GEOLOGIJA *36*, 223-248 (1993), Ljubljana 1994
https://doi.org/10.5474/geologija.1994.012

UDK 550.4+550.378(497.12) (084.3)=863

Rezultati radiometričnih in geokemičnih meritev za karto naravne radioaktivnosti Slovenije

Results of radiometric and geochemical measurement for the natural radioactivity map of Slovenia

Mišo Andjelov
Geološki zavod Ljubljana, Dimičeva 14, 61000 Ljubljana, Slovenija

Kratka vsebina

Leta 1990 smo pričeli uresničevati program meritev gama sevanja v mreži 5 × 5 km. Meritve so bile opravljene s štirikanalnim prenosnim spektrometrom Scintrex GAD-6. Na vsaki izmed 816 lokacij smo opravili pet meritev spektra gama. Razen tega so bili za laboratorijske analize vzeti tudi vzorci zemlje iz zgornjih 10 cm tal. Uran v vzorcih tal je bil analiziran z metodo nevtronske aktivizacije (DNC), drugih 35 elementov: Ag, Al, As, Au, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Sb, Sc, Sn, Sr, Th, Ti, U, V. W, Y, Zn in Zr pa so analizirali z metodo plazemske emisijske spektrometrije (ICP). Terenske meritve sevanja gama so bile presnovane v koncentracije kalija, urana in torija v tleh. Te meritve kažejo dobro povezavo z laboratorijskimi meritvami. Glede na relativno veliko razdaljo med lokacijami meritev, izdelane karte dobro nakazujejo glavne geološke enote. Uporabljena metodologija je dokazala, da bi jo lahko uspešno uporabili za monitoring okolja, geološko kartiranje in raziskave mineralnih surovin.

Rezultat naloge je prva karta naravne radioaktivnosti tal v Sloveniji.

Abstract

In 1990, a program was initiated to cover Slovenia with portable gamma-ray spectrometer measurements on a 5 × 5 km grid. The measurements were performed with a four channel Scintrex GAD-6 spectrometer. Five gamma-ray measurements were taken at each of 816 locations. Samples of the upper 10 cm of soil profile were collected for laboratory analysis. Uranium in samples was determined by delayed neutron method (DNC). Other 35 elements: Ag, Al, As, Au, Ba, Be, Bi, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Sb, Sc, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, W, Y, Zn and Zr were analyzed by plasma–coupled emission spectrometry (ICP). The field gamma-ray measurements were converted to ground concentrations of potassium, uranium and thorium. These show good correlation with the laboratory analyses of soil samples. Regardless of the wide spaced sampling, the produced maps show relatively good correlation with main geological units. They demonstrated that the methodology can be successfully implemented for environmental monitoring, geological mapping and mineral exploration. The product of this project is the frist natural background radioactivity map of Slovenia covering the entire country.

Uvod

Naravno radioaktivno okolje je glavni vir radioaktivnega sevanja, ki mu je izpostavljen človek. Odvisno je od kamninske sestave, vrste in debeline preperine in njene prepustnosti. Poleg geološke zgradbe je sevanje odvisno tudi od nadmorske višine in od vpliva delovanja človeka na okolje. Radioaktivno sevanje sestavljajo notranji in zunanji viri. Glavna notranja vira sta ^{40}K in ^{222}Rn, ki se lahko kopičita v človeškem organizmu. Zunanji viri sevanja so kozmično in zemeljsko sevanje; slednje nastane pri radioaktivnem razpadu ^{40}K, ^{238}U in ^{232}Th v zemeljski skorji.

Z meritvami naravne radioaktivnosti slovenskega ozemlja so začeli po odkritju radioaktivnosti skonca plasti v idrijskem rudniku živega srebra leta 1947. Radioaktivnost so v preteklosti raziskovali z različnimi inštrumenti le na posameznih območjih Slovenije. Dosedanje meritve radioaktivnosti so vključevale v glavnem regionalne prospekcije uranskih anomalij ob uporabi letalskih in avtomobilskih tehnik, raziskave potencialnih uranovih nahajališč, raziskave v premogovnikih, opazovanje okolice jedrskih objektov, večletno opazovanje kontaminacije zemlje po nesreči v Černobilu in geotermalne študije.

Leta 1969 je bila petina slovenskega ozemlja pokrita z regionalno letalsko spektrometrijo gama. Sprememba kart izolinij v digitalno obliko je bila le delno uspešna zradi težav pri niveliranju podatkov med letalskimi profili in zaradi omejenega števila izorad na kartah. V prejših desetletjih so bili deli Slovenije gama spektrometrično merjeni le na določenih kamninah pri uranskih raziskavah.

Doslej zbrani podatki nam niso dali regionalnega pregleda nad naravno radioaktivnostjo v Sloveniji. Zato smo se odločili za meritve v pravilni mreži, s katero bi lahko enakomero prekrili celotno ozemlje in tako zajeli vse geološke enote, ki se razlikujejo po starosti, nastanku, litologiji, vrsti tal itd. (Andjelov et al., 1992).

Metodologija

Mreža meritev in vzorčenje

Na podlagi rezultatov geokemičnih raziskav v Istri (Pirc, 1989), ki so vključevale analizo variabilnosti v različnih geoloških medijih, smo za zagotovitev sistematičnih meritev uporabili naključno vzorčno mrežo s celicami 5 × 5 km in v manjšem območju s celicami 1 × 1 km. Možno variabilnost na vzorčnih mestih smo zajeli s 5 meritvami v krogu 20 m. Skupaj je bilo v štirih letih izmerjenih 819 lokacij v mreži 5 × 5 km in 226 lokacij v mreži 1 × 1 km.

Merilna tehnika radioaktivnih prvin

Radiometrične meritve smo opravili s 4-kanalnim spektrometrom in s 348 cm^3 velikim detektorjem s kristalom natrijevega jodida. Inštrument smo kalibrirali na kalibracijskih padih Geološkega zavoda Avstrije.

Kalij je bil merjen neposredno v energijskem območju, 1,46 MeV sevanja gama, ki ga emitira ^{40}K. Uran in torij sta bila merjena posredno preko sevanja gama potomcev v njuni razpadni verigi. Uran je bil izmerjen preko povprečja sevanja gama pri približno 1,76 MeV, ki ga emitira ^{214}Bi in torij preko povprečja sevanja gama pri 2,61 MeV, ki ga emitira ^{208}Tl. Energijska okna, ki so bila uporabljena, so:

kalij	^{40}K	1,38–1,56 MeV
uran	^{214}Bi	1,66–1,90 MeV
torij	^{208}Tl	2,44–2,77 MeV

Časovni interval meritve na tleh je bil 5-krat po 100 sekund.

Viri radioaktivnosti ozadja, ki motijo meritev, so radioaktivnost opreme, kozmično sevanje in radioaktivnost v zraku, ki se pojavlja zaradi potomcev plina radona iz uranove razpadne verige. Meritve ozadja smo opravili na Blejskem jezeru.

Analitski metodi kemičnih analiz tal

Vzorec za geokemično preiskavo je bil odvzet na posamezni lokaciji v krogu 10 metrov proti N, E, S in W okrog centralne točke. Vzorčevali smo zgornjih 10 cm talnega profila. Povprečna teža vzorca je bila od 1.5 do 2 kg.

Geokemične preiskave vzorcev smo opravili na vzorcih, ki smo jih posušili na zraku. Vzorce smo pred sušenjem in po sušenju stehtali, da smo določili vsebnost vlage v njih. Le-ta je bila povprečno 22-odstotna. Vzorci so bili presejani na sitih z 2-milimetrskimi režami in nato zmleti v vibracijskem mlinu do debeline 0.063 mm.

Vzorci so bili analizirani na uran z metodo nevtronske aktivacije (DNC), na drugih 35 elementih (Ag, Al, As, Au, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Sb, Sc, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, W, Y, Zn in Zr) pa po totalnem kislinskem razklopu z metodo plazemske emisijske spektrometrije (ICP).

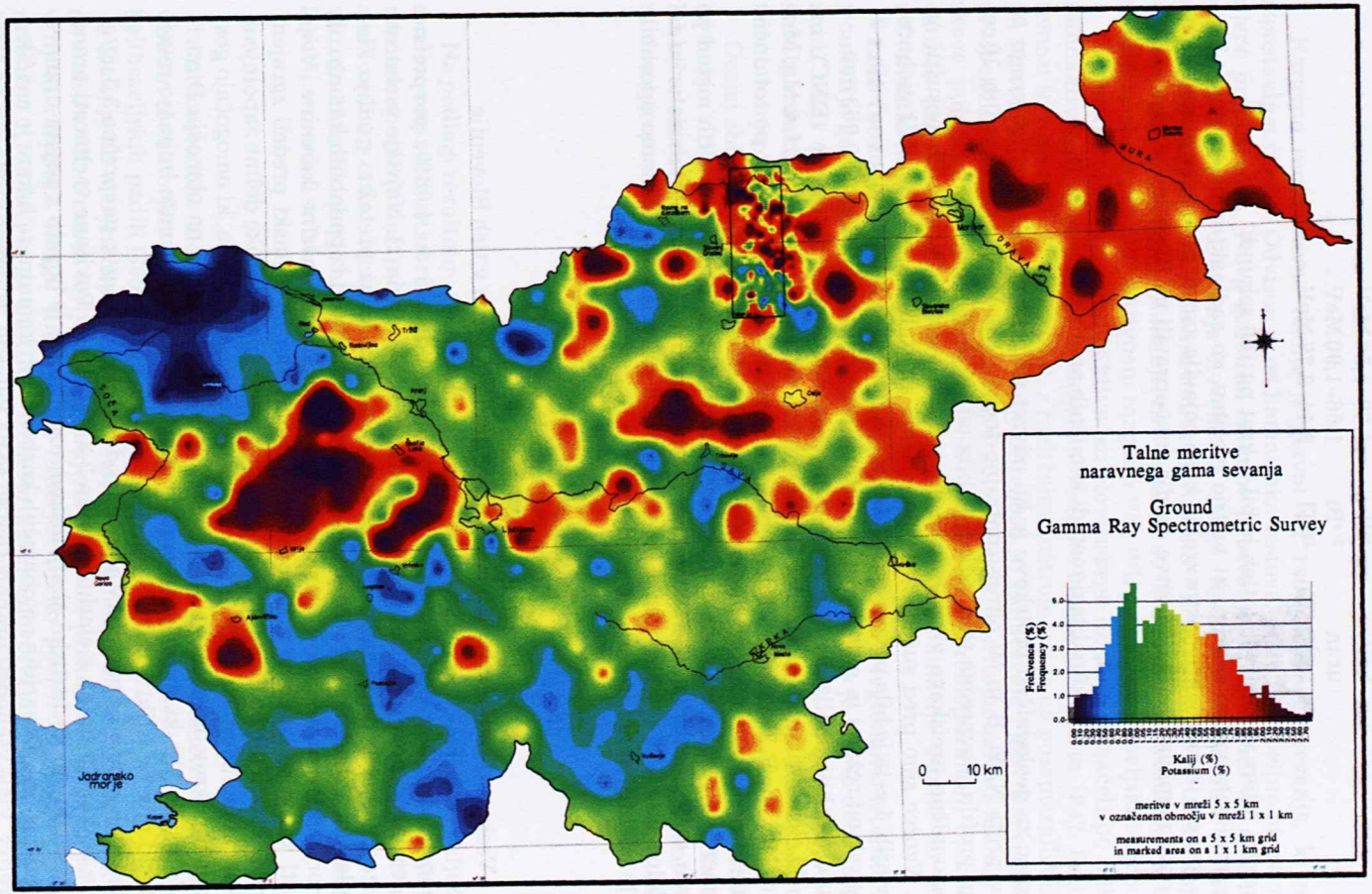
Primerjava rezultatov vseh uporabljenih merilnih tehnik in analitskih metod je pokazala, da je korelacija med terenskimi meritvami in določitvami v laboratoriju za kalij določena z ICP +0,75, uran z DNC +10,66 in za torij slaba, ker smo uporabili premalo občutljivo laboratorijsko metodo.

Rezultati raziskav

Vsebnosti radioaktivnih prvin kalija, urana in torija v tleh Slovenije

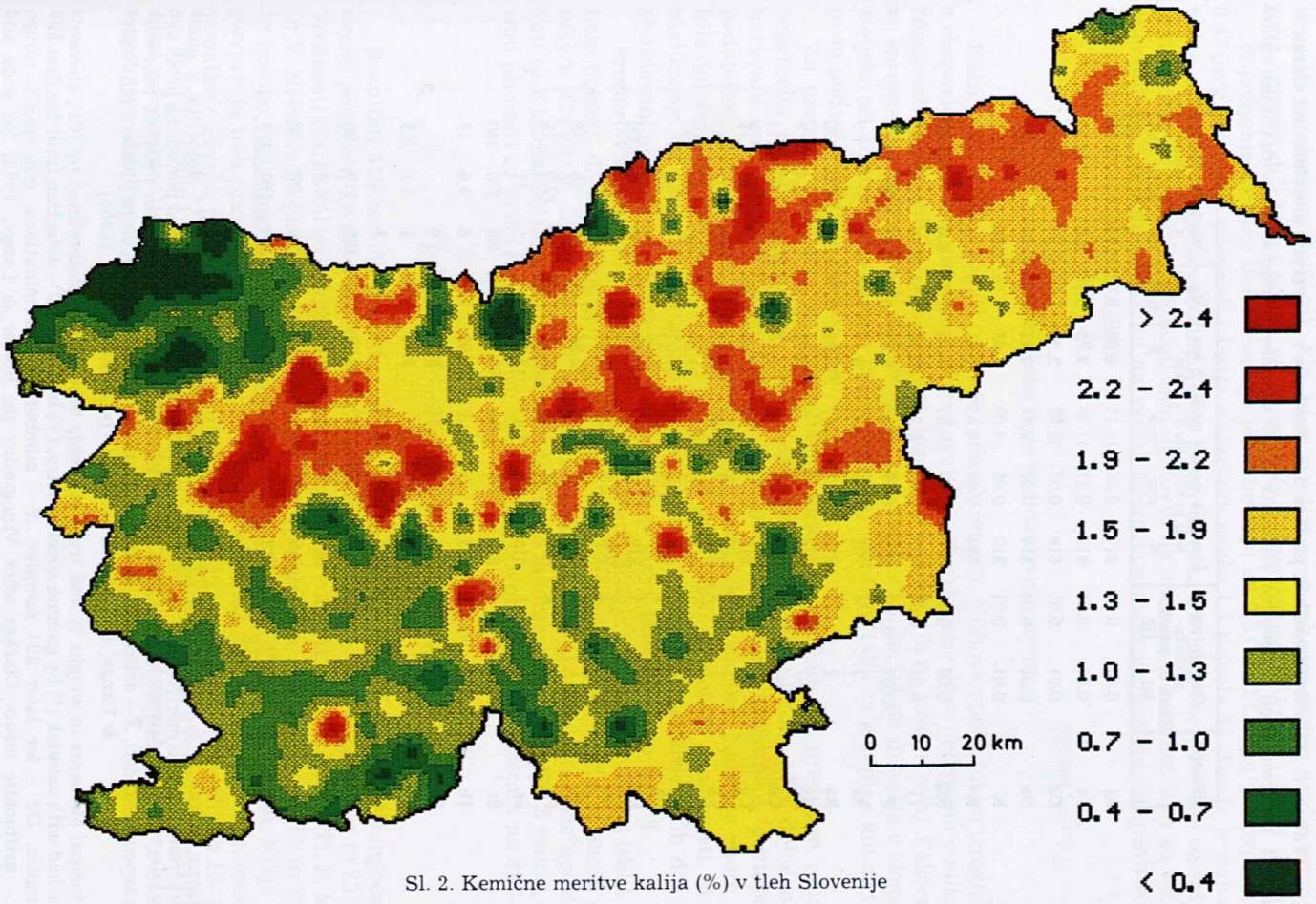
Vsebnosti kalija v tleh Slovenije so v območju od 0,05 do 4,63 %, povprečno 1,23 %, razmerje povprečja kalija s clarkom znaša 0,9 (tabela 1). Najvišje vsebnosti kalija smo namerili na idrijsko-škofjeloškem ozemlju, ki ga pretežno gradijo klastične plasti, v vzhodnem delu Posavskega hribovja, ki sestoji iz podobnih kamnin, in na Pohorju, kjer nastopajo v glavnem magmatske in metamorfne kamnine. Višje vsebnosti kalija so izražene v Panonskem bazenu, kjer so višinski predeli zgrajeni pretežno iz klastičnih sedimentov, v nižinskih predelih pa so široke doline zapolnjene z rečnimi naplavinami. Na vseh teh območjih nastopajo bogata tla, ki omogočajo gost vegetacijski pokrov, medtem ko so vsebnosti kalija precej nižje na območju Dinaridov in Julijskih Alp, ki so zgrajene predvsem iz karbonatnih kamnin in imajo reven preperinski pokrov (sliki 1 in 2).

Uran v tleh Slovenije nastopa v območju od 0,11 do 16,79 μg/g, povprečno 3,3 μg/g, razmerje povprečja urana s clarkom znaša 3,3 (tabela 1). Povišane vsebnosti urana v tleh prevladujejo na Idrijsko-škofjeloškem ozemlju, ki je bogato s pojavi uranove mineralizacije, in v Dinaridih na območjih karbonatnih kamnin, za katere je značilen kraški relief. Višje vsebnosti urana v tleh so še na Pohorju. Najnižje vrednosti pa smo



Sl. 1. Gama spektrometrične meritve kalija (%) v Sloveniji

Fig. 1. Gamma spectrometric measurements of potassium (%) in Slovenia



Sl. 2. Kemične meritve kalija (%) v tleh Slovenije

Fig. 2. Distribution of ICP determined potassium (%) in soils of Slovenia

Tabela 1. Določitve kemičnih prvin v tleh Slovenije v primerjavi z vrednostmi clarka
Table 1. Determination of chemical elements in soil samples in comparison with Clarke values

Element	Občutljivost analitike Limit of detection D1	D2	Slovenija meritve tal 5 x 5 km Soil in Slovenia 5 x 5 km N	min	max	$\bar{X}$	$\bar{X}_{slo}$ / $clark_{tla}$	Vrednost clarka Clark value tla	sed.	lito.
Al	0.01	0.01	819	0.39	11.12	**6.69**	0.93	**7.13**		8.05
Fe	0.01	0.01	819	0.21	11.76	**3.75**	0.98	**3.8**		4.65
Ca	0.01	0.01	819	0.02	28.92	**2.58**	1.88	**1.37**		2.96
Na	0.01	0.01	819	0.02	2.54	**0.52**	0.82	**0.63**		2.5
K	0.01	0.01	819	0.06	4.09	**1.45**	1.06	**1.36**		2.5
K*			816	0.05	4.63	**1.23**	0.9	**1.36**		
Mg	0.01	0.01	819	0.09	10.87	**1.35**	2.25	**0.6**		1.87
Ti	0.01	0.01	818	0.02	2.23	**0.38**	0.82	**0.46**	0.39	0.45
P	0.001	0.002	819	0.05	0.46	**0.07**	0.87	**0.08**	0.061	0.093
As	2	4	722	4	131	**8.17**	1.63	**5**		1.7
Ba	2	1	819	12	2261	**370.91**	0.74	**500**	470	650
Be	0.2	1	616	1	5	**2.02**			3.4	3.8
Cd	0.2	0.4	571	0.25	10	**1.16**	(2.32)	**(0.5)**	0.25	0.13
Co	1	2	818	3	99	**27.56**	3.45	**8**	15	18
Cr	1	2	819	7	406	**90.33**	0.45	**200**	78	83
Cu	1	2	818	3	270.5	**27.85**	1.39	**20**	37	47
La	2	2	816	3	104	**31.33**			78	
Mn	1	5	819	24	7187	**1043.99**	1.23	**850**	740	1000
Nb	2	2	709	2.5	21	**7.21**			8.8	
Ni	1	2	816	3	200	**52.85**	1.32	**40**	56	58
Pb	2	4	818	4	181	**38.28**	3.82	**10**	17.5	16
Sc	0.2	1	815	1.6	41.45	**13.22**			11	
Sr	1	4	819	12.5	1016	**98.19**	0.32	**300**	270	340
Th	2	2	795	3	26	**11.02**	1.83	**6**	9.9	13
Th*			816	0.31	21.86	**8.47**	1.41	**6**		
U+	0.01	0.01	816	0.3	12.1	**3.73**	3.73	**1**	3.1	2.5
U*			816	0.11	16.79	**3.3**	3.3	**1**		
V	2	2	819	5	357	**118.07**	1.18	**100**	110	90
Y	2	2	811	3	116	**17.83**			2.8	
Zn	1	2	818	10	1409.5	**113.42**	2.26	**50**	79	38
Zr	1	2	818	2	227	**49.23**	0.16	**300**	160	170

Glavne prvine v % in sledne v µg/g so bile določene z metodo ICP,* določitve z gama spektrometričnimi meritvami, + določitve z metodo DNC, *D1* – občutljivost metode za prvih 595 vzorcev, *D2* – občutljivost metode za poznejših 224 vzorcev, *N* – število meritev, *min-max* – razpon vrednosti, $\bar{X}$ – aritmetična sredina. Clarki po Vinogradovu – tla in litosfera (cf. Rösler & Lange, 1972) in za sedimente po Judoviču et al. (1985)

Principal elements in weight % and trace elements in µg/g were determined by ICP, elements marked with asterisk (*) by gamma spectrometry, (+) by DNC. *D1* – detection limit for first 595 samples, *D2* – for later 224 samples. *N* – number of determinations, *min-max* – range, $\bar{X}$ – arithmetic mean. Clarkes after Vinogradov (in Rösler & Lange, 1972) for soils and lithosphere, and after Judovič et al. (1985) for sedimentary rocks

izmerili na območju Julijskih Alp, kjer je relief prav tako podvržen kraški eroziji, toda največji deli tega ozemlja so skoraj brez preperinskega pokrova (sliki 3 in 4.)

Pojavljanje torija v tleh Slovenije je v območju od 0,31 do 21,86 µg/g, povprečno 8,47 µg/g, razmerje povprečja torija s clarkom znaša 1,4 (tabela 1). Torija je največ v tleh predvsem v severovzhodnem delu Dinaridov, na Idrijsko-škofjeloškem ozemlju in na Pohorju. Najnižje vsebnosti smo ugotovili na ozemlju Dinaridov, kjer so večje površine flišnih sedimentov, in na skoraj brezpreperinskem območju Julijskih Alp (sliki 5 in 6) (Andjelov, 1993).

Ekspozicijske doze radioaktivnih prvin

Kalij, uran in torij so viri naravne radioaktivnosti. Njihove vplive lahko izrazimo z ekspozicijsko ali absorpcijsko dozo v zraku. Ekspozicijsko dozo podajamo v mikro röntgenih na uro (µR/h), absorpcijsko dozo pa v nanograyih na uro (nGy/h). Faktorji za spremembo koncentracij naravnih radioelementov kalija, urana in torija v ekspozicijsko ali absorpcijsko dozo v zraku so skoraj identični tako za kamnine kot za tla in so podani v tabeli 2 (IAEA, 1990).

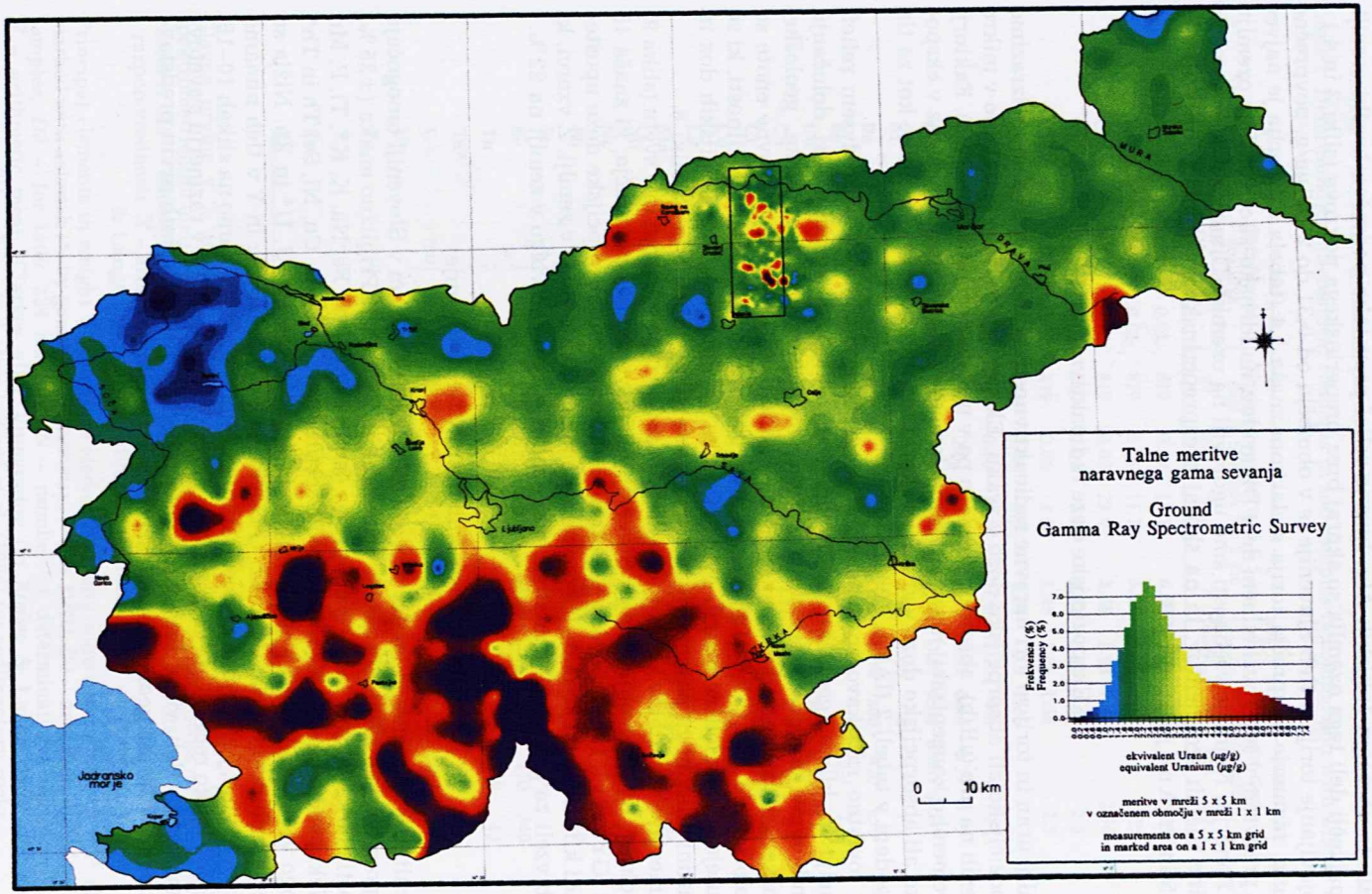
Za tovrstno raziskavo so pomembne geografske značilnosti – predvsem relief, vegetacija in klima, geološke pa litologija in tektonska zgradba. Pri določanju naravnih enot za potrebe izrabe prostora smo uporabili topografske, geološke, pedološke, gozdarske in klimatske karte ter satelitske posnetke. Naravne enote so bile določene po Poljaku (1987) na podlagi geografsko-geoloških značilnosti, ki se razlikujejo od razdelitev drugih avtorjev (slika 7). Povprečja ekspozicijskih doz in standardni odkloni za posamezne naravne enote glej v tabeli 3 in na sliki 8.

Primerjava rezultatov z absorpcijskimi dozami drugje v Evropi in v svetu (slika 9) nam pokaže, da je sevanje gama v Sloveniji blizu svetovnega povprečja, ki znaša 45 nGy/h (Grasty, 1984). Seveda je potrebno pri izračunu absorpcijske doze upoštevati tudi klimatske dejavnike, predvsem sezonsko nihanje vlage v zemlji. Z vzorci, ki smo jih vzeli za primerjalne analize, smo ocenili povprečno vlago v zemlji na 22 %.

Povprečja kemičnih prvin v tleh Slovenije

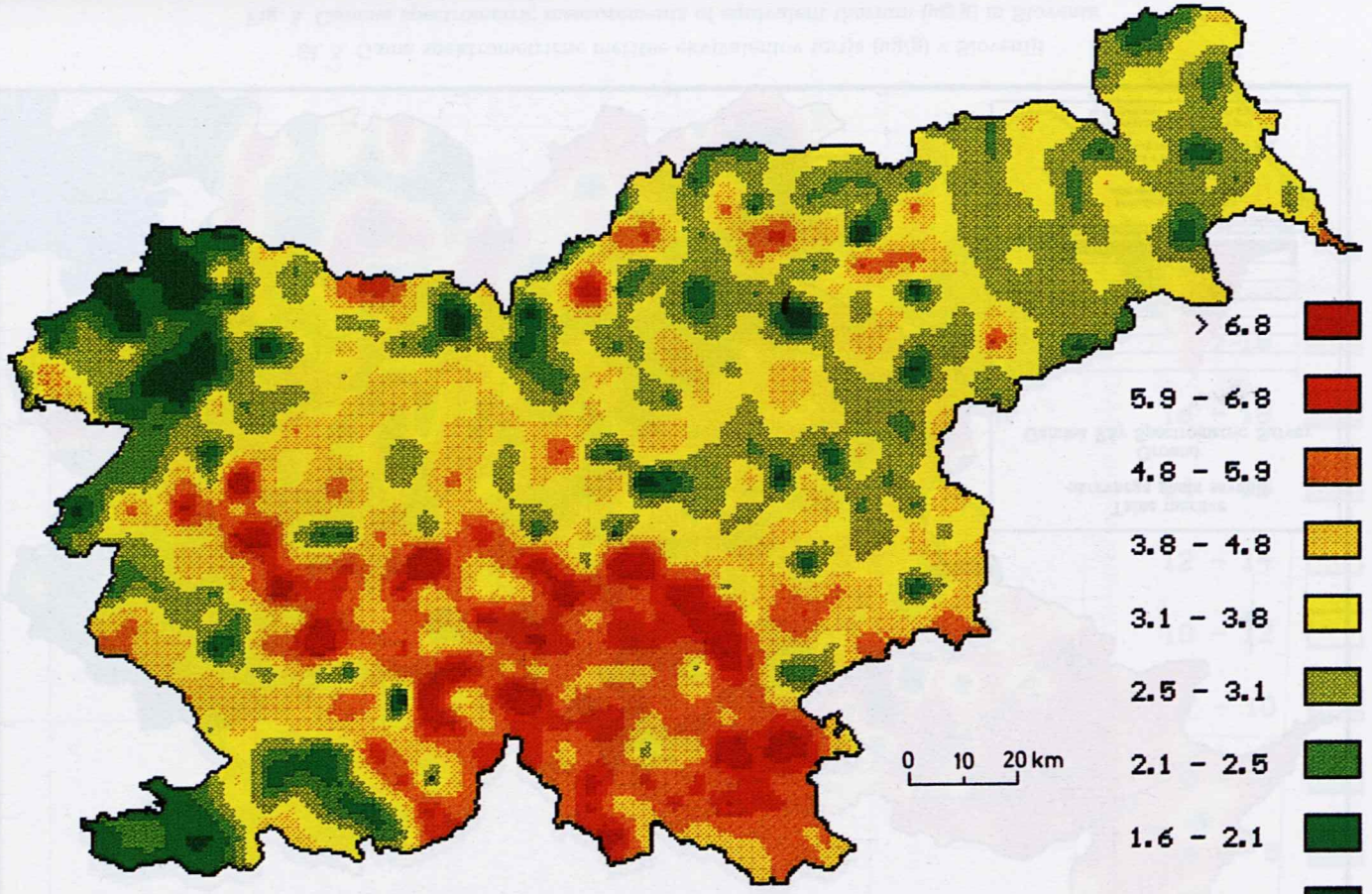
Rezultati 819 kemičnih analiz vzorcev tal v mreži 5 × 5 km v Sloveniji omogočajo oceno povprečij 28 kemičnih prvin; prikazana je v tabeli 1. Približno enaka (±25 %) vrednosti clarka tal so v tabeli 1 povprečja osmih prvin – Al, Fe, Na, K, K*, Ti, P, Mn in V. Nekaj večja (do 100 %) so povprečja šestih prvin – Ca, As, Cu, Ni, Sr, Th in Th* in mnogo večja (nad 100 %) povprečja prvin Mg, Cd, Co, Pb, U, U* in Zn. Nižja so povprečja treh prvin – Ba, Cr in Zr. O clarku za Be, La, Nb, Sc in Y v tleh nimamo podatkov. Prvine, pomembne za oceno stanja v okolju predstavljamo na slikah 10–16.

Splošno lahko rečemo, da so povprečja prvin v tleh Slovenije v razmerju s svetovnimi povprečji v tleh, višja. Prve ugotovitve o porazdelitvi kemičnih prvin predstavljajo izziv nadaljnjim geokemičnim raziskavam tal Slovenije.

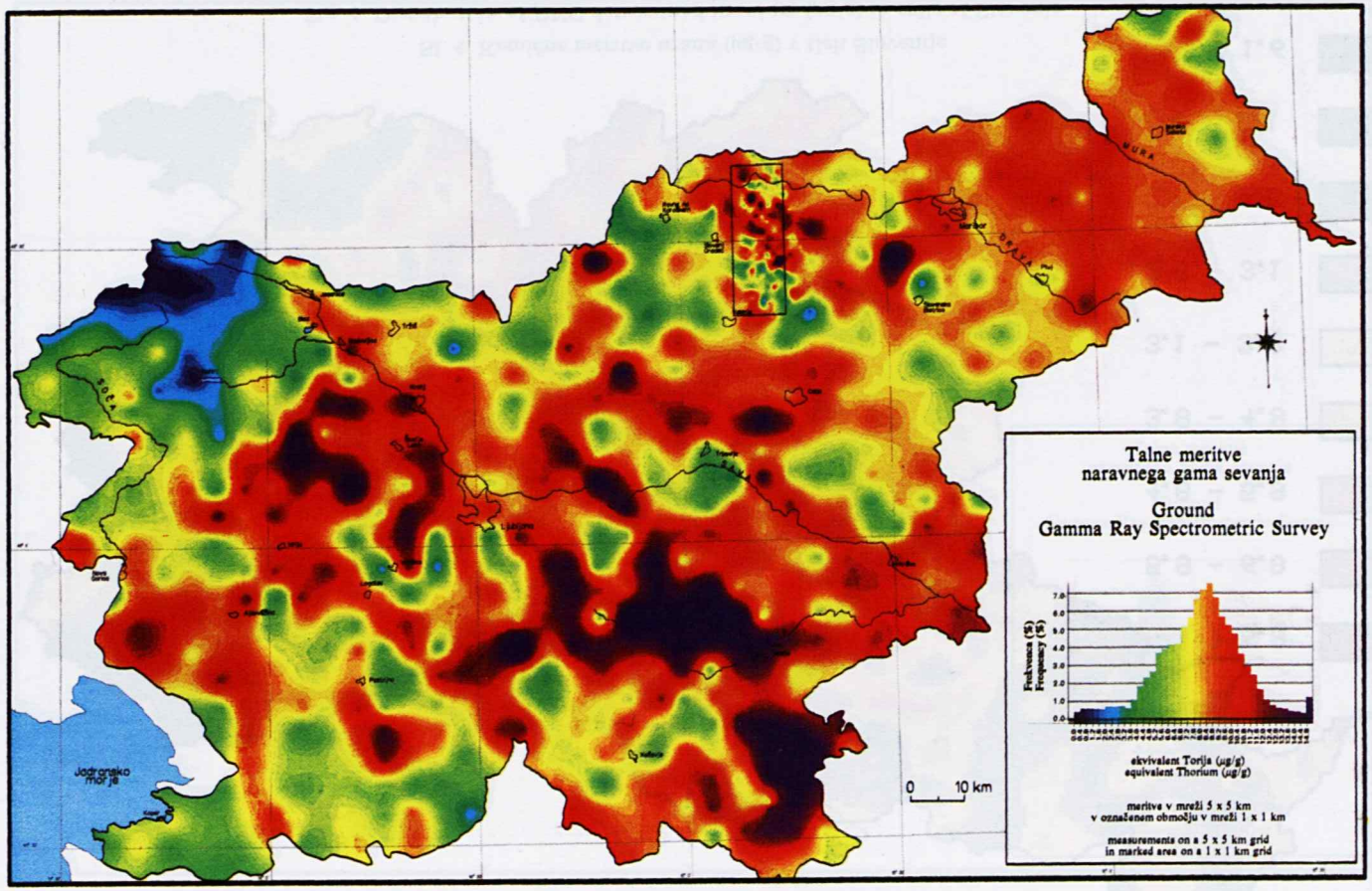


Sl. 3. Gama spektrometrične meritve ekvivalentov urana (µg/g) v Sloveniji

Fig. 3. Gamma spectrometric measurements of equivalent uranium (µg/g) in Slovenia

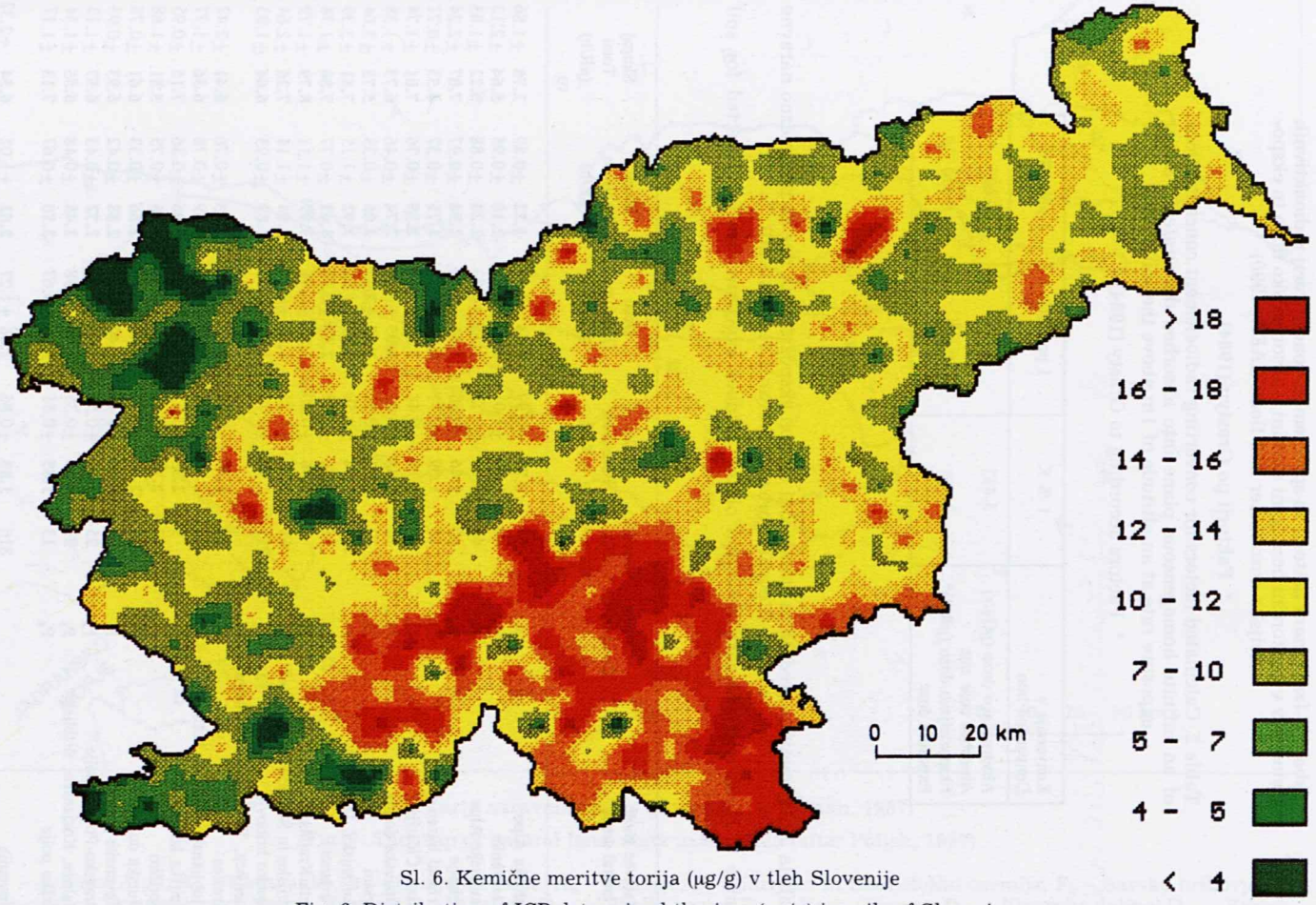


Sl. 4. Kemične meritve urana (μg/g) v tleh Slovenije
Fig. 4. Distribution of DNC determined uranium (μg/g) in soils of Slovenia



Sl. 5. Gama spektrometrične meritve ekvivalentov torija (µg/g) v Sloveniji

Fig. 5. Gamma spectrometric measurements of equivalent thorium (µg/g) in Slovenia



Sl. 6. Kemične meritve torija (μg/g) v tleh Slovenije

Fig. 6. Distribution of ICP determined thorium (μg/g) in soils of Slovenia

Tabela 2. Izračunani faktorji za spremembo koncentracij radioaktivnih elementov v neskončni homogeni ravnini v absorpcijsko dozo in ekspozicijsko dozo meter nad tlemi (IAEA, 1990)

* Faktorji po Grastyu (1984)

Table 2. Calculated factors for converting radioelement concentrations of an infinite homogeneous plane into absorbed dose rate in air or exposure rate at an altitude of 1 m above the soil plane

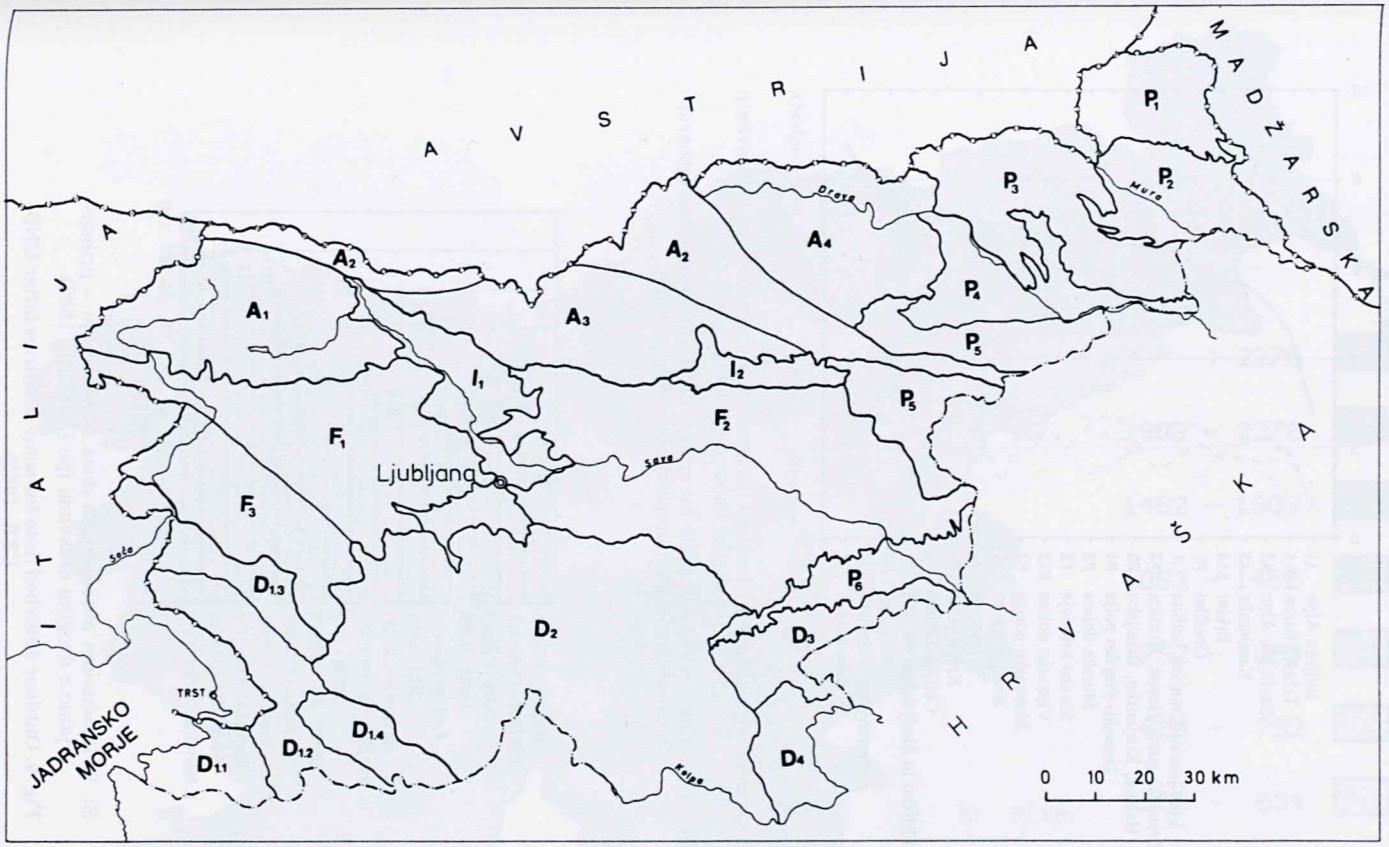
* Factors according to Grasty (1984)

Konverzija v Conversion into	1 % K	1 ppm eU	1 ppm eTh
Absorpcijsko dozo (pGy/s) Absorbed dose rate	3.633	1.576	0.693
Ekspozicijsko dozo (μR/h)* Exposure dose	1.505	0.625	0.310

Tabela 3. Aritmetična sredina in standardni odklon ekspozicijskih doz za posamezno naravno enoto v Sloveniji (brez upoštevanja vlažnosti tal)

Table 3. Mean and standard deviation of the outdoor exposure rate (uncorrected for soil moisture)

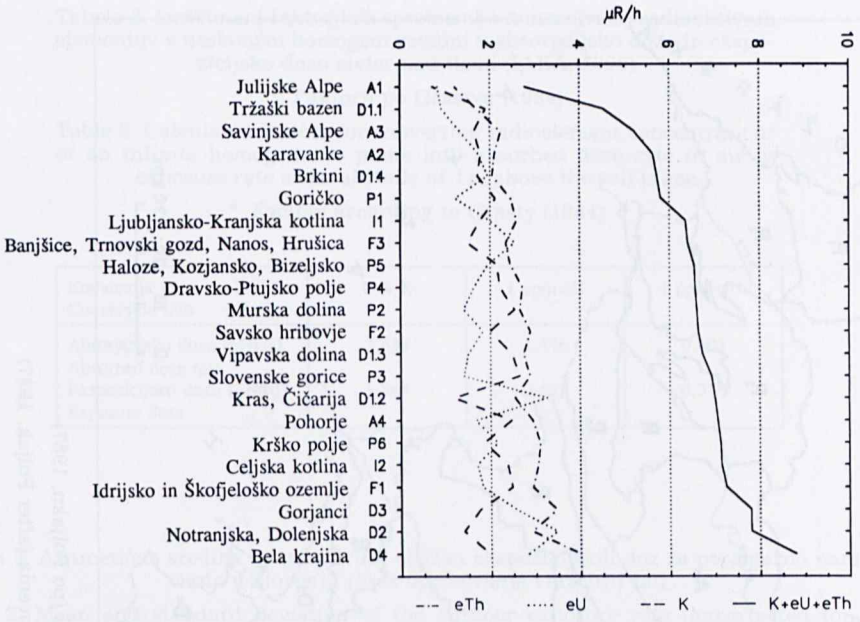
Naravne enote Natural areas	Oznaka Designation	Število točk Number of points	Kalij Potassium (μR/h)	Uran Uranium (μR/h)	Torij Thorium (μR/h)	Skupaj Total (μR/h)
Julijske Alpe	A_1	51	**0.72** ±0.59	**0.83** ±0.51	**1.22** ±0.89	**2.78** ±1.86
Karavanke	A_2	49	**1.79** ±1.01	**1.74** ±0.72	**2.10** ±0.95	**5.64** ±2.13
Savinjske Alpe	A_3	40	**1.64** ±0.72	**1.33** ±0.53	**2.24** ±0.88	**5.22** ±1.83
Pohorje	A_4	46	**2.46** ±0.80	**1.66** ±0.76	**2.94** ±0.97	**7.07** ±2.24
Tržaški bazen	$D_{1.1}$	16	**1.09** ±0.31	**0.92** ±0.23	**1.71** ±0.37	**4.53** ±0.71
Kras, Čičarija	$D_{1.2}$	27	**1.19** ±0.44	**3.26** ±1.13	**2.55** ±0.76	**7.01** ±1.74
Vipavska dolina	$D_{1.3}$	14	**2.48** ±0.95	**1.05** ±0.86	**2.74** ±0.46	**6.73** ±1.38
Brkini	$D_{1.4}$	12	**1.72** ±0.50	**1.95** ±2.27	**2.05** ±0.35	**5.73** ±2.04
Notranjska, Dolenjska	D_2	139	**1.04** ±0.58	**3.48** ±1.52	**2.92** ±1.15	**7.81** ±2.39
Gorjanci	D_3	18	**1.76** ±0.55	**2.57** ±0.93	**3.47** ±0.77	**7.80** ±1.74
Bela Krajina	D_4	8	**1.96** ±0.20	**2.84** ±0.76	**3.99** ±1.11	**8.79** ±1.79
Idrijsko in Škofjeloško ozemlje	F_1	62	**2.48** ±1.23	**1.82** ±0.80	**2.94** ±1.14	**7.26** ±2.64
Savsko hribovje	F_2	111	**1.99** ±0.73	**1.83** ±0.76	**2.89** ±0.93	**6.64** ±1.93
Banjšice, Trnovski gozd, Nanos, Hrušica	F_3	37	**1.49** ±0.70	**2.55** ±1.69	**2.35** ±0.76	**6.41** ±2.42
Ljubljansko-Kranjska kotlina	I_1	32	**1.77** ±0.58	**2.00** ±0.75	**2.59** ±0.78	**6.36** ±1.77
Celjska kotlina	I_2	7	**2.38** ±0.53	**1.70** ±0.44	**3.06** ±0.36	**7.15** ±0.95
Goričko	P_1	20	**2.12** ±0.61	**1.22** ±0.41	**2.46** ±0.75	**5.81** ±1.68
Murska dolina	P_2	25	**2.54** ±0.37	**1.40** ±0.29	**2.66** ±0.33	**6.61** ±0.78
Slovenske gorice	P_3	35	**2.65** ±0.43	**1.40** ±0.29	**2.88** ±0.42	**6.93** ±0.93
Dravsko-Ptujsko polje	P_4	25	**2.21** ±0.55	**1.63** ±0.33	**2.72** ±0.43	**6.57** ±1.12
Haloze, Kozjansko, Bizeljsko	P_5	29	**2.15** ±0.35	**1.94** ±0.98	**2.45** ±0.48	**6.55** ±1.34
Krško polje	P_6	13	**1.85** ±0.51	**2.16** ±0.67	**3.10** ±0.67	**7.13** ±1.17
Slovenija		816	**1.85** ±0.86	**2.06** ±1.27	**2.62** ±1.02	**6.54** ±2.32



Sl. 7. Karta naravnih enot v Sloveniji (po Poljaku, 1987)

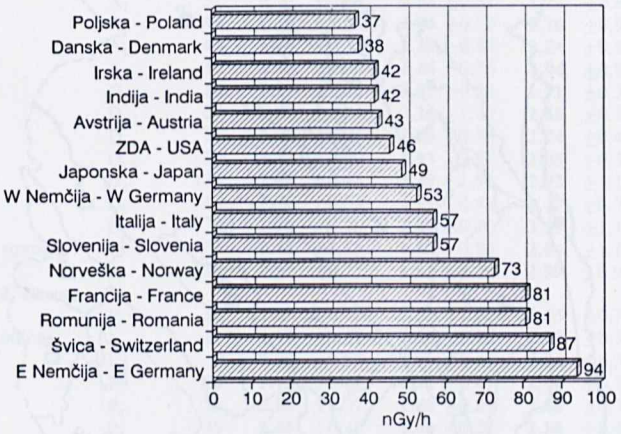
Fig. 7. The map of natural land-units in Slovenia (after Poljak, 1987)

A_1 – Julijske Alpe; A_2 – Karavanke, A_3 – Savinjske Alpe, A_4 – Pohorje; F_1 – Idrijsko in Škofjeloško ozemlje; F_2 – Savsko hribovje; F_3 – Banjščice, Trnovski gozd, Nanos, Hrušica; D – Dinaridi; $D_{1.1}$ – Tržaški bazen; $D_{1.2}$ – Kras, Čičarija; $D_{1.3}$ – Vipavska dolina; $D_{1.4}$ – Brkini; D_2 – Notranjska, Dolenjska; D_3 – Gorjanci; D_4 – Bela krajina; I_1 – Ljubljansko-kranjska kotlina; I_2 – Celjska kotlina; P_1 – Goričko; P_2 – Murska dolina; P_3 – Slovenske gorice; P_4 – Dravsko-ptujsko polje; P_5 – Haloze, Kozjansko, Bizeljsko; P_6 – Krško polje



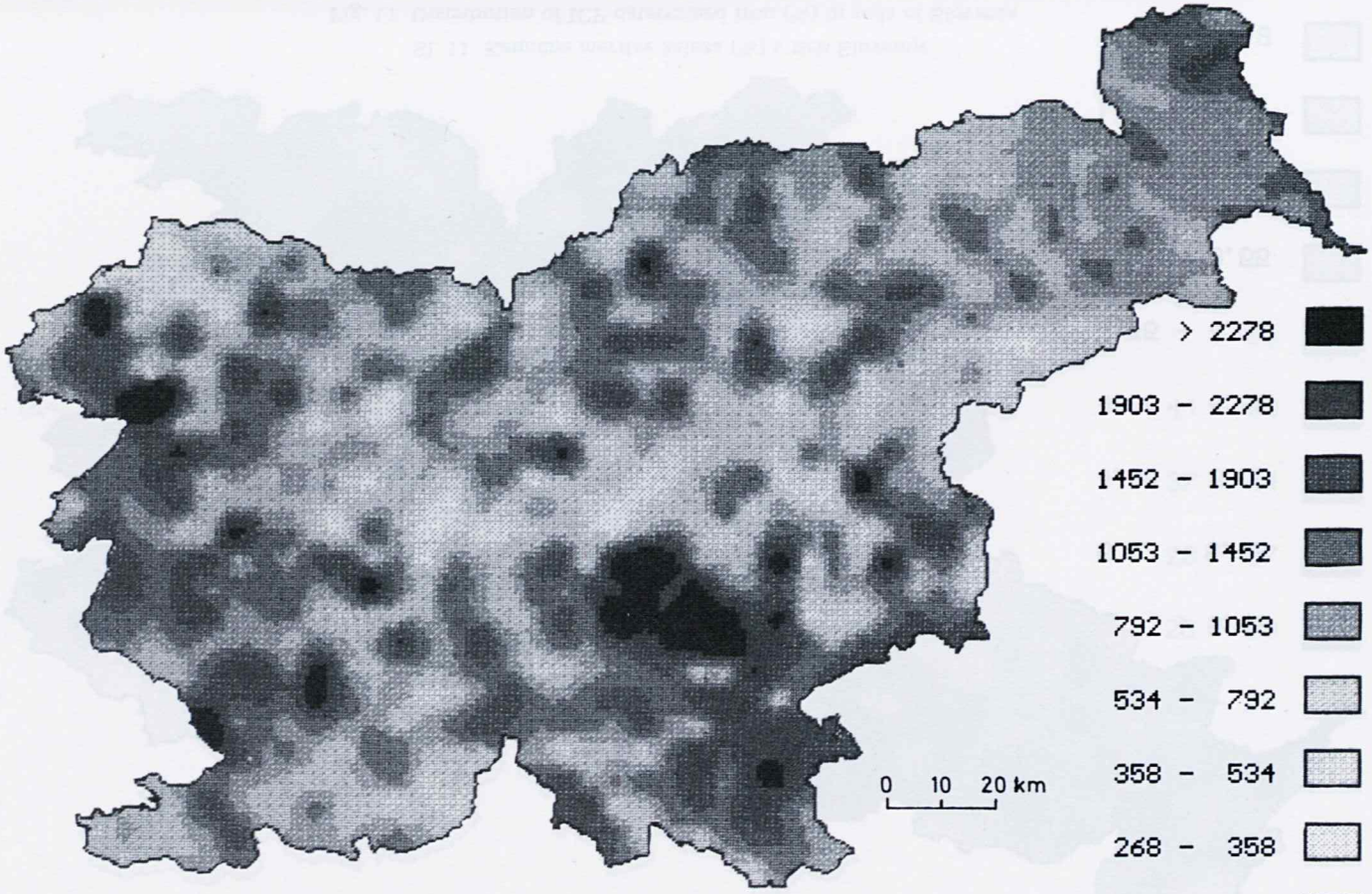
Sl. 8. Povprečna ekspozicijska doza za posamezno naravno enoto v Sloveniji (geografsko-geološke enote po Poljaku, 1987)

Fig. 8. The mean radiation exposure rate for each natural unit of Slovenia (geographical-geological subdivision after Poljak, 1987)

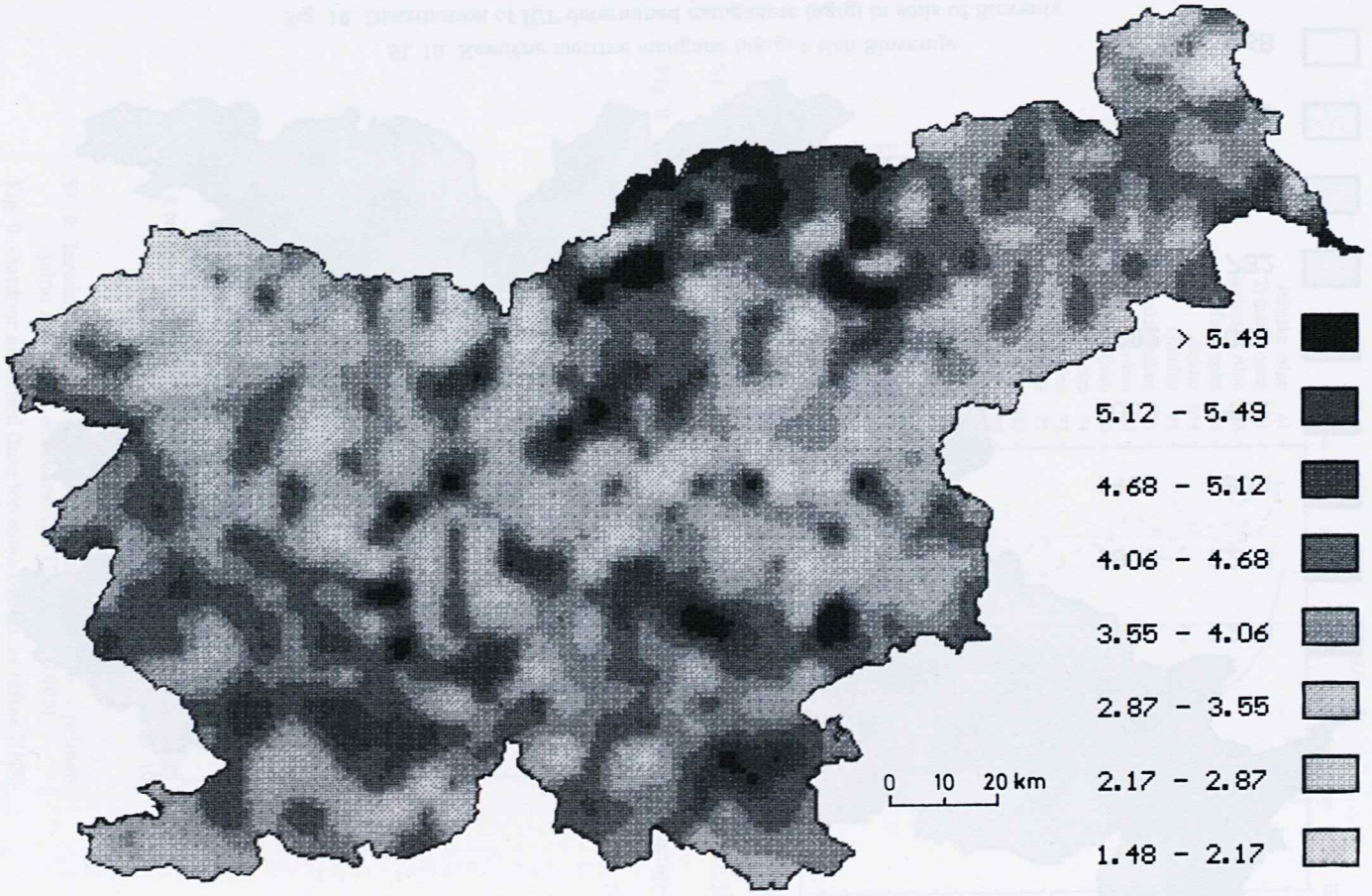


Sl. 9. Izračunana absorpcijska doza za Slovenijo – primerjalno z drugimi državami (po UNSCER, 1982)

Fig. 9. Outdoor absorbed dose for some countries (after UNSCER, 1982)

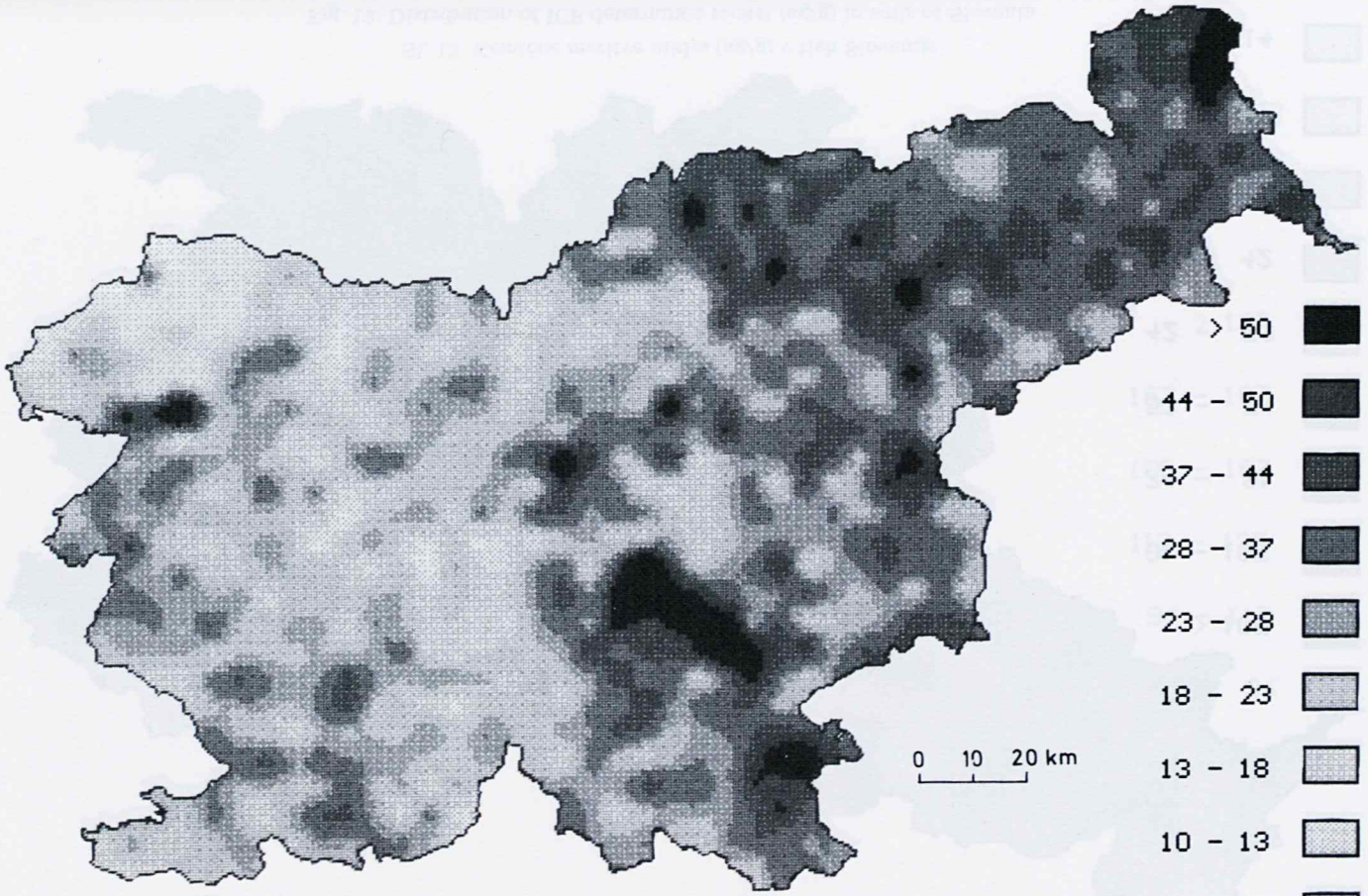


Sl. 10. Kemične meritve mangana (µg/g) v tleh Slovenije
Fig. 10. Distribution of ICP determined manganese (µg/g) in soils of Slovenia

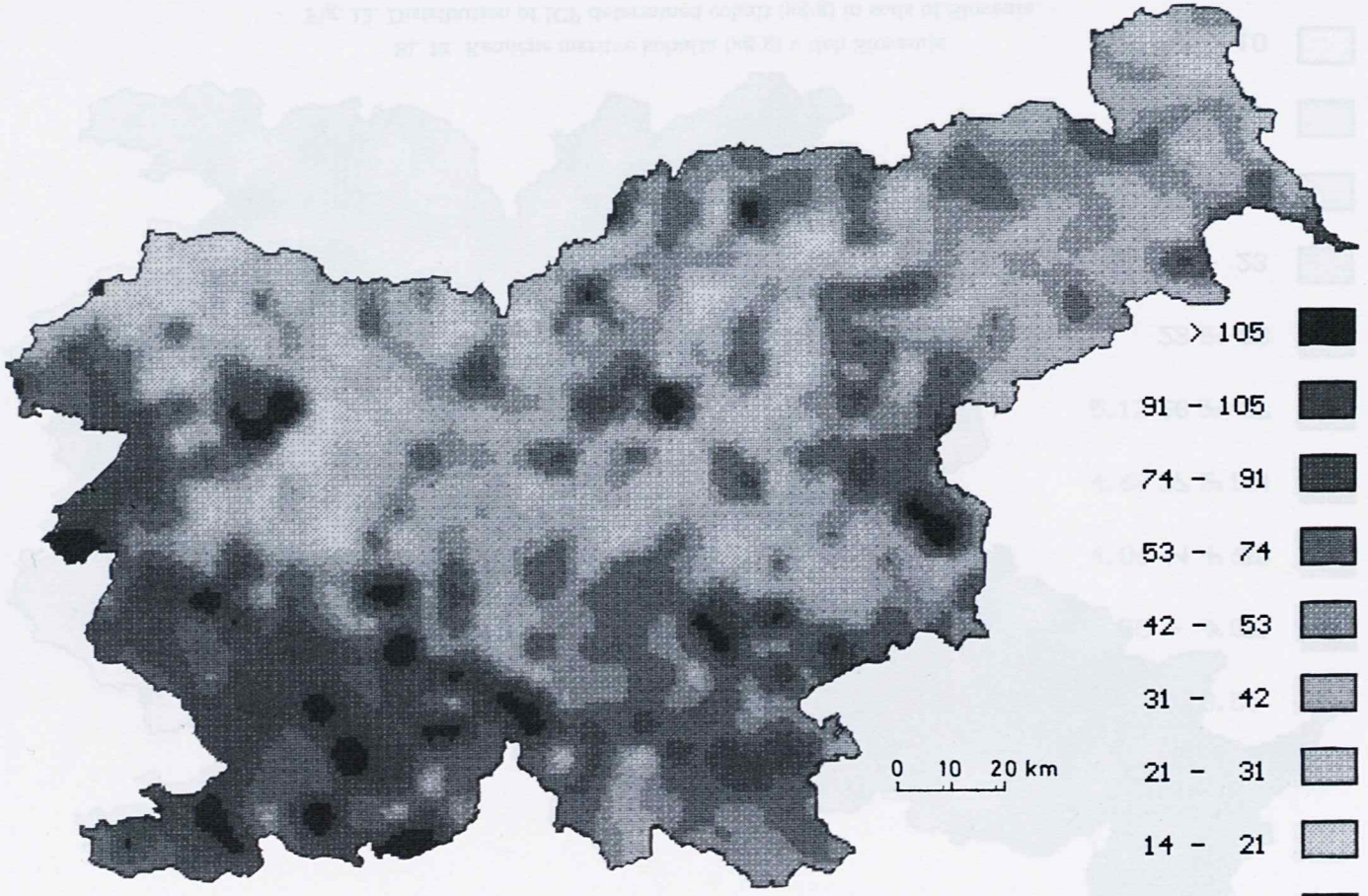


Sl. 11. Kemične meritve železa (%) v tleh Slovenije

Fig. 11. Distribution of ICP determined iron (%) in soils of Slovenia

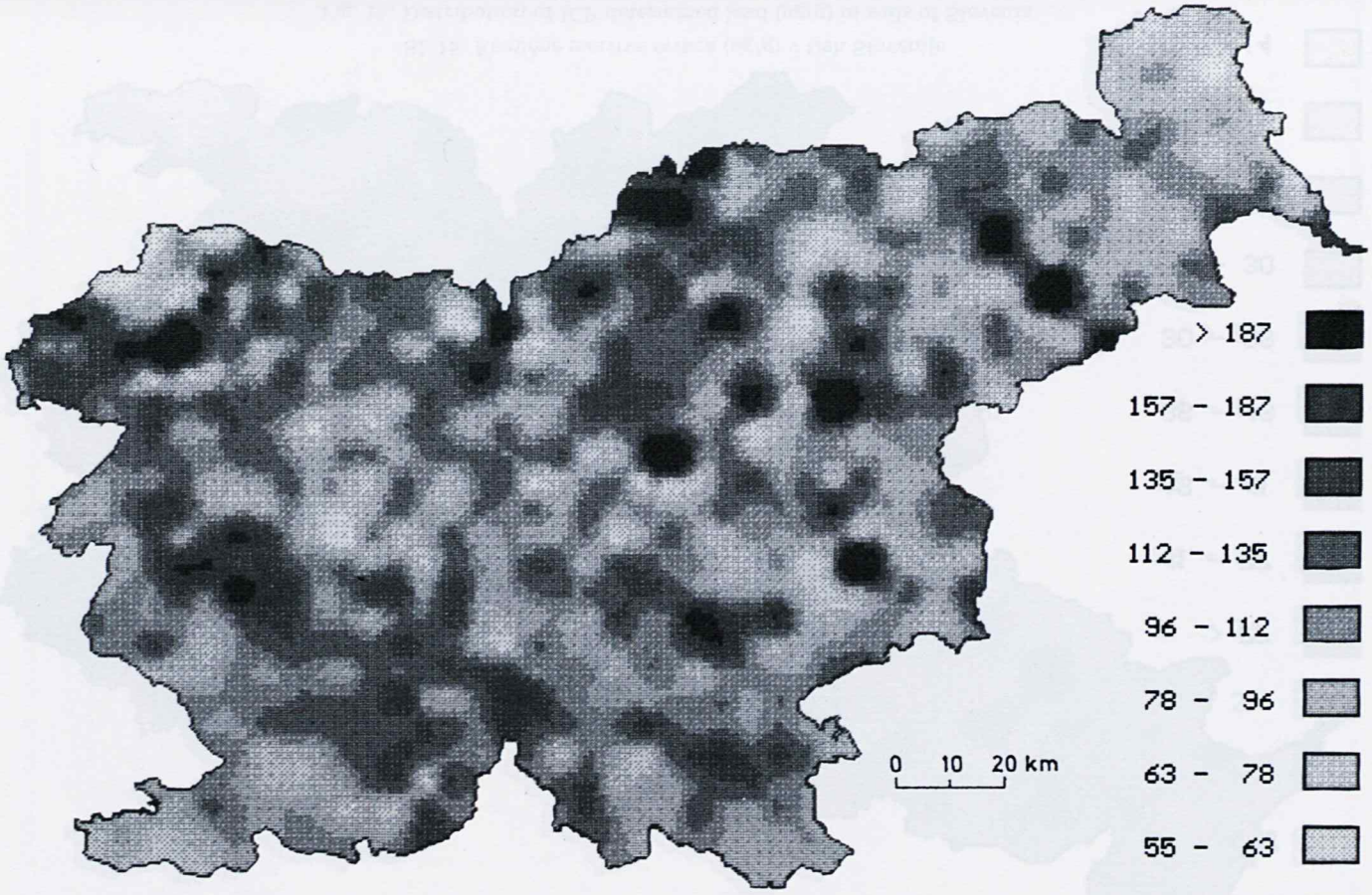


Sl. 12. Kemične meritve kobalta (μg/g) v tleh Slovenije
Fig. 12. Distribution of ICP determined cobalt (μg/g) in soils of Slovenia

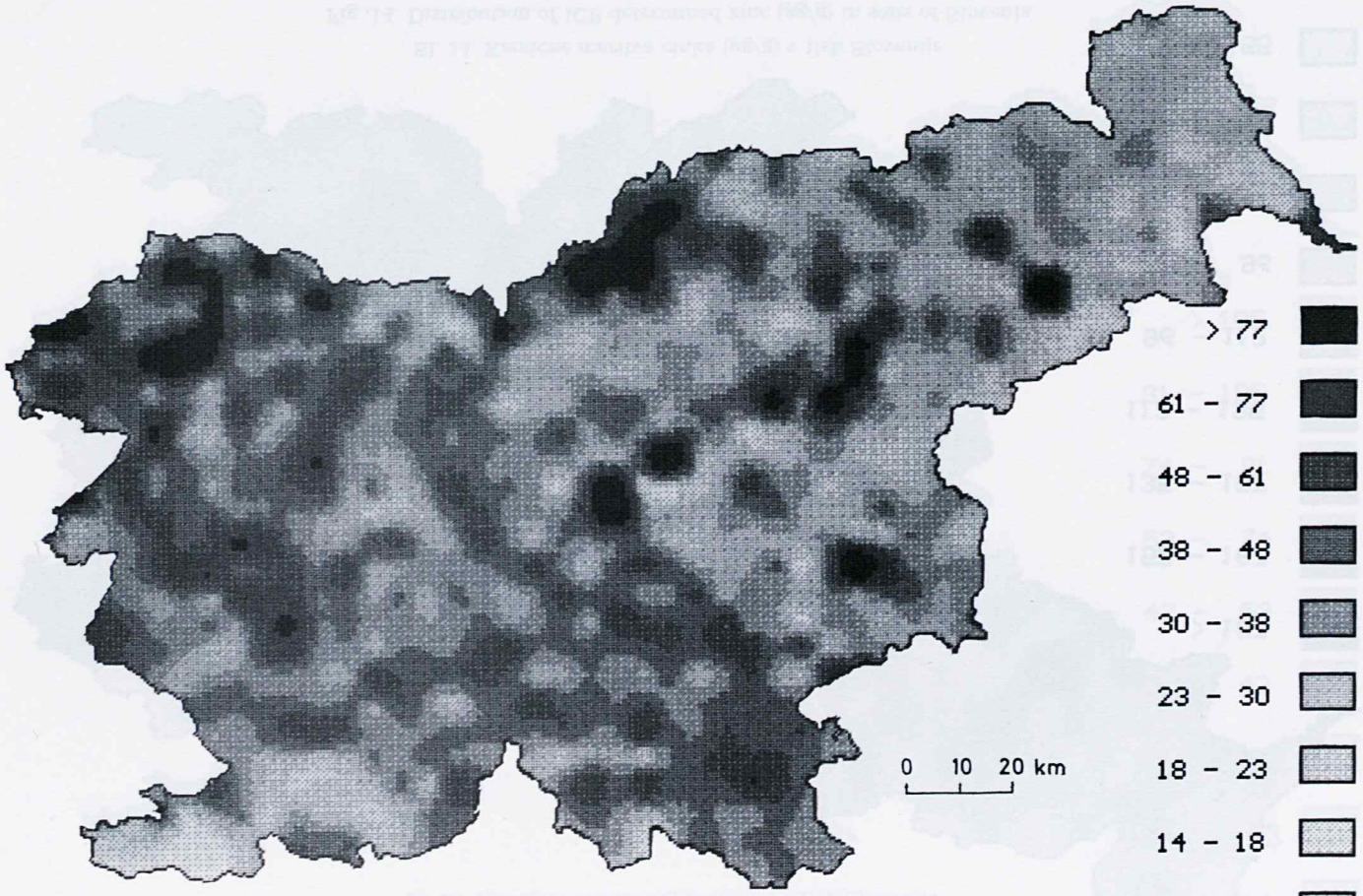


Sl. 13. Kemične meritve niklja (µg/g) v tleh Slovenije

Fig. 13. Distribution of ICP determined nickel (µg/g) in soils of Slovenia

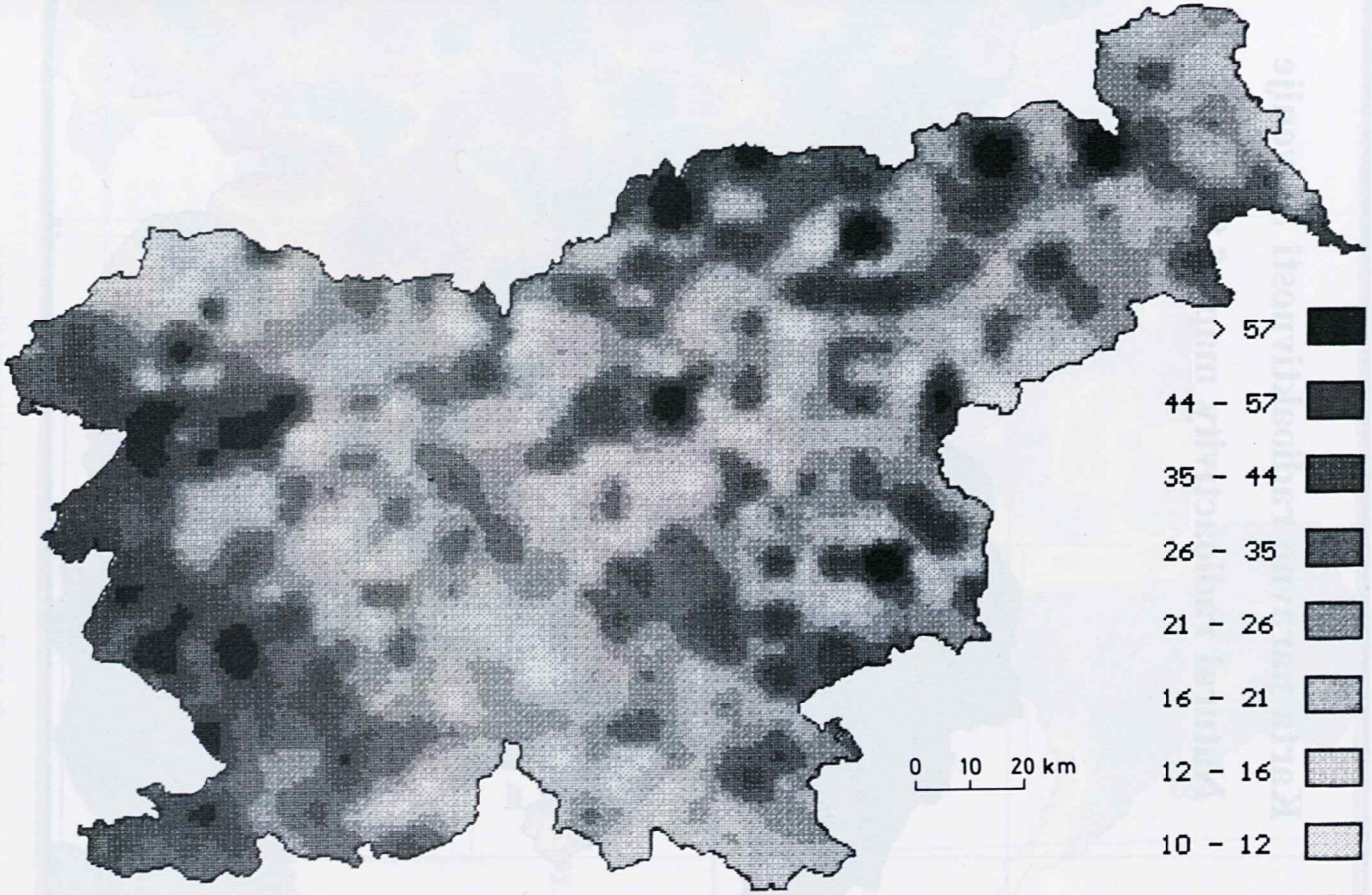


Sl. 14. Kemične meritve cinka (μg/g) v tleh Slovenije
Fig. 14. Distribution of ICP determined zinc (μg/g) in soils of Slovenia



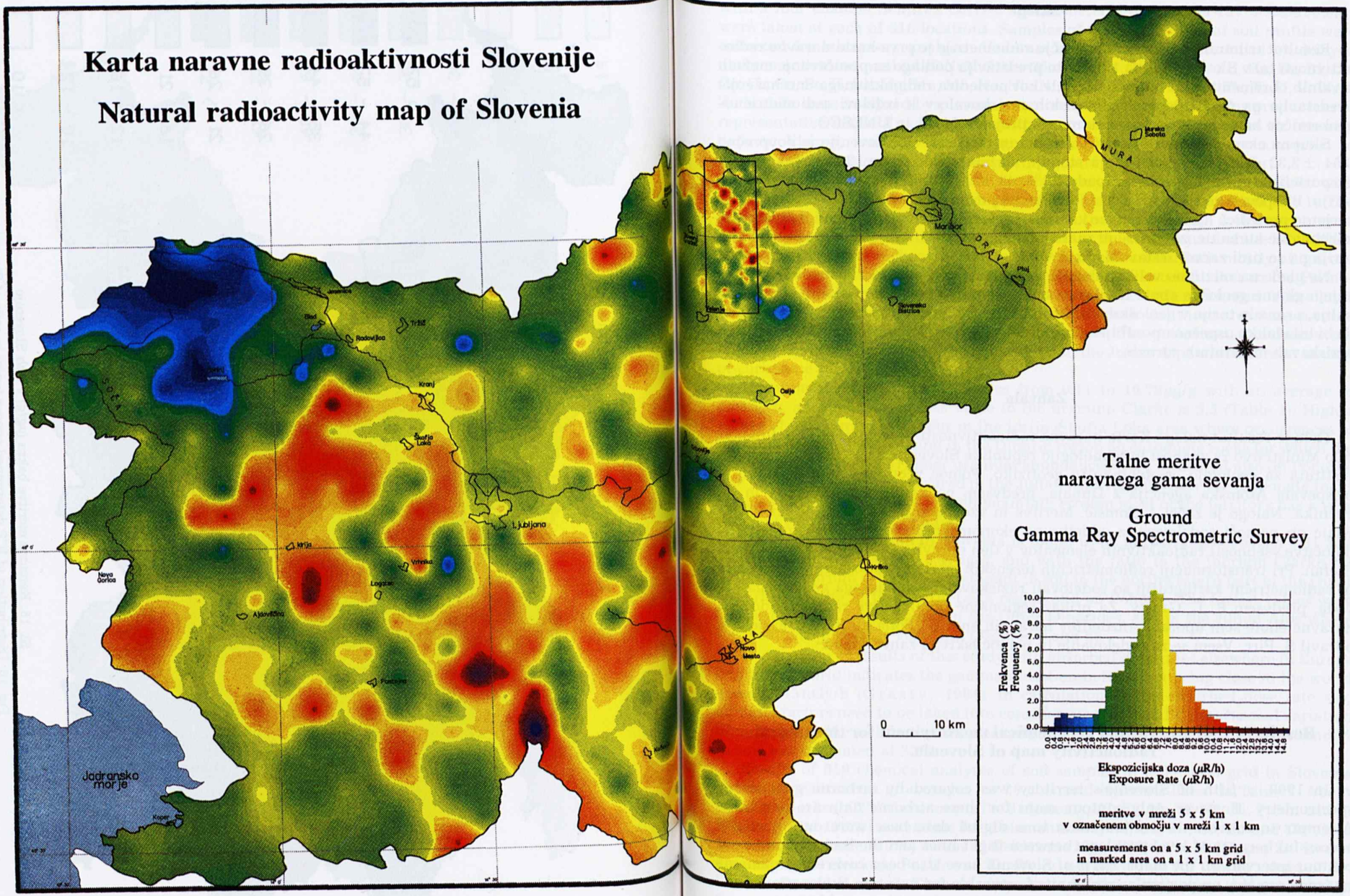
Sl. 15. Kemične meritve svinca (μg/g) v tleh Slovenije

Fig. 15. Distribution of ICP determined lead (μg/g) in soils of Slovenia



Sl. 16. Kemične meritve bakra (μg/g) v tleh Slovenije

Fig. 16. Distribution of ICP determined copper (μg/g) in soils of Slovenia



Sl. 17. Karta naravne radioaktivnosti Slovenije

Fig. 17. Natural radioactivity map of Slovenia

Sklepi

Rezultat triletnih raziskav na področju radiometrije je prva karta naravne radioaktivnosti tal v Sloveniji (slika 17). Le-ta predstavlja podlago za preučevanje možnih sevalnih obremenitev, ki bi lahko nastale kot posledica radioaktivnega onesnaženja. Predstavlja pa tudi prispevek slovenskih raziskovalcev k izdelavi radiometrično-geokemične karte sveta v okviru skupnega projekta IAEA in UNESCO.

Skupna ekspozicijska doza kalija, urana in torija za vso Slovenijo je povprečno 6,54 ± 2,32 μR/h brez upoštevanja stopnje vlažnosti tal (povpr. 22 %). Od skupne ekspozicijske doze 6,54 μR/h odpade 28 % na kalij, 32 % pripada uranu in 40 % toriju. Prispevek kalija je nižji, kot je svetovno povprečje za zemeljsko skorjo, kar je verjetno posledica litološke sestave kamnin, saj več kot polovico Slovenije prekrivajo karbonatne kamnine, za katere je značilna nižja vsebnost kalija. Vsebnosti urana in torija pa so tudi zaradi sestave kamnin višje.

Ne glede na relativno velike razdalje med lokacijami meritev, karte dobro nakazujejo glavne geološke enote in glavne smeri razporeditve radioaktivnih elementov kalija, urana in torija v geoloških strukturah. Uporabljena metodologija je dokazala, da bi bila lahko uspešno uporabljena pri monitoringu okolja, geološkem kartiranju in raziskavah mineralnih surovin.

Zahvala

Delo je rezultat naloge Karta naravne radioaktivnosti Slovenije, ki jo je financiralo Ministrstvo za znanost in tehnologijo republike Slovenije z vsestransko podporo Inštituta za geologijo, geotehniko in geofiziko. Pomoč v opremi in štipendijah je prispevala Atomska agencija z Dunaja, predvsem po zaslugi M. Tauchida in M. Pečnika. Nalogo je začel J. Tomšič. Meritve in vzorčevanje na terenu je izvajal Z. Klaić ob pomoči sodelavcev z oddelka za ekonomsko geologijo. Spektrometrične določitve vsebnosti radioaktivnih elementov v tleh opravlja D. Brajnik z Inštituta J. Stefan. Pri transformaciji radiometričnih terenskih meritev, kalibraciji inštrumenta in radiometrični kartografiji so sodelovali raziskovalci Kanadskega geološkega zavoda, predvsem R. L. Grasty. Za prikaz regionalne porazdelitve radionuklidov na naravne enote sem uporabil razdelitev naravnih enot po Poljaku. Recenzijo dela je opravil S. Pirc. Vsem se za sodelovanje in pomoč iskreno zahvaljujem.

Results of radiometric and geochemical measurement for the natural radioactivity map of Slovenia

In 1969, a fifth of Slovenia's territory was covered by airborne gamma-ray spectrometry. However, only contour maps for these airborne data are available. Attempts to convert the contour data to a digital data base were only partially successful because of level problems between flight lines and the limited number of contour intervals on the maps. Parts of Slovenia have also been covered by gamma-ray spectrometry on particular rock units favourable for uranium exploration.

In 1990, a program was initiated to cover Slovenia with portable gamma-ray spectrometer measurements on a 5 × 5 km grid. The measurements were performed

with a four channel Scintrex GAD-6 spectrometer. Five gamma-ray measurements were taken at each of 816 locations. Samples of the upper 10 cm of soil profile were collected for laboratory analysis. Uranium in samples was determined by delayed neutron activation method (DNC). Other 35 elements: Ag, Al, As, Au, Ba, Be, Bi, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Sb, Sc, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, W, Y, Zn and Zr were analyzed by plasma emission spectrometry (ICP). For production of representative maps of radio-elements the spectrometer was calibrated on concrete pads in Vienna, Austria. The field gamma-ray measurements were converted to ground concentrations of potassium, uranium and thorium.

Concentrations of potassium in Slovenia vary between 0.05 and 4.63 %, with a mean of 1.23 %, and the ratio of this average to the Clarke value is 0.9 (Table 1). The highest potassium contents were measured in the Idrija-Škofja Loka territory in which predominantly clastics are exposed, and in the eastern part of the Sava Hills, consisting of similar rock, as well as in the Pohorje Mountain built mostly of igneous and metamorphic rocks. Higher potassium abundances occur further in the Pannonian basin where tops of elevations consist mainly of clastic rocks, and in lowlands the broad river valleys are filled with alluvial deposits. All these areas are covered with rich soils on which a dense vegetation grows. The potassium abundances are much lower in the territory of the Dinarides and the Julian Alps which consist mainly of carbonate rocks (Figures 1 and 2).

Uranium in Slovenian soils varies from 0.11 to 16.79 μg/g with an average of 3.23 μg/g, and the ratio of this value to the uranium Clarke is 3.3 (Table 1). Higher values of uranium in soil occur in the Idrija–Škofja Loka area where occurrences of uranium ore are frequent, and in the Dinaric region on carbonate rocks for which the karstic relief is typical. Higher uranium abundances were measured also on Pohorje. The lowest values were measured in the Julian Alps region where the carbonate rocks are also karstified, but due to high mountain erosion most of the territory has a very thin soil cover (Figures 3 and 4).

Occurrence of thorium in Slovenia is found to be in the range between 0.31 and 21.86 μg/g, on the average 8.47 μg/g, and with the ratio to the thorium Clarke 1.4 (Table 1). Thorium is the most abundant in soil in the northwestern part of the Outer Dinarides, in the Idrija–Škofja Loka region and on Pohorje. The lowest values were measured in the flysch basins of the Outer Dinarides, and in the Julian Alps where the weathering crust is very thin (Figures 5 and 6).

Comparison of results of this study with absorbed dose rates elsewhere in Europe and in the world indicates the gamma radiation in Slovenia being close to the world average 45 nGy/h (Grasty, 1984). In calculation of the absorbed dose rate also climatic factors need to be taken into consideration, especially the seasonal variation of moisture in the soil. In the samples collected for comparison the average humidity in soil was estimated at 22 %.

Results of 819 chemical analyses of soil samples at a 5 × 5 km grid in Slovenia enable the estimation of averages for 28 chemical elements listed in Table 1. About equal to Clarke (± 25 %) are means for 8 elements, Al, Fe, Na, K, K*, Ti, P, Mn and V. Higher (up to 100 %) are means for 6 elements: Ca, As, Cu, Ni, Sr, Th and Th*, and much higher (above 100 %) means of 6 elements Mg, Cd, Co, Pb, U, U* and Zn. Lower are means of 3 elements Ba, Cr and Zr. We do not have data for Clarke values of Be, La, Nb, Sc and Y in soil. Elements important for the environment are presented in figures 10–16.

Generally it appears that the elemental averages in soils in Slovenia exceed the

world averages. These first data on distribution of chemical elements represent a challenge for further geochemical investigations of the Slovenian territory.

Comparison of field gamma measurements converted to potassium, uranium and thorium concentrations in soil with laboratory determinations of soil samples shows a good correlation.

The result of the project is the first map of natural radioactivity for entire Slovenia (Figure 17). The map is a good basis for the study of possible radiation hazards as a consequence of radioactive pollution, and beside that, a contribution of Slovenia to the construction of the Geochemical map of the world which is in elaboration under a common project of UNESCO and IAEA.

The average total exposure rate for potassium, uranium and thorium in Slovenia is $6.54 \pm 2.32\,\mu R/h$. This result is not corrected for soil humidity which is on the average 22%, and which either increases or reduces the calculated exposure rate in the areas. Of the total mean exposure rate $6.54\,\mu R/h$ 28% is related to potassium, 32% to uranium and 40% to thorium. The contributoin of potassium is lower than the world average for the Earth's crust. The reason is probably the lithology, since more than half of the Slovenian territory consists of carbonate rocks for which lower potassium abundances are typical, and higher (in insoluble residue) abundances of uranium and thorium.

Regardless of the relatively large spacing between measurement localities, the principal geological units and trends of the distribution of radioactive elements potassium, uranium and thorium in geological structures are well indicated by the map. The applied methodology has proved useful for environment monitoring, geological mapping and mineral exploration.

Literatura

Andjelov, M., Tomšič, J. & Brajnik, D. 1992: Osnove za pripravo radiometrične karte Slovenije. – Onesnaževanje in varstvo okolja. Geologija in tehnika za okolje. Zbornik, Zavod za tehnično izobraževanje, 222–225, Ljubljana.

Andjelov, M. 1993: Use of ground gamma ray spectrometric survey for elaboration of radioelement geochemical maps. Manuscript. – Final report for 1993, Research Contract No. 6793/R1/RB, IAEA, Vienna.

Grasty, R. L., Carson, J. M., Charbonneau, B. W. & Holman P. B. 1984: Natural background radiation in Canada. – Bulletin 360, Geological Survey of Canada, Ottawa.

IAEA, 1990: International Atomic Energy Agency: The use of gamma ray data to define the natural radiation environment. – Technical report 566, IAEA, Vienna.

Judovič, Ja. E., Ketris, M. P. & Merc, A. B. 1985: Elementi-primesi v iskopajemih ugljah. – Nauka, Leningradskoje otdelenije, 239 pp., Leningrad.

Pirc, S. & Zupančič N. 1989: Geokemična karta Istre in Slovenskega primorja. Rokopis – Geokemija kamnin Slovenije. FNT Montanistika, Ljubljana.

Poljak, M. 1987: Homogene naravne enote, bazirane na geografsko-geoloških značilnostih SR Slovenije. – Uporaba satelitskih metod teledetekcije za ocenjevanje izrabe tal in za potrebe kmetijstva in gozdarstva, Projekt: FAO:TCP/YUG/4502(T), 7 pp., Ljubljana.

Rösler, H. J. & Lange, H. 1972: Geochemical tables. Elsevier Publishing Company, Amsterdam.

UNSCER, 1982: Sources and biological effects of ionizing radiation. – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1982, United Nations, New York.