

UPORABA ^{210}Pb ZA DATIRANJE IN SLEDENJE PROCESOM V OKOLJU

MATEJ URBANČIČ

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

^{210}Pb je radioaktivni izotop z razpolovno dobo 22,2 let. Nahaja se tako v zraku kot v Zemljini skorji in v živih organizmih. Uporabimo ga lahko za spremljanje erozije ter določanje starosti useda na kopnem in v jezerih ter morjih do največ 200 let nazaj. Uporabljamo ga tudi za oceno onesnaženosti vode, rastlin in prsti s svincom človeškega izvora. Poleg tega lahko ugotovimo, kolikšen delež svinca v različne dele rastlin pride iz tal in kolikšen iz zraka.

APPLICATIONS OF ^{210}Pb FOR DATING SEDIMENT LAYERS AND TRACKING ENVIRONMENTAL PROCESSES

^{210}Pb is a radioactive isotope with a half life of 22,2 years. It is present in air, Earth's crust as well as in living organisms. It can be used for following erosion processes and dating sediment layers on shore or on seabed that are up to 200 years old. ^{210}Pb can also be used to estimate degree of antropogenic lead pollution in water, plants and soil. Another possible application of ^{210}Pb is to find out the share of lead present in a plant that comes from air and the share that comes from soil.

1. Uvod

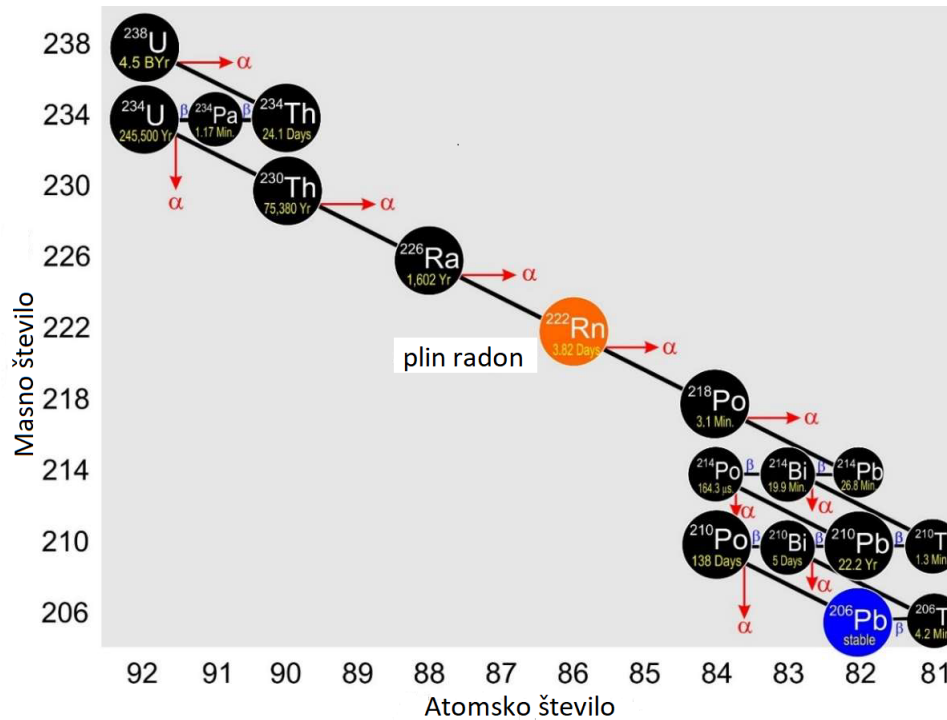
Svinec je težka kovina, z več v naravi prisotnimi izotopi. Eden izmed njih je tudi radioaktivni izotop ^{210}Pb . Kakor lahko s pomočjo izotopa ^{14}C izračunamo starost organskih snovi, lahko s pomočjo ^{210}Pb izračunamo starost useda (geoloških usedlin). Z njegovo pomočjo lahko preučujemo tudi erozijo, onesnaženost narave s svincom človeškega izvora in različne vrste izvora svinca v naravi. Datiranje useda s ^{210}Pb se uporablja od 70-ih let 20. stoletja [1], medtem ko datiranje s ^{14}C poteka od 40-ih let 20. stoletja. Tehnika določanja starosti in z njo povezani modeli so bili v začetku še bolj preprosti, skozi desetletja pa so jih znanstveniki izpopolnili. Za preučevanje erozije in odlaganja useda se ^{210}Pb uporablja od 90-ih let 20. stoletja [2].

Cilj članka je predstaviti možne uporabe izotopa ^{210}Pb za datiranje in preučevanje procesov v naravi. V prvem delu bomo spoznali ^{210}Pb , njegove lastnosti, kako nastane in kako razpade. Opisali bomo dinamiko ^{210}Pb v naravi in dva različna izvora ^{210}Pb ter razlike med njima. Podali bomo različne matematične modele za računanje starosti useda in predstavili kvocient η . Spoznali bomo tudi, kako lahko v vzorcu izmerimo koncentracijo aktivnosti ^{210}Pb in ^{226}Ra . V drugem delu bomo opisali različne načine, kako lahko v praksi uporabimo ^{210}Pb . Podali bomo razloge za različen dotok ^{210}Pb v used in katere modele za datiranje useda lahko uporabimo ob različnih pogojih. Izvedeli bomo, kako ^{210}Pb uporabimo za določanje erozije in spremljanje onesnaženosti prsti, zraka, vode s svincom človeškega izvora. Na koncu bomo predstavili, kako izmeriti, v katere dele rastlin pride več svinca iz zraka in v katere ga pride več iz prsti. Podali bomo rezultate eksperimentov.

2. Izotop ^{210}Pb

Svinec (Pb) je element z atomskim številom 82. Je težka kovina s štirimi stabilnimi izotopi, ki se nahajajo v naravi. To so: ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb in ^{204}Pb . Radioaktivni izotop ^{210}Pb ima naravni izvor in je vmesni člen v razpadni verigi ^{238}U (glej sliko 1).

V naravi se nahaja v zelo majhnih količinah. Ima razpolovni čas 22,2 leti. Ker imajo drugi svinčevi izotopi iz razpadnih nizov vsaj štiri rede velikosti krajši ali daljši razpolovni čas, je ^{210}Pb edini primeren za preučevanje okoljskih procesov v časovnem okviru nekaj deset let.



Slika 1. Razpadna veriga ^{238}U . Napisi na sliki so prevedeni. Vir: [3].

V večjih koncentracijah od povprečne vrednosti v Zemljini skorji se ^{210}Pb nahaja v uranovi rudi in v procesnih produktih kopanja take rude, kot so koncentracije in neuporabljeni ostanki rude (jalovina).

2.1 Radioaktivni razpad ^{210}Pb

^{210}Pb razpada prek razpada β . Od tega 19,8 % razpadov privede do ^{210}Bi v osnovnem stanju, 80,2 % pa do ^{210}Bi v vzbujenem stanju, ki se stabilizira z izsevanjem nizkoenergijskega žarka γ z energijo 46,5 keV in interno konverzijo (angl. *internal conversion*) elektronov do osnovnega stanja jedra. Interna konverzija elektronov je proces, pri katerem vzbujeno jedro elektromagnetno interagira z enim izmed elektronov v elektronskem oblaku. Pri tem procesu se iz atoma izstreli visokoenergetski elektron, vendar ne iz jedra, zato tega delca ne imenujemo delec β . Izotop ^{210}Bi je radioaktiven in z razpolovnim časom 5,012 dni prek razpada β razpade v ^{210}Po , ki je čisti sevalec α , (ima razpolovni čas $t_{1/2} = 138,37$ dni in energijo $E = 5407$ keV), in razpade v stabilni izotop ^{206}Pb .

2.2 Dinamika ^{210}Pb v naravi

^{226}Ra in ^{210}Pb sta člena razpadne verige ^{238}U . V izoliranem sistemu, iz katerega razpadni produkti ne bi mogli izhajati, bi se po daljšem času (več razpadnih časov izotopa ^{210}Pb) vzpostavilo dinamično ravnovesje. Razlog je v tem, da ima ^{226}Ra veliko daljši razpolovni čas od vseh svojih razpadnih produktov, tudi od ^{210}Pb (glej sliko 1). V ravnovesju bi bil kvocient med masama izotopov v usedu konstanten, prav tako bi bili enaki koncentraciji aktivnosti obeh izotopov. Koncentracija aktivnosti pove aktivnost izotopa v enoti mase vzorca, enota je Bq/kg (Bq pomeni število razpadov na sekundo). Zemljina skorja ni izoliran sistem, zato tako ravnovesje ponavadi ni vzpostavljeno. Vzrok je v difuzijski naravi ^{222}Rn , ki se v razpadni verigi ^{238}U nahaja med ^{226}Ra in ^{210}Pb . Del ^{222}Rn ($t_{1/2} = 3,8$ dni) difundira skozi kamnine in prst v atmosfero, kjer se njegovi razpadni produkti (tudi ^{210}Pb) primejo na aerosole in prašne delce. Delež difundiranega ^{222}Rn glede na ves nastali ^{222}Rn iz ^{226}Ra se giblje med 0,2 in 0,3 [2].

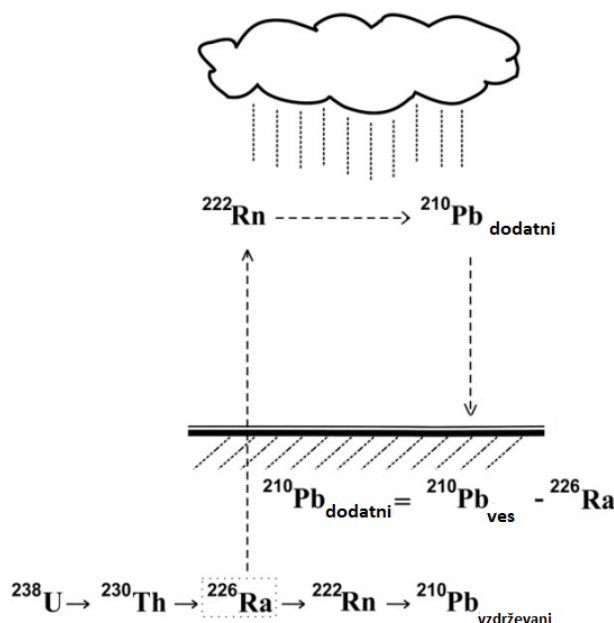
Prašni delci in aerosoli, na katere se vežejo razpadnimi produkti ^{222}Rn , se nabirajo na površju na dva načina, in sicer kot posledica prostega pada ali kot posledica usedanja zaradi padavin (izpiranje). V naravi je prevladujoč drugi proces. Zaradi obeh procesov ima vrhnja plast prsti večjo koncentracijo aktivnosti ^{210}Pb , kot bi pričakovali iz dinamičnega ravnotežja med ^{226}Ra in ^{210}Pb pod površjem (glej sliko 2). Na vrhnjo plast prsti se nato nalagajo nove plasti useda in tako ni več novega dotoka ^{210}Pb v plast, ampak se koncentracija le-tega zaradi radioaktivnega razpada zmanjšuje.

^{210}Pb v usedu, ki je prisoten kot posledica dinamičnega ravnovesja z ^{226}Ra , bomo imenovali vzdrževani (angl. *supported*) ^{210}Pb . V slovenščini zanj še ni ustaljenega izraza, v članku ga bomo imenovali vzdrževani, saj je njegova pomembna lastnost ta, da se zaradi razpada ^{226}Ra njegova koncentracija aktivnosti ohranja oz. vzdržuje za čase veliko manjše od razpolovnega časa ^{226}Ra , ki znaša 1600 let. Koncentracija aktivnosti vzdrževanega ^{210}Pb namreč pada z razpolovnim časom ^{226}Ra .

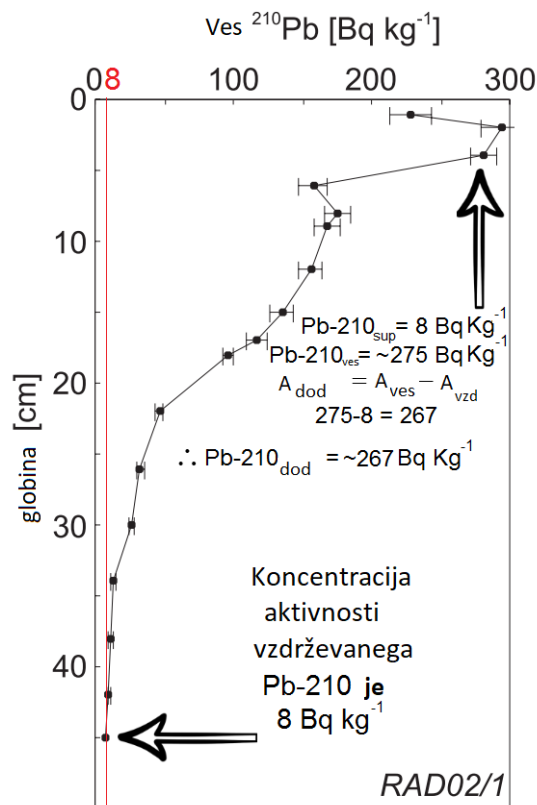
Tisti ^{210}Pb v usedu, ki presega ravnovesno koncentracijo, se imenuje dodatni (angl. *excess* ali *unsupported*) ^{210}Pb . Zanj je značilno, da se njegova koncentracija aktivnosti zmanjšuje z razpolovnim časom ^{210}Pb , ki je dva reda velikosti manjši od razpolovnega časa ^{226}Ra . Aktivnost dodatnega ^{210}Pb A_{dod} izračunamo tako, da od celotne aktivnosti ^{210}Pb A_{ves} odštejemo aktivnost vzdrževanega ^{210}Pb A_{vzd}

$$A_{\text{dod}} = A_{\text{ves}} - A_{\text{vzd}}. \quad (1)$$

Namesto aktivnosti vzdrževanega ^{210}Pb lahko uporabimo tudi aktivnost ^{226}Ra ali ^{214}Pb . Ker so ti izotopi del iste razpadne verige, so v dinamičnem ravnovesju in so njihove aktivnosti v teoriji enake, če ne upoštevamo difundiranja ^{222}Rn iz tal. Ker je to ponavadi grob približek, za natančno računanje upoštevamo tudi difuzijo.



Slika 2. Slika prikazuje razliko v izvoru med dodatnim ^{210}Pb in vzdrževanim ^{210}Pb . V enačbi na sredi slike nastopajo aktivnosti $^{210}\text{Pb}_{\text{dodatni}}$, $^{210}\text{Pb}_{\text{ves}}$ in ^{226}Ra . Napisi na sliki so prevedeni. Vir: [2].



Slika 3. Slika prikazuje primer odvisnosti aktivnosti ^{210}Pb na kilogram useda v odvisnosti od globine. Prikazan je izračun maksimalne vrednosti dodatnega ^{210}Pb in ocena vzdrževanega ^{210}Pb . Izračun vzdrževanega in dodatnega ^{210}Pb v usedu je iz jezera Raduíske na Poljskem. Napisi na sliki so prevedeni. Vir: [1].

2.3 Kvocient η

Pri preučevanju okolja z ^{210}Pb uporabljamo tudi kvocient η , ki predstavlja razmerje med koncentracijo aktivnosti dodatnega ^{210}Pb v vzorcu a_{dod} in masnim deležem celotnega Pb (ne le ^{210}Pb) v vzorcu C_{Pb}

$$\eta = \frac{a_{\text{dod}}}{C_{\text{Pb}}}$$

Tako kot ^{210}Pb se namreč v sedimentu nahajajo tudi drugi svinčevi izotopi. Enota kvocienta η je Bq/kg. Povprečni letni dotok dodatnega ^{210}Pb $P_{\text{Pb}210}$ obravnavamo kot konstanto (enota Bq/s), medtem kot je masni dotok svinca $M_{\text{Pb}}(\tau)$ (enota kg/s) funkcija časa nanosa τ in velja

$$\eta(\tau) = \frac{P_{\text{Pb}210}}{M_{\text{Pb}}(\tau)}$$

Če spremljamo vzorec od časa nanosa (τ) naprej do časa t , parameter η pada z razpolovnim časom ^{210}Pb

$$\eta(\tau, t) = \frac{P_{\text{Pb}210} e^{-(t-\tau)\lambda}}{M_{\text{Pb}}(\tau)} = \eta(\tau) e^{-(t-\tau)\lambda},$$

kjer je $\lambda = \ln(2)/t_{1/2}$ razpadna konstanta ^{210}Pb . V splošnem velja, da je kvocient η v zraku različen od tistega v prsti. V rastlinah preučujemo, kolikšen del svinca vanje pride iz prsti in kolikšen iz zraka. Računanja se lotimo tako, da kvocient η_p v vzorcu razpišemo kot

$$\eta_p = F_d \eta_d + (1 - F_d) \eta_s,$$

kjer je F_d delež svinca, ki pride v rastlino iz atmosfere, η_d je razmerje med koncentracijo aktivnosti ^{210}Pb in koncentracijo Pb v rastlini oz. delu rastline, η_s pa je isto razmerje v prsti. Ko izrazimo F_d , dobimo

$$F_d = \frac{\eta_p - \eta_s}{\eta_d - \eta_s}.$$

Potem ko izmerimo kvociente η_p , η_d in η_s , lahko izračunamo F_d . Ta opis je primeren za rastline oz. dele rastlin, ki so občutno mlajši od razpolovne dobe ^{210}Pb . Za obravnavo starejših delov rastlin moramo upoštevati tudi radioaktivni razpad ^{210}Pb in prenos snovi po rastlini, torej morebiten dodatni dotok ^{210}Pb in svinca na splošno v starejše dele rastline.

3. Usedanje in dotok ^{210}Pb v used

Poleg dodatnega ^{210}Pb , ki se useda na površje iz atmosfere, se na površju odlagajo tudi različni organski in anorganski delci, ki sestavljajo used. Used, ki se je nabrala ob nekem točno določenem času oz. v nekem krajšem časovnem intervalu, tvori usedlo plast. V vsaki usedli plasti se nahaja tudi ^{210}Pb , in sicer sta v njej tako dodatni kot vzdrževani ^{210}Pb .

Pri obravnavi usedanja ločimo dva različna pojma, in sicer hitrost usedanja ter dotok ^{210}Pb v usedle plasti. Hitrost usedanja pove, kako debela plast usedov se je nabrala v določenem času. Enota je mm na leto. Dotok ^{210}Pb v used pove, koliko ^{210}Pb se je odložilo v določenem času med used. Dotok lahko izrazimo v gramih nanesenega ^{210}Pb v letu na kvadratni meter. Glede na to, da je aktivnost ^{210}Pb v vzorcu linearno odvisna od njegove mase in zato, ker je aktivnost veliko lažje izmeriti kot maso ^{210}Pb v vzorcu, merimo dotok v Bq m^{-2} na leto.

3.1 Modeliranje usedanja ^{210}Pb

Pri preučevanju usedanja nas zanima hitrost usedanja ob različnih časih in starost useda. Uporabimo različne modele. Ker sta usedanje in dotok ^{210}Pb v usedle plasti v splošnem zapletena procesa, uporabimo različne približke. Le-ti ob določenih predpostavkah poenostavljeno, a za naše potrebe dovolj dobro opisujejo usedanje.

Za lažje razumevanje delovanja modelov je pomembno, da razumemo razliko med trenutno in začetno koncentracijo aktivnosti ^{210}Pb v usedli plasti. Trenutna koncentracija aktivnosti, je tista, ki jo izmerimo. Začetna koncentracija aktivnosti je tista, ki jo je imela plast pri svojem nastanku.

Predpostavke, ki jih uporabljamo v različnih modelih, se nanašajo na začetno koncentracijo aktivnosti ^{210}Pb v usedu. Nanašajo se tudi na velikost dotoka ^{210}Pb v različne usedle plasti in na naravo usedanja (npr. na to ali je hitrost usedanja konstantna ali ne). Najpogostejši uporabljeni matematični modeli so: konstanten dotok in konstantna hitrost usedanja (angl. *constant flux - constant sedimentation* oz. CFCS), konstanten dotok ^{210}Pb (angl. *constant rate of supply* oz. CRS) in konstantna začetna aktivnost (angl. *constant initial activity* oz. CIC).

3.2 Model konstantnega dotoka in konstantne hitrosti usedanja CFCS (?)

Najenostavnejši model za datiranje s pomočjo ^{210}Pb je model CFCS. Model predvideva, da so hitrost usedanja, dotok dodatnega ^{210}Pb in začetna koncentracija aktivnosti ^{210}Pb v usedu konstantni skozi čas. V takem modelu je koncentracija aktivnosti ^{210}Pb odvisna od globine po enačbi

$$a(z) = a_0 e^{-\frac{\lambda z}{\omega}},$$

kjer je z globina, kjer se nahaja usedla plast, a_0 je koncentracija aktivnosti ^{210}Pb v zgornji plasti, λ je razpadna konstanta ^{210}Pb z vrednostjo $\lambda = 0,031$ na leto, ω pa je hitrost usedanja (enota meter na leto). Hitrost usedanja izrazimo in dobimo

$$\omega = -\lambda z \ln \frac{a_0}{a(z)},$$

kjer lahko vse količine izmerimo in tako izračunamo hitrost usedanja. Starost useda na globini z nato preprosto izračunamo

$$t(z) = \frac{z}{\omega}.$$

3.3 Model konstantne začetne koncentracije CIC

Model CIC predpostavlja, da je bila začetna koncentracija aktivnosti ^{210}Pb enaka v vseh usedlih plasteh, neodvisno od hitrosti usedanja in globine. Hitrost usedanja ni nujno konstantna. Starost $t(z)$ posamezne usedle plasti na globini z določimo po enačbi

$$t(z) = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{a_0}{a(z)},$$

kjer je a_0 koncentracija aktivnosti ^{210}Pb v zgornji plasti in $a(z)$ koncentracija aktivnosti ^{210}Pb na globini z . Hitrost usedanja ω ob nastanku posamezne usedle plasti nato izračunamo tako, da debelino plasti Δz delimo s trajanjem nastanka plasti Δt

$$\omega = \frac{\Delta z}{\Delta t}. \quad (2)$$

3.4 Model konstantnega dotoka CRS

Model CRS predvideva konstanten dotok ^{210}Pb v used, neodvisen od hitrosti usedanja. To pomeni, da bo v primeru večje hitrosti začetna koncentracija aktivnost usedle plasti manjša kot v primeru počasnejšega usedanja. Za model CRS velja

$$t(z) = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A_0}{A_z}, \quad (3)$$

kjer je A_0 je povprečna aktivnost dodatnega ^{210}Pb v celotnem profilu useda na neki izbrani površini. A_z je aktivnost dodatnega ^{210}Pb v delu usedlinskega profila, ki je mlajši od $t(z)$ in se nahaja nad globino z . A_z in A_0 določimo s pomočjo numerične integracije izmerjenih aktivnosti usedlih plasti. Hitrost usedanja izračunamo enako kot pri modelu CIC, torej po enačbi (2).

Izpeljava časovne odvisnosti iz enačbe (3): Najprej pokažemo, da se aktivnost celotnega profila useda ob konstantnem dotoku ^{210}Pb v used ne spreminja. Zapišemo diferencialno enačbo za skupno aktivnost A dodatnega ^{210}Pb

$$\frac{dA}{dt} = P_d - \lambda A.$$

P_d predstavlja dotok dodatnega ^{210}Pb v used in ima enoto Bq/s, v našem primeru je konstanten, saj tako predvideva model CRS. Zadnji člen pa je posledica radioaktivnega razpada ^{210}Pb . Splošna rešitev diferencialne enačbe je

$$A = \frac{P_d}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}) + A_a,$$

kjer je A_a aktivnost profila ob začetku dotoka dodatnega ^{210}Pb v used, t pa je čas od tistega trenutka. Glede na to, da dotok dodatnega ^{210}Pb poteka že tisoče let, velja $t \gg \frac{1}{\lambda}$. Vzamemo limito $\lim_{t \rightarrow \infty}$ in dobimo

$$A = \frac{P_d}{\lambda} + A_a = A_0.$$

Aktivnost dodatnega ^{210}Pb v profilu je bila torej ves čas enaka (gledamo v obdobju zadnjih 200 let, ko lahko datiramo s pomočjo ^{210}Pb). Zamislimo si profil ob nekem času v preteklosti t_p . Tako takrat kot sedaj je aktivnost profila enaka A_0 . Opazujemo le dodaten ^{210}Pb , ki je bil v profilu že ob času t_p . Zanj je značilno, da se nahaja pod globino useda z , ki se je nabral v času t , to je od časa t_p do sedanjega trenutka. Čas t predstavlja tudi starost useda na globini z . Aktivnost ^{210}Pb , ki je bil v profilu že ob času t_p , je padala po splošni enačbi za aktivnost radioaktivnih snovi

$$A_z = A_0 e^{-\lambda t}.$$

Aktivnosti A_z in A_0 lahko izmerimo. Ker nas zanima čas t , ga izrazimo in dobimo enačbo (3), s katero izračunamo starost useda na globini z pri modelu CRS.

4. Merjenje aktivnosti ^{210}Pb in ^{226}Ra v vzorcu

Da določimo koncentracijo aktivnosti dodatnega ^{210}Pb v usedu, s katerim preučujemo usedne procese, v vzorcu useda izmerimo koncentracijo aktivnosti vsega ^{210}Pb in koncentracijo aktivnosti ^{226}Ra (glej poglavje 2.2).

4.1 ^{226}Ra

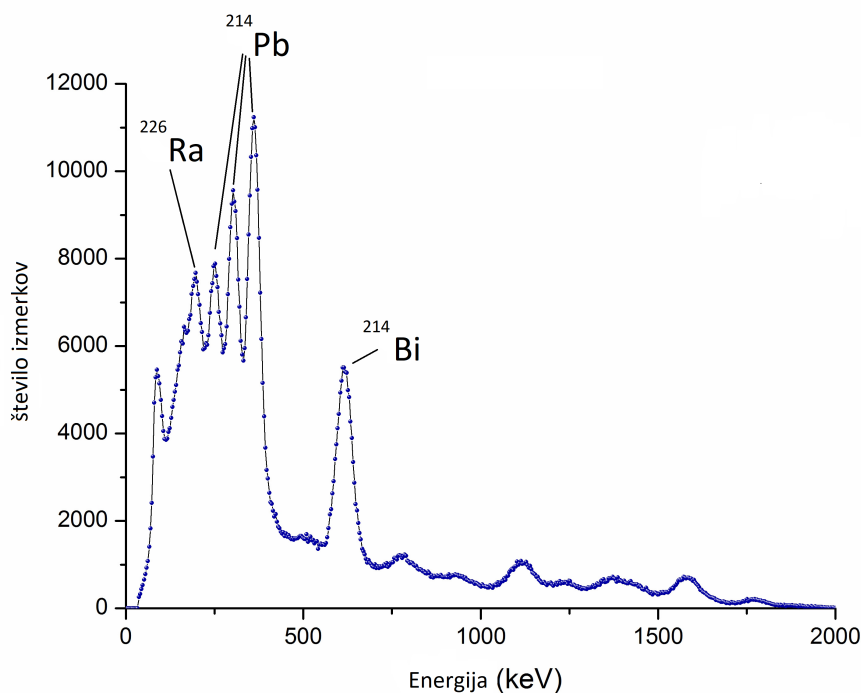
Za merjenje ^{226}Ra lahko uporabimo spektroskopijo γ in α . S spektroskopijo γ lahko aktivnost ^{226}Ra merimo na dva načina, in sicer z opazovanjem spektralnih vrhov pri energijah, ki ustrezajo izsevanim žarkom γ za izotopa ^{214}Bi in ^{214}Pb (609,3 keV za ^{214}Bi in 351,9 keV za glavni spektralni vrh ^{214}Pb), ki sta hčerinska izotopa ^{226}Ra (glej sliko 4). Lahko merimo tudi vrh pri 186,2 keV, ki ustreza žarkom γ , ki jih oddaja ^{226}Ra neposredno. Pri prvi metodi moramo poskrbeti, da je ^{226}Ra v ravnovesju z svojimi potomci. V tem primeru so aktivnosti vseh nastalih izotopov enake in lahko iz števila izmerjenih žarkov γ sklepamo na aktivnost ^{226}Ra . Da vzpostavimo ravnovesje, moramo vzorce tesno zapreti in jih shraniti za vsaj 21 dni. Pri drugi metodi, ko merimo žarke γ direktno iz izotopa ^{226}Ra , moramo iz izmerjenega vrha pred obravnavo odšteti prispevek žarkov γ iz ^{235}U , ker se vrhova prekrivata (^{235}U ima vrh pri 185,7 keV). Večina naprav za spektroskopijo γ ne more ločiti teh dveh vrhov. Ocena prispevka ^{235}U je zelo zapletena naloga, zato v praksi pogosteje uporabljamo prvo metodo. Prednost spektroskopije γ je v tem, da je to nedestruktiven način merjenja, poleg tega lahko meritev za ^{226}Ra in ^{210}Pb opravimo hkrati ob enem merjenju.

Spektroskopija α omogoča direktno merjenje ^{226}Ra brez vzpostavljanja ravnovesja. Ker se delci α hitro absorbirajo v snovi, mora biti plast vzorca zelo tanka in mora vsebovati čim manj drugih sevalcev α . Prednosti so visoka občutljivost, majhen šum ozadja, visoka zanesljivost. Problem je v tem, da moramo vzorec prej obdelati.

4.2 ^{210}Pb

^{210}Pb lahko merimo s spektroskopijo γ . Težava pri tej metodi je, da imajo izsevani gama žarki majhno energijo (46,5 keV), poleg tega je verjetnost za njihovo izsevanje po tej poti le 4,25% (glej poglavje 2.1). Ti nizko energetski žarki γ se v veliki meri absorbirajo že v vzorcu. Zato natančnost izmerkov ni velika.

Aktivnost ^{210}Pb lahko merimo posredno s pomočjo spektroskopije α njegovega razpadnega produkta ^{210}Po . Metoda predvideva, da je v vzorcu vzpostavljeno ravnovesje med ^{210}Pb in ^{210}Po , kar dobro velja za used na dnu jezer ali morja. Vzorce iz drugih okolij moramo za natančne meritve



Slika 4. Spekter γ izotopa ^{226}Ra . Na spektru so vidni tudi vrhovi žarkov γ , ki jih izsevajo njegovi potomci. Napisi na sliki so prevedeni. Vir: [4].

hraniti minimalno dve leti, da se vzpostavi ravnovesje. Glavna prednost spektroskopije α je v tem, da lahko izvedemo meritve z nizkim detekcijskim pragom. Problem je kompleksna obdelava vzorca in visoka cena.

V praksi velja, da je v usedu z nizkimi vrednostmi dodatnega ^{210}Pb veliko bolje uporabiti spektroskopije α . Pri aktivnosti 10 Bq/kg je namreč relativna negotovost meritve s spektroskopije γ 40%, pri aktivnostih nad 30 Bq/kg je le-ta že sprejemljiva (15%), nad 120 Bq/kg, pa sta negotovosti za spektroskopiji α in γ praktično enaki. Torej v praksi velja, da za večje aktivnosti ^{210}Pb uporabljamo spektroskopijo γ , za nižje pa α .

5. Uporaba ^{210}Pb za preučevanje usedanja in datiranje useda

Svinec je ena izmed kovin, ki se najbolj veže na usedle delce v kislih, nevtralnih in bazičnih razmerah. Močno se veže na anorganske snovi, kot so glineni delci, Fe in Mn oksidi, ki so pogosti v prsti in organski snovi. Le v manjši meri ga vsrkajo rastline. To pomeni, da je njegovo premikanje skladno s premikanjem delcev, na katere je vezan. Prav to je ena ključnih lastnosti za uporabo svinca pri raziskovanju usedanja, erozije, mešanja usedlih plasti itd.

Izotop ^{210}Pb lahko uporabimo za preučevanje usedanja in datiranja v različnih okoljih, kot so travniki, gozdovi, obdelane površine, močvirja, jezersko in morsko dno itd. Iz izračunanih aktivnosti dodatnega ^{210}Pb v usedlih plasteh (primer na sliki 3) in s pomočjo modelov iz poglavja 3.1 lahko izračunamo starost različnih usedlih plasti in hitrosti usedanja do največ 200 let nazaj. Da vemo, kateri model naj uporabimo, moramo poznati naravo dotoka ^{210}Pb v usedle plasti. Vedeti moramo, ali je konstanten, ali niha, in če niha, kakšna je značilna frekvenca. Zato moramo poznati vse dejavnike, ki vplivajo na dotok ^{210}Pb v usedle plasti.

5.1 Glavni razlogi za neenakomeren dotok ^{210}Pb med različnimi kraji

Na globalni ravni opazimo največje razlike predvsem zaradi prevladujočih vetrov. Na severni polobli prevladujejo zahodni vetrovi, ki potujejo od zahoda proti vzhodu, zaradi česar so koncentracije dodatnega ^{210}Pb na zahodu celin manjše. Razlog je v tem, da so se zračne mase do tja premikale le preko oceanov in niso nakopičile veliko ^{210}Pb . Na vzhodu celin so koncentracije aktivnosti ^{210}Pb v zraku večje, ker so do tja zračne mase potovale preko kopnega. Večja koncentracija aktivnosti v zraku ob enaki količini padavin pomeni večji dotok ^{210}Pb . Globalno nanašanje dodatnega ^{210}Pb iz zraka v used variira od 0.1 Bq m^{-2} na leto do 360 Bq m^{-2} na leto [2]. Pri tem velja, da so višje vrednosti prisotne na kontinentih, nižje pa nad oceani in nad polarnimi predeli.

Raziskave so pokazale, da obstaja povezava med letno količino padavin in/ali številom neviht z močnim nalivom ter letnim nanosom dodatnega ^{210}Pb [2]. Dotok ^{210}Pb v used je v času padavin največji zato, ker dežne kaplje nastanejo na aerosolih, na katere se lahko prilepijo tudi atomi ^{210}Pb . Ko dežne kaplje padejo na tla, se ti aerosoli pomešajo med used. Poleg tega pri padcu vodne kaplje poberejo iz zraka tudi aerosole, okoli katerih se dežne kaplje še niso tvorile. Tako se dotok ^{210}Pb v used zaradi padavin še dodatno poveča.

5.2 Glavni razlogi za časovno neenakomeren dotok ^{210}Pb

Sezonske spremembe v dotoku ^{210}Pb v used lahko opazimo na različnih koncih sveta. Glavni razlog je različna količina padavin med letnimi časi. V Budimpešti so na primer opazili, da je bil pozimi in jeseni, ko je padavin več, povprečen dotok ^{210}Pb večji kot v bolj sušnem delu leta spomladi in poleti [2]. Na sliki 5 vidimo, kako je koncentracija aktivnosti ^{210}Pb v zraku v sušnem delu leta večja kot v deževnem. V deževnem delu leta je koncentracija manjša, ker dež izpere aerosole iz zraka in jih odloži v usedle plasti. Ostali razlogi so lahko različna smer vetra v različnih letnih časih. Veter s celine ima namreč večjo vsebnost ^{210}Pb kot tisti z morja.

Načeloma velja, da je poleti dotok ^{210}Pb v used manjši, saj je takrat zračni tlak večji, kar pomeni, da je difuzija ^{222}Rn , ki je vir ^{210}Pb v zraku, poleti počasnejša. Prav tako se poleti zračne mase iz različnih plasti ozračja hitreje mešajo in ker višje plasti ozračja vsebujejo veliko manj ^{210}Pb kot troposfera, je poleti dotok ^{210}Pb v used manjši.

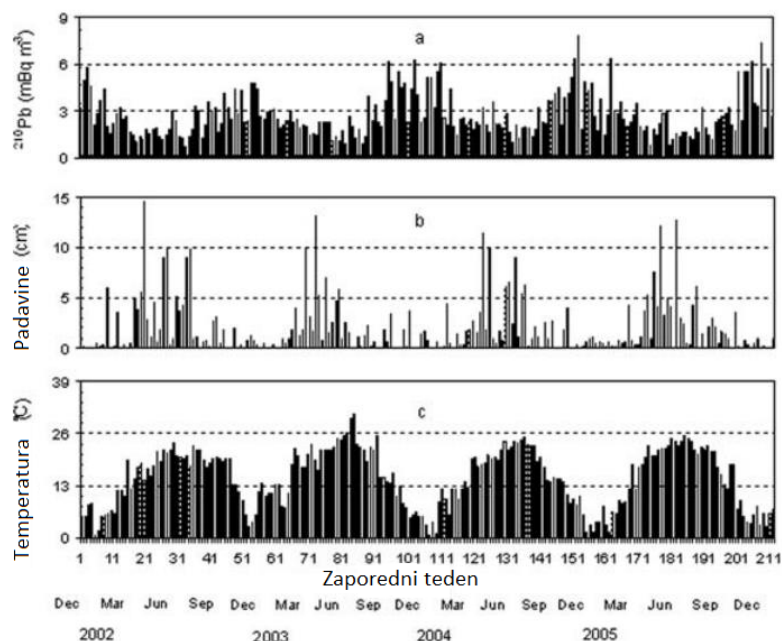
5.3 Vzroki za različno koncentracijo aktivnosti useda ob enakem dotoku ^{210}Pb

Na krajih, kjer je dotok ^{210}Pb v used enak, bi pričakovali, da je aktivnost v enako starih usedlih plasteh enaka, vendar ni nujno tako. Za to obstaja več razlogov. Na koncentracijo aktivnosti ^{210}Pb v usedu vpliva tudi tekstura useda. Meritve so pokazale, da obstaja povezava med velikostjo delcev v usedu in aktivnostjo ^{210}Pb v le-tem. Najverjetneje je razlog v tem, da imajo manjši delci večjo skupno površino stika z zunanostjo in zato tudi več možnosti za adsorpcijo ^{210}Pb .

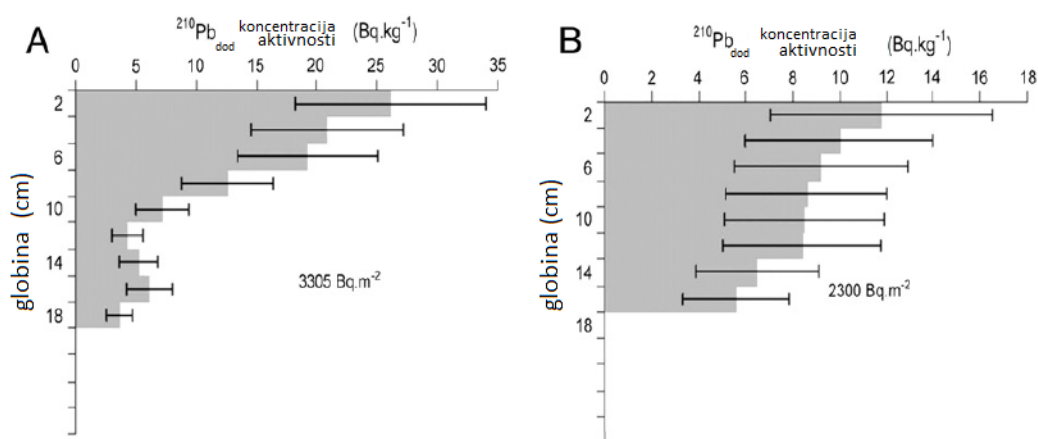
Na koncentracijo aktivnost ^{210}Pb v usedu vplivajo tudi organizmi. Rastline in živali namreč mešajo usedle plasti, ko rastejo korenine, ko kopljejo rove, se premikajo po usedlih plasteh na dnu rek, jezer, morij. Proces imenujemo biološka motnja (angl. *bioturbation*). V območjih, kjer je večja, je zaradi mešanja useda v vrhnjih plasteh manjša koncentracija aktivnosti ^{210}Pb kot tam, kjer je nižja. Proces mešanja plasti se dogaja tudi kot posledica človeškega vpliva, npr. pri oranju zemlje (glej sliko 6). Različne koncentracije aktivnosti v usedlih plasteh so lahko tudi posledica erozije in odlaganja materiala, torej prehajanja useda med različnimi kraji.

5.4 Modeliranje usedanja ^{210}Pb

Ker sta usedanje in dotok ^{210}Pb v usedle plasti v splošnem zapletena procesa, uporabimo različne modele (glej poglavje 3.1). Le-ti ob določenih predpostavkah poenostavljeno, a za naše potrebe



Slika 5. Graf (a) predstavlja koncentracijo ^{210}Pb v zraku, (b) količino tedenskih padavin, (c) povprečno tedensko temperaturo zraka. Meritve so bile opravljene med 20. decembrom 2001 in 7. februarjem 2006 na Kitajskem v regiji Guizhou. Napisi na sliki so prevedeni. Vir: [1].



Slika 6. Prikaz koncentracije aktivnosti dodatnega ^{210}Pb v profilu nanosov. Slika A predstavlja profil neobdelane prsti, slika B pa profil obdelane prsti, ki je podvržena eroziji. Oba vzorca sta iz Maroka. Opazimo, da koncentracija aktivnosti v neobdelani zemlji z globino pade veliko hitreje kot v obdelani zemlji. Poleg tega je vrednost koncentracije aktivnosti na vrhu profila v neobdelani zemlji večja kot v obdelani. Oboje je posledica mešanja usedlih plasti. Napisi na sliki so prevedeni. Vir: [2].

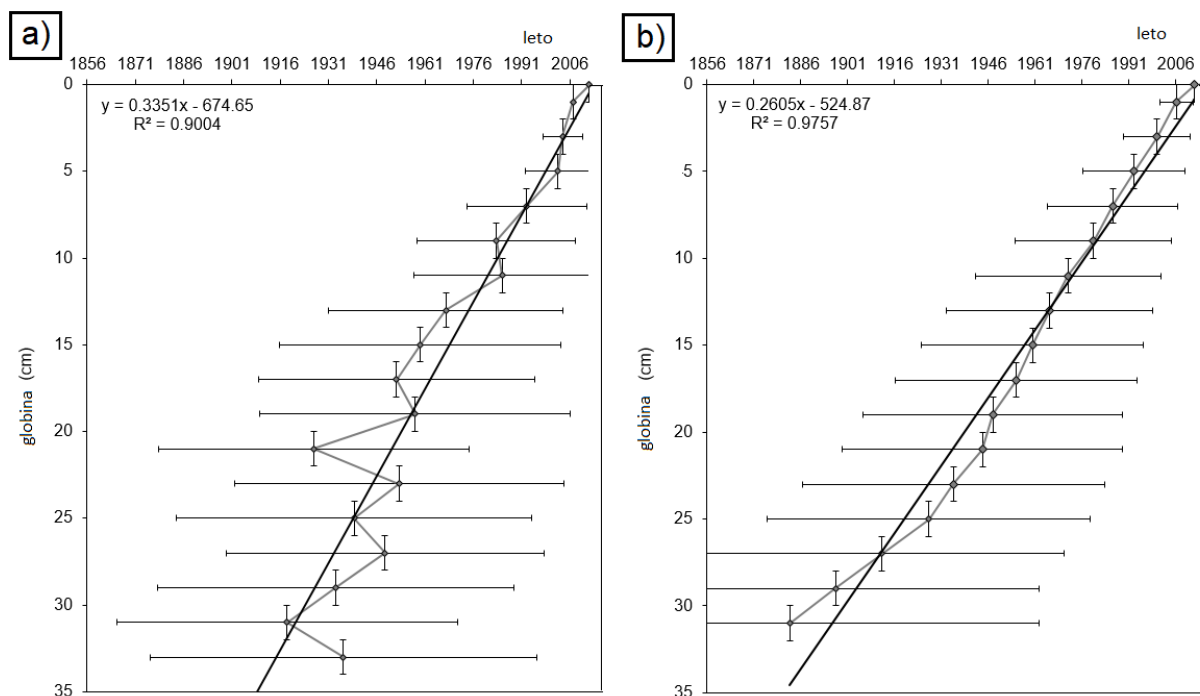
dovolj dobro opisujejo usedanje.

Nekatere predpostavke se nanašajo na posamezne modele (več v poglavju 3.1) in so zato za vsak model drugačne. Za vse modele morajo veljati naslednje predpostavke:

1. ^{210}Pb se iz zraka ali vode hitro izloči in ujame v used.
2. Usedle plasti se ne mešajo.
3. Vzdrževani ^{210}Pb in ^{226}Ra sta v ravnovesju.
4. Vsebnost ^{226}Ra je neodvisna od globine.

Ovrednotenje zgornjih predpostavk. 1. ne velja dobro v bolj poroznih prsteh, kjer lahko delci pridejo do večjih globin, kar lahko privede do tega, da maksimum ^{210}Pb ni na vrhu prsti, ampak nižje (primer na sliki 3). 2. je za večino primerov le groba predpostavka, ki ne drži povsem. Najpogostejši vzrok za mešanje plasti so biološke motnje. Manjše ko je mešanje med usedlimi plastmi, boljše modeli opišejo usedanje. 3. velja za večino vrst useda pod vodnimi površinami npr. v jezerih, morjih. Za usedle plasti na kopnem to načeloma ne velja. Modeliramo lahko tudi brez te predpostavke, če lahko dobro ocenimo difundiranje ^{222}Rn v atmosfero. Uporabimo koeficient izhajanja, ki pove, kakšna je verjetnost, da ^{222}Rn uide iz prsti oz. kamnine. Njegove značilne vrednosti so 0,2–0,3 [2]. Dobimo ga tako, da primerjamo razmerje aktivnosti ^{210}Pb in ^{226}Ra na večjih globinah, kjer skoraj ni dodatnega ^{210}Pb (ponavadi je na globini pol metra ta pogoj že izpolnjen). 4. za manjše globine, na katerih opazujemo usedanje (nekje do pol metra) je tej predpostavki ponavadi zadoščeno, na večjih pa ne nujno.

Katero vrsto modela uporabimo, je odvisno od tega, katerim predpostavkam, ki se nanašajo na posamezen model, najbolj ustrezajo dejanske razmere v naravi (primer na sliki 7). Model CIC je primeren za analizo useda iz dna jezer, ki niso bila prizadeta s človeško dejavnostjo, medtem ko je model CRS bolj primeren za used na kopnem in v močvirjih. Poleg tega velja tudi, da bo CRS model neprimeren, če v usednem profilu nekatere plasti manjkajo. Čeprav smo v poglavju 5.2 zapisali, da dotok ^{210}Pb niha, v praksi vseeno najpogosteje uporabljamo model CRS. Razlog je v tem, da je frekvenca nihanja dotoka ^{210}Pb 1/leto, nas pa zanima dogajanje v obdobju približno stotih let. Za lažjo obravnavo zato variacij v dotoku s tako velikimi frekvencami ne obravnavamo in vzamemo kar povprečno vrednost.



Slika 7. Modeliranje istih izmerjenih vrednosti dodatnega ^{210}Pb a) z modelom CIC in b) z modelom CRS. Premica na obeh grafih prikazuje linearno interpolacijo izračunanih vrednosti. Pri modeliranju z modelom CRS je vsaka višja plast mlajša od spodnje in rekonstruirano nanašanje je bolj enakomerno. Oba razloga nakazujeta, da je CRS v tem primeru bolj primeren model kot CIC. Napisi na sliki so prevedeni. Vir: [1].

5.5 Prednosti in slabosti uporabe ^{210}Pb za preučevanje usedanja in datiranje

Glavna prednost uporabe radioaktivnih izotopov za preučevanje usedanja so globalna prisotnost izotopov in s tem široko območje mogoče uporabe. Potreben je le en odvzem vzorcev. Negativni vidik je potreba po posebni opremi za preučevanje izotopov (npr. spektrometri α in γ).

Prednost uporabe izotopa ^{210}Pb za raziskovanje usedanja in datiranje je možnost datiranja relativno dolgo nazaj v preteklost v primerjavi s konkurenčnimi izotopi, kot je ^{137}Cs . Poleg tega je ^{210}Pb v naravi prisoten izotop in je njegov dotok v usedle plasti relativno stalen. Umetni izotopi, kot je ^{137}Cs , ki so v atmosferi prisotni od začetka atmosferskih testov jedrskega orožja, imajo veliko bolj nestalen dotok. Povezani so z nenadnimi dogodki, kot je bila nesreča v černobilski elektrarni leta 1986.

Slabost metode z uporabo ^{210}Pb je v tem, da je težko natančno določiti koncentracijo aktivnosti dodatnega ^{210}Pb . Na nekaterih območjih je vsebnost dodatnega ^{210}Pb tako majhna, da se je ne da določiti, saj je celotna vsebnost ^{210}Pb zelo blizu (v okviru merske napake) vsebnosti vzdrževanega ^{210}Pb .

Preučevanje usedanja in datiranje s pomočjo ^{210}Pb v rekah in rezervoarjih ni primerno. Usedanje v takih okoljih namreč ne poteka enakomerno in se njegova hitrost zelo hitro spreminja. Npr., če je reka visoka, hitro odnaša material in ga nato hitro nanese nižje po toku. Ko je reka nizka, je odnašanje in nanašanje veliko počasnejše. Modeli, ki jih uporabljamo za modeliranje starosti useda in hitrosti usedanja v takih primerih ne delujejo dobro.

6. Preučevanje drugih procesov v okolju s pomočjo ^{210}Pb

6.1 Preučevanje erozije

S pomočjo ^{210}Pb lahko preučujemo erozijo. To počnemo tako, da primerjamo aktivnost celotnega profila ^{210}Pb na kraju vzorčenja s tisto iz okolja, kjer ni nobene izmenjave ^{210}Pb z okolico. Če je zaloga ^{210}Pb manjša od referenčne vrednosti, je bila na vzorčnem mestu prevladujoč pojav erozija. Če je zaloga ^{210}Pb večja od referenčne, je bil prevladujoč pojav odlaganje. Na sliki 6 opazimo, da je na obdelani zemlji aktivnost ^{210}Pb v profilu manjša kot v neobdelani zemlji. To nakazuje, da je v obdelani zemlji prevladujoč pojav erozija.

6.2 Uporaba ^{210}Pb kot indikatorja za različne izvore svinca v neživi naravi in v rastlinah

Svinec, ki je kot težka kovina škodljiv ljudem in vsem drugim živim bitjem, se nahaja tako naravno kot zaradi človeških izpustov. S pomočjo kvocienta η lahko ocenimo, kako onesnažen je vzorec s svincem človeškega izvora. V splošnem velja manjšo kot ima vzorec useda vrednost η , bolj je onesnažen s svincem človeškega izvora. To je zato, ker svinec človeškega izvora ne vsebuje izotopa ^{210}Pb , manjša vrednost η namreč pomeni manjši delež ^{210}Pb med vsemi izotopi svinca.

V članku [5] so v parku Richmond v Londonu primerjali vrednosti kvocienta η v deževnici in v različnih plasteh prsti. Povprečna izmerjena vrednost v deževnici je bila $\eta = (96 \pm 9) \text{ Bq mg}^{-1}$. V prsti je bila najvišja vrednost η izmerjena v zgornji plasti prsti (0–2 cm), in sicer $4,7 \text{ Bq mg}^{-1}$.

Razmerje η se med deževnico in vrhnjo plastjo prsti se razlikuje za več kot red velikosti. To nakazuje, da tudi v zgornji plasti prsti velik prispevek svinca izpred dvajset do petdeset let, ko je bilo onesnaževanje s svincem večje kot danes.

Če v prst dodamo ^{210}Pb , lahko razmerje η v njej umetno dvignemo tudi visoko nad vrednosti v zraku. S preučevanjem vrednosti η v različnih delih rastlin lahko ugotovimo, ali večina Pb v rastlino pride iz zraka ali iz prsti. Poleg tega lahko primerjamo, v katerih delih rastlin je prispevek svinca iz prsti večji in v katerih manjši (za matematično razlago glej poglavje 2.3).

V danskem eksperimentu [6], kjer so v prsti z umetno dodano visoko koncentracijo ^{210}Pb gojili norveško smreko, so ugotovili, da je povprečen prispevek svinca v iglicah iz prsti 1,4%. V mahovih v londonskem parku Richmond so v drugi raziskavi [5] odkrili, da je le 15–21% svinca prišlo iz atmosfere. Večina raziskav potrjuje dejstvo, da bolj kot je analizirani del rastline oddaljen od korenin, manjši je prispevek svinca iz prsti. V analizi poljščin [6] so ugotovili, da je povprečen prispevek svinca iz prsti v listih 4%, medtem ko je bil v koreninah kar 76%.

7. Druge uporabe ^{210}Pb

Izotop ^{210}Pb se lahko poleg spremljanja usedanja in erozije uporablja tudi za določanje izvora različnih usedlih delcev v suspenziji v reki. Ker je dodatni ^{210}Pb omejen na vrhno plast prsti, lahko ugotovimo, ali prihaja used v reke v večini iz vrhnje plasti ali nižjih plasti, kot so rečni bregovi. Poleg tega je aktivnost dodatnega ^{210}Pb na površini neobdelane zemlje večja kot na površini obdelane zemlje zaradi mešanja plasti pri oranju (glej sliko 6). Zato lahko do neke mere razlikujemo tudi med usedom iz obdelanih in neobdelanih površin.

Izotop ^{210}Pb se lahko uporablja tudi za preučevanje hitrosti ledeniškega toka, starosti in debeljenja ledenikov na višjih nadmorskih višinah ter taljenja na nižjih itd.

8. Zaključek

^{210}Pb je v naravi prisoten radioaktivni izotop svinca. V usedu imamo dva glavna prispevka ^{210}Pb , in sicer vzdrževani in dodatni ^{210}Pb . Prvi nastane pri razpadu ^{222}Rn v Zemljini skorji, drugi pa, ko razpadni produkti ^{222}Rn , ki so nabrani na aerosolih, padejo nazaj na zemljo in se naberejo v usedu. S pomočjo izmerjenih koncentracij aktivnosti v usedlih plasteh in uporabo matematičnih modelov lahko določimo starost posameznih plasti. Iz aktivnosti usednega profila lahko sklepamo na to, ali je na vzorčnem mestu prevladujoč proces erozija ali odlaganje. S pomočjo koeficienta η lahko primerjamo, kako so voda, zrak, prst, rasline, itd. onesnaženi s svincom človeškega izvora. Prek meritve η v rastlinah smo ugotovili, da v dele rastline, ki so bolj oddaljeni od prsti (za drevesa npr. listi) pride večina svinca iz zraka, medtem ko v korenine pride večina svinca iz prsti.

Raziskali bi lahko tudi, kako lahko s pomočjo ^{210}Pb preučujemo nastajanje, taljenje in tok ledenikov in preučili še kakšne kompleksnejše matematične modele za določanje starosti usedlih plasti.

LITERATURA

- [1] J.M. Dinsley, C.J.B. Gowing, and A.L. Marriott, *Natural and anthropogenic influences on atmospheric Pb-210 deposition and activity in sediments: a review*, British Geological Survey, 2018.
- [2] L. Mabit and M. Benmansour and J.M. Abril and D.E. Walling and K. Meusburger and A.R. Iurian and C. Bernard and S. Tarján and P.N. Owens and W.H. Blake and C. Alewell, *Fallout ^{210}Pb as a soil and sediment tracer in catchment sediment budget investigations: A review*, Earth-Science Reviews **138** (2014), 335–351.
- [3] N. Cook and K. Ehrig and M. Rollog and C. Ciobanu and D. Lane and D. Schmandt and N. Owen and T. Hamilton and S. Grano, *^{210}Pb and ^{210}Po in Geological and Related Anthropogenic Materials: Implications for Their Mineralogical Distribution in Base Metal Ores*, Minerals **8** (2018), 211.
- [4] C. Denk, *Ra226 Gamma Spectrum*, spletna stran: <https://www.gammaspectacular.com/blue/ra226-spectrum>, ogled: 5.4.2022.
- [5] H. Yang and P. G. Appleby, *Use of lead-210 as a novel tracer for lead (Pb) sources in plants*, Scientific Reports **6** (2016).
- [6] M.F. Hovmand and S.P. Nielsen and I. Johnsen, *Root uptake of lead by Norway spruce grown on ^{210}Pb spiked soils*, Environmental Pollution **175** (2009), 404–409.