti tuščio indo masę. Tam įjungiamos elektroninės svarstyklės (mygtukas „ON/OFF/TARE“), paskui tuščias 0,5 l talpos indas uždedamas ant svarstyklių. Svarstyklių rodytuvas parodo indo svorį (g). Dar kartą nuspaudžiamas tas pats svarstyklių mygtukas. Tada svarstyklės įsimenta indo svorį, ir jis bus automatiškai atimtas iš vėlesniųjų matavimų rezultatų.
2. 0,5 l talpos indas su KCl milteliais atsargiai išimamas iš maišelio ir uždedamas ant svarstyklių. Darbo sąsiuvinyje užrašoma bandinio masė.
3. Į AB įdedamas indas su KCl milteliais. Uždaromas AB dangtis.
4. Į radiometro atmintį įrašomas bandinio tūris. Tam reikia nuspausti mygtuką **ОБЪЕМ**. Yra kelios standartinės matavimo geometrijos, kurias galima pasirinkti laikant nuspaudus mygtuką **ОБЪЕМ**. Matavimo geometriją nusako simbolis, kuris pasirodo rodytuve. Laikant nuspaudus mygtuką **ОБЪЕМ**, rodytuve paeiliui atvaizduojami simboliai, kurie pavaizduoti 15 pav. Pirmasis simbolis parodo, ar matavimai atliekami su uždarytu dangčiu, ar su atidarytu dangčiu (simbolis **H** atitinka uždarytą dangtį, o simbolis **U** atitinka atidarytą dangtį). Skaičius parodo tūrį (litrais). Nuo pasirinkimo priklauso normavimo koeficientas, kurį naudos radiometras, konvertuodamas gama kvantų skaičiavimo spartą (išreikštą s^{-1}) į savitąjį aktyvumą (Bq/kg) arba į tūrinį aktyvumą (Bq/l). Normavimo koeficientai, kurie atitinka uždarytą dangtį, nustatyti tiksliai apibrėžtos formos indams, kurie įeina į radiometro komplektą (tie indai ir yra naudojami šiame darbe). Normavimo koeficientai, kurie atitinka atidarytą dangtį, nustatyti pramoninei stiklinei tarai (1 l, 0,5 l ir 0,25 l talpos stiklainiai). Kadangi matavimas bus atliekamas su uždarytu dangčiu naudojant 0,5 l talpos indą, tai mygtuką **ОБЪЕМ** reikia paleisti tada, kai pasirodys užrašas „**H** 0.5 l“. Kad šis pasirinkimas būtų įrašytas į radiometro atmintį, reikia nuspausti mygtuką **СТОП** ir laikyti jį nuspaudus 2 – 3 s iki trumpo garso signalo.

H	1,0 l
H	0,5 l
H	0,1 l
U	1,0 l
U	0,5 l
U	0,2 l

15 pav. Simboliai, kurie atvaizduojami rodytuve pasirenkant matavimo geometriją

Pastaba: Kai bus matuojamas bandinio aktyvumas, radiometro rodytuve bus atvaizduojamas vienas iš dviejų dydžių – savitasis aktyvumas (Bq/kg) arba tūrinis aktyvumas (Bq/l). Kuris iš šių dviejų dydžių bus atvaizduotas, priklauso nuo to, kuris iš dviejų normavimo koeficientą lemiančių parametrų (tūris ar masė) buvo užduotas paskutinis. Jeigu tie parametrai užduodami ta pačia tvarka kaip čia parašyta (t. y. jeigu masė užduodama po tūrio), tada radiometras

matuos savitąjį aktyvumą (Bq/kg). Priešingu atveju (sukeitus 4 ir 5 punktus vietomis) radiometras matuos tūrinį aktyvumą (Bq/l). Kadangi šiame darbe turi būti matuojamas savitasis aktyvumas, tai, uždavus tūrį, būtinai reikia užduoti masę (net jeigu jos vertė lieka nepakitusi). T. y. reikia nuspausti mygtuką **MACCA**, o paskui nuspausti mygtuką **CTOII**.

6. Pradedamas savitojo aktyvumo matavimas. Tam nuspaudžiamas mygtukas **ИЗМЕР**. Pirmąsias 3 s rodytuve atvaizduojamas normavimo koeficientas Cs kanalui (šis koeficientas priklauso nuo bandinio tūrio ir masės). Praėjus 3 s, rodytuvo pirmojoje eilutėje atvaizduojami aktyvumo matavimo režimo žymėjimas ("A"), matuojamojo nuklido žymėjimas ("cs"), savitojo aktyvumo vertė Cs kanale ir matavimo vienetas ("Bq/kg"), o antrojoje eilutėje atvaizduojama absoliutinė matavimo paklaida, kuri išreikšta tais pačiais vienetais. **Pastaba:** Jeigu matavimo vienetas, kuris atvaizduotas rodytuve, yra ne "Bq/kg" o "Bq/l", tai reiškia, kad matuojamas ne savitasis aktyvumas, o tūrinis aktyvumas. Tada reikia sustabdyti matavimą (mygtukas **CTOII**) ir užduoti bandinio masę (t. p. žr. pastabą po 5 punkto).
7. Jeigu reikia atvaizduoti savitojo aktyvumo matavimo rezultatą ir jo absoliutinę paklaidą K kanale (nenutraukiant matavimo), dar kartą nuspaudžiamas mygtukas **ИЗМЕР**. Apskritai aktyvumo matavimo metu kiekvieną nelyginį mygtuko **ИЗМЕР** nuspaudimą atitinka aktyvumo Cs kanale atvaizdavimas, o kiekvieną lyginį nuspaudimą – aktyvumo K kanale atvaizdavimas. Radiometras visada matuoja šiuos du dydžius vienu metu, nepriklausomai nuo to, kuris iš jų yra atvaizduotas rodytuve.
8. Išmatuotojo savitojo aktyvumo vertė, kuri atvaizduota pirmojoje eilutėje, palaipsniui keičiasi, artėdama prie tikimiausios vertės, o absoliutinė statistinė paklaida, kuri atvaizduota antrojoje eilutėje, nuolat mažėja. Kai absoliutinės paklaidos ir savitojo aktyvumo santykis (t. y. santykinė paklaida) Cs kanale tampa mažesnis už 15%, pasigirsta trumpas garso signalas ir rodytuvo antrojoje eilutėje prieš simbolį "+/-" pasirodo simbolis "!". Kadangi šiame darbe yra matuojamas nuklido ^{40}K savitasis aktyvumas, tai į šį signalą galima nekreipti dėmesio.
9. Matavimus galima baigti tada, kai savitojo aktyvumo santykinė paklaida K kanale tampa mažesnė už 15%. Rodytuve atvaizduojama ne santykinė, o absoliutinė paklaida (santykinę paklaidą reikia skaičiuoti dalijant absoliutinę paklaidą iš vidurkio). Norint baigti matavimą, reikia nuspausti mygtuką **CTOII**. Tada radiometras įsimena matavimo rezultatą, kuris atvaizduotas rodytuve. Jeigu reikia atvaizduoti galutinį rezultatą kitame kanale, tada dar kartą nuspaudžiamas mygtukas **CTOII**. Gautieji rezultatai abiejuose kanaluose (vidutiniai savitieji aktyvumai ir jų paklaidos) užrašomi darbo sąsiuvinyje.
10. Indas su tiriamuoju bandiniu atsargiai ištraukiamas iš AB ir įdedamas atgal į maišelį.
11. Radiometras ir svarstyklės išjungiami (norint išjungti svarstyklės, reikia kelias sekundes laikyti nuspaudus mygtuką „ON/OFF/TARE“).

6. Atmosferos radioaktyviojo užterštumo matavimo duomenų analizė

1. Apskaičiuojamos dn/dt vertės (min^{-1}) įvairiais laiko momentais. Tam iš kiekvieno matavimo rezultato atimamas fonas (išreikštas min^{-1}). Tai galima atlikti, spustelėjus mygtuką „Atimti foną“ grafiko lange „Filtru_grafikas“.
2. Gautoji skilimo kreivė aproksimuojama teorine funkcija (3.2.10). Tai galima atlikti, spustelėjus mygtuką „Aproksimuoti“ grafiko lange „Filtru_grafikas“. Tada grafiko viršuje atvaizduojamos abiejų optimizuojamų parametrų (K ir λ_{ef}) optimaliosios vertės ir jų standartiniai nuokrypiai.
3. Naudojant etaloninio šaltinio matavimo duomenis (4.2 poskyrio 9 punktą), apskaičiuojama skaitiklio neveikos trukmė. Tam naudojama [1] knygos G priedo (G.5.6) formulė:

$$\tau_n = \frac{T}{\bar{x}_e} \left(1 - \sqrt{\frac{D_e}{\bar{x}_e}} \right); \quad (6.1)$$

čia T yra vieno matavimo trukmė ($T = 0,1$ s), \bar{x}_e yra vieno matavimo rezultato vidurkis, o D_e yra vieno matavimo dispersija.

4. Etaloninio šaltinio dalelių vidutinė skaičiavimo sparta $\bar{N}_e \equiv \bar{x}_e / T$ pataisoma, atsižvelgiant į neveikos trukmę. Tam naudojama [1] knygos (15.7.1) formulė:

$$\bar{N}'_e = \frac{\bar{N}_e}{1 - \bar{N}_e \tau_n} - \bar{N}_f; \quad (6.2)$$

čia \bar{N}'_e yra pataisyta etaloninio šaltinio skaičiavimo sparta (dalelės per sekundę), o \bar{N}_f yra vidutinė fono skaičiavimo sparta (s^{-1}).

5. Skilimo registravimo efektyvumas apskaičiuojamas pagal formulę

$$\varepsilon = \frac{\Omega_{\text{filtr}}}{\Omega_e} \cdot \frac{\bar{N}'_e}{\Phi_e}; \quad (6.3)$$

čia \bar{N}'_e yra pataisytas etaloninio ^{90}Sr šaltinio spinduliuojamų β dalelių skaičius per sekundę, kuris gautas anksčiau, Φ_e yra etaloninio šaltinio aktyvumas matavimų metu, Ω_e yra erdvinis kampas, kuriuo matomas Geigerio ir Miulerio skaitiklio langelis, žiūrint iš etaloninio ^{90}Sr bandinio, kai tas bandinys padėtas prieš filtro langelį, o Ω_{filtr} yra vidutinis erdvinis kampas, kuriuo matomas Geigerio ir Miulerio skaitiklio langelis, žiūrint iš filtro paviršiaus, kai filtrai padėtas prieš langelį. Šiame darbe naudojamo etaloninio ^{90}Sr bandinio skilimo pusamžis lygus $T_{1/2} = 28.74$ m., o 2001 m. liepos 9 d. jo aktyvumas buvo $\Phi_0 = (74 \pm 15)$ kBq. Pažymėjus atskaitos metus T_0 , etaloninio šaltinio aktyvumas T -aisiais metais skaičiuojamas pagal formulę

$$\Phi_e = \Phi_0 2^{-(T-T_0)/T_{1/2}}. \quad (6.4)$$

Skaičiuojant Ω_e , reikia taikyti taškinio šaltinio modelį, t. y. reikia skaičiuoti [1] knygos (15.6.6) reiškinių:

$$\Omega_e = 2\pi \left[1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + (D/2)^2}} \right]; \quad (6.5)$$

čia D yra Geigerio ir Miulerio skaitiklio langelio skersmuo ($D = 27$ mm), o x yra atstumas tarp ^{90}Sr bandinio ir langelio ($x = 93$ mm). Skaičiuojant Ω_{filtr} , reikia taikyti dviejų lygiagrečių diskų modelį, kuris aprašytas [1] knygos 15.6.3 poskyryje, t. y.

$$\Omega_{\text{filtr}} = \frac{4\pi D}{L} \int_0^\infty \frac{\exp(-xk) J_1(Lk/2) J_1(Dk/2)}{k} dk; \quad (6.6)$$

čia D yra Geigerio ir Miulerio skaitiklio langelio skersmuo ($D = 27$ mm), L yra filtro medžiagos skersmuo ($L = 30$ mm), x yra atstumas tarp filtro ir langelio ($x = 4$ mm), o J_1 yra pirmosios eilės Beselio funkcija. Kadangi (6.6) integralo skaičiavimas yra palyginti sudėtingas, toliau pateikta Ω_{filtr} vertė, kuri gaunama naudojant minėtas atstumų vertes:

$$\Omega_{\text{filtr}} = 4,0 \text{ sr.}$$

6. Apskaičiavus skilimo registravimo efektyvumą ε , iš (3.2.11) formulės išreiškiamas radioaktyviųjų nuklidų kiekis filtre filtravimo pabaigoje N_0 . Šio dydžio paklaida apskaičiuojama, remiantis dydžių K ir λ_{ef} paklaidomis, kurios gautos aproksimuojant, bei dydžio ε paklaida, kurią lemia etaloninio šaltinio pradinio aktyvumo Φ_0 paklaida (žr. aukščiau).
7. Pagal (3.3.5) formulę apskaičiuojama radioaktyviųjų nuklidų koncentracija ore ir jos paklaida. Tipiškos koncentracijos vertės – (10 ÷ 50) at./l. Atmosferos radioaktyvūs užterštumas priklauso nuo oro sąlygų ir nuo patalpos ventiliacijos.

7. Medžiagų tūrinio radioaktyviojo užterštumo matavimo duomenų analizė

Naudojant žinomas K ir Cl atomų mases, apskaičiuojamas visų K izotopų atomų skaičius N viename KCl kilograme. Paskui pagal matavimo duomenis apskaičiuojamas nuklido ^{40}K atomų skaičius viename KCl kilograme. Tam reikia pasinaudoti radioaktyviojo skilimo dėsnio, kuris teigia, kad duotojo nuklido aktyvumas A yra lygus to nuklido skilimo konstantos λ ir jo atomų skaičiaus N_1 sandaugai:

$$A = \lambda \cdot N_1. \quad (7.1)$$

Skilimo konstanta λ apskaičiuojama pagal žinomą ^{40}K skilimo pusamžį ($1,277 \cdot 10^9$ m.). Skilimo konstanta turi būti išreikšta s^{-1} . Iš (7.1) išplaukia, kad ^{40}K atomų skaičius N_1 viename KCl kilograme yra lygus KCl savitojo aktyvumo ir skilimo konstantos λ santykiui. Tačiau čia reikia atsižvelgti į tai, kad ^{40}K savitojo aktyvumo normavimo koeficientas, kuris naudojamas radiometre RKG-01A, neįskaito skilimų, kurie vyksta be γ spinduliuotės (žr. 7 pav.). Todėl apskaičiuotąją N_1 vertę reikia pataisyti, dalinant ją iš 0,1067 (žr. 7 pav.). Tokiu būdu apskaičiuotą N_1 , randama ^{40}K atomų dalis pilnutiniame K atomų skaičiuje (N_1/N) ir šio dydžio paklaida. Gautoji vertė palyginama su tiksliaja verte 0,0119%. **Pastaba:** Minėtoji paklaida turi būti skaičiuojama remiantis išmatuotąja savitojo aktyvumo paklaida (ją rodė radiometras). Pastaroji paklaida – tai dvigubas standartinis nuokrypis (t. y. 95 % pasiklivimo intervalo pusplotis). Atitinkamai ir apskaičiuotoji ^{40}K santykinės dalies paklaida reiškia to dydžio dvigubą standartinį nuokrypį (95 % pasiklivimo intervalo pusplotį).