

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Ústav pro životní prostředí

Studijní program: Ekologie a ochrana prostředí

Studijní obor: Ochrana životního prostředí



Kristina Malkova

Vlivy jaderné energetiky na životní prostředí

Bakalářská práce

Vedoucí bakalařske práce: Ing. Luboš Matějček, Dr.

Praha, 2013

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Jaderná energie a její vliv na životní prostředí“ vypracovala samostatně s použitím literatury, kterou uvádím v seznamu.

V Praze dne

.....

Malkova Kristina

Poděkování:

Panu Ing. Libošu Matějčikovi, vedoucímu mé bakalářské práce za přínosné připomínky k práci, za odborné vedení práce, za cenné informace, rady a připomínky, které jsem uplatnila při zpracování této bakalářské práce

Nazev práce: Vlivy jaderné energetiky na životní prostředí

Autor: Kristina Malkova

Vedoucí bakalařské práce: Ing. Luboš Matějčík, Dr., Ústav pro životní prostředí

Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze, Benátská 2, 128 01 Praha 2

e-mail vedoucího: lmatejic@natur.cuni.cz

Abstrakt: cílem je zaměření na studium vlivu jaderné energetiky na životní prostředí s ohledem na ostatní neobnovitelné a obnovitelné zdroje energie. Práce obsahuje zhodnocení celého palivového cyklu z hlediska použití různých technologií. Dále obsahuje vývojové trendy využití zdrojů jaderné energie s ohledem na havarijní události z celosvětového pohledu. Zvýšená pozornost je i věnována mediálním dopadům havárií jaderných elektráren s účinky na okolí.

Klíčová slova: jaderná energie, energetický mix, technologie, Černobyl, Fukušima, jaderný odpad

Title: Environmental impacts of nuclear energy

Author: Malkova Kristina

Supervisor: Ing. Luboš Matějčík, Dr., Ústav pro životní prostředí Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze, Benátská 2, 128 01 Praha 2

Supervisor's e-mail adress: lmatejic@natur.cuni.cz

Abstract: The thesis is focused on study the impact of nuclear energy on the environment regard to non – renewable and renewable energy sources. The work includes evaluation of the entire fuel cycle of the use of various technologies. It includes trends in resource using of nuclear energy with respect to emergency events from a global perspective. Increased attention is also paid to the media impacts nuclear power plant accidents with effects on the environment.

Keywords: nuclear energy, energy mix, technology, Chernobyl, Fukushima, nuclear waste

Obsah

Seznam zkratk.....	7
Úvod.....	8
1. Postavení jaderné energie ve světě.....	10
1.1. Zastoupení jaderné energie ve světovém energetickém mixu.....	12
1.2. Faktory ovlivňující uplatnění jaderné energie.....	13
1.3. Současný stav jaderné energie.....	15
2. Technologie získání jaderné energie.....	16
2.1 Nejpoužívanější typy reaktorů.....	17
2.1.2 Varný reaktor BWR.....	17
2.1.3 Těžkovodní reaktor CANDU.....	18
2.1.4 Pokročilý plynem chlazený reaktor AGR.....	18
2.1.5 Vysokoteplotní reaktor HTGR.....	18
2.1.6 Rychlý množivý reaktor FBR.....	18
3. Riziko havárií a přírodních katastrof.....	18
3.1 Přehled největších havárie na jaderných elektrárnách.....	19
3.1.1 Havárie v Černobylu.....	22
3.1.2 Fukišima.....	26
4. Vliv na životní prostředí.....	26
4.1 Potenciální role jaderné energie ve snižování emise CO ₂	27
4.2 Ukládání jaderného odpadu.....	29
Závěr.....	31

Seznam literatury.....34

Přílohy:

Příloha č. 1 – Graf vyskytu Cs¹³⁷ v půdě v okolí Běloruska a jeho vliv na rakovinu štítné žlázy

Příloha č. 2 – Vyskyt rakoviny štítné žlázy v oblasti Běloruska

Příloha č. 3 – Tabulka vyskytu rakoviny štítné žlázy a její odhad na 1000 obyvatelů v Bělorusku

Příloha č. 4 – Graf závislosti koncentrace ¹³⁷Cs na vyskytu rakoviny štítné žlázy

Příloha č. 5 – Obrázek kontaminace půdy ¹³⁷Cs a vyskyt rakoviny štítné žlázy v Bělorusku

Seznam zkratek

Bq – je jednotka intenzity záření zdroje radioaktivního záření v soustavě SI, $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ nebo $1 \text{ Bq} = 1 \text{ částice} / 1 \text{ s}$

Ci – měrná jednotka radioaktivity, $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$, 1 Ci je aktivita zářiče kdy dochází ke 37 miliardám rozpadů za sekundu. V soustavě SI je nahrazena jednotkou becquerel

GJ – je zkratka pro gigajoul. Joule (J) je jednotka práce a energie, $1 \text{ GJ} = 10^9 \text{ J}$

GWe – měrná jednotka elektrické energie, $1 \text{ GWe} = 1 \text{ mld. Wattů}$, jaderná elektrárna o výkonu 1 GWe vyprodukuje ročně 7 TWh elektrické energie

IAEA – International Atomic Energy Agency – Mezinárodní agentura pro atomovou energii –součást Organizace Spojených Národů, která dohlíží na mírové využití jaderné

IEA – International Energy Agency – Mezinárodní energetická agentura

NEA – Nuclear Energy Agency – Agentura pro jadernou energii – specializovaná mezivládní organizace v OECD, na území 30 jejích členů je umístěno cca 85 % nainstalované světové jaderné capacity

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development – Organizace pro ekonomickou spolupráci a rozvoj

TEPCO – Tokyo Electric Power Company – je největší japonská elektrárenská společnost

TNT – Trinitrotoluen, výbušnina s velmi vysokou brizancí a razancí výbuchu

WHO – World Health Organization – Světová zdravotnická organizace

WNA – World Nuclear Association – Světová jaderná asociace

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation – v vědecký výbor OSN pro dopady jaderného záření

Úvod

Vědecký a technický pokrok není možný bez rozvoje energetiky. Za účelem zvýšení produktivity jsou nejdůležitější mechanizace a automatizace výrobních procesů, nahrazení lidské práce (zejména těžké nebo monotónní) strojní. Ale drtivá většina prostředků mechanizace a automatizace (vybavení, zařízení, počítače) má elektrickou základnu. Rozšířené používání elektrická energie získala pro pohon elektromotorů. Výkon elektrických strojů (v závislosti na jejich účelu), je odlišný: od zlomku watt (mikromotory používající v řadě průmyslových strojů a výrobků pro domácnost) a obrovské množství přesahující miliony kilowattů (elektrocentrály). Lidstvo elektřinu potřebují, a to se každým rokem víc a víc. Na druhou stranu rezervy tradičních přírodních paliv (ropa, uhlí, plyn) jsou omezené. Omezené také i jaderné palivo - uran a thorium, ze kterého pomoci reaktorů můžeme získat plutonium.

Bakalařská práce je zaměřena na studium vlivu jaderné energetiky na životní prostředí s ohledem na ostatní neobnovitelné a obnovitelné zdroje energie. Jaderná energie je popsána jako systém, který je schopen dodávat energetické potřeby lidské civilizace na celé škále scénáře lidského energetického využití, jak velmi vysokou míru využívání energie a velký přírůstek k celkovému energetickému využití.

Použití jakéhokoli druhu energie a výroba elektrické energie doprovázeno vznikem mnoha znečišťujících látek ve vodě a ovzduší. Seznam znečišťujících látek je překvapivě dlouhý, ale i počet látek je docela velký. Je se zcela přirozené ptát, zda se má vždy používání a výroba elektrické energie být doprovázena ničením životního prostředí. A pokud je pravda, že nějaký druh lidské činnosti nevyhnutelně má negativní dopad na životní prostředí, stupeň poškození se liší. My nemůžeme ovlivnit prostředí, ve kterém žijeme, s cílem zachovat životní procesy jako takové, protože pro tuto rovnovahu potřebujeme absorbovat a využívat energii. Samozřejmě člověk má vliv na životní prostředí, ale v přírodě existují přirozené mechanismy, které působí jako rovnováhová podpora mezi životním prostředím a žijícími organismy v rovnovážném stavu, při jejich pomalých změnách. Nicméně, v mnoha případech lidská činnost narušuje rovnováhu generovaných těmito mechanismy, které vedou k rychlým změnám v podmínkách prostředí, s čeho ani člověk, ani příroda nemůže úspěšně zvládnout. Tradiční výroba

energie, která dává obrovské množství znečišťujících látek do vody a do vzduchu – typ těchto lidských činností.

Bakalařská práce se zabývá posouzením potenciálu jaderné energie zajistit vzrůstající spotřebu energie ve světě, a to ekonomicky i ekologicky udržitelným způsobem. Kromě toho, že jaderná energie je udržitelná z hlediska zdrojů, je také udržitelná s ohledem na životní prostředí a lidské zdraví, včetně těch, které vyplývají z vážných nehod. Zastánci jaderné energie kladou důraz, že jaderná energie nepřispívá na emisí skleníkových plynů a prokážou schopnost "pracovat" v plném rozsahu v dnešní době, zatímco kritici poukazují na otázky spojené s odpady z jaderného štěpení, rizika zneužití štěpných materiálů na vytváření jaderných zbraní, a možnost závažných havárií, které zahrnují rozsáhlé úniky radioaktivní materiálu do biosféry.

Nejvíce se jaderná energie přispívá k výrobě elektrické energie. Pak je využívána k medicínským účelům a případně k odsolování mořské vody. Využití jaderné energie pro medicínské účely je po celém světě rozšířené a liší se od využití pro výrobu elektrické energie. Jaderná energie v procesu odsolování mořské vody hraje roli jako zdroj potřebné energie, proto je možné tuto problematiku zahrnout do využití jaderné energie pro výrobu elektrické energie.

Práce je rozdělena do 4 kapitol. V první kapitole je probírána jaderná energetika jako taková, její zastoupení ve světě, faktory, které ovlivňují její uplatnění, a ostatní zdroje energie jako její alternativy. Druhá kapitola obsahuje zhodnocení celého palivového cyklu z hlediska použití různých technologií, jejich stručné popsání.

Třetí kapitola je věnována rozboru zajištění bezpečnosti na technologické úrovni, zvýšená pozornost je i věnována mediálním dopadům havárií jaderných elektráren s účinky na okolí.

Vliv jakéhokoliv zdroje energie je rozsáhlý, může zařazovat různé složky životního prostředí jako vcelku tak i zvlášť. Proto ve čtvrté kapitole jen popsan vliv jaderné energie na emise CO₂ a ukládání jaderného odpadu.

1. Postavení jaderné energie ve světě

Jaderná energie patří k nejméně diskutovaným zdrojům jako energie budoucnosti a očekával se její masový nástup. V šedesátých letech dvacátého století nastala masová výstavba jaderných elektráren využití jaderné energie pro komerční účely, ale později, od konce 80. let její nárůst se zmírnil. Proti využití jaderné energie v mnoha zemích vstála vlna odporu, která byla založena v první řadě na obavách z nehody, za druhé na strachu z radiace, za zmínku stojí říct, že roli hral relativní dostatek energie z fosilních zdrojů.

Převládající většina nebezpečných situací v jaderných elektrárnách je způsobena lidským faktorem. Proto musí být největší důraz kladen na vzdělání pracovníků a jejich schopnost ovládnout situací. Aby zajistit vlastní bezpečnost, rozvinuté státy by měly umožnit rozvojovým státům přístup k novějším vědeckým poznatkům a metodám zajištění jaderné bezpečnosti.

Významné havarie vznikají na jaderných elektrárnách zřídka. Však jejich emocionální působení na populaci těžko přecenit. Nejvíce významné havarie na jaderných elektrárnách jsou představeny v tabulce č.1.

Tabulka č. 1 Přehled významných havárií na jaderných elektrárnách.

(zdroj:<http://molphys.ustu.ru/Study/Atom/cap6.html#6.2>)

Místo havarie	Datum	Příčina	Radioaktivita, Ci	Plocha zněčištění, km	Počet obětí (evakuované)
<i>Kyštym, Rusko</i>	1957	Vybuch skladu	2x10	15000	1000
<i>Windscale Pile, Anglie</i>	1957	Hoření grafitu	3x10	500	-
<i>Three Mile Island, USA</i>	1979	Tavení aktivní zony	20	-	-
<i>Černobyl, Ukrajina</i>	1986	Rozběhnutí reaktoru	100x10	20000	1200
<i>Fukušima, Japonsko</i>	2011	Zemětřesení a vlna tsunami	7,8 - 650	20x20	200 000

Z této tabulky je vidět měřítko působení radioaktivních látek, zněčištění velkých ploch a stěhování populace. Však můžu říct, že takové havárie doprovázeny malým počtem obětí, které zemřeli během několika týdnů po havárie. Tím pádem je, že hlavní složkou škody jsou sociální a ekonomické ztráty.

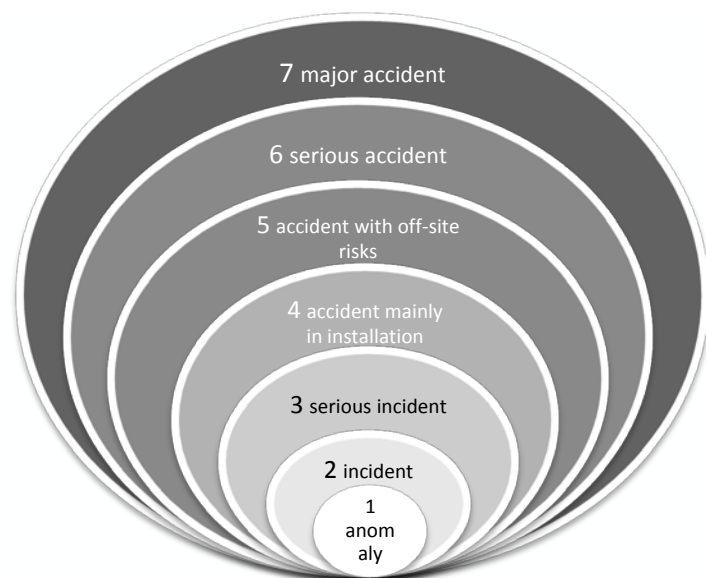
Jako jeden z největších problémů jaderné energie se často označován odpor veřejnosti. Za první oponentů argumentují to tak, že jaderná energie stojí příliš mnoho. Za druhé, že jaderné elektrárny jsou nebezpečné. Ale dlouholeté průzkumy říkají, že ohrožení zdraví veřejnosti provozem reaktorů je velmi malé. Bohužel většina lidí vnímá to jinak a věří, že bezpečnost by se měla být líp. Havárie na Ukrajině roku 1986, v Japonsku roku 2011 dokázaly nutnost kvalitního zabezpečení jaderných elektráren (John F. Ahearne, 1995).

Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE) v roce 1991 zavedla stupnici závažnosti nehod v jaderných zařízeních - International Nuclear Event Scale (INES), která slouží k rychlému informování veřejnosti o jaderných nehodách (obr.č 1).

V stupnici INES celkem 8 stupňů – od 0 do 7, kde nejnižší čtyři (0 – 3) jsou označovány jako události (incidents), vyšší stupně (4 – 7) jako havárie (accidents) (www.csvts.cz/cns).

Na obrázku č.1 je shrnuta stupnice závažnosti nehod, kde 1. stupeň je anomálie, poslední – velká katastrofa.

K událostím stupně 0 – 2 dochází poměrně běžně, ale o všech nich my ani nevíme.

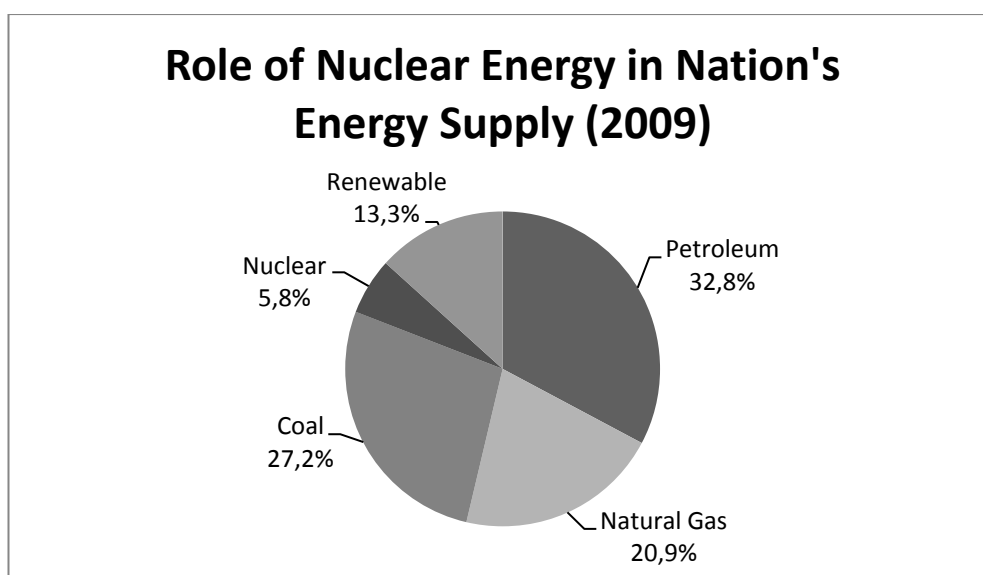


Obrázek č. 1 Stupnice závažnosti nehod v jaderných zařízeních (zdroj: rivne-today.com)

1.1. Zastoupení jaderné energie ve světovém energetickém mixu

S rozvojem moderní společnosti neustále stoupají nároky po energii, co vede společnost hledat víc a víc zdrojů energie a získávání potřebného množství z okolního prostředí. Kromě toho, že se počet obyvatel neustále zvyšuje, také energetické potřeby každého stoupají. Například v období tzv. zemědělství (9-7 tisíc let před n.l.) člověku stačilo jen 40 GJ na celý rok na pokrytí svých energetických potřeb, když dnes je to činí 450 GJ ročně pro každého (Kobylka and Matějka, 2006).

Z grafu č.1 je vidět, že v roce 2009 největší podíl na výrobě energie jako takové celosvětově měla ropa s 32,8 % a uhlí s 27,2 %. Pak následují přírodní plyn s 20,9 % a obnovitelné zdroje s 13 %. Stejnou situaci můžeme pozorovat ve výrobě elektrické energie, kde nejvíce se podílí uhlí s 40,6 %, která je doplněna přírodním plynem s 21,4 %. Třetím nejvýznamějším zdrojem je jaderná energie s 13,4 %. Ropa má podíl 5,1 % (Key World Energy Statistics, IEA, 2011).



Graf č.1 : Podíl jaderné energie na výrobě elektrické energie v roce 2009 (zdroj : Key World Energy Statistics, IEA, 2011)

K 1. červenci 2013 je podle statistik WNA v provozu 432 jaderných reaktorů s celkovou kapacitou 371,87 GWe, které vyrábějí asi 11 % elektřiny. Dnes ve výstavbě se nachází 68 reaktorů s celkovou výkonností 71,226 GWe ve 13 zemích. Plánuje se výstavba 162 reaktorů. Předpokládaná doba výstavby je 8-10 let (<http://world-nuclear.org>).

Podle NEA očekává se podle vysokého scénáře jaderný podíl na světové výrobě elektřiny ze 16% v současné době na 22% v roce 2050. Analitici takže se domnívají, že významná část jaderné energie bude nadále vyprodukována v zemích OECD (Nuclear energy outlook, NEA, 2008).

1.2. Faktory ovlivňující uplatnění jaderné energie

V dnešní době, jak už bylo řečeno výše, na výrobě energie se podílějí fosilní paliva, zásoby kterých nejsou obnovitelná a už brzo nam dojdou. Nemůžeme ani zanedbát neekologičnost těchto zdrojů, a proto můžeme se narazit na různá komplikace související s těmito zdroje energie. Taky se nemůžeme spolehnout na obnovitelné zdroje energie, protože nemůžou zcela pokrýt naši potřeby v energie a tím pádem nahradit ostatní zdroje energie.

Jediným řešením aby udržet pokrytí nárůstu spotřeby energie je kombinace všech druhu energie – fosilní paliva, obnovitelné zdroje a především jadernou energie. Významnou roli budou hrát te zdroje, které mají technické inovace, co může zlevnit a zpřístupnit zdroje energie a hlavně být šeternější k životnímu prostředí.

Velkou nevýhodou jaderné energie je dlouhá doba výstavby elektráren a náklady související s tím. Obecně se uvádí, že od schválení stavby jaderné elektrárny po její uvedení do provozu uběhne průměrně 15 let (Pearce J. M., 2012).

Havarie ve Fukušime obrátila pozornost společnosti ke zvýšení bezpečnosti stávajících i budoucích zařízení. Při vybudování těchto zařízení se provádějí zkoušky a zátěžové testy, podle kterých se vymýšlejí nové scénáře možného ohrožení, občas nepředstavitelné (Pearce J. M., 2012). To všechno může vést, že se mezi veřejnost šíří obavy bezpečnosti jaderné energetiky, které jsou založené spíše na nepravděpodobné informaci.

Kolík bude přispěvat jaderná energetika ve složení energetického mixu závisí na několika faktorech. Především se jedná o rozhodování společnosti při výběru šeterných zdrojů energie. Doposud většina ekologicky zaměřených organizací stála

proti jaderné energetice a dávala přednost obnovitelným zdrojům, ale tyto zdroje nemůžou zcela pokrýt poptávky po energii.(www.oizp.cz; www.czp.cuni.cz)

Příkladem toho, jak je vážný ekonomický problém jaderná energie představuje, spočívá v tom, že pojišťovny odmítají pokrýt veškeré náklady a nest plnou odpovědnost v případě jaderné nehody(McNeil B., 2007). Je to především proto, že v případě katastrofické jaderné havárie, by se společnost pravděpodobně stala bankrotem, tohle by se týkalo každé společnosti, která by nesla plnou odpovědnost za událost.

Velice důležitým bude vývoj ekonomických parametrů energetických zdrojů. To znamená, že objev nových ložisek fosilních paliv může mít vliv na pokles jejich ceny a tím pádem oddálit plány toho nebo jiného státu na postavení nových jaderných bloků nebo vybudování zcela nové jaderné elektrárny. Taková situace se stala v Mexickém zálivu, když se objevily nová ložiska plynu, které oddálily plány Mexika na postavení deseti nových jaderných bloků (www.world-nuclear.org). Dostatek levných fosilních zdrojů energie může způsobit problémy při rozvoje jaderné energetiky. Odhadované zásoby fosilních paliv nemůžou zcela odpovědět na otázku jestli budou stáčet za 15-20 let, protože počet lidí s každým rokem rostou poptavky po energie s růstem počtu lidí.

Jeden z pozitivních faktorů je, že rozšíření jaderné energetiky mohlo ovlivnit vývoj nových moderních reaktorů a s tím zkušenosti v provozu, co by zvýšilo bezpečnost jaderné energetiky celkem. Vývoj nových reaktorů by pomohl najít cestu k rychlému a levnému vybudování jaderných elektráren, snížit dopady na životní prostředí a přesvědčit společenstvo, že jaderná energetika je jedinou možností udržovat energetickou potřebu.

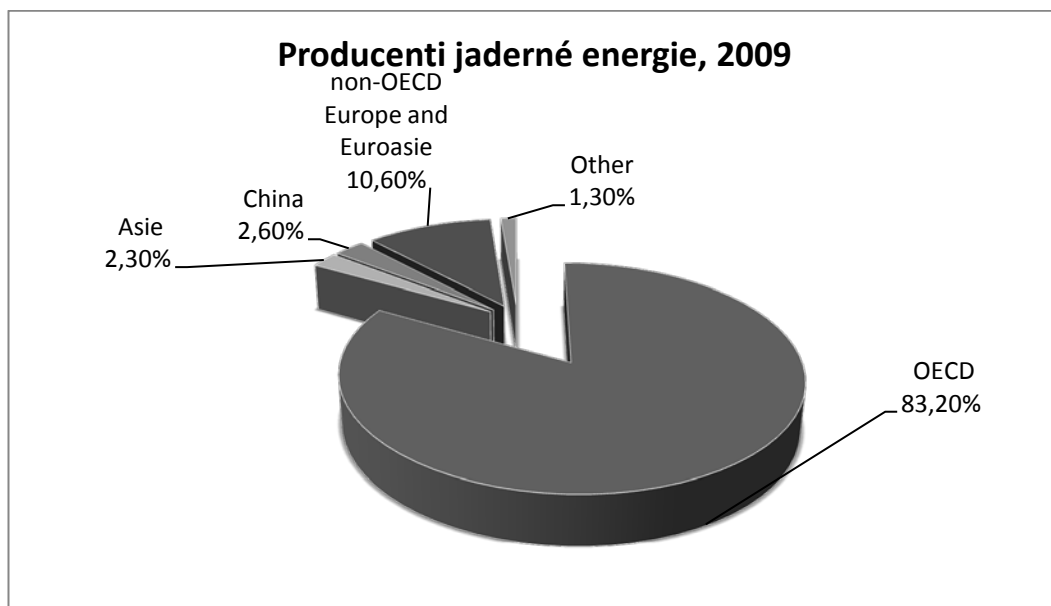
1.3. Současný stav jaderné energie

První jaderná elektrárna byla pro komerční účely byla postavena v padesátých letech 20. století, byla to elektrárna Calder Hall ve Velké Británii (www.nri.cz). Výužití jaderné energetiky se poté rychle rozvíjelo v celém světě, zejména v Rusku, USA, Velké Británii a ve Francii (www.world-nuclear.org).

V šedesátá a sedmdesátá léta byl velký pokrok v vývoje jaderné energie jako zdroj elektrické energie pro komerční účely, mnozí věřili, že jaderná energie vyřeší otázky z nedostatkem energie jednou pro vždy. Ale v osmdesátých letech nastala doba útlumení, která byla způsobena odporem k jaderné energie. Po havárie v Černobylu lidé se stali citit strach z radiace a všimli jaké riziko přináší tento zdroj, a proto ve mnohých zemích vláda rozhodla pozastavit provoz stávajících jaderných elektráren a výstavbu celkem (www.world-nuclear.org).

Tento stav přetrval až do konce 20. století, ale stále stoupaající spotřeby energie, zvýšení cen na fosilní paliva a jejich hrozící vyčerpatelnost přivedly k tomu, že veřejnost přehodnotila svůj postoj k jaderné energie. Takže jaderná energetika byla podpořena i zefektivněním výroby v jaderných elektrárnách a prodloužením jejich bezpečné životnosti.

Podle dat IEA z roku 2009 největšími producenty jaderné energie jsou Spojené státy, které vyrábí 30,8 % z celkové výroby jaderné energie. Dále následuje Francie s 15,2 % a Japonsko s 10,4 %. V první desítce také jsou Rusko (6,1 %), Jižní Korea (5,5 %), Německo (5 %), Kanada (3,3 %), Ukrajina (3,1 %), Čína (2,6 %) a Spojené Království (2,6 %). (Key World Energy Statistics, IEA, 2011)



Graf č. 2. Podíl jednotlivých regionů na výrobě jaderné energie (zdroj: Key World Energy Statistics, IEA, 2011)

2. Technologie získání jaderné energie

Ve světě se používají různé typy reaktorů v závislosti na jejich specifičnosti. Vývoj jaderných reaktorových technologií pokračuje i dnes. Na dnešek lze tyto technologie rozdělit do několika generací:

1. **Generace I** – jde o prototypy reaktorů, které byly zkonstruované v 50. a 60. letech.
2. **Generace II** – patří sem reaktory postavené v 70-80 letech. Nejběžnějšími typy jsou lehkovodní reaktory a těžkovodní reaktory. Tato generace reaktorů nyní je páteř jaderné energetiky. V současnosti dodávají elektrickou energii po celém světě a využívají se na jaderných elektrárnách na Temelíně a v Dukovanech (www.osel.cz).
3. **Generace III** – vznikly v 90. letech minulého století, v dnešní době fungují v Japonsku a probíhá výstavba ve Finsku. Mají lepší bezpečnostní vlastnosti, delší životnost a jednodušší konstrukce (www.osel.cz).
4. **Generace IV** – spadají sem reaktory, které ještě ve fázi výzkumu a vývoje. Vývoj těchto reaktorů souvisí s zkušenostmi, které jsou získány z činnosti předchozích generací jaderných reaktorů.

2.1 Nejpoužívanější typy reaktorů

2.1.1 Tlakovodní reaktor PWR

Reaktor PWR (Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor) je dnes nejrozšířenějším typem jaderného reaktoru, který dnes představuje přes 230 reaktorů (www.world-nuclear.org). Jako palivo zde zastoupen obohacený uran (^{235}U), chladičem je obyčejná voda (www.large.stanford.edu). Tento typ reaktoru byl vyvinut v USA, pak tuto koncepci převzalo Rusko a známo tam pod jiným názvem jako VVER (Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor).

Na obrázku č.2 je část jaderné elektrárny Temelín, která se nachází v Česku. Tato elektrárna je vybavena dvěma tlakovodními reaktory typu VVER o tepelném výkonu 3000 MW (www.cez.cz¹).



Obr. č.2. Chladičí věže jaderné elektrárny Temelín, ČR (zdroj:)

2.1.2 Varný reaktor BWR

Tento typ je napodobný reaktoru PWR, ale BWR (Boiling Water Reactor) může snadněji pracovat v režimech zatížení. Má jen jednu nádobu, v které se nachází voda při nižším tlaku a ohřívá se tu až do varu. Palivem je obochacený uran ve formě válečku oxidu uraničitého, které jsou uspořádány do 90 až 100 palivových tyčí. (www.world-nuclear.org)

2.1.3 Těžkovodní reaktor CANDU

Těžkovodní reaktor CANDU byl vyvíjen v roce 1950 v Kanadě. Využívá přírodní uran ve formě oxidu uraničitého jako palivo, a proto potřebuje efektivnějšího moderátora a chladivo. V daném případě je to těžká voda D_2O (www.world-nuclear.org). Těžkovodní moderátor v nádobě musí být chlazen, protože se zvyšující teplotou se snižuje moderační schopnost.

2.1.4 Pokročilý plynem chlazený reaktor AGR

Pokročilý plynem chlazený reaktor AGR (Advanced Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor) je generaci reaktorů, které se používají ve Velké Británii. Palivem jsou pelety oxidu uraničitého. Moderátorem zde je grafit a chladivem oxid uhlíčitý (www.world-nuclear.org).

2.1.5 Vysokoteplotní reaktor HTGR

Vysokoteplotní reaktor HTGR (High Temperature Gas Cooled Reactor) má dobré bezpečnostní vlastnosti a poskytuje vysokou teplotu na výstupu, což znamená, že má

velmi vysokou účinnost výroby elektrické energie. Palivem je vysoce obohacený uran ve formě kuliček oxidu uraničitého. Moderátorem je grafit a chladičem je helium proháněné aktivní zónou (Velká kniha o energii, 2001).

2.1.6 Rychlý množivý reaktor FBR

Rychlý množivý reaktor FBR (Fast Breeder Reactor) nemá moderátor, štěpná reakce probíhá působením rychlých neutronů. Palivem slouží plutonium ve směsi s oxidem plutoničitého a uraničitého. Aktivní zóna tvořená svazky palivových tyčí, které jsou obklopeny pláštěm z uranu. Chladičem zde je sodík, ale má svou nevýhodu – má velkou chemickou reaktivitu s kyslíkem. (Velká kniha o energii, 2001)

3. Riziko havárií a přírodních katastrof

Během století populace přežila hodně těžkých kataklizmu, které jsou odlišné zdrojem vzniku a následky. To jsou zemětřesení, erupce sopek, povodně, požáry, války a revoluce. Nejsou podobné navzájem, ale mají jen jednu věc společnou: každá tato situace odnáší desítky, tisíce a miliony lidských životů, nechá po sobě materiální škody a hlavně psychické problémy. Však lidé znovuzískávali a začínali se obnovovat život.

3.1.1 Havárie v Černobylu

Nehoda na Černobylské jaderné elektrárně byla nejzávažnější v historii jaderného průmyslu, způsobila obrovské uvolňování radionuklidů ve velkých oblastech Evropy. Dnes většina postižených pozemků je bezpečná pro život a ekonomickou aktivitu. Nicméně, v uzavřené zóně Černobylu a v omezených oblastech Běloruska, Ruska a Ukrajiny některá omezení týkající se využití půdy by měla být zachována pro příští desetiletí. Většina pracovníků operace obnovy a pět milionů obyvatelů kontaminovaných oblastí v Bělorusku, Rusku a Ukrajině získala poměrně malé dávky záření, které jsou srovnatelné s přírodním pozadím (Balonov M.I., 2007). Kromě dramatického zvýšení výskytu rakoviny štítné žlázy u exponovaných osob a nárůstu leukémie, nebyly jasně prokázány další onemocnění způsobené radiací.

K havárii došlo 1:24 26.dubna r. 1986. Na čtvrtém bloku v aktivní zóně reaktoru typu RBMK došlo k vybuchu. Exploze byla způsobena hrubým porušením provozních postupů ze strany personálu a kvůli technickým nedostatkům v bezpečnostním systému (Balonov M.I., 2007; Rahu M., 2003).

Jaderná elektrárna se nachází 130 km severovýchodně od Kyjeva, hlavního města Ukrajiny.

Vzhledem k vybuchu byl reaktor uzavřen. Reaktor hořel po dobu 10 dnů, během této doby radioaktivní látky ve formě plynů, par, aerosolů a horké částice byly rozptýleny po celé Evropě, především v Bělorusku, Rusku a Ukrajině. Celkový únik radioaktivních látek byl asi 14 EBq, včetně 1,8 EBq ^{131}I , 0,085 EBq ^{137}Cs , 0,01 EBq ^{90}Sr a 0,003 EBq plutonia a radioizotopů (Balonov M.I., 2007). Vzácné plyny činily asi 50% z celkového počtu uvolnění. Více než 200.000 km² území Evropy získala úroveň ^{137}Cs nad 37 kBq/m². Velká část s toho (70%) byla nad Ukrajinou, Běloruskem a Ruskem, 20% radioaktivního úniku se rozšířil i mimo Evropu (De Cort et al., 1998). Většina radioizotopů stroncia a plutonia byla uložena ve vzdálenosti 100 km od zničeného reaktoru z důvodu větších rozměrů částic.

Zdravotní důsledky byly analyzovány komplexně a do hloubky ve zprávách UNSCEAR (UNSCEAR, 1988, 2000). Nicméně, v průběhu let, spolu se snížením radiace, nejvíc významnými problémy se staly sociální a ekonomické deprese a související závažné psychické problémy pro širokou veřejnost. Celoevropský radionuklidový spad měl za následek znečištění městských, lesních a vodních ekosystému, které vyžadovaly rozsáhlé montirování životního prostředí. Během prvních týdnů po nehodě, zvýšená koncentrace ^{131}I v mléce z pastvy skotu vedla k podstatnému příjmu ^{131}I v lidském těle a vysoké dávky v štítné žláze u dětí (Cardis E., Hatch M., 2011; Zvonova I. Et al., 2010). Do roku 2002 více než 4000 případů rakoviny štítné žlázy bylo diagnostikováno u dětí, a to je velmi pravděpodobné, že velká část těchto rakovin je důsledkem radioaktivního jódu z mléka (Cardis E., Hatch M., 2011). Později, vysoký obsah radionuklidů Cs v mléce a mase stejně jako v "divoké" potravě způsobil významné radiologické problémy.

Kromě dramatického výskytu rakoviny štítné žlázy u exponovaných osob na mladém věku, není jednoznačně prokázáno zvýšení výskytu rakovinu nebo leukémie kvůli radiaci u široké veřejnosti (Cardis E., Hatch M., 2011). Tam byly zvýšené psychické

problémy u postiženého obyvatelstva, doprovázená nedostatečnou komunikací o účincích radiace.

Největší dávku dostali asi 1000 lidí, kteří byli vedle reaktoru, kdy došlo k vybuchu a kteří se zúčastnili likvidace požáru, z ozáření.

Během několika let bylo provedeno hodně výzkumů, které se zabývaly měřením koncentrace ^{137}Cs v postižených oblastech, zejména v oblasti Běloruska. V přílohách č. 1, 2, 4 a 5 je znázorněn odhad výskytu rakoviny štítné žlázy v oblasti Běloruska. Nemůžeme vynechat ani statistické výzkumy, které jsou představeny tabulkou v příloze č. 3. Nejvyšší dávky z Černobylu bezprostředně po nehodě byli přijaty rostlinami a zvířaty v okruhu 30 km od reaktoru (Geras'kin S.A., Fesenko S.V., Alexakhin R.M., 2008). Úroveň znečištění dosahovala několika desítek MBq/m². Do šesti měsíců dávkový příkon na povrchu půdy klesl o faktor 100 z počáteční hodnoty. Některé z potravin z kontaminovaných oblastí, zejména zvířata, lesních plodů a hub, nadále vykazují zvýšené dávky ^{137}Cs , než národní přijaté limity v části Běloruska, Ukrajiny, Ruska, skandinávských zemí a ve Spojeném království.

Od roku 1986 úroveň radiace v postižených prostředích poklesla více než stonásobně v důsledku přírodních procesů a protipatření (Balonov M.I., 2007). Proto většina z "kontaminovaných území" je nyní bezpečná pro osídlení a hospodářské činnosti. Však, v Černobylu jsou vyloučené zóny a v některých omezených oblastech určitá omezení využívání půdy budou muset být zachována pro příští desetiletí (Balonov M.I., 2007).

V blízkosti černobylské jaderné oblasti asi 10 km vzdalené, převažovala borovice lesní ve věku 30-40 let (Kozubov G.M. and Taskaev A.I., 2002). Vysoká retenční kapacita vrcholíku stromu vzhledem k radioaktivnímu spadu vedlo k tomu, že 60 - 90% ze všech radionuklidů, které spadly na les byly původně zachycené korunami stromů (Tichomirov F.A. and Shcheglov A.I., 1994; Kozubov G.M. and Taskaev A.I., 2002).

Oblast 30 km vzdalená od elektrárny je zastoupená listnatým lesem, především rosté tam bříza, černá olše a dub. Opadavé druhy ukázaly, že jsou nejvíce tolerantní k vystavení před zářením než jehličnany (Geras'kin S.A. et al., 2008). Proto velké radiační poškození bylo pozorováno pouze v bezprostřední blízkosti místa havárie.

Obnova postižené bioty v zóně byla zahájena tím, že převažovala reakce na odstranění lidských činností v nejvíce postižené oblasti. Jako výsledek populace mnoho rostlin a živočichů se nakonec rozšířila a současné podmínky prostředí mají pozitivní vliv na flóru a faunu v uzavřené zóně.

Po odchodu člověka, životní prostředí začalo rychle měnit – vracet se do svého přirozeného stavu, ve kterém hlavní roli hrají neměnné zákony přírody. Bývalé orné půdy jsou rychle zarostly přírodními byliny a postupně zarůstají stromy. Lesní porosty, které byly uměle vytvořeny člověkem v 50. letech minulého století, dnes bez lidské péči jsou zdrojem nebezpečí – místem epidemického šíření škůdců a chorob spolu s vyskytujícími se zde požáry (www.tass-ural.ru). To vše opakovaně se projevovalo v uzavřené zóně v minulých desetiletích. Ale díky přírodním zákonům, výsadba borovice se postupně přeměňuje na smíšené lesy, které jsou odolnější vůči těmto katastrofickým přírodním jevům.

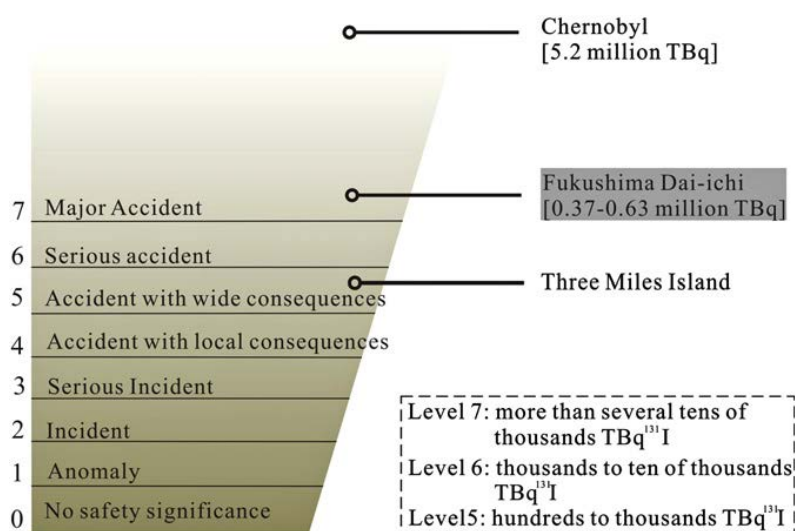
Důležitým důsledkem existence opuštěných lokalit je zvýšená rozmanitost druhů divokých zvířat a jejich tvorba stabilních populací. Podle vědců fauna černobylské zóny může mít celkem asi 400 druhů rostlin, ale kvůli nedostatkům studie, na dnešek je prokázána přítomnost pouze 300 druhů (www.tass-ural.ru). Mnoho druhů zvířat, která byla před nehodou na okraji vyhynutí, a existovaly pouze vyjíměčně, nyní jsou druhy, které se vyskytují běžně. Dnes pro přírodní krajinu černobylské zóny jsou obvyklé stádo divočáků. Velikost populace jelena lesního, losa, srnce také dosáhla optimálního množství pro tyto přírodní podmínky (www.vokrugsveta.ru). Přítomnost kořisti vede k existenci přirozených nepřátelů – vlků. Podle vědeckých odhadů populace šedých predátorů dosáhuje počtu dvou set osob.

Je třeba poznamenat, že i přes dramatický vznik černobylské zóny, tato oblast je nyní domovem asi 60ti vzácných druhů zvířat a ptáků. Takové, například vydra, jezevec, rys, čáp černý, orel mořský. V polovině 90. let do zakázané zóny bylo přestěhováno stádo koní Převalského - vzácného druhu divokého koně (www.tass-ural.ru). Koně jsou dobře přizpůsobili k životu v uzavřené zóně. V současné době existují tři stáda těchto zvířat. V běloruské části zóny byl zavlečen bizon, který se také dobře adaptoval. Kromě toho, běloruskou část zóny obývá hnědý medvěd – vzácný druh.

3.1.2 Fukušima

Výroba jaderné energie výrazně vzrostla od roku 1990, rostoucí z 1909 bilionů kW · h v roce 1990 až 2620 bilionů kW · h v roce 2010, zatímco její podíl na celkové výrobě elektřiny se snížil z 16,8% na 13,5% v tomto období (USEIA, 2012). Existuje 436 jaderných reaktorů, které působí v 30 zemích, z celkovým instalovaným výkonem 370000 MWe a 61 reaktory z celkovou kapacitou 58000 MWe ve 13 zemích (IAEA, 2012). Z toho je tři čtvrtiny provozních reaktorů ve vyspělých zemích, většina z reaktorů ve výstavbě jsou v rozvinutých zemí. Čína a Indie mají v plánu vybudovat kolem 100 reaktorů během příštích 25 let. Kromě toho, 45 nových země mají plány na stavbu jaderných elektráren v příštích dvou desetiletích (WNA, 2012). Tento růst a zájem o jaderné energetice je řízen řadou faktorů, a to především týkajících snížení zásob primárních energetických zdrojů a rostoucí cenou a vlivu životního prostředí. Zlepšení a snížení investičních nákladů při budování jaderné elektrárny rovněž přispělo k růstové vyhlídce, což vyvolává naději na oživení jaderné energie.

Nicméně, Fukušimská jaderná havárie v Japonsku zvýšila obavy, že rozvoj jaderné energetiky může být příliš riskantní vzhledem k jeho výhodám v porovnání s alternativami.



Obr. č.3. INES rating on the event in the Fukushima Daiichi NPP. (zdroj: Suzuki T., 2011)

V pátek 11. března v 14:46 (05:46 GMT) zemětřesení o síle 8,9 a 9,1 podle Richtero­ve škály udeřilo asi 10 km pod hladinou moře a asi 120 km jiho – východně od východního pobřeží Japonska (WNA, 2011). O pár minut později vlna tsunami až 10 metrů dosáhla severo – východní pobřeží Japonska, a proto společnost TEPCO (Tokyo Electric Power Company) oznámila, že více než 4 miliony domácností jsou bez proudu kvůli poruchy generatoru pro výrobu elektřiny(IAEA, 2011; WNA, 2011). Takže společnost TEPCO uvedla, že jednotky 1, 2 a 3 na jaderné elektrárně Fukušima Daiichi a jednotka 4 automaticky zastaví kvůli zemětřesení. Byl to začátek nejhorší jaderné havárie za posledních dvou desetiletí (Černobylská tragédie se datuje roku 1986) (Suzuki T., 2011).

Zemětřesení 8,9 podle Richtero­ve škály je nejškodlivější událost zaznamenaná během historických dob: množství energie uvolněné v tomto případě je zhruba stejné jako při výbuchu 30 bilionů (10^9) tun TNT (IAEA, 2011). Obrázek č. 3 ukazuje stupeň závažnosti této události v porovnání s ostatními velkými havárií, které byly záznamenané a přivedly k negativním následkům.

Podle informací japonské vlády byly v době, kdy Japonsko zasáhlo ničivé zemětřesení a tsunami, tři ze šesti fukušimských reaktorů (bloky 4, 5 a 6) mimo provoz kvůli pravidelné údržbě. Reaktory 1, 2 a 3 byly v provozu. Poté, co byla elektrárna zasažena zemětřesením, proběhlo automatické havarijní odstavení reaktorů (Wang Q. et al., 2013). Po výpadku dodávky elektrického proudu zvenčí, který způsobilo zemětřesení, bylo uvedeno do provozu havarijní chlazení reaktorů pomocí dieselgenerátorů. Pak ale následovala vlna tsunami a bylo zničeno i havarijní chlazení. Reaktory nebyly dostatečně chlazeny a hladina vody v reaktorové nádobě poklesla. Došlo k obnažení palivových článků a porušení pokrytí paliva, které se začalo tavit a uvolňovat radioaktivní látky. Zvyšující se radiace v reaktorových budovách situaci dále komplikovala(Srinivasan T.N. and Gopi Rethinaraj T.S., 2013). Kvůli rostoucímu tlaku uvnitř kontejntentu bylo rozhodnuto tento tlak snížit odvětráním. Následně reaktorovými budovami otřásly exploze vodíku, které je poškodily.

Hlavním problémem bylo chlazení reaktorů, na které bylo využito všech dostupných prostředků. Proto japonští inženýři rozhodli přistoupit ke krizovému řešení a použít k chlazení reaktorů mořskou vodu. Dálším problémem byly bazény vyhořelého paliva, a

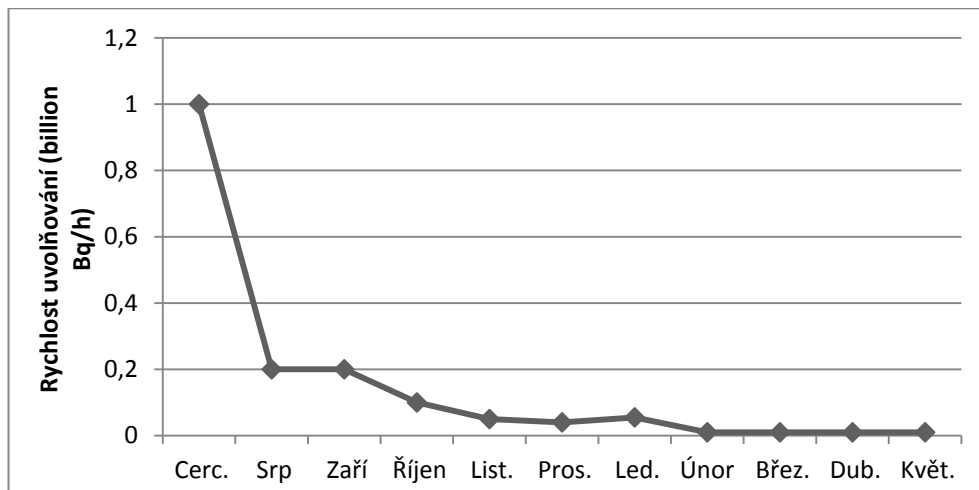
to především u reaktoru č. 4, kam bylo umístěno velké množství paliva čerstvě vyvezeného z reaktoru (Srinivasan T.N. and Gopi Rethinaraj T.S., 2013).

V následujících týdnech po havárii se intenzivně pracovalo na stabilizaci situace, hlavně na obnově dodávky elektrické energie a zajištění stabilního chlazení. V červnu 2011 bylo obnoveno cirkulační chlazení.

Nepoškozené bloky 5 a 6, které v době katastrofy byly odstavené, ale obsahovaly palivo, se podařilo pomocí dieselgenerátoru zchladit a dosáhnout studeného odstavení již 20. 3. 2011. Podle zprávy WHO byla několik měsíců po katastrofě situace v poškozené jaderné elektrárně stabilizovaná. Stále probíhalo chlazení poškozených reaktorů č. 1, 2, a 3 a do bazénů vyhořelého paliva u reaktorů 1, 3 a 4 byla čerpána mořská voda (IAEA, 2011).

Nejčastěji detekované radionuklidy jsou ^{137}Cs , ^{134}Cs a ^{131}I . To jsou antropogenní radionuklidy bez denního příspěvku, které byly uvolněny z jaderných zařízení a jaderných reaktorů (Livingston a Povinec, 2000; Matsuda N. et al., 2013). Za normálních podmínek jen ^{137}Cs je stále přítomen v životním prostředí v důsledku jeho dlouhého poločasu rozpadu (Livingston a Povinec, 2002). Největší obavy z radiologického ozáření byly u ^{137}Cs kvůli jeho relativně dlouhému poločasu rozpadu a jeho biologické dostupnosti. ^{137}Cs je přítomen v atmosférickém aerosolu, půdě, vegetaci, mořské vodě a sedimentech (Matsuda N. et al., 2013). A proto sloužilo jako indikátor environmentálních procesů po celém světě, zejména pro studium procesu v atmosféře, mořských a suchozemských ekosystémech (Livingston a Povinec, 2002; Povinec et al, 2003).

Graf č.3 znázorňuje odhad měsíčního množství radioaktivních látek uvolňovaných do ovzduší z jednotek 1 – 3 jaderné elektrárny Fukušima Daiiči a pouhým okem je vidět, že se každý měsíc toto množství snižovalo. Atmosférický únik ^{137}Cs byl v rozmezí od 13 do 15 PBq, a radioaktivita kapaliny, která byla uvolněna přímo do moře se odhaduje na 3-27 PBq (Chino et al., 2011, Kawamura et al., 2011 a Bailly du Bois et al., 2011).



Graf č.3 Odhad měsíčního množství radioaktivních látek uvolňovaných do ovzduší z jaderné elektrárny Fukušima Daiiči (zdroj: IAEA. Fukushima Daiichi Status Report, 28. 6. 2012.)

V současné době úniky do ovzduší radioaktivních látek z jaderné elektrárny Fukušima Daiiči relativně nízké oproti množství radioaktivních látek uvolňovaných v období havárii. Jak hlásí TEPCO, že v dnešní době uniká do atmosféry každou hodinu $1 \cdot 10^7$ Bq radioaktivního cezia (IAEA, 2012).

Radioaktivní látky byly přenášeny větrem do dalších oblastí a kontaminovaly rozsáhlé oblasti na japonském ostrově Honšú. Nejvíce zasaženy byly oblasti severozápadně od elektrárny. V důsledku havárie bylo evakuováno obyvatelstvo v okruhu 30 km od elektrárny a v dalších oblastech (Srinivasan T.N. and Gopi Rethinaraj T.S., 2013; Matsuda N. et al., 2013).

Voda, která byla použita k chlazení, je velmi radioaktivní a akumulovala se v prostorách elektrárny, ale bohužel se také dostala do oceánu, čím způsobila kontaminaci mořské vody při japonském pobřeží. Tím padem japonské Ministerstvo zdraví, práce a sociálních věcí (Ministry of Health, Labour and Welfare) rozkázalo sledovat radioaktivní látky ve vodě a v potravinách v oblastech, kde je riziko radioaktivní kontaminace. (Health Sciences Council, 2011)

K omezení konzumace pitné vody došlo v oblastech, kde byl překročen limit radioaktivních látek, zejména ^{131}I . Rovněž se objevily vysoké dávky radioizotopu ^{137}Cs v potravinách. (WHO, 2012)

Malé množství radioaktivních látek uniklo do Evropy a Severní Ameriky. Ale to nějak neovlivnilo zdraví obyvatelstva a proti nebyly nutné veškeré opatření.

Fukušimská havárie byla druhou nejhorší havárií jaderné elektrárny v historii, první byla Černobylská havárie. Byla ohodnocena sedmým stupněm INES. Radioaktivní kontaminace životního prostředí byla značná, ale nedosáhla "globálních" rozměrů.

Zodpovědnost za havárii přijala společnost TEPCO, která je provozovatelem této elektrárny. Japonský stát poskytovaly podrobné informace o problému na rozdíl od havárie v Černobylu, většinu údajů a dat lze dohledat na internetu.

4. Vliv na životní prostředí

V posledních několika letech mnoho zemí potkal problém rostoucího požadavku energie, který nutí vyrábět více energie, zatímco ve stejné době vyskytují problém snižování emisí skleníkových plynů. Když nebudou podniknuta opatření na snížení globálního oteplování, by pro svět mohla nastat ekologická katastrofa. Mezinárodní agentura pro energii (IEA) naznačuje, že aktuální trendy zásobování energií jsou neudržitelné, jak ekonomicky a sociálně, tak i ekologicky. Bez rozhodných opatření spojených se spotřebou energie emise CO₂ zdvojnásobí a do roku 2050 se zvýší poptávka na olej, což způsobí velké obavy o bezpečnosti dodávek (IEA, 2009). Nobuo Tanaka, ředitel IEA zdůraznil tuto prognózu takto: "Je to jednoduché: v případě, že svět pokračuje na základě dnešní energie a klimatické politiky, důsledky změny klimatu budou těžké. Energie je v srdci problému – a proto musí tvořit jádro řešení".

Analýza ukazuje, že vládní politika států s vysokou spotřebou energie pokračuje bez změn, což by znamenalo rychle rostoucí závislost na fosilních palivech s alarmujícími důsledky pro změnu klimatu.

Problém energetické bezpečnosti země dovážející energii je stejně klíčová. Koncentrace zdroje v nestabilním regionu Blízkého východu nese riziko pro mnoho zemí z hlediska spolehlivosti dodávek energie. Proto pro energetickou bezpečnost mnohé země hledají energetické alternativy fosilním palivům. Obnovitelné a jaderné zdroje energie mohou poskytnout řešení některých problémů energetické bezpečnosti a degradace životního prostředí. A tak mnohé země vnaší své investice v oblasti

obnovitelných a jaderných zdrojů energie, aby snížil závislost na dovážení ropy a zvýšit přísun bezpečné energie, minimalizovat cenu spojenou z dovážení fosilních paliv a snížit emisí skleníkových plynů. Mnozí z nás věří, že jaderné a obnovitelné zdroje energie jsou prakticky bez emisí a poskytují hlavní řešení globálního oteplování a otázky energetické bezpečnosti.

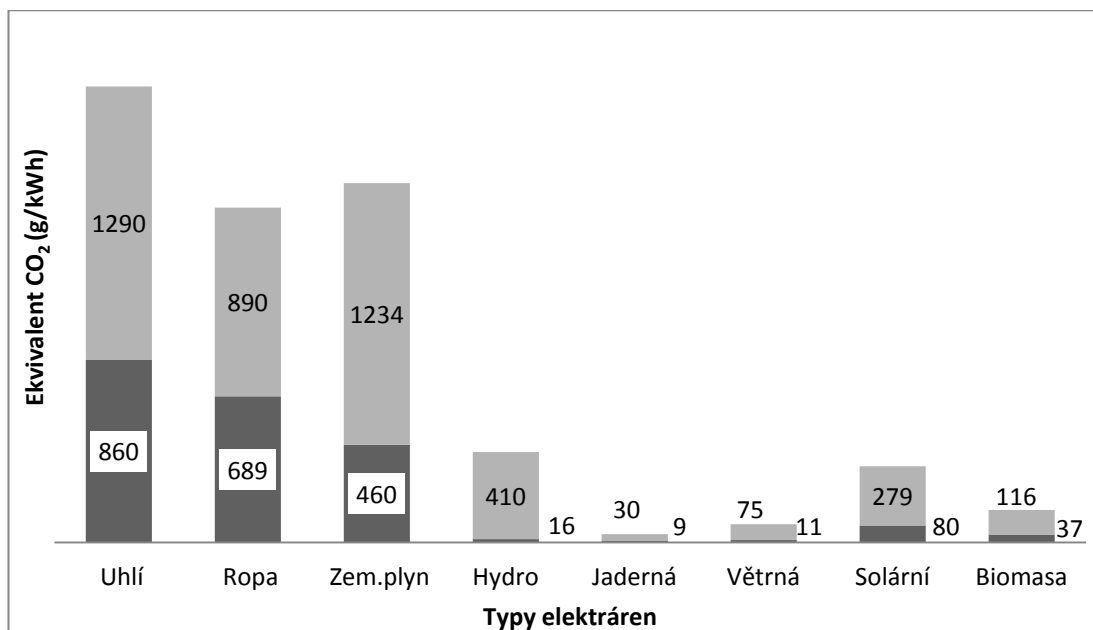
Hlavním důvodem pro studium vztahu mezi emisí uhlíku a jadernou energií je, že jaderná energie hraje významnou roli v současné diskuse o ochraně životního prostředí a udržitelného rozvoje.

4.1 Potenciální role jaderné energie ve snižování emisí CO₂

Jaderná energie hraje důležitou roli nejen při plnění energetických potřeb mnoha zemí, ale i ve snižování emisí. Po celém světě provoz jaderných elektráren významně přispívá k snižování emisí skleníkových plynů, rovněž jaderné elektrárny v současné době ušetří zhruba 10% emisí CO₂ ze světového energetického využití (Adamantiades a Kessides, 2009). Jaderné elektrárny hrály významnou roli při snižování množství emisí skleníkových plynů produkovaných elektrickým sektorem v zemích OECD (Nuclear Energy Agency, 2002). Kromě toho, Evropská unie tvrdí, že Evropa by nebyla schopna učinit žádné významné řešení na snižování emisí CO₂ bez použití jaderné energie.

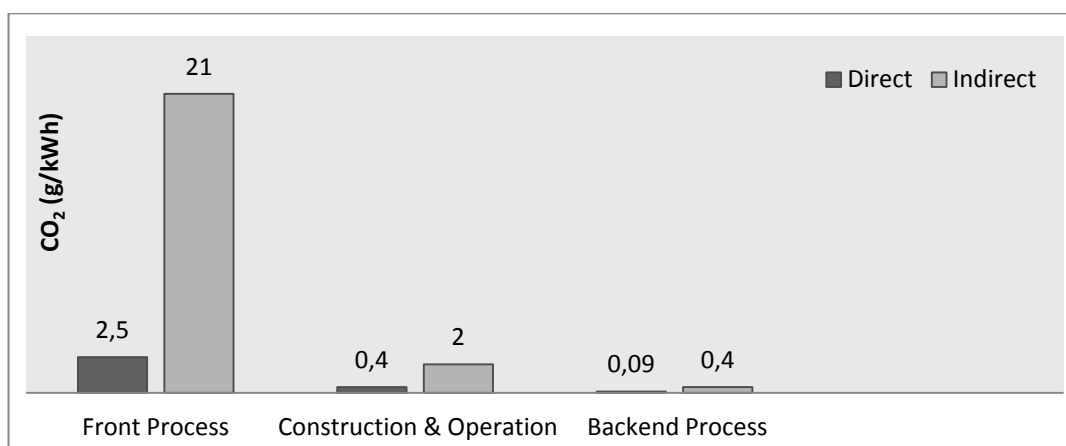
Stejně jak obnovitelné zdroje energie, jaderná energie předpokládá přispívat 6% k celkovému snížení CO₂ do roku 2050. Tento malý podíl je do značné míry způsoben dlouhou dobou investičních nákladů a veřejných opozice vůči jaderné energii v některých zemích.

Graf č.4 ukazuje nám emisí CO₂ z vybraných druhů elektráren v roce 2000, přihlíže k očekávaným nákladům na výrobu elektřiny. Je zřejmé, že se často hledá kompromis mezi nízkou cenou a vhodnými technologií na výrobu elektřiny s nízkými emisemi CO₂, a to navzdory předpokládanému poklesu ceny elektřiny z obnovitelných zdrojů.



Graf č.4 Přispěvek různých druhů elektráren na emisí CO₂. (zdroj: IAEA, 1995)

Přímé emise CO₂ z jaderné energie jsou velmi nízké. Nicméně, existuje uvolnění malého množství CO₂ nepřímými postupy. Přímé a nepřímé emise CO₂ můžeme vidět na grafu č.5. Tento graf uvádí emise na začátku (Front Process) a na konci (Backend Process) palivového cyklu a při výstavbě a obsluze (Construction&Operation) jaderné elektrárny. Součet přímých a nepřímých složek je 25,7 g CO₂/kWh, z čeho nepřímá složka tvoří asi 89% z celkového počtu emise CO₂, za zmínku stojí říct, že na emise CO₂ z jaderné energie se podílejí uhlí, které mají 2,7%.



Graf č.5 Přímé a nepřímé emise CO₂ z jaderné elektrárny. (zdroj: IAEA, 1995)

4.2 Ukládání jaderného odpadu

Žadná lidská činnost se neobejde bez produkce odpadů, týká se to také i jaderné energetiky. Země EU každoročně produkuje 2 miliardy tun odpadu všeho druhu. Z toho je 35 milionů tun klasifikováno jako "nebezpečný odpad" (pesticidy, asbest, těžké kovy atd.) (www.cez.cz²). Na rozdíl od jiných průmyslových odpadů, které jsou jedovaté nebo jinak nebezpečné pro zdraví v jakémkoliv věku, jaderný odpad svou nebezpečnost postupně ztrácí. Radionuklidy, které se nachází v použitém palivu, přeměňují na neaktivní prvky. Toto palivo obsahuje následující množství aktinidů: Pu ~ 3000 tun, np ~ 140 t, Am ~ 120 t, trvanlivé štěpné produkty: Tc - 250 t, Cs - 90 t, I - 60 tun. To by mělo být do stovek tun na vysoké úrovni výrobků nahromaděné v průběhu řízení a uspořádání jaderných zbraní. Radioaktivity těchto produktů s celkovou dlouhou životností (> 105 let) činí více než 5×10^8 Cu (Zrodnikov A., 2005).

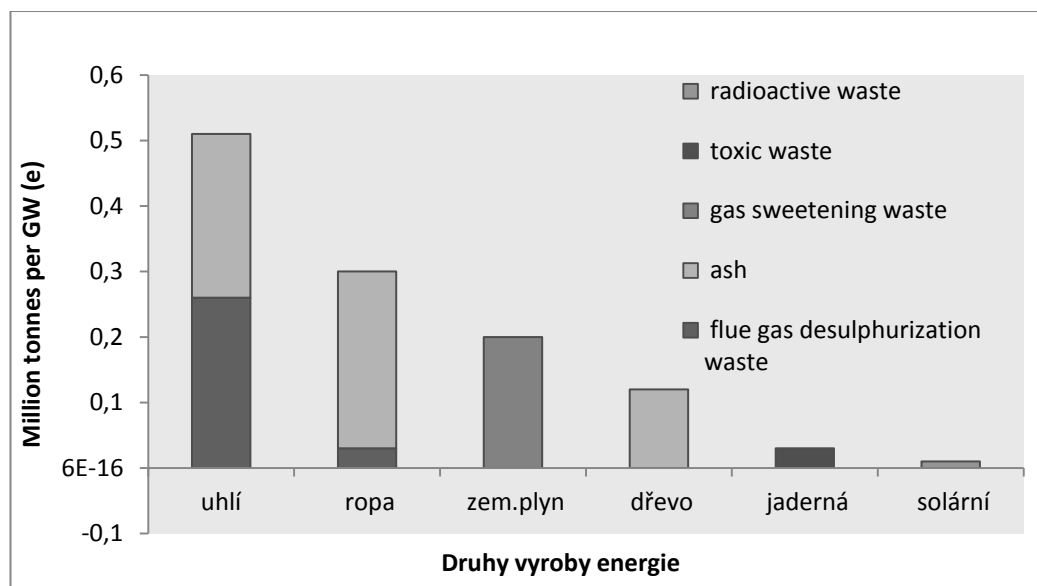
A proto izolace jaderných odpadů po dobu nejméně tisíce let je naléhavě celosvětovým problémem. Jedná se o mezinárodní problém, neboť v mnoha zemích jejich geologické podloží není vhodné pro dlouhodobou izolaci těchto odpadů. Hlavní otázkou je – jaké jsou nejlepší horniny s garantovanou dlouhodobou nízkou propustností a nejlepší iontoměniči, redoxní systémy pro snímání, uchovávání nejnebezpečnějších nuklidů (Pearce J. M., 2012; Gauthier A. et al., 2000).

Výpusti z jaderných zařízení představují pouhých 0,001 mSv. Průměrné ozaření obyvatel z přírodních zdrojů je 3 – 3,5 mSv (nejvíce z radonu z podloží a v podzemních vodách). Průměrné ozaření z umělých zdrojů, tj. z těch, co člověk vytváří sám, představuje jednu šestinu z celkového ozaření. Z nich nejvíce přispívají lékařská ošetření a radioaktivní spad při zkouškách jaderných zbraní.

Z uvedených čísel je zřejmé, že jaderná energetika pro obyvatelstvo a plochy, kontaminované radioaktivním materiálem nepředstavuje významné nebezpečí. Ale to neznamená, že by pro nakládání s radioaktivními odpady neplatilo opatření a bezpečnostní pravidla.

Z grafu č. 6 je vidět podíl množství toxických látek a odpadu vznikajících při výrobě energie různými způsoby. Obecně platí, že znečištění závisí na úrovni nečistot z paliva. Jaderná elektrárna s výkonem 1000 MW neuvolňuje škodlivé plyny nebo jiné

znečišťující látky a produkuje ročně asi 30 tun vysoce radioaktivního vyhořelého odpadu spolu s 800 tunami nízko a středně radioaktivního odpadu (www.ucitsnadno.cz). Významné snížení objemu nízké radioaktivního odpadu lze provést zhutněním (Laciok A. et al., 2000). Za poslední desetiletí v USA pomocí této technologie byl nízko radioaktivní odpad snížen 10krát, tj. 30 m³ ročně na každém zařízení.



Graf č.6 Odpad z vybraných druhů výroby energie (zdroj: IAEA, 2000)

Existují dva způsoby, jak vyřešit problém s vysoce radioaktivním odpadem:

1. Konzervativní – použití dlouhodobých úložišť v geologickém podloží s očekávanou zaručenou izolací po dobu více než 100 000 let (Fyfe W.S., 1999).
2. Dynamické – což naznačuje přepracování vyhořelého jaderného paliva s cílem snížit celkovou životnost radioaktivity kvůli procesu transmutace aktinidů a štěpných produktů na úroveň, která umožňuje následnou konečnou likvidaci "propadlin" z přepracování dobrými a spolehlivými metodami (Laciok A. et al., 2000; Fyfe W.S., 1999).

Odpad z jaderné energie má nesporné výhody, protože jejího množství je pozoruhodně malé vzhledem k vyrobené energii. Malé množství tohoto odpadu je v podstatě izolováno od okolního prostředí.

Závěr

Energie a rozvoj jsou dvě složky, které se navzájem ovlivňují. K zajištění základních lidských potřeb je energie nenahraditelná, takže nemůžeme ji vynechat v boji proti hladu, chudobě, nemocem. Za zmínku stojí říct, že pro rozvojové země energie důležitá jako základní podmínka pro další rozvoj.

Jsem optimista a neveřím, že přírodní zdroje energie budou brzy u konce. V každém případě, až do poloviny tohoto století, hlavním zdrojem energie, který zajistí udržitelný rozvoj lidstva, zůstane energie fosilních paliv. Role jaderné energie v tomto období – je stabilizace energetické situace ve světě, která je velmi složitá.

Nerovnoměrné rozdělení přírodních zdrojů ve světě dělá tu či jinou země hosti převažující množství tohoto bohatství. Tím pádem, je energetická otázka se mísí i v politice. Jaderná energie může uklidnit každého, kdo si není jistý ve své energetické současnosti a budoucnosti. Je to určitě jediný zdroj energie, který může zajistit udržitelný rozvoj ve světě.

Lidská zkušenost ukazuje, že všechny známé zdroje energie jsou nějakým způsobem napomohají lidem najít své místo v procesu života. Navzdory tomu, že jaderná energie bude hrát hlavní roli v budoucnu, nevylučuje se možnost, že lidstvo bude vyvíjet alternativní způsoby výroby energie. Především solární, větrnou, vodní, energie biomasy, které mají své nepopíratelné výhody a možná jsou konkurenceschopné před jadernou energií. To vše má právo koexistovat v harmonii.

Bezpečné a spolehlivé zásobování elektrickou energií je pro každou moderní ekonomiku životně důležité. Podle průzkumu na celém světě stoupla od roku 1980 spotřeba energie o 50 % (www.cez.cz). Krytí takového nárůstu vyžaduje "vybalancování" nákladů na výrobu elektrické energie, bezpečnosti provozu, požadavků na ochranu životního prostředí a dostupnost vhodných zdrojů.

V současné době na světovém trhu roste cena na ropu a zemní plyn, a je jasné, že tyto ceny nebudou klesat. Taková situace by mohla vést ke zhroucení ekonomik svých jednotlivých států. Například v USA, cena plynu je dnes tak vysoká, že chemický průmysl ztrácí svou konkurenční výhodu na světovém trhu. V jiných zemích takže hodně problémů souvisejících s vyčerpáním neobnovitelných zdrojů a rostem cen. V

tomto kontextu alternativou může být pouze jaderná energie. Navzdory skutečnosti, že toto odvětví je velmi složité, kapitálově náročné, vyžadující zvláštní bezpečnostní opatření, je to stále ziskový zdroj energie.

Jaderná energie umožňuje pokrýt rostoucí poptávku po energii za rozumné náklady. Proto má velký potenciál i v rozvojových zemích.

V tomto ohledu, jaderná energie je kvalitativně odlišný od jiných spotřebních zdrojů energie a je třeba je považovat za plně udržitelnou ve všech ohledech. Dále nevyhnutelné meteorologické eroze neustále myjou uran z hor přes řeky do moře, čímž se regeneruje všudypřítomné mořské zdroje uranu, které jsou skutečně obnovitelné.

Moderní jaderné elektrárny patří z hlediska vlivu na životní prostředí mezi nejšetrnější zdroje výroby elektrické energie. Při jejich provozu nevznikají skleníkové plyny, nespotebovává se kyslík ani neobnovitelné suroviny. Program environmentální politiky založen na prevenci a na trvalém zlepšování vztahu k ochraně životního prostředí. To, spolu se schopností levné výroby elektřiny v podmínkách postupného vyčerpávání fosilních paliv, jsou důvody pro nezastupitelné místo jaderné energetiky v energetickém mixu výroby elektrické energie.

Seznam literatury:

- Abdel Rahman R. O., Ibrahim H. A. and Hung Yung-Tse, Liquid Radioactive Wastes Treatment: A Review, *Water* №3, 2011, pp 551-565
- Adamantiades A. and Kessides I., Nuclear power for sustainable development: Current status and future prospect, *Energy policy*, № 37, 2009, pp 5149-5166
- Ahearne John F., Budoucnost jaderné energie, *Vesmír* 74, 1995/8, p 431
- Apergis N., Payne J., Menyah K., Wolde-Rufael Y., On the causal dynamics between emissions, nuclear energy, renewable energy, and economic growth, *Ecological Economics* 69, 2010, pp 2255–2260
- Bailly du Bois P., Laguionie P., Boust D., Korsakissok I., Didier D., Fiévet B., Estimation of marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2011, pp 1-8
- Balonov M.I., The Chernobyl Forum: major findings and recommendations, *Journal of Environmental Radioactivity* 96, 2007, pp 6-12
- Cardis E., Hatch M., The Chernobyl Accident d An Epidemiological Perspective, *Clinical Oncology* 23, 2011, pp 251-260
- Chino M., Nakayama H., Nagai H., Terada H., Katata G., Yamazawa H., Preliminary estimation of release amounts of ¹³¹I and ¹³⁷Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the atmosphere, *Journal of Nuclear Science and Technology*, №48, 2011, pp 1129–34
- De Cort M., Dubois G., Fridman Sh.D., Germenchuk M.G., Izrael Yu.A., Janssens A., Jones A.R., Kelly G.N., Kvasnikova E.V., Matveenکو I.I., Nazarov I.M., Pokumeiko Yu.M., Sitak V.A., Stukin E.D., Tabachny L.Ya., Turov S.Yu., Avdyushin S.I., Atlas of Caesium Deposition on Europe after the Chernobyl Accident European Commission report EUR 16737, Luxembourg, 1998

- Diaz-Maurin F., Giampietro M., A “Grammar” for assessing the performance of power-supply systems: Comparing nuclear energy to fossil energy, *Energy*, №49, 2013, pp 162-177
- IAEA, 1995. International Atomic Energy Agency. Nuclear power: an overview in the context of alleviating greenhouse gas emissions, Vienna, Austria
- IAEA, 2012. International Atomic Energy Agency. The Database on Nuclear Power Reactors. Power Reactor Information System, Vienna, Austria
- Fyfe W.S., Nuclear waste isolation: an urgent international responsibility, *Engineering Geology*, №52, 1999, pp 159–161
- Gauthier A., Le Coustumer P., Motelica M., Donard O.F.X., Real time alteration of a nuclear waste glass and remobilization of lanthanide into an interphase, *Waste Management*, №20, 2000, pp 731-739
- Geras'kin S.A., Fesenko S.V., Alexakhin R.M, Effects of non-human species irradiation after the Chernobyl NPP accident, *Environment International*, Volume 34, 2008, pp 880-897
- Johnston K., Krivoruchko K., Lucas N., Ver Hoef J. M., Using Arcgis Geostatistical Analyst, 2001, ESRI Press, pp 316
- Kawamura H., Kobayashi T., Furuno A., In T., Ishikawa Y., Nakayama T., Shima S. and Awaji T., Preliminary numerical experiments on oceanic dispersion of ¹³¹I and ¹³⁷Cs discharged into the ocean because of Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster, *Journal Nuclear Science Technology*, №48, 2011, pp 1349–56
- Kolektiv autorů, Velká kniha o energii, L.A. Consulting Agency, 2001
- Kozubov G.M. and Taskaev A.I., The features of morphogenesis and growth processes of conifers in the Chernobyl nuclear accident zone, *Radiation biology. Radioecology* № 47, 2007, pp 204–223
- Laciok A., Marková L., Vokál A., Co s vyhořelým jaderným odpadem?, *Vesmír*, №79, 2000

- Livingston, H.D. and Povinec, P.P., Anthropogenic marine radioactivity, *Ocean & Coastal Management*, №43, vol.8-9, 2000, pp 689-712
- Livingston, H.D. and Povinec, P.P., Millennium perspective on the contribution of global fallout radionuclides to ocean science, *Health Phys.*, №82, 2002, pp 656-668
- Matsuda N., Yoshida K., Nakashima K., Iwatake S., Morita N., Ohba T., Yusa T., Kumagai A., Ohtsuru A., Initial activities of a radiation emergency medical assistance team to Fukushima from Nagasaki, *Radiation Measurements*, 2013, pp 1-4
- McNeil B., The costs of introducing nuclear power to Australia, *Political Economy* 2007, № 59, pp 5–29
- NEA, Nuclear energy outlook, 2008, str. 4
- Passerini S. and Kazimi M., Sustainability Features of Nuclear Fuel Cycle Options, *Sustainability* №4, 2012, pp 2377-2398
- Pearce J. M., Limitations of Nuclear Power as a Sustainable Energy Source, *Sustainability* 4, 2012, pp 1173-1187
- Petroski R. and Wood L., Sustainable, Full-Scope Nuclear Fission Energy at Planetary Scale, *Sustainability* №4, 2012, pp 3088-3123
- Povinec, P.P., Hirose K., Honda T., Ito T., Scott E.M., Togawa O., Spatial distribution of ^3H , ^{90}Sr , ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ in surface waters of the Pacific and Indian Ocean – GLOMARD database, *Journal of Environmental Radioactivity*, №76, vol.1-2, 2003, pp 113-137
- Rahu M., Health effects of the Chernobyl accident: fears, rumours and the truth, *European Journal of Cancer*, Volume 39, 2003, pp 295–299
- Rashad S.M. and Hammad F.H., Nuclear power and the environment: comparative assessment of environmental and health impacts of electricity-generating systems, *Applied Energy*, №65, 2000, pp 211-229

- Rogner M., Riahi K., Future nuclear perspectives based on MESSAGE integrated assessment modeling, *Energy Strategy Reviews*, 2013, pp 1-10
- Srinivasan T.N., Rethinaraj Gopi T.S., Fukushima and thereafter: Reassessment of risks of nuclear power, *Energy Policy*, №52, 2013, pp 726–736
- Suzuki T., Energy and nuclear energy policy in Japan after the 3/11 Fukushima nuclear accident. In: *Proceedings of the Yomiuri-IEEJ Joint International Symposium on the Best Energy Portfolio and the Nuclear Power*, Japan Atomic Energy Commission; 2011
- Tichomirov F.A. and Shcheglov A.I., Main investigation results on the forest radioecology in the Kyshtym and Chernobyl accident zones, *Sci Total Environ* №157, 1994, pp 45–57
- Wang Q., Chen X., Yi-chong X., Accident like the Fukushima unlikely in a country with effective nuclear regulation: Literature review and proposed guide lines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, №17, 2013, pp 126–146
- Zrodnikov A., Gulevich A., Chekounov V., Dedoul A., Novikova N., Tormyshev I., Orlov Y., Pankratov D., Roussanov A., Smetanin E., and Troyanov V., Nuclear waste burner for minor actinides eliminations, *Progress in Nuclear Energy*, vol. 47, 2005, pp 339-346
- Zvonova I., Krajewski P., Berkovsky V., Ammann M., Duffa C., Filistovic V., Homma T., Kanyar B., Nedveckaite T., Simon S.L., Vlasov O., Webbe-Wood D., Validation of ¹³¹I ecological transfer models and thyroid dose assessments using Chernobyl fallout data from the Plavsk district, Russia, *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 101, 2010, pp 8–15
- UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, effects and risks of ionizing radiation (1988 Report to the General Assembly, with Annexes), 1988
- UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, (2000 Report to the General Assembly, with Annexes); Annex J.

Sources and Effects of Ionizing Radiation, vol. II. United Nations, New York, 2000, pp 451-566

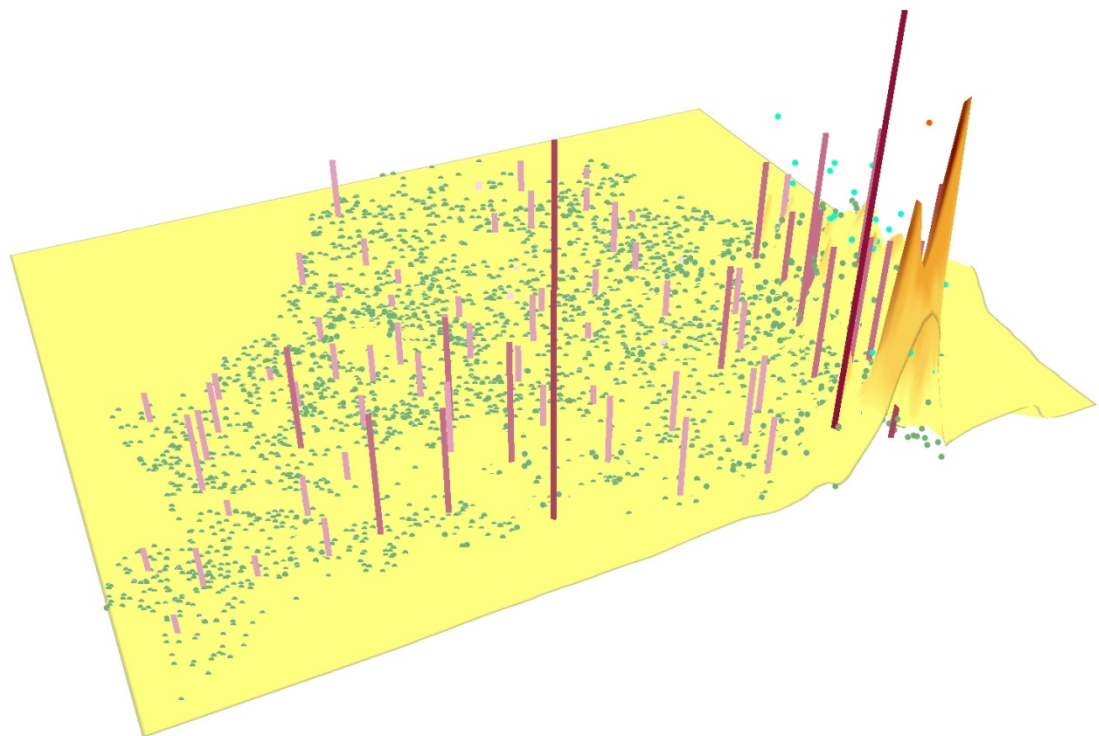
- WHO. World Health Organisation, 2006. Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes, Geneva.
- Nuclear Energy Agency, 2002. Nuclear Energy and the Kyoto Protocol

Elektronické zdroje:

- Boj proti jaderné energii pomocí paragrafů. OIŽP. Dostupné: <http://oizp.cz/?p=5519&lang=cz>
- Chernobyl otdychaet od ljudej? ITAR TASS, 2013. Dostupné: http://www.tass-ural.ru/analytics/chernobyl_otdykhaet_ot_lyudey.html
- Health Sciences Council, Dostupné: <http://www.scj.go.jp/en/report/houkoku-110502-7.pdf>
- IAEA, 2011. International fact finding expert mission of the Fukushima Dai-ichi NPP accident following the great east j
- Japan earthquake and tsunami. Dostupné: http://www-pub.iaea.org/MTCD/meetings/PDFplus/2011/cn200/documentation/cn200_Final-Fukushima-Mission_Report.pdf
- IEA, 2011. Dostupné: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/key_world_energy_stats-1.pdf
- Jaderná energie. Dostupné: http://www.czp.cuni.cz/info/EU/Energetika/jadern%C3%A1_energie.htm
- Klasifikace nehod na jaderných reaktorech. Dostupné: <http://molphys.ustu.ru/Study/Atom/cap6.html#6.2>
- Nakládání s odpady. ČEZ. Dostupné: ²<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/zvazovana-dostavba-elektrarny-temelin/nakladani-s-odpady.html>

- Nuclear power in Mexico. WNA, 2012. Dostupné: <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/Mexico/#.UfPXTI2554A>
- Technologie a zabepečení. ČEZ. Dostupné: ¹<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/technologie-a-zabezpeceni/2.html>
- USEIA, 2012. International Energy Statistics. Dostupné :
[/http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfmS](http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfmS)
- Nuclear Reactor Types, 2005. Dostupné:
http://large.stanford.edu/courses/2013/ph241/kallman1/docs/nuclear_reactors.pdf
- Nuclear Power in China. World Nuclear Association. Dostupné:
<http://www.world-nuclear.org/info/default.aspx?id=320&terms=china%20nuclearS>
- Nuclear power reactors. WNA, 2013. Dostupné: <http://world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Nuclear-Power-Reactors/#.UfPXxY2554A>
- Odpady z energetiky. Dostupné:
http://www.ucitsnadno.cz/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=92&category_id=9&option=com_virtuemart&Itemid=61
- Ozverevsheje prostranstvo. Vokrus světa, 2011. Dostupné:
<http://www.vokrugsveta.ru/vs/article/7389/>
- Reaktory III generace. OSEL, 2008. Dostupné:
<http://www.osel.cz/index.php?clanek=3531>
- Reaktory IV generace. OSEL, 2008. Dostupné:
<http://www.osel.cz/index.php?clanek=3568>
- Stupnice závažnosti nehod v jaderných zařízeních. Dostupné: <http://www.rivne-today.com>
- Česká nukleární společnost. Dostupné: <http://www.csvts.cz/cns>

Příloha č.1 – Graf vyskytu Cs^{137} v půdě v okolí Běloruska a jeho vliv na rakovinu štítné žlázy



Rakovina štítné žlázy

Výskyt [1/1000]

- 0 - 0.05
- 0.05 - 0.4
- 0.4 - 1
- 1 - 1.5
- 1.5 - 2

3D pohled: CS137

[Bq/kg]

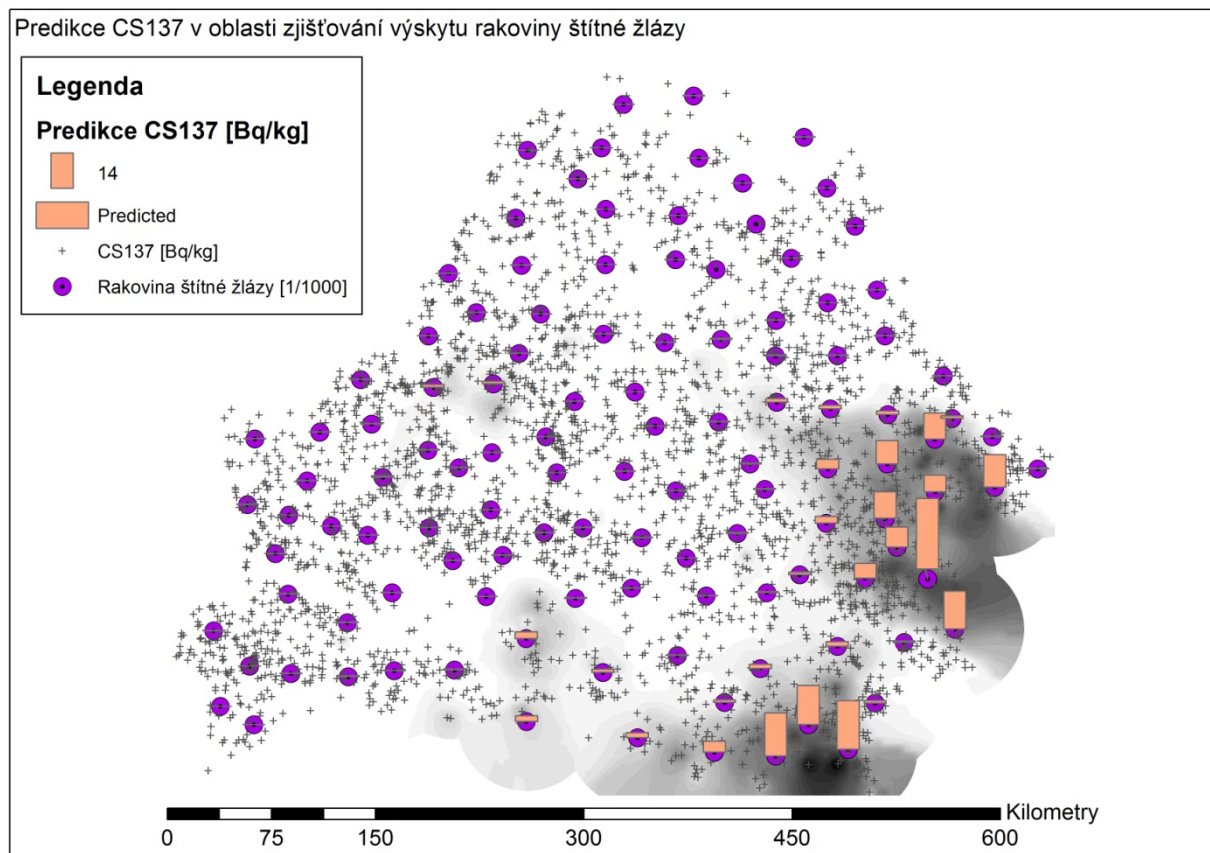
- 0 - 35
- 35 - 70
- 70 - 100
- 100 - 140
- 140 - 200

IDW: CS137

<VALUE>

- 0 - 35
- 35 - 70
- 70 - 100
- 100 - 140
- 140 - 200

Příloha č.2 – Vyskyt rakoviny štítné žlázy v oblasti Běloruska



Zdroj : vlastní zpracování v GISu, Johnston K. et al., 2001

Příloha č.3 – Tabulka vyskytu rakoviny štítné žlázy a její odhad na 1000 obyvatelů v Bělorusku

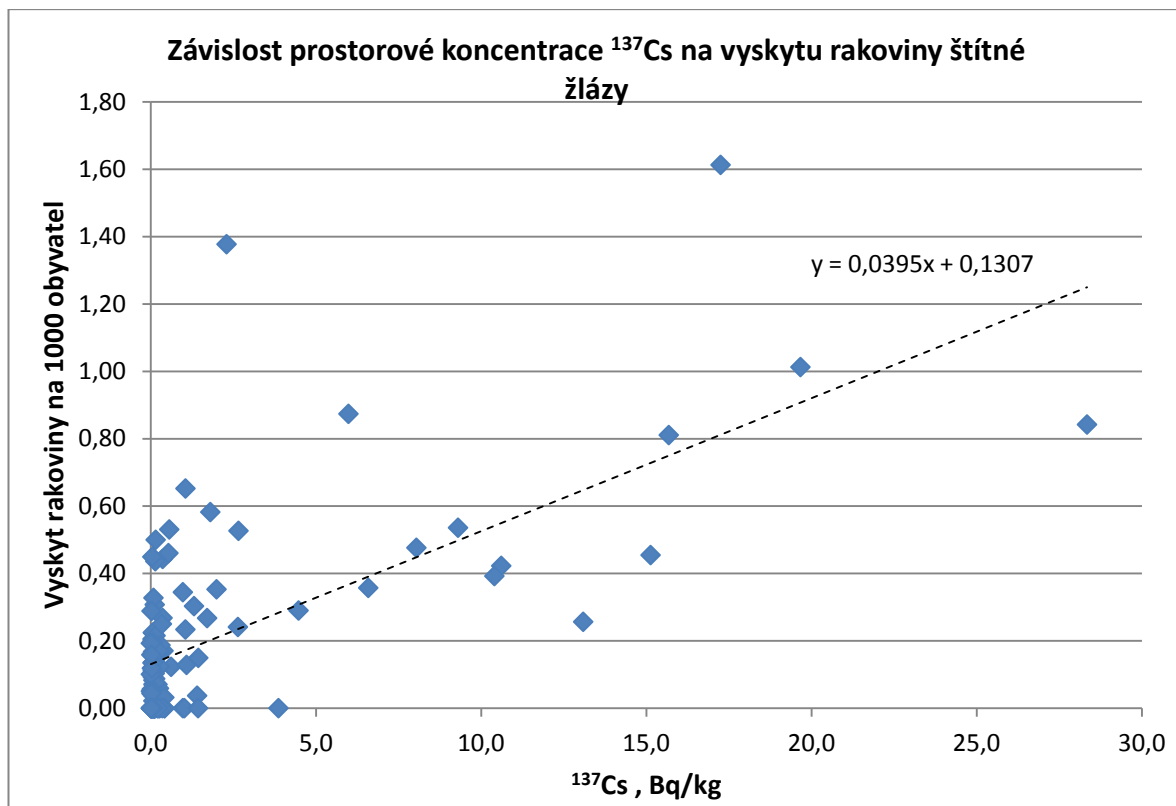
Město	Počet případů	Počet obyvatelů	¹³⁷ Cs, Bq/kg	Vyskyt 1/1000
Baranovichi	7	50113	0,1	0,14
Bereza	3	17053	0,3	0,18
Brest	6	72261	0,1	0,08
Gantsevichi	3	9760	0,1	0,31
Dragichin	2	11744	0,4	0,17
Zhabinka	1	5964	0,1	0,17
Ivanovo	6	12006	0,1	0,50
Ivatsevichi	2	16248	0,1	0,12
Kamenets	1	9704	0,1	0,10
Kobrin	2	21699	0,1	0,09
Luninets	12	22790	2,7	0,53
Lyahovichi	0	8203	0,1	0,00
Malorita	0	6738	0,1	0,00
Pinsk	21	47401	0,4	0,44
Pruzany	1	14189	0,2	0,07
Stolin	23	16698	2,3	1,38
Bragin	8	7900	19,7	1,01
Buda-Koshelevo	9	10300	6,0	0,87
Vetka	8	9500	28,3	0,84
Gomel	74	139459	0,6	0,53
Dobrush	5	11000	15,1	0,45
Elsk	2	6900	4,5	0,29
Zhitkovichi	4	13200	1,3	0,30
Zhlobin	5	21400	1,0	0,23
Kalinkovichi	5	18700	1,7	0,27
Korma	3	7100	10,6	0,42
Lelchitsy	3	8500	2,0	0,35
Love	3	4600	1,0	0,65
Mozyr	11	31948	1,0	0,34
Narovlya	10	6200	17,2	1,61
October	0	4600	0,2	0,00
Petrikov	3	11200	0,4	0,27
Rechitsa	17	29200	1,8	0,58
Rogachev	4	16600	2,6	0,24
Svetlogorsk	11	23900	0,5	0,46
Khoiniki	9	11100	15,7	0,81
Chechersk	3	6300	8,0	0,48
Berestovets	0	4251	0,1	0,00
Volkovysk	4	17943	0,1	0,22
Voronovo	0	8256	0,1	0,00
Grodno	11	82069	0,1	0,13
Dyatly	1	8149	0,6	0,12
Zelva	0	5604	0,1	0,00
Iva	1	7790	1,1	0,13
Korolevichi	1	5820	0,2	0,17

Lida	2	34040	0,2	0,06
Město	Počet případů	Počet obyvatelů	¹³⁷ Cs, Bq/kg	Vyskyt 1/1000
Mosty	2	8917	0,1	0,22
Novogrudok	2	11789	0,3	0,17
Ostrovtsy	1	6362	0,0	0,16
Oshmyany	0	8441	0,1	0,00
Svisloch	2	6107	0,1	0,33
Slonim	7	16048	0,1	0,44
Smorgon	1	14287	0,1	0,07
Tschuchin	1	8339	0,1	0,12
Berezino	1	8121	0,3	0,12
Borisov	1	46110	0,1	0,02
Vilia	1	13971	0,1	0,07
Volozin	0	10260	1,0	0,00
Dzerzhinsk	2	14846	0,1	0,13
Kletsk	4	8902	0,0	0,45
Kopyl	0	8381	0,1	0,00
Krupki	0	7658	0,4	0,00
Logoysk	0	9720	0,1	0,00
Lyuban	1	11449	0,1	0,09
Minsk	43	412863	0,1	0,10
Molodechno	2	33226	0,1	0,06
Myadel	1	7384	0,1	0,14
Nesviz	2	9740	0,1	0,21
Puhovichi	4	18577	0,1	0,22
Slutsk	4	23849	0,3	0,17
Smolevichi	1	26380	0,1	0,04
Soligorsk	7	37454	0,3	0,19
Starye Dorogy	0	6205	0,1	0,00
Stolbtsy	2	10267	0,1	0,19
Uzda	1	6054	0,1	0,17
Cherven	1	8991	0,1	0,11
Belynichi	1	6700	1,4	0,15
Bobruysk	2	62900	0,4	0,03
Byhov	0	12300	3,9	0,00
Glusk	0	4500	0,1	0,00
Gorki	0	12100	0,1	0,00
Kirovsk	1	5900	0,2	0,17
Klimovichi	0	8200	0,3	0,00
Klichev	0	5100	0,4	0,00
Kostukovichi	2	7800	13,1	0,26
Krasnopolie	2	5600	6,6	0,36
Krichev	0	11500	1,0	0,00
Krugloe	1	4000	0,3	0,25
Mogilev	3	81100	1,4	0,04
Mstislav	0	6500	0,2	0,00
Osipovichi	1	13200	0,1	0,08
Slavgorod	3	5600	9,3	0,54
Hotimsk	0	3400	0,3	0,00
Chausy	0	6500	1,4	0,00
Cherikov	2	5100	10,4	0,39

Shklov	0	9400	0,2	0,00
Beshenkovichi	0	5300	0,0	0,00
Město	Počet případů	Počet obyvatelů	¹³⁷ Cs, Bq/kg	Vyskyt 1/1000
Braslav	2	6935	0,0	0,29
Verhnedvinsk	0	6525	0,0	0,00
Vitebsk	5	89151	0,0	0,06
Glubokoe	0	10101	0,0	0,00
Gorodok	0	7490	0,0	0,00
Dokshitsy	0	7410	0,0	0,00
Dubrova	0	5641	0,0	0,00
Lepel	1	9933	0,0	0,10
Liozno	0	4946	0,0	0,00
Miory	0	6763	0,0	0,00
Orsha	2	39766	0,0	0,05
Polotsk	2	45849	0,0	0,04
Postavy	0	9688	0,0	0,00
Rossony	0	3193	0,0	0,00
Senna	1	8442	0,0	0,12
Tolochin	0	8859	0,0	0,00
Usha	0	4924	0,0	0,00
Chashniki	2	10380	0,0	0,19
Sharkovshina	0	5052	0,0	0,00
Shumilino	1	6306	0,0	0,16

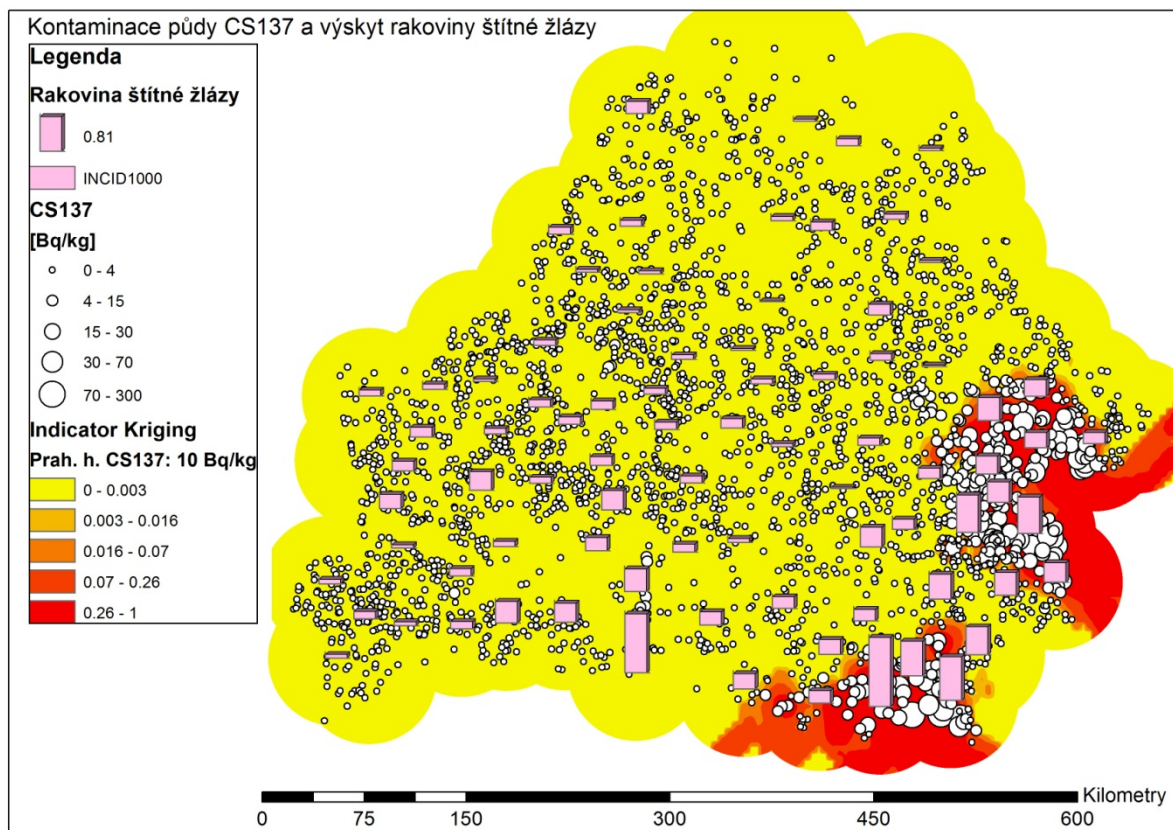
Zdroj : vlastní zpracování, Johnston K. et al., 2001

Příloha č.4 – Graf závislosti koncentrace ^{137}Cs na vyskytu rakoviny štítné žlázy



Zdroj : vlastní zpracování, Johnston K. et al., 2001

Příloha č.5 – Obrazek kontaminace půdy Cs137 a výskyt rakoviny štítné žlázy v Bělorusku



Zdroj : vlastní zpracování v GISu, Johnston K. et al., 2001