



Осиромашени уранијум: оно што јавност ретко чује

Доц. др Предраг Кузмановић, виши научни сарадник

Шта представља уранијум?

- **Уранијум** представља 92. елемент Менделјејевог периодног система
- Основни елемент који је састав **атомске бомбе** као и **нуклеарног горива** и **наоружања**
- **Природна супстанца** **више заступљенија од калаја и злата**
- Елемент за који се претпоставља да га у **Земљиној кори** има у количини отприлике колико има и **молибдена** и **арсена**



Breaking Atom

U

Uranium

92 238.029

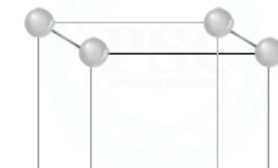
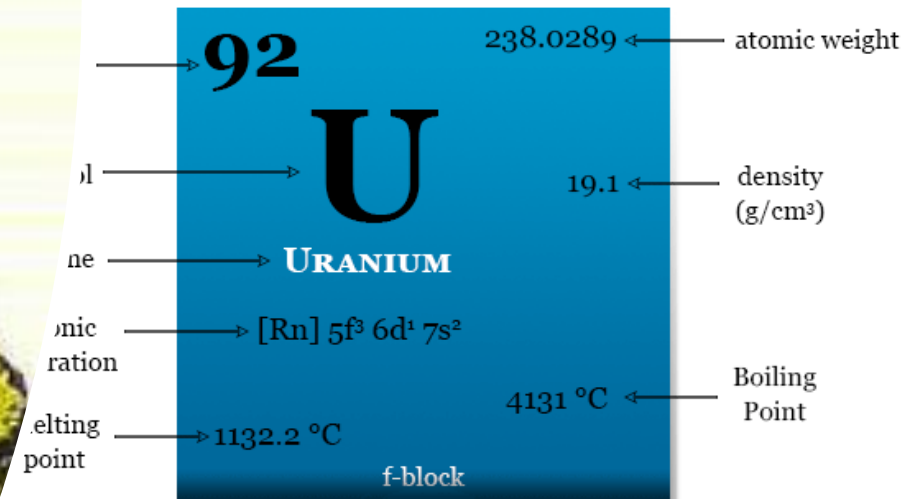
2

- **Физичке особине уранијума**
- Пирофорни метал, сребрно беле боје при чистом облику
- Природно радиоактиван елемент без стабилних изотопа
- Температура топљења износи 1132°C , тачка кључања износи 3818°C
- Густина уранијума – $19,05 \text{ g/cm}^3$ - због тога се убраја у тешке метале
- Мекши од челика, дуктилан и благо парамагнетичан
- Распадом емитује алфа, бета и гама зрачење



Uranium

.029



Crystal structure
(orthorhombic)

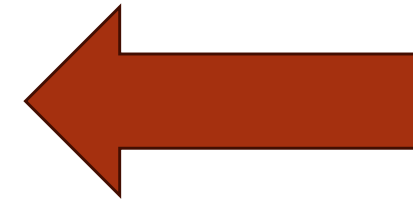
Појава уранијума у природи:

- Уранијум је широко распрострањен у Земљиној кори.
- Присутан је у више од 200 минералних врста.
- **Јавља се у:**
 - редукованом облику U^{4+}
 - оксидованом облику U^{6+}
- Присутан је у стенама, земљишту и води.
- Просечна концентрација активности ^{238}U у земљишту износи **33 Bq/kg** (UNSCEAR, 2000).

Природни и осиромашени уранијум

- Природни уранијум представља смешу три изотопа:

- ^{238}U – заступљен је са приближно 99,2745%,
- ^{235}U – заступљен је са приближно 0,7200%,
- ^{234}U – заступљен је са приближно 0,0055%



- Екстракција уранијума-235 врши се све док његов садржај у руди не буде испод 0,2-0,3%. Оно што преостане назива се **осиромашени уранијум (ОУ)**.
- ОУ настаје као **нужнопроизвод у процесу обогаћивања природног уранијума** или као **истрошено нуклеарно гориво** из реактора широм света.
- Има пирофорна (запаљива), корозивна, радиоактивна и токсична дејства.

ГЛОБАЛНА ПРОИЗВОДЊА УРАНИЈУМА

- Уранијум-235 је једини природни фисиони изотоп (копа се у рудницима уранијума широм света).
- **Аустралија**, **Казахстан** и **Канада** имају највеће резерве уранијума на својим територијама. Од ове три, Аустралија се доста истиче, са више од 1,7 милиона тона откривеног уранијума (28 одсто светских резерви) у овом тренутку.

Највећи произвођачи уранијума 2024. године:

Казахстан – 39% светске производње

Канада – 24%

Намибија – 12%

Ове државе представљају главне центре светске експлоатације уранијума.

- Процес сепарације је технолошки поступак којим се повећава количина уранијума-235 на вредност која премашује ону у природном уранијуму (3-5%), док је у природном око 0,72%.

Цивилна и војна примена ОУ

- Осиромашени уранијум (ОУ) користи се деценијама у цивилне и војне сврхе.

- Цивилна примена:**

- заштита од зрачења у медицини,
- баласт у авионима,
- катализатор у хемијским реакцијама.

- Војна примена:**

- оклопи тенкова и борбених возила,
- противоклопна (панцирна) муниција.

Примена ОУ у војне сврхе

- Почетком 1970-их, америчка војска је започела истраживања примене осиромашеног уранијума (ОУ) у противоклопним гранатама (кинетичким пенетраторима) и оклопима тенкова.

Зашто је ОУ изабран за војну примену?

- Густина ОУ: **19,0 g/cm³**
- Густина волфрама: **19,3 g/cm³**
- Тачка топљења уранијума: **1132 °C**
- Тачка топљења **волфрама**: **3410 °C**
- Предности ОУ:
 - нижа цена,
 - већа доступност,
 - пиррофорност (самозапаљивост при удару).

Конструкција DU пенетратора

- Легирање са:
 - **0,75% титанијума (масени удео).**
- При удару:
 - долази до самозапаљења,
 - пројектил се топи и самооштри,
 - повећава се пробојна моћ.

Тенкови користе муницију већег калибра (100 и 120 mm), док авиони испաљују муницију мањег калибра (25 и 30 mm).

Употреба осиромашеног уранијума у наоружању

Артиљеријски пројектили



30mm DU munition: jacket and penetrator

Муниција за ваздухоплове



A-10 Thunderbolt 2

Оклопна муниција



M1A1 Abrams САД, 120 mm

T62 Руске производње
125 mm



**Пројектил од осиромашеног
уранијума**

Употреба осиромашеног уранијума у наоружању

- Авион A-10 Thunderbolt II („Warthog“)
- Најпознатија платформа за употребу ОУ муниције.
- Користи топ:
 - GAU-8/A Avenger
 - калибар 30 mm

Карактеристике PGU-14/B пројектила

- Продор у челични оклоп:
 - до 9 cm
- Дужина пенетратора:
 - 95 mm
- Пречник основе:
 - 16 mm
- Маса пенетратора:
 - око 300 g

Борбене карактеристике А-10

- Брзина гађања:
 - до **3900 метака у минути**
- Типичан рафал:
 - **2–3 секунде**
- Број испалених метака:
 - **120–195**

Расипање пројектила

- Размак погодака:
 - **1–3 m**
- Покривена површина:
 - око **500 m²**
- Обично мање од:
 - **10% пенетратора погађа циљ.**

Формирање аеросола ОУ

При удару или сагоревању:

- у аеросол прелази:
 - **10–35% масе пројектила**
- у екстремним случајевима:
 - до **70% масе**

Карактеристике настале прашине

- Већина честица:
 - мања од **5 μm**
- Растворљиво у води:
 - **17–48% честица**
- Прашина је:
 - црне боје,
 - састоји се претежно од оксида уранијума и уранил јона.

Хемијске трансформације у земљишту

- Хемијске трансформације
- Примарно настаје:
- $\text{UO}_2 + x$
- где је:
 - $0 < x < 0,4$
- Даљом оксидацијом настаје мешавина:
- U(IV) оксида
- U(VI) оксида

Фактори који утичу на контаминацију

- тип земљишта,
- минерални састав,
- количина падавина,
- хидрологија терена,
- правац ветра,
- површински водотокови.

Бомбардовање Србије 1999. године муницијом са осиромашеним уранијумом из авиона А-10 САД-а



30mm DU munition: jacket and penetrator



A full DU round found on a surface (penetrator already corroded)



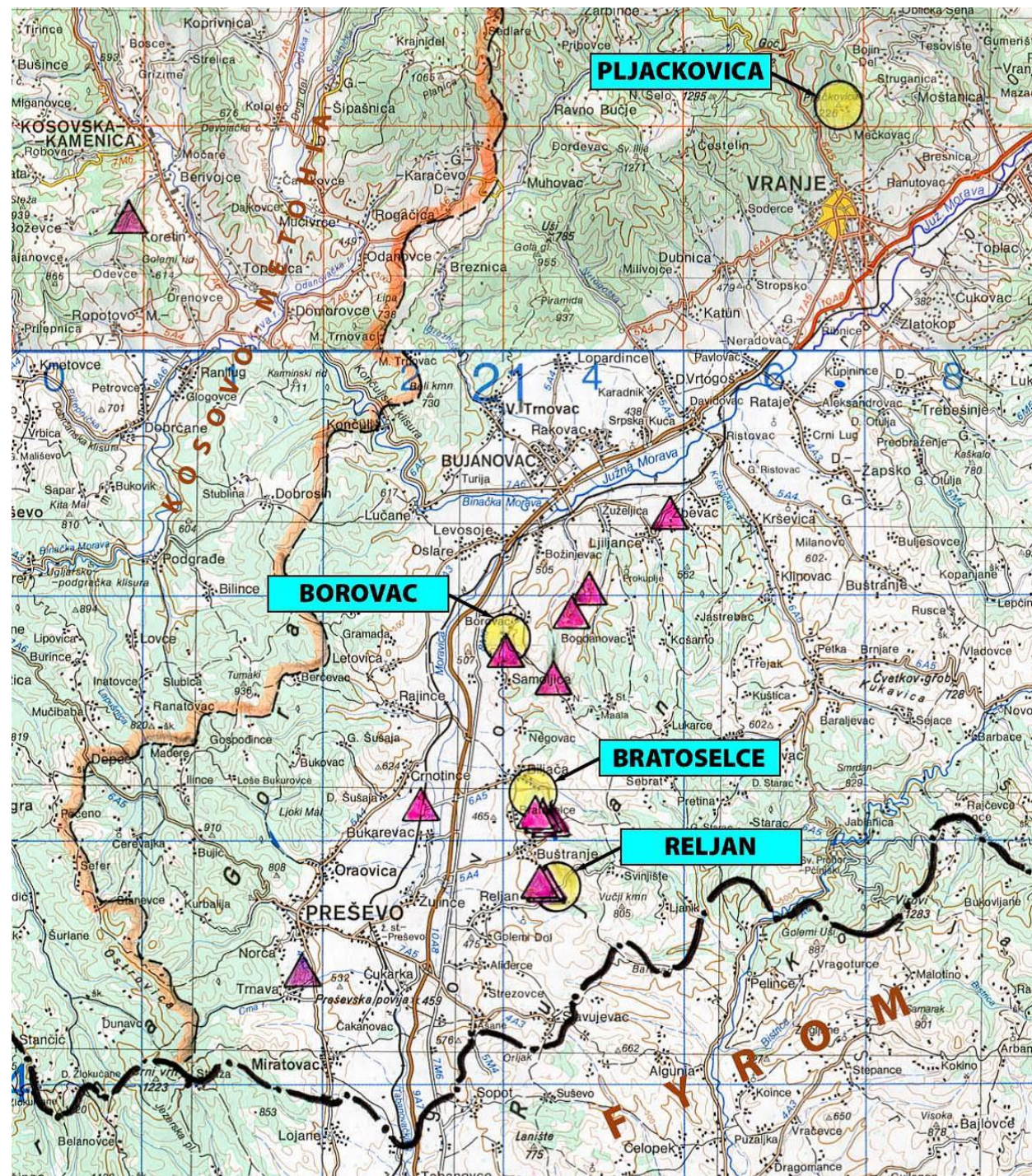
Пронађени пенетратори
од осиромашеног
уранијума након
завршетка рата 1999.
године



Локације погођене
муницијом од ОУ у
СРБИЈИ 1999.
године



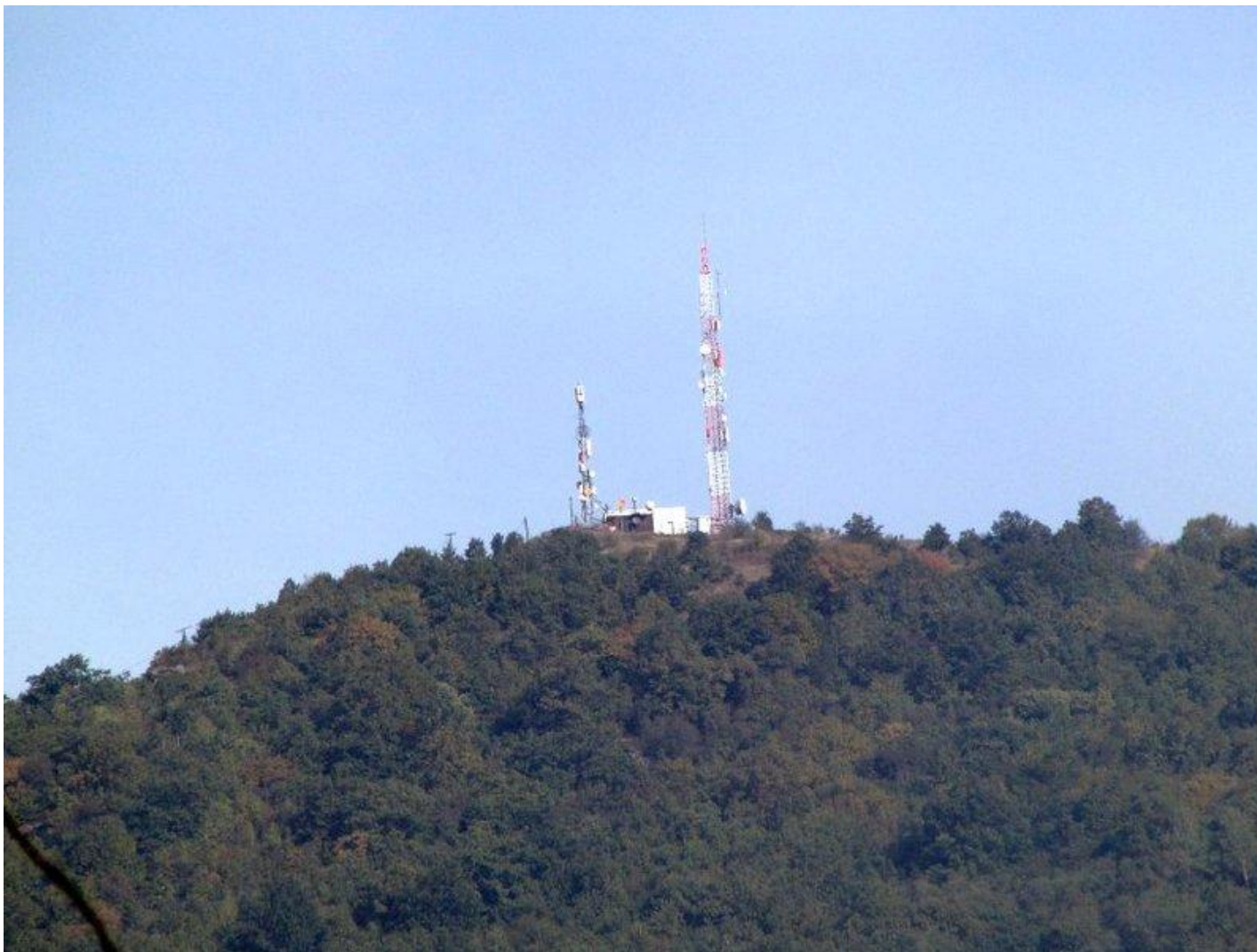
Локације погођене
муницијом од ОУ у
јужној СРБИЈИ
1999. године



Након завршетка рата-обележене локације у јужној Србији



Локације погођене у јужној Србији (ван Косова и Метохије) 1999. године



Брдо
Пљачковица
код Врања

Погођен
ПРЕДАЈНИК
РТС-а

Pljačkovica



Borovac



Bratoselce



Reljan



Decontamination of depleted uranium sites



Lokacije pogođene municijom
od OU u južnoj Srbiji, van
Kosova i Metohije

Lokacije sa slika su
dekontaminirane u periodu od
2002-2007. godine od strane
Instituta za nuklearne nauke
Vinča.

Процењује се да је укупно бачено
око 31000 пројектила од ОУ на
112 локација, што је укупно око
10 тона ОУ.

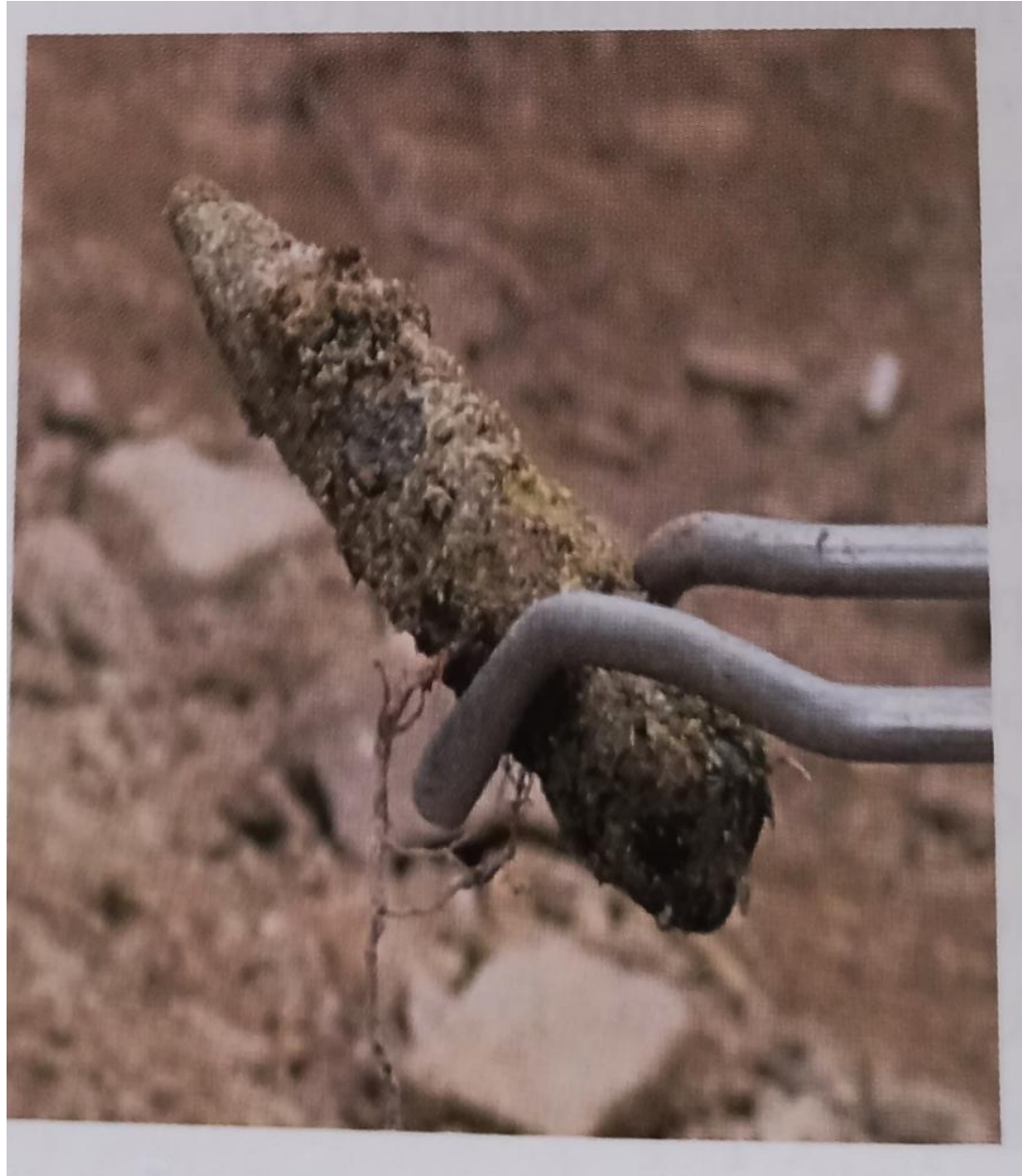
Ван Косова и Метохије доказано
просуство ОУ на 4 локације са
слике, док су све преостале на
КиМ.

Највише локација је погођено у
ширем рејону **Баковице** и
Драгаша, југ КиМ-а.

Постоји неслагање у локацијама
између података НАТО-а у
Војске Србије.







Тенкови на Косову и Метохији погођени пројектилима од осиромашеног уранијума 1999. године.



Деконтаминација терена 2002-2007. године. Спровео Институт „Винча“-државни пројекат за јужну Србију



На Косову и Метохији до
данас нису спроведене
мере деконтаминације
земљишта..



Чишћење локације **Боровац** 2005. године

Локалитет „Боровац“ налази се око 10 km од Бујановца.

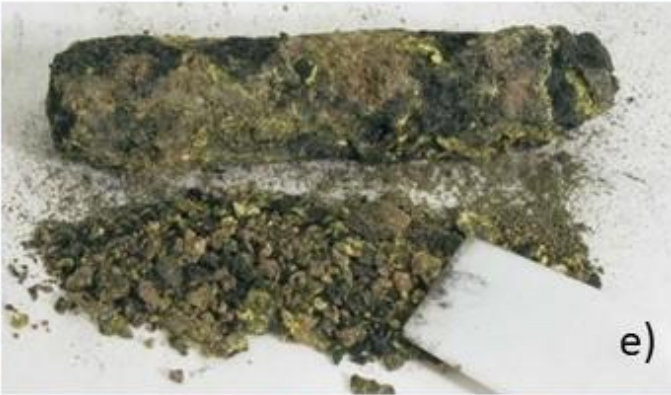
- Чишћење контаминираног земљишта спровели су Институт „Винча“ и АБХО служба Војске СЦГ.
- Прегледано и очишћено је 4.860 m² земљишта.
- Прекопано је 4.380 m³ земље.
- Пронађено је 59 пројектила и 58 чаура са осиромашеним уранијумом.
- Прикупљено је око 400 kg контаминиране земље.
- Радови су започети 8. августа и финансирани су из републичког буџета.
- Вредност пројекта деконтаминације износила је око 34 милиона динара.
- Због растреситог земљишта терен је прекопаван до дубине од 1,2 m.
- Очекиван је проналазак целих пенетратора од осиромашеног уранијума масе око 300 g.

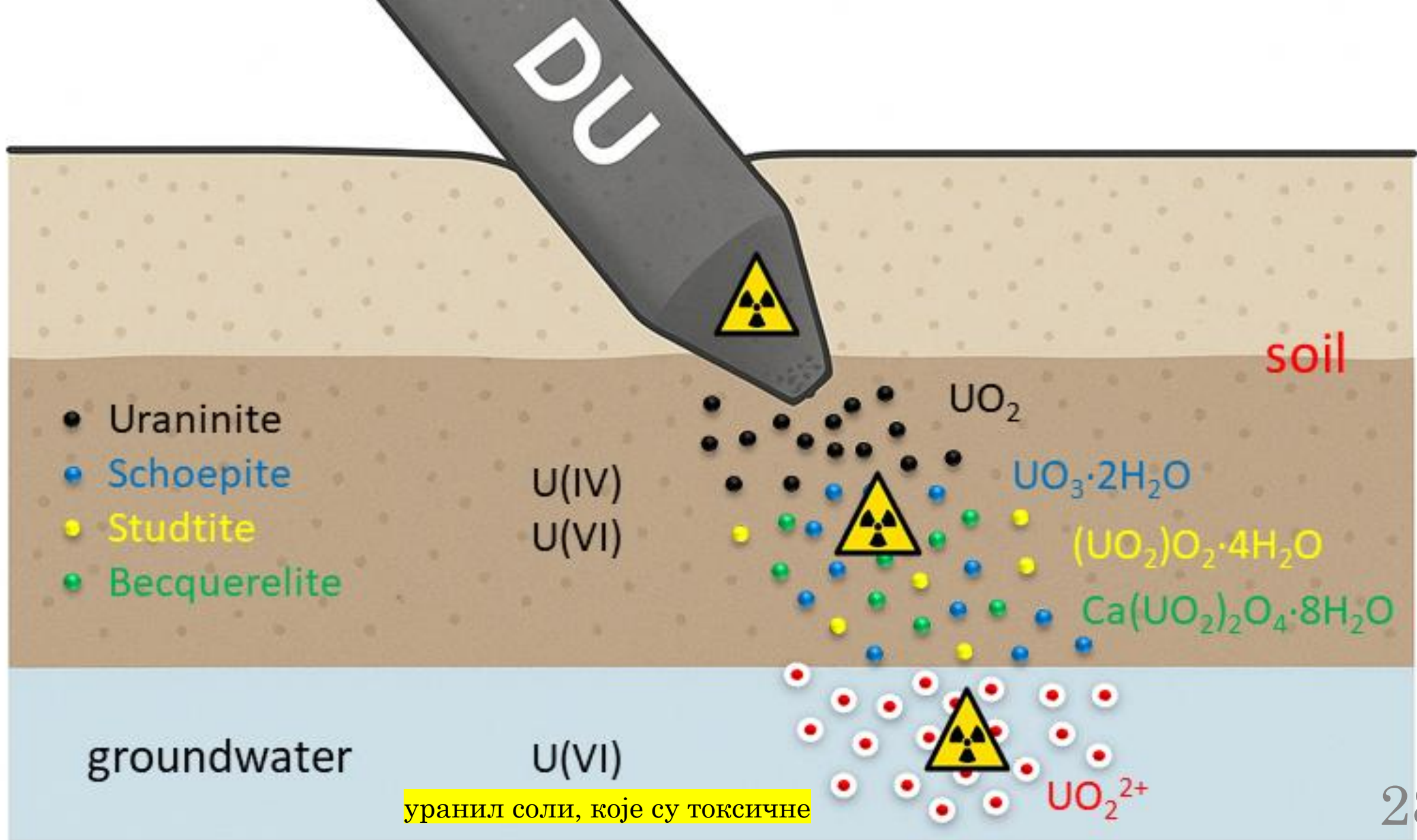
Дугорочни еколошко-здравствени ризици

- Пенетратори кородирају у земљишту деценијама.
- **Постоји ризик:**
 - контаминације подземних вода,
 - контаминације хране,
 - поновног подизања прашине ветром,
 - случајног контакта људи са фрагментима ОУ.



Кородирани пенетратори, извори секундарних продуката U у животној средини





Шта је до сада измерено???

Детекција могуће контаминације осиромашеним уранијумом гамаспектрометријом углавном се заснива на одређивању односа активности $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$.

Природни однос активности $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ износи 0,046.

Атомски однос $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.0072$

Само ако је тај однос мањи од наведених вредности може се рећи да постоји присуство осиромашеног уранијума.



Review

The impact of depleted uranium on the environment in Serbia

Predrag Kuzmanović^{a,b,*}, Sofija Forkapić^a, Dušan Mrđa^a, Jan Hansman^a,
Jovana Knežević Radić^a

^a University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Physics, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 4, 21000 Novi Sad, Serbia

^b Academy of Applied Studies Sabac, Department of Medical and Business-Technological Studies, Hajduk Veljkova 10, 15000 Sabac, Serbia

HIGHLIGHTS

- During the NATO action in Serbia in 1999, approximately 10 tons of depleted uranium ammunition were used.
- The presence of depleted uranium was observed near penetrator impact sites.
- After decontamination efforts, no significant presence of depleted uranium was recorded.
- Following the end of the war and after decontamination, there was no contamination of drinking water.
- Radioactivity monitoring from 2013 to 2023 does not indicate the presence of depleted uranium in soil and water.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Editor: Xinbin Feng

Keywords:

Depleted uranium
Environment
Soil
Water
Contamination
Radioactivity monitoring

ABSTRACT

During the 1999 war, NATO forces used >30,000 rounds of depleted uranium (DU) ammunition, with a total mass of around 10 tons, on the then Federal Republic of Yugoslavia (now the Republic of Serbia). After the war, between 2002 and 2007, land decontamination was carried out. This paper presents a comprehensive study of the impact of depleted uranium on soil and water in Serbia, with a special focus on contaminated locations in southern Serbia. The study includes key results from analyses of uranium isotopes ^{238}U and ^{235}U in soil and water, and their ratio ($^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$) before and after land decontamination. Data from the UNEP international mission, as well as other studies from the end of the war to the present, were analyzed. Reported values of ^{238}U and ^{235}U in the remaining penetrators were $12.7 \cdot 10^6 \text{ Bq/kg}$ and $1.9 \cdot 10^5 \text{ Bq/kg}$, respectively. The maximum measured values of ^{238}U in contaminated soil were up to $307,000 \text{ Bq/kg}$, and ^{235}U values were up to 3920 Bq/kg . The established $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ ratios indicate that the contamination of soil with DU was near the impact sites of the penetrators, while values in more distant samples were within natural levels. It was found that the water in southern Serbia was not contaminated with DU and that the concentrations were comparable to other studies. After the remediation measures were carried out on contaminated sites, no DU presence was detected in soil or water. This is confirmed by DU monitoring results in Serbia conducted from 2013 to 2023. Additional studies for other parts of Serbia show no evidence of environmental contamination with DU, as all results are comparable to

* Corresponding author at: University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Physics, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 4, 21000 Novi Sad, Serbia.

E-mail address: predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs (P. Kuzmanović).

Journal: The European Physical Journal Plus

Depleted Uranium as a Secondary Source of U(VI) in the Environment

Predrag Kuzmanović

Department of Forensic Engineering, Faculty of Forensic Sciences and Engineering, University
of Criminal Investigation and Police Studies, Cara Dušana 196, 11080 Belgrade, Serbia

Corresponding author: Predrag Kuzmanović, e-mail: predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs
<https://orcid.org/0000-0002-1661-5427>

Abstract:

Large amounts of depleted uranium (DU) munitions were used during the conflicts in the Balkans (1995, 1999) and the Gulf Wars (1991, 2003). This raised concerns about long-term environmental impacts, potential contamination of groundwater, and associated health effects. This paper provides an overview of previous research on the corrosion, transformation, mobility, and environmental behavior of DU, with emphasis on studies from war-affected areas. Findings show that metallic DU oxidizes and corrodes under the influence of oxygen, moisture, and microorganisms, forming soluble and toxic uranyl complexes (UO_2^{2+} , U(VI)). This oxidation enables uranium migration through soil, sediments, and water, making DU a secondary source of mobile U(VI) in the environment. Existing results indicate strong local contamination near penetrator impact sites, typically within 200 m. DU concentrations in the top 10 cm of soil beneath a penetrator decrease by two orders of magnitude, and by three orders in the next 30 cm. Seven years of penetrator corrosion showed a downward migration front reaching about 42 cm, depending on local geochemical conditions. Metaschoepite was identified as the dominant corrosion phase, containing hexavalent uranium with high solubility. Studtite and becquerelite were also observed, formed by metaschoepite transformation under specific geochemical conditions, with lower solubility and mobility. Overall, DU contamination in conflict zones represents a persistent environmental issue requiring continuous monitoring and effective decontamination strategies, especially given the large number of remaining penetrators that generate mobile U(VI). Significant health risks from DU exposure have been identified, although comprehensive epidemiological data for affected regions are still lacking.

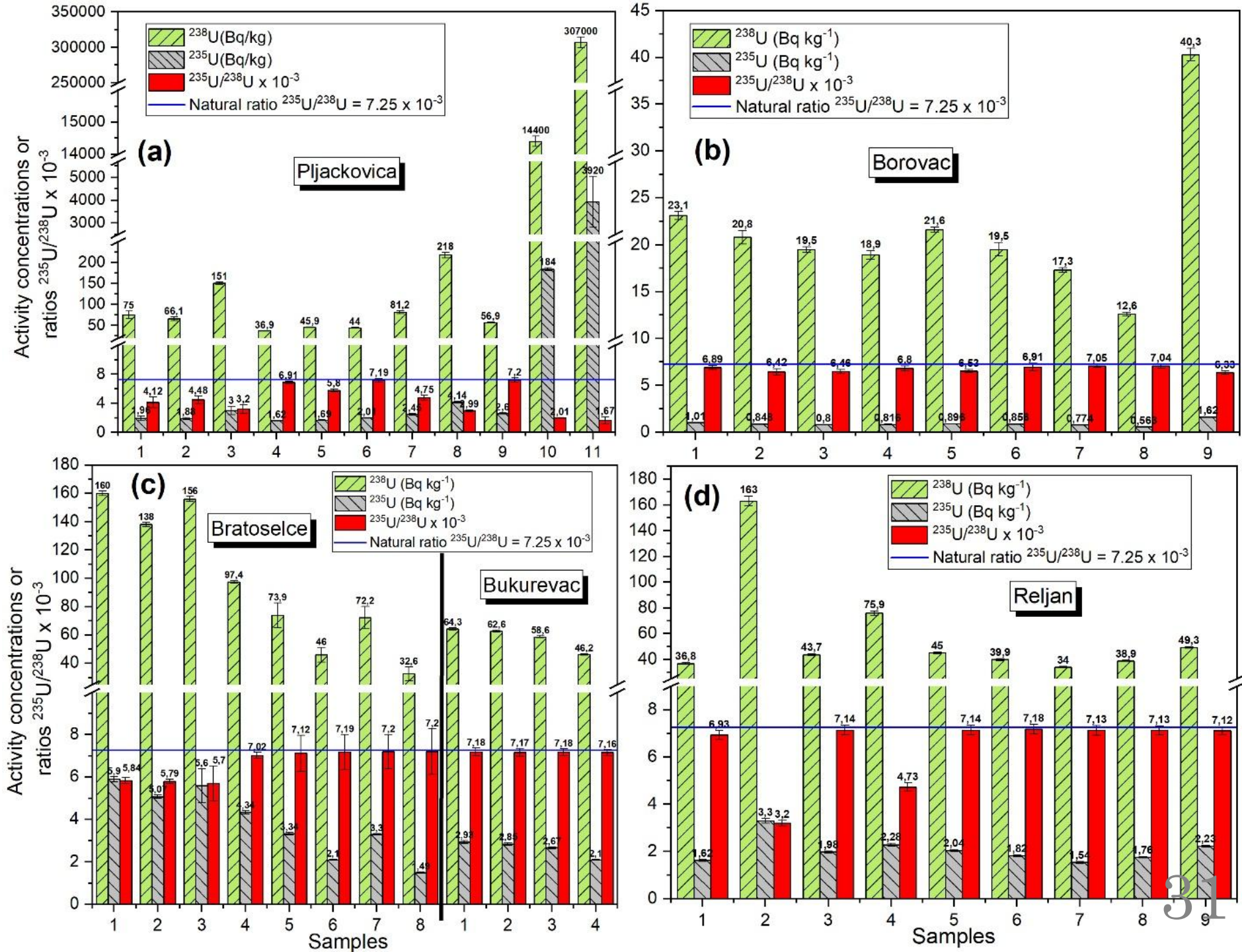
Key words: Radioactivity, Uranium (VI), Depleted Uranium, Environmental Contamination, Corrosion, Groundwater, Soil.

DOI : 10.1140/epjp/s13360-026-07881-5

UNEP, 2002

Земљиште

- Детектовано присуство плутонијума Pu-239 і Pu-240 и титанијума



ВОДА

Локација	Број узорака	Концентрација активности (mBq/l)		$^{235}\text{U}/^{238}\text{U} \times 10^{-3}$
		^{238}U	^{235}U	
Врање*	1	16.5±0.76	0.83±0.17	8.09±1.70
	2	1.17±0.23	0.09±0.06	12.12±8.42
	3	4.54±0.36	0.34±0.10	11.80±3.59
Боровац	1	5.2±0.36	0.28±0.09	8.48±2.79
	2	0.61±0.13	0.03±0.04	7.75±10.46
	3	0.18±0.09	0.05±0.03	43.75±34.17
	4	0.42±0.10	0.01±0.03	3.94±11.85
	5	0.52±0.11	0.02±0.03	6.06±9.18
Братоселце	1	21.85±1.46	0.98±0.35	7.06±2.57
Букуревац	1	0.56±0.12	0.02±0.02	5.63±5.75
Рељан	0	/	/	/

Остале студије — земљиште са контаминираних локација

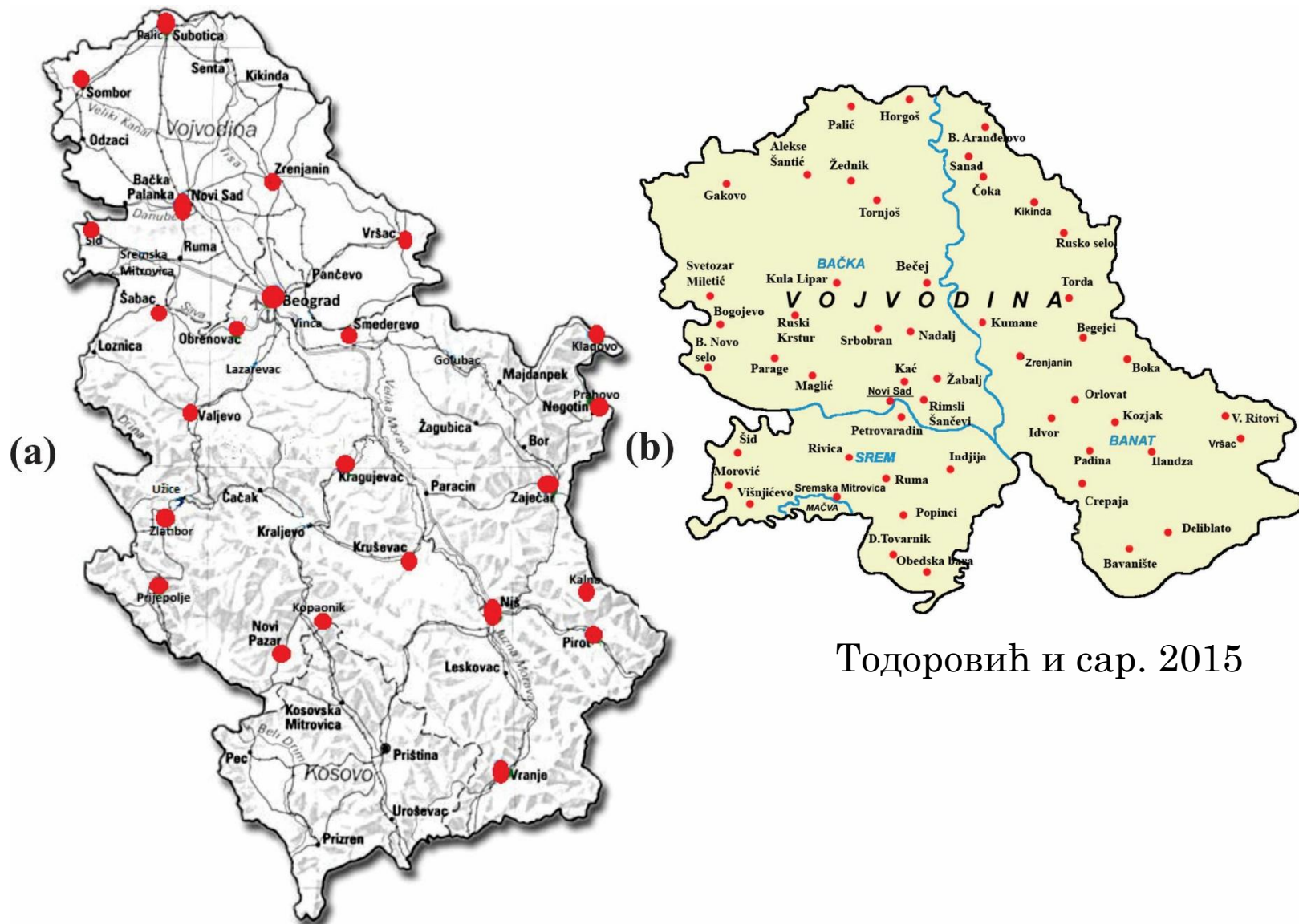
Lokacija	Broj uzoraka	Koncentracija aktivnosti (Bq/kg)		$^{235}\text{U}/^{238}\text{U} \times 10^{-3}$	Reference
		^{238}U	^{235}U		
Južna Serbia	3	33-5000	/	/	Bikit et al., 2001
Pljačkovica	1	59±16	/	/	Esposito et al., 2002
Pljačkovica	/	69-14958	2.3-119	/	Milačić et al., 2004
Pljačkovica	/	33±7	2.2±0.3	10.55	Sarap et al., 2014
Bratospelce	/	/	/	6.062-7.210	Sahoo et al., 2004
Bratospelce	1	14700±1500	/	/	Esposito et al., 2002
Southern Serbia – Bratospelce	24	100-3500	4.3-50	2.2-8.0	Karangelos et al., 2004
Southern Serbia, Bratospelce	/	95±18	7.4±0.8	9.29	Sarap et al., 2014
Reljan	/	/	/	7.112	Sahoo et al., 2004
Reljan	/	49±12	2.9±0.4	9.29	Sarap et al., 2014
Borovac	/	21±5	1.1±0.2	8.19	Sarap et al., 2014
Kosovo i Metohija	19	0.014-7.06*	2-4040*	1.70-7.27	Danesi et al., 2003
Kosovo i Metohija – Đakovica	16	0.69-31.47*	/	2.15-7.17	Di Lella et al., 2005
Kosovo i Metohija	13	9-38 (22±8)	0.5-1.9 (1.0±0.4)	4.88-10.08 (7.72±1.73)	Carvalho and Oliveira, 2010
Kosovo i Metohija	116	11.3-2.26·10 ⁵	0.60-3251	1.94-18.02	Jia et al., 2004

Земљиште широм Србије и у околини

Локација	Број узоракa	Концентрација активности (Bq/kg)		$^{235}\text{U}/^{238}\text{U} \times 10^{-3}$	Референце
		^{238}U	^{235}U		
Нови Сад	16	11-80	/	/	Bikit et al., 2001
Војводина	50	24-72 (51.4±9.2)	/	/	Bikit et al., 2001a
Војводина	50	5-80 (42±10)	/	/	Todorović et al., 2015
Нови Сад	21	18-85 (34.7±14.4)	0.4-4.1 (1.9±0.9)	7.09-11.66 (9.45±1.42)	Janković et al., 2023
Западна Србија	11	12-98 (60.4±26.2)	/	/	Dugalic et al., 2010
Широм Србије	16	49-90 (67.3±13.6)	2.7-4.6 (67.3±13.6)	6.30-11.66 (8.66±1.58)	Vukašinović et al., 2010
Београдски паркови	22	14-46	1.2–3.4	4.88-13.86 (8.66±2.36)	Vukašinović et al., 2017
Хрватска	/	23.6-92 (54±24)	1.6-6.1 (3±1)	/	Skoko et al., 2017
Хрватска	138	MDA-140 (45)	/	/	Šoštarić et al., 2021
Хрватска-Истра	48	14.5-407 (61±77)	0.7-19 (2.6±3.3)	7.40	Radolić et al., 2019
Северна Македонија	213	9-111 (41±17)	/	/	Stojanovska et al., 2019
Бугарска	20	27-57 (41.8±8.2)	MDA-3 (2±0.5)	(7.56)	Lazarova, 2021

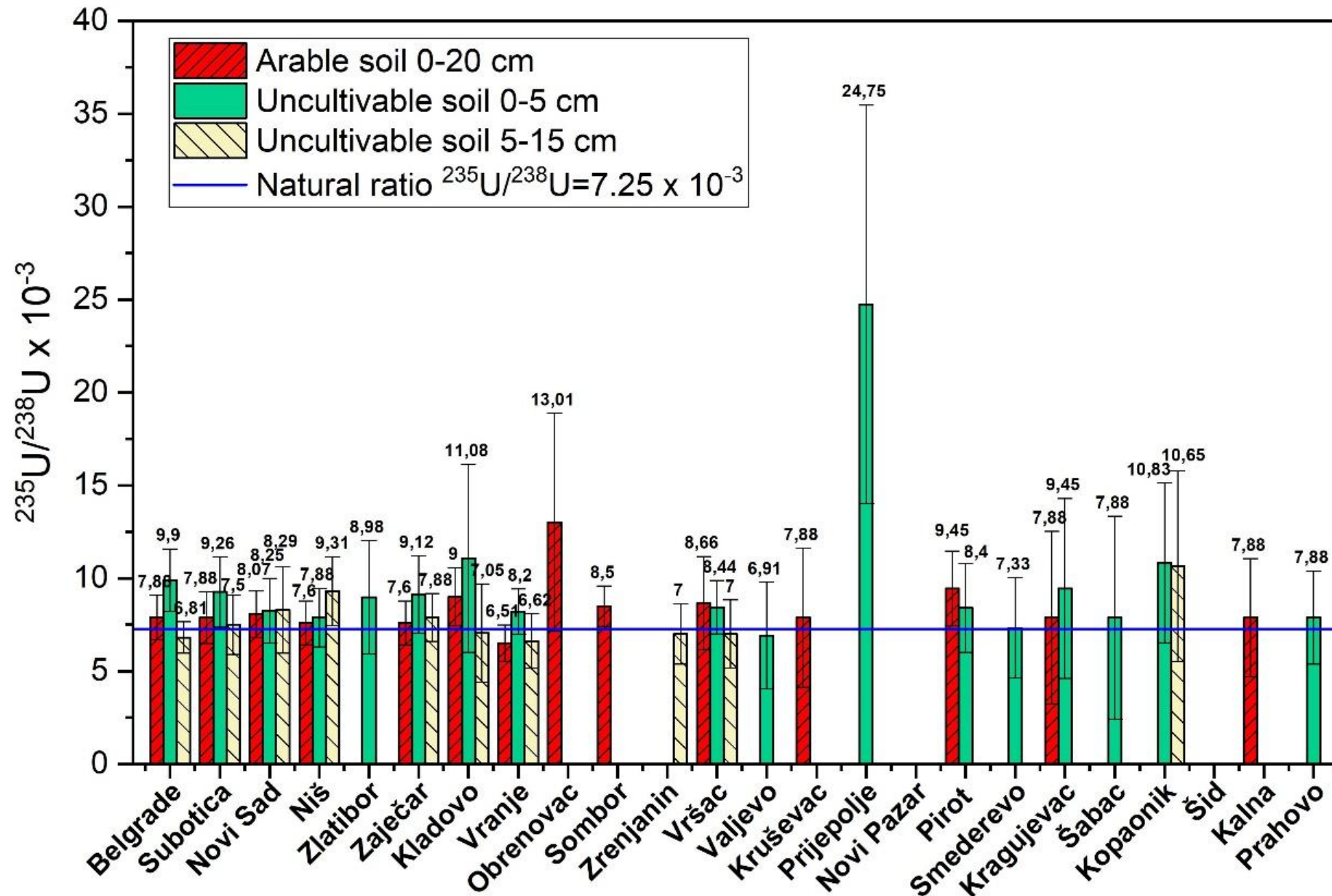
Истраживања ВОДЕ

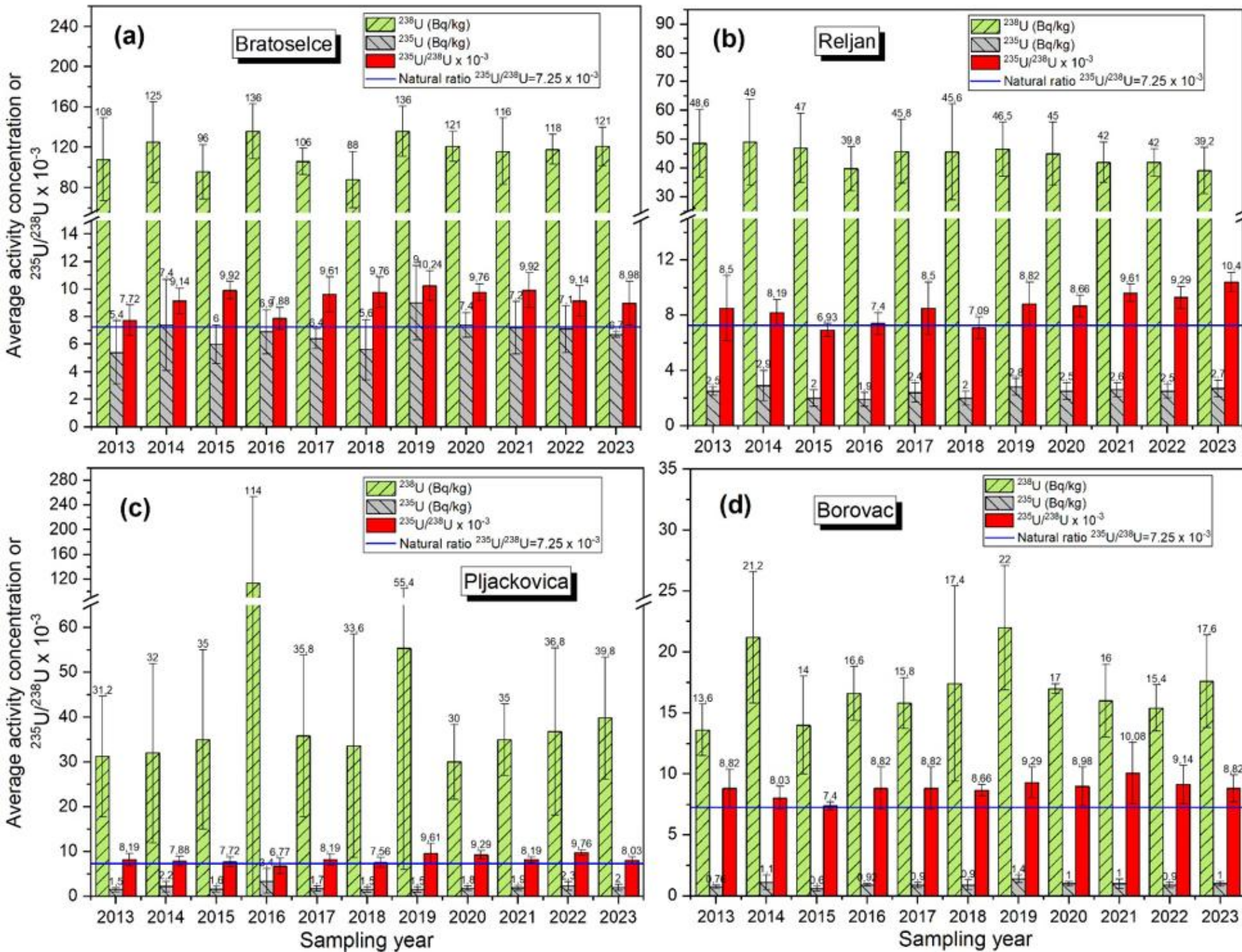
Локација	Број узорака	Концентрација активности (mBq/l)		$^{235}\text{U}/^{238}\text{U} \times 10^{-3}$	Референце
		^{238}U	^{235}U		
Србија	20	1.37-63.18	/	6.98-7.45	Sahoo et al., 2007
Врање	/	< 110	< 6	/	Milačić et al., 2004
Боровац	3	0.04-0.08*	/	7.05-7.25	Oeh et al., 2007
Братоселце	/	< 50	< 3	/	Milačić et al., 2004
Братоселце	5	0.03-17.7*	/	7.251	Oeh et al., 2007
Косово и Метохија	12	0.06-2.44*	/	6.23-7.35	Oeh et al., 2007
Србија	11	0.40-21.9	0.01-0.88	5.67-12.13	Jia et al., 2005
Косово и Метохија	940	0.012-166* (5.0)*	/	/	Berisha and Goessler, 2013
Косово и Метохија	9	2.4-9.4 (6.1±2.9)	0.1-0.4 (0.3±0.1)	6.30-10.24 (7.56±1.26)	Carvalho and Oliveira, 2010
Косово и Метохија	13	0.3-103	0.02-4.82	(7.88±1.42)	Jia et al., 2004
Босна и Херцеговина	8	0.79-14.8 (4.9±4.3)	0.05-0.8 (0.2±0.2)	4.57-10.24 (7.88±1.89)	Carvalho and Oliveira, 2010



Мониторинг радиоактивности 2013-2023. године

Мониторинг радиоактивности земљишта 2014. године широм Србије





Мониторинг
радиоактивности
земљишта од
2013-2023.
године —
после
деконтаминације

Извор:
(СРБАТОМ, 2014-2024).

Мониторинг радиоактивности воде од 2013-2023. године – после деконтаминације

Год.	Братоселце		Рељан		Пљачковица		Боровац	
	^{238}U	^{235}U	^{238}U	^{235}U	^{238}U	^{235}U	^{238}U	^{235}U
2013	< 0.06	< 0.005	< 0.06-0.14	< 0.005-0.0057	< 0.03	< 0.002	< 0.04	< 0.002
2014	< 0.4	< 0.02	< 0.3	< 0.02	< 0.3	< 0.02	< 0.3	< 0.02
2015	< 0.1	< 0.005	< 0.4	< 0.01	< 0.04	< 0.002	< 0.05	< 0.002
2016	< 0.08	< 0.004	< 0.08	< 0.004	< 0.08	< 0.005	< 0.2	< 0.01
2017	< 0.01	< 0.002	< 0.01-0.07	< 0.003	< 0.02	< 0.003	< 0.04	< 0.002
2018	< 0.07	< 0.004	< 0.06	< 0.003	< 0.07	< 0.004	< 0.08	< 0.005
2019	< 0.09	< 0.007	< 0.09	< 0.004	< 0.08	< 0.003	< 0.09	< 0.004
2020	0.07-0.12	< 0.008	< 0.07	< 0.003	< 0.07	< 0.004	< 0.08	< 0.004
2021	< 0.1	< 0.005	< 0.09	< 0.005	< 0.1	< 0.005	< 0.1	< 0.005
2022	< 0.1	< 0.005	< 0.1	< 0.009	< 0.09	< 0.005	< 0.1	< 0.006
2023	< 0.04	< 0.002	< 0.04	< 0.002	< 0.09	< 0.005	< 0.09	< 0.005

Извор: (СРБАТОМ, 2014-2024).

Локација	Концентрација активности (Bq/l)	
	Укупна алфа	Укупна бета
Пљачковица		
Вода са јавне чесме	< 0,02	0,09 ± 0,02
Вода са извора поред пута	< 0,02	0,12 ± 0,02
Боровац		
Вода из приватне куће	< 0,03	0,08 ± 0,02
Вода са јавне чесме	< 0,02	0,09 ± 0,02
Братоселце		
Бунар у центру села	< 0,05	0,25 ± 0,05
Вода из дворишта	< 0,06	0,34 ± 0,07
Рељан		
Вода са јавне чесме	< 0,06	0,17 ± 0,05
Вода са јавне чесме	< 0,05	0,18 ± 0,04

Референтне вредности

< 0,1

<1

Мониторинг
радиоактивности
воде 2016. године
— после
деконтаминације

Закључак

- **Не постоји бојазан од тренутног излагања осиромашеном уранијуму.**
- Особе удаљене од тачкастих извора ОУ нису могле бити изложене.
- Мерења показују да је контаминација углавном ограничена на 100–200 m од места удара.
- Није утврђено ширење контаминације на веће површине терена.
- Није утврђена контаминација подземних водотокова.
- **Војна лица на терену могла су бити изложена и имати повећан ризик од изложености ОУ (инхалација).**
- Успешно је спроведена деконтаминација терена у јужној Србији
- **На КОСОВУ И МЕТОХИЈИ нису спроведене мере деконтаминације терена**
- ВМА је до 2004. године пратила здравствено стање припадника војске и полиције који су боравили на контаминираним локацијама.
- **НЕ ПОСТОЈЕ ШИРЕ ЕПИДЕМИОЛОШКЕ СТУДИЈЕ!!**

Хвала на пажњи!

predrag.kuzmanovic@kpu.edu.rs
