

Chernobyl: mitologia contemporânea?

1. Consequências ambientais.

São Paulo, 6 de julho de 2015

PROF. ALEXANDRE FERREIRA RAMOS
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



Introdução

Apresentamos uma descrição dos efeitos ambientais do acidente de Chernobyl. As conclusões e informações apresentadas foram baseadas em relatórios produzidos pelo Fórum Chernobyl, composto pelas seguintes agências da ONU: Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA); Organização Mundial de Saúde (WHO); Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas (UNDP); Organização para Alimentação e Agricultura (FAO); Programa Ambiental das Nações Unidas (UNEP); Escritório das Nações Unidas para Coordenação de Assuntos Humanitários (UN-OCHA); Comitê Científico das Nações Unidas para Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR); Banco Mundial; Governos da Bielorrússia, Rússia e Ucrânia. Também utilizamos artigos científicos publicados na literatura especializada e visitamos o local do acidente (de fato, a maior parte das fotografias aqui apresentadas foram tiradas por nós).

Estamos elaborando uma série de apresentações e, por esse motivo, não abordaremos aqui os detalhes referentes às causas do acidente ou seus efeitos à saúde humana. Apresentações dedicadas a esses tópicos estão em fase de preparação e apenas incluímos dados que contribuem para o entendimento dos efeitos ambientais do acidente.

Uma breve lista de referências e conceitos básicos é apresentada no último slide.

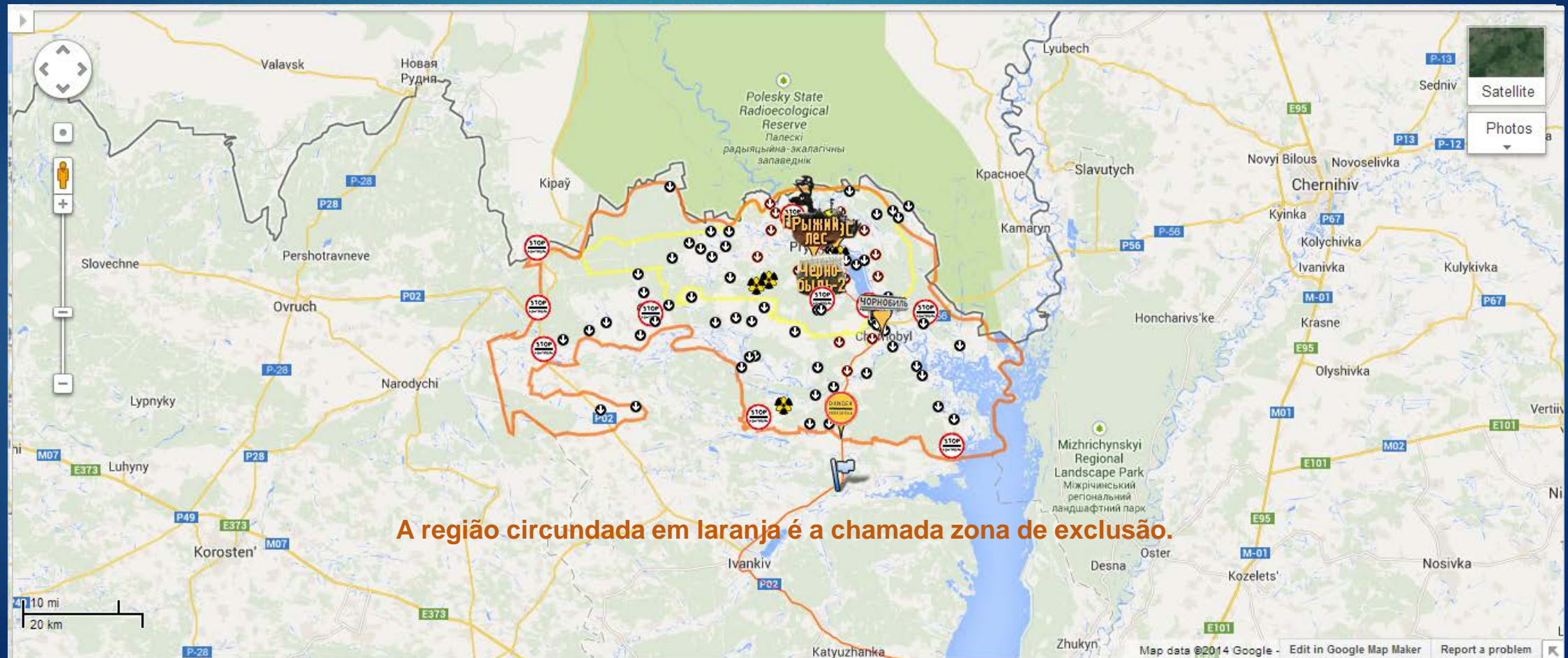
O acidente de Chernobyl foi o mais grave da indústria nuclear. Confirmaram-se a morte de 28 pessoas por efeitos imediatos de radiação aguda e outras 19 morreram entre 1987 e 2004, algumas por causas outras que não a radiação. As maiores doses de radiação foram recebidas por 1.000 pessoas que trabalhavam no local durante e logo após o acidente. Aproximadamente 600.000 pessoas atuaram na remediação dos efeitos do acidente (os chamados "liquidators") e também receberam grandes doses. Em 2002, mais de 4.000 casos de casos de câncer de tireoide em indivíduos que tinham até 18 anos na época do acidente foram detectados. A maior parte desses casos foi causada pelos elementos radioativos emitidos após o acidente de Chernobyl.

Questionar se Chernobyl consiste em uma mitologia contemporânea têm uma motivação forte: a grande diferença entre a ideia acerca dos efeitos do acidente, seja na cultura popular ou científica, e os efeitos que têm sido de fato observados.

Por exemplo, apresentamos aqui um estudo errado publicado pelo prestigioso jornal científico Nature. As conclusões do estudo eram motivadas por um viés previamente concebido por seus autores. Outro exemplo é a ideia de que Chernobyl é um lugar sem vida. Verificamos, *in loco*, que essa é uma ideia falsa. Até 2000, o reator imediatamente vizinho ao reator acidentado ainda produzia eletricidade. Atualmente, há pessoal construindo um repositório para combustível nuclear usado e uma estrutura de isolamento do reator acidentado. Cientistas de várias partes do mundo executam seus projetos de pesquisa no local e a região é aberta ao turismo. Na região do entorno do reator acidentado (a zona de exclusão) não é permitida a habitação permanente de humanos. Isso fez com que a área se tornasse um santuário para diversas espécies que voltaram a habitá-la.

Data e Local do acidente

Em 26 de abril de 1986, no reator 4 da Usina de Nuclear de Chernobyl, localizada no distrito de Pripyat, em Chernobyl, Ucrânia, antiga União Soviética. O acidente ocorreu durante um teste de segurança, em que o reator RBMK superaqueceu e uma explosão por pressão de vapor causou a ruptura do vaso do reator. Consequentemente, houve liberação de materiais radioativos (os radionuclídeos) ao ambiente durante dez dias [1].



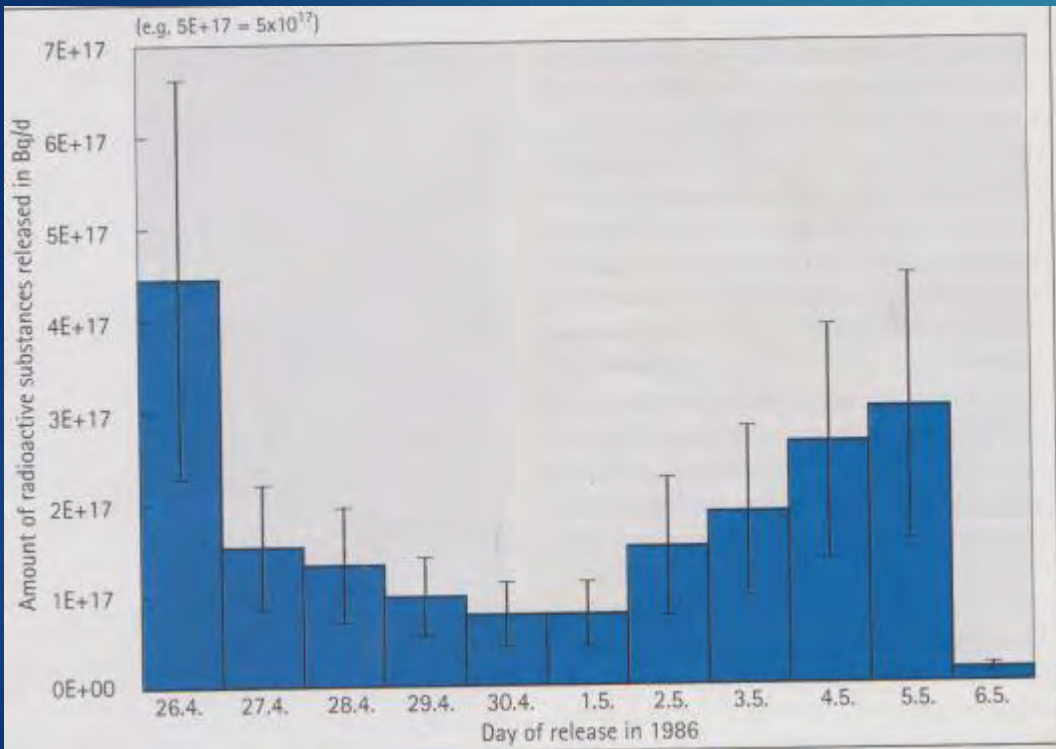
O acidente: breve descrição

- ▶ O acidente ocorreu durante um teste de segurança destinado a verificar o funcionamento do sistema de resfriamento de emergência do reator [2];
- ▶ Até então, este teste não havia sido realizado;
- ▶ Esse sistema auxiliar deveria entrar em operação em casos de perda acidental do líquido refrigerante principal;
- ▶ Como o teste ocorreu no âmbito da engenharia elétrica, o pessoal especializado na área nuclear não estava na sala de controle;
- ▶ Considera-se que a principal causa do acidente foi a insuficiência de cultura de segurança, ou seja, houve falha humana.
- ▶ É que as falhas técnicas que causaram o acidente já eram conhecidas antes do acidente e não foram corrigidas visando sua prevenção.



O reator 4 após o acidente. Ao lado direito o reator 3, que permaneceu operacional até o ano 2000.

A liberação de radionuclídeos



Quantidades de radionuclídeos liberados durante os primeiros 10 dias [2]. Note que há grande incerteza nas medidas, conforme indicado pelas barras de erro.

- ▶ Na Figura ao lado o eixo vertical indica as quantidades de radionuclídeos liberados após a explosão do reator. No eixo horizontal apresentamos as datas.
- ▶ A quantidade de radionuclídeos é apresentada em Bq/d. O Bq (leia-se Becquerel) é uma unidade de medida de radioatividade. 1 Bq indica a ocorrência de um decaimento nuclear por segundo. Por exemplo, em Cárceres, Espanha, uma amostra de 1 kg de solo contém radônio – 226, urânio – 235, tório – 232, potássio – 40, que emitem, respectivamente, 38,3, 3,06, 41,0 e 653 Bq [3].
- ▶ Em geral, a composição dos radionuclídeos emitidos corresponde à sua composição no reator. Identificamos quatro fases de emissão de radionuclídeos após o acidente:
 - ▶ Fase 1. pó composto de elemento combustível é liberado juntamente com a iodina, gases nobres e céσιο (1º. Dia).
 - ▶ Fase 2. nos próximos 5 dias a liberação de radionuclídeos decresce continuamente devido à ação de contenção do fogo no grafite do reator e cobertura do núcleo do reator.
 - ▶ Fase 3. Incremento na liberação de radionuclídeos devido a um superaquecimento do núcleo do reator > 2.000 C.
 - ▶ Fase 4. Uma queda abrupta na liberação de radionuclídeos por motivos não compreendidos por completo. Supõe-se que seja devido ao esfriamento do reator por nitrogênio.

Espalhamento dos radionuclídeos

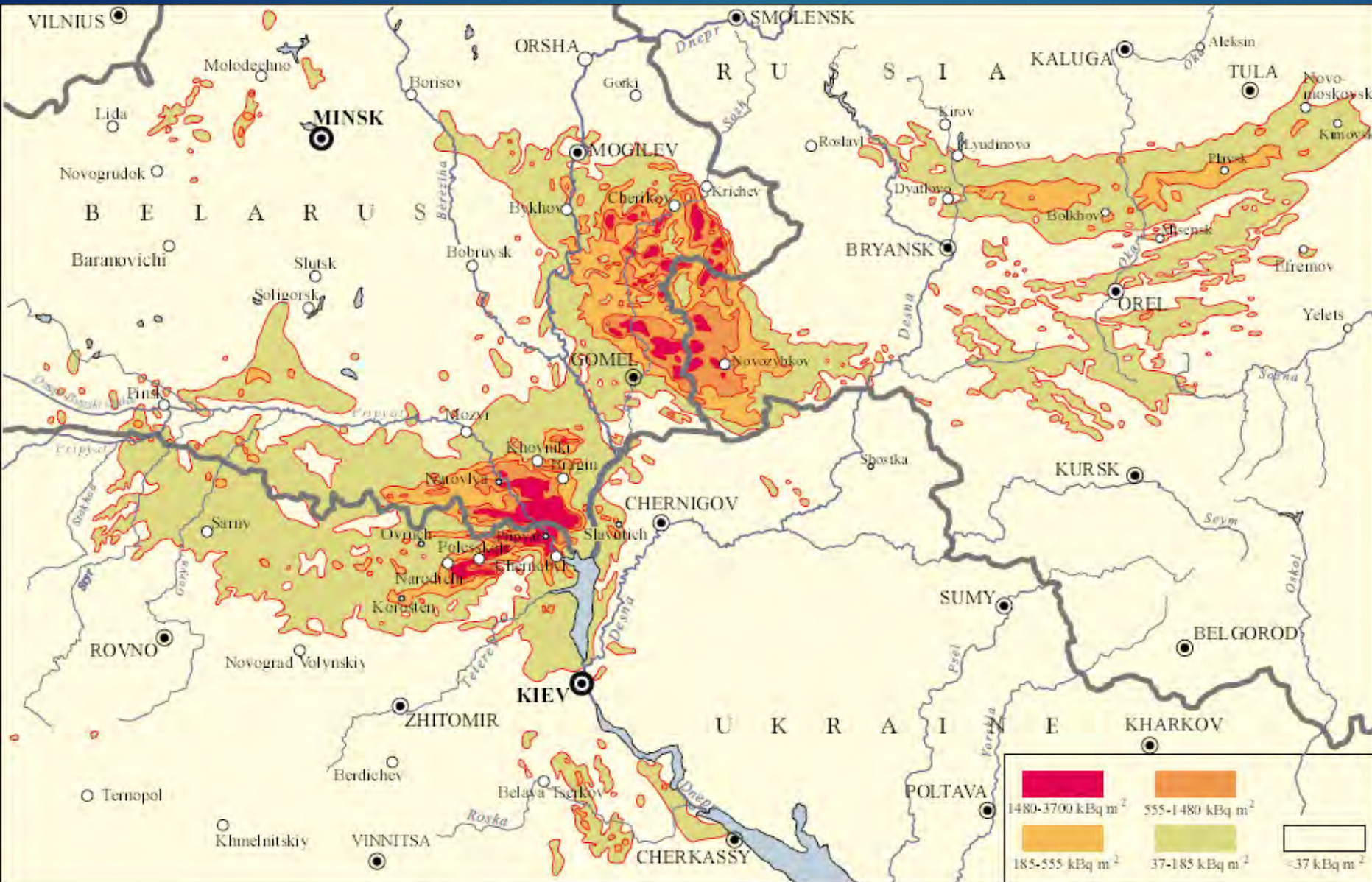
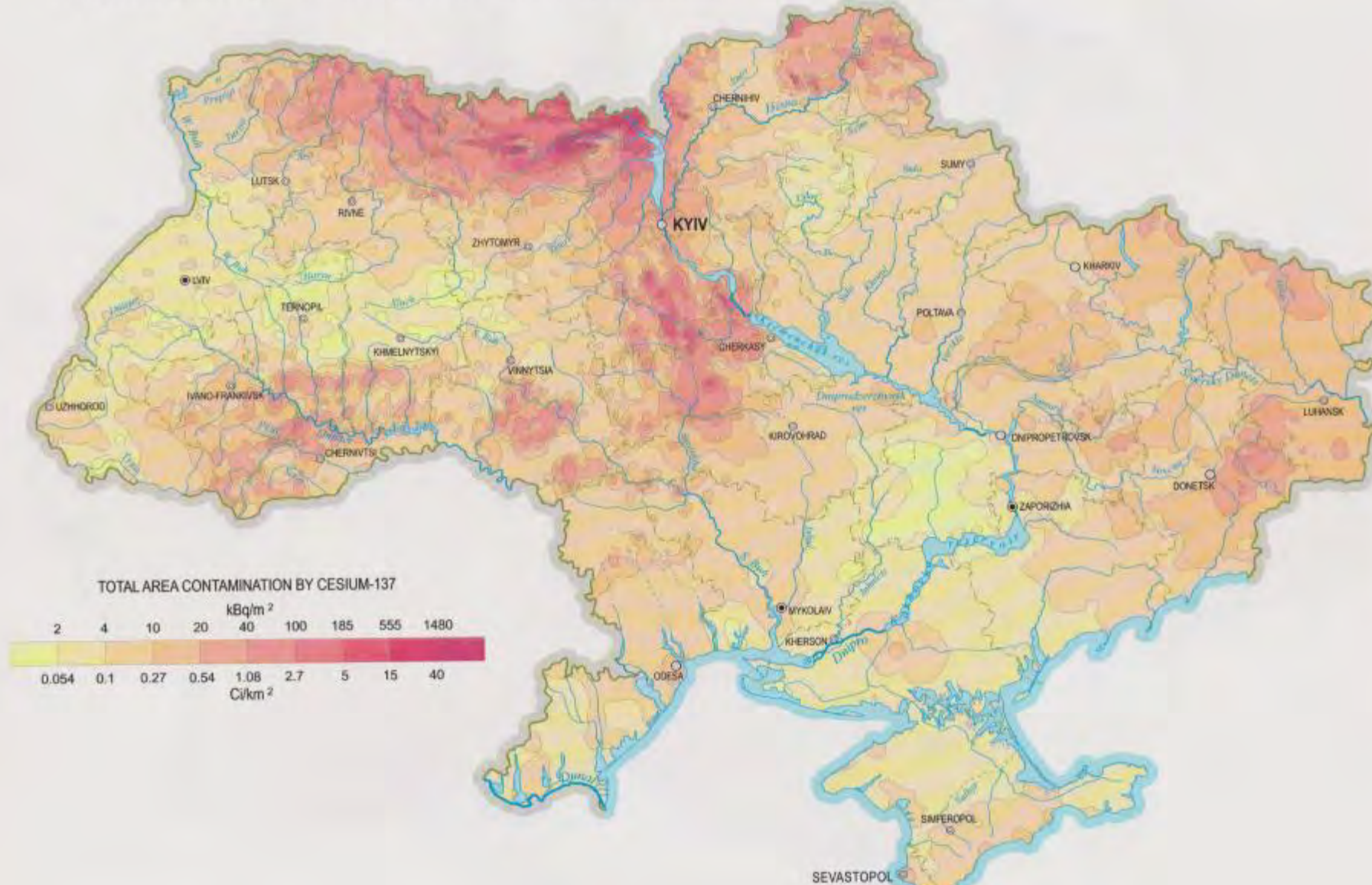


Figure VI. Surface ground deposition of caesium-137 released in the Chernobyl accident [11, 13].

- ▶ O reator 4 fica localizado na região rosada onde fica o distrito de Pripyat, Ucrânia.
- ▶ A distribuição de céσιο – 137 pelos três países mais afetados, Bielorrússia, Rússia e Ucrânia.
- ▶ O estrôncio e o plutônio liberados, que são elementos mais pesados, ficaram depositados a uma distância de até 100 km do reator acidentado.

Espalhamento dos radionuclídeos: Ucrânia

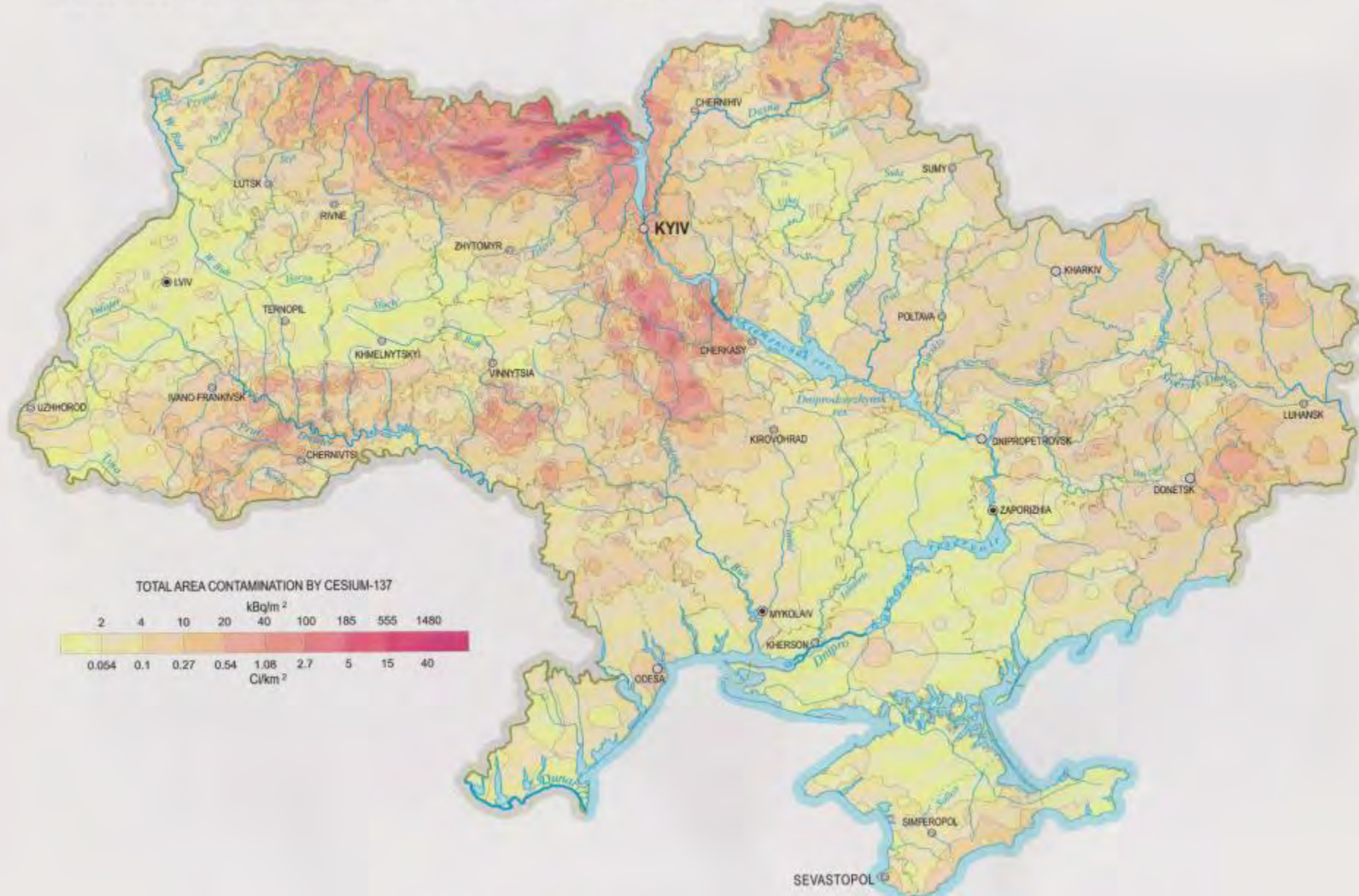
CONTAMINATION OF THE TERRITORY OF UKRAINE BY CESIUM-137 (AS OF MAY 10, 1986)



- A distribuição de césio – 137 na Ucrânia em 1986 [4].

Espalhamento dos radionuclídeos: Ucrânia

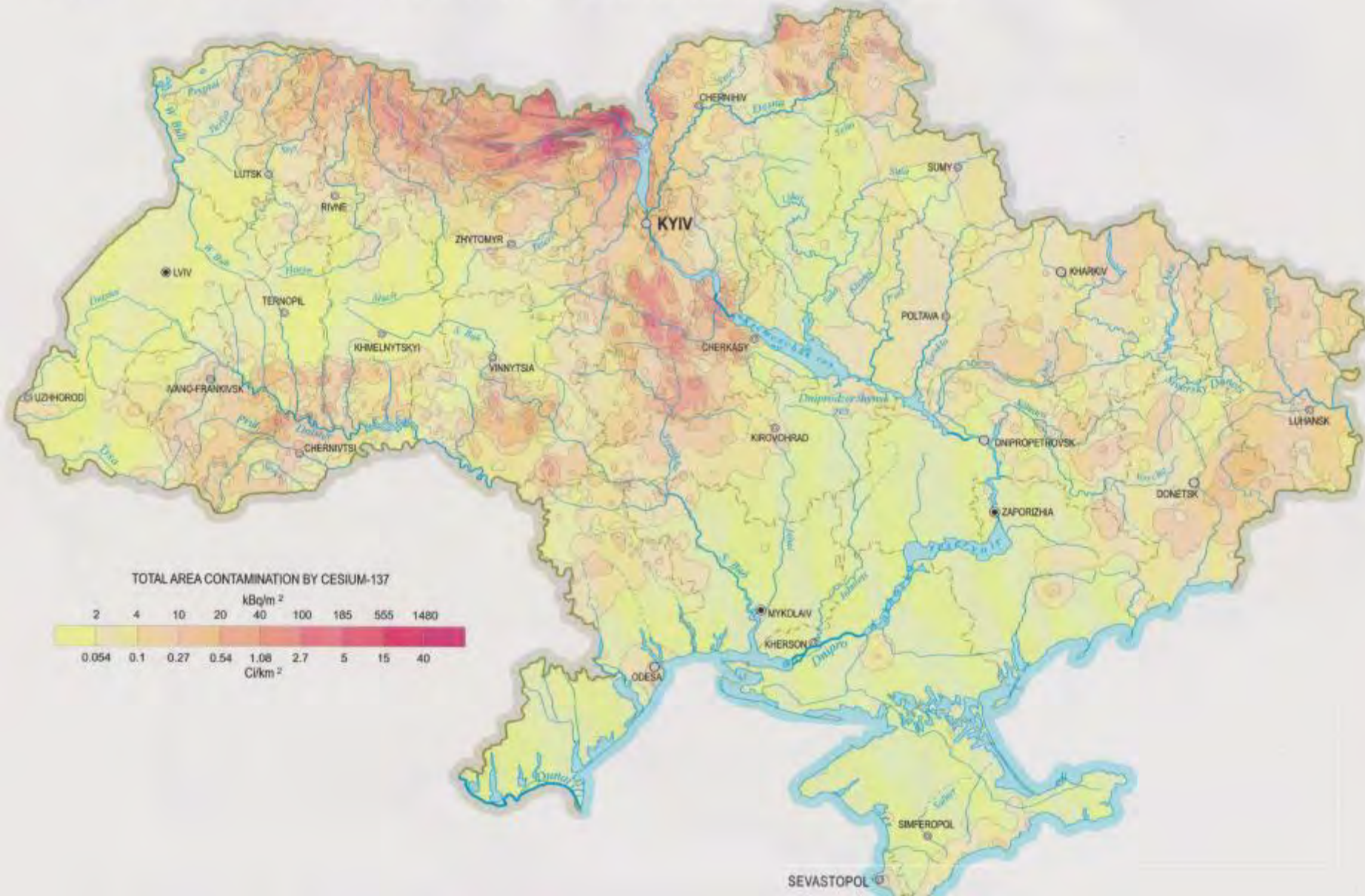
CONTAMINATION OF THE TERRITORY OF UKRAINE BY CESIUM-137 (AS OF MAY 10, 2011)



- A distribuição de césio – 137 na Ucrânia em 2011 [4].

Espalhamento dos radionuclídeos: Ucrânia

CONTAMINATION OF THE TERRITORY OF UKRAINE BY CESIUM-137 (AS OF MAY 10, 2036)



- ▶ A distribuição de césio – 137 na Ucrânia conforme previsto para 2036 [4].

Contaminação: zona urbana

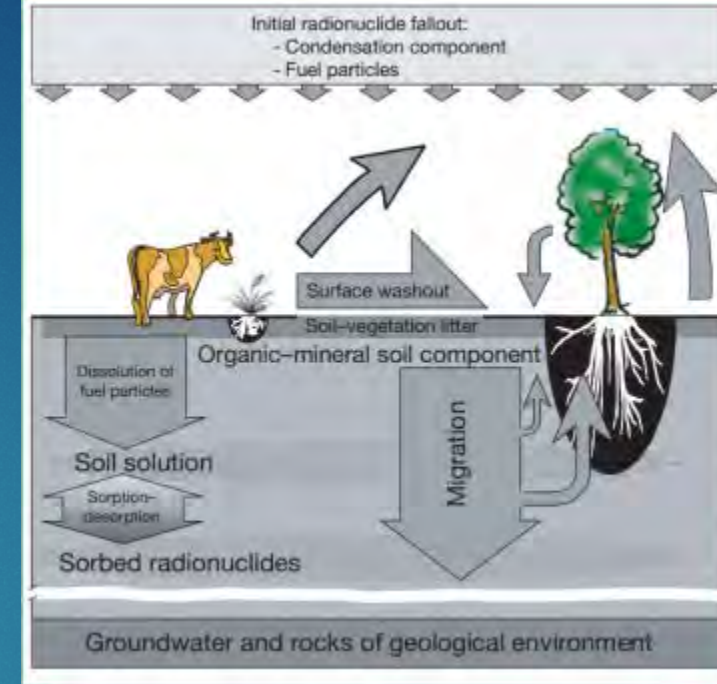
- ▶ Os radionuclídeos depositaram-se, principalmente, em áreas abertas como praças, parques, rodovias, tetos de construções e paredes. Em dias secos, os níveis de radiação mais altos eram emitidos a partir de copas de árvores, marquises, etc. Após a chuva, essas partículas eram espalhadas pelo solo ao redor dessas construções ou árvores.
- ▶ Embora fosse esperado que os principais efeitos dos radionuclídeos ocorressem na região do entorno do reator acidentado (em Pripyat e arredores), a evacuação evitou que populações humanas sofressem com essas doses.
- ▶ Processos de limpeza e remoção de solo contribuíram para minimizar os efeitos dos radionuclídeos sobre a população humana.



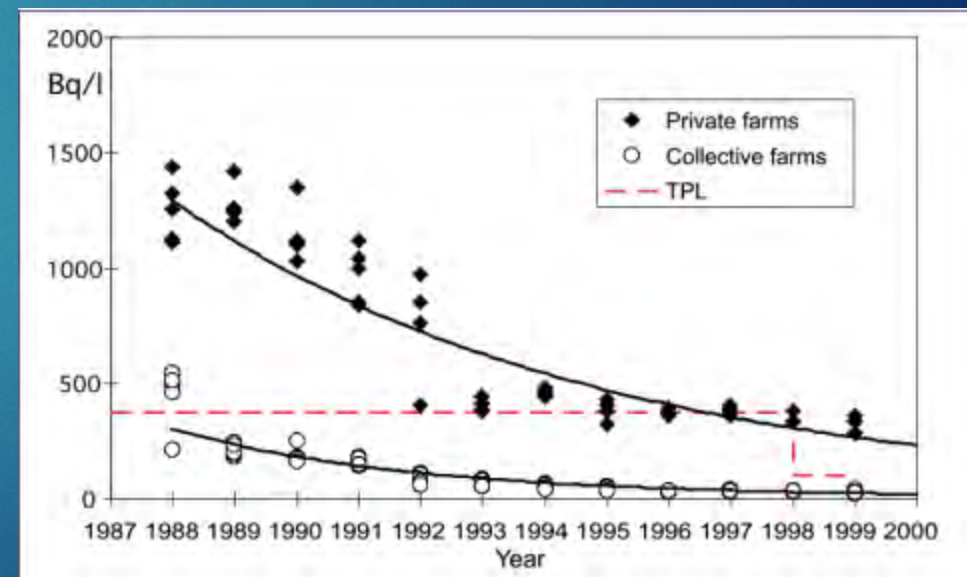
Uma imagem da cidade de Pripyat atualmente.

Contaminação: zona rural

- ▶ Imediatamente após o acidente, a radioatividade de plantas e animais de pasto foi causada pelo consumo de radionuclídeos depositados no solo. A iodina – 131 [5] foi o principal motivo de preocupação durante os dois primeiros meses, quando os decaimentos radioativos reduziram suas quantidades a valores insignificantes.
- ▶ Todavia, a iodina das pastagens foi absorvida por animais destinados a produção de laticínios. Esses laticínios foram consumidos pela população enquanto ainda continham iodina. Essa iodina, acumulou-se nas tireoides, especialmente de indivíduos que, na época do acidente, tinham entre 0 e 18 anos.
- ▶ Mais de 4.000 casos de câncer de tireoide foram detectados entre aqueles indivíduos na Bielorrússia, Rússia e Ucrânia e consideram-se que esses casos devam ser atribuídos à radiação emitida após o acidente de Chernobyl.
- ▶ Em outras regiões da Europa, medidas de precaução foram tomadas: distribuiu-se iodo, que acumulou-se nas tireoides, saturando-as desse elemento; destarte, a iodina não acumulou-se e foi eliminada do corpo humano por processos naturais.
- ▶ Por sua maior meia-vida, elementos de Césio – 137 ainda são encontrados em produtos agrícolas produzidos na região.
- ▶ Os níveis de emissão por elementos de maior meia-vida (estrôncio, plutônio, amerício) são considerados insignificantes.
- ▶ Atualmente, os níveis de emissão por césio – 137 estão abaixo dos limites internacionais.
- ▶ Na figura ao lado, as fazendas privadas são de sub-existência; as coletivas eram de propriedade da URSS no período do acidente;
- ▶ Há ainda regiões limitadas que demandam medidas de remediação;



Absorção de radionuclídeos por plantas e animais



Níveis de atividade do césio – 137 no leite produzido na região de Rovno (Ucrânia). TPL: limites temporariamente permitidos.

Contaminação: áreas florestais

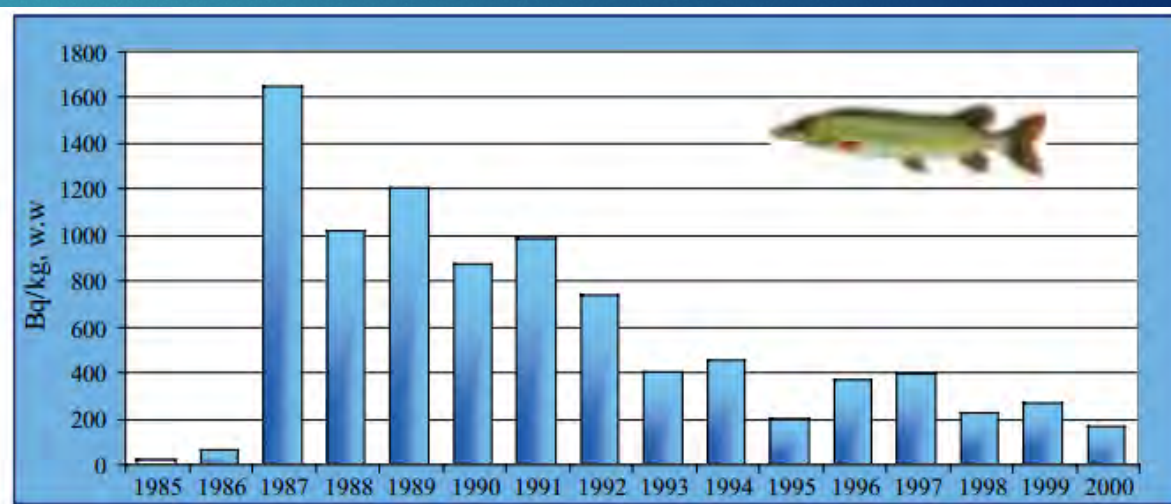
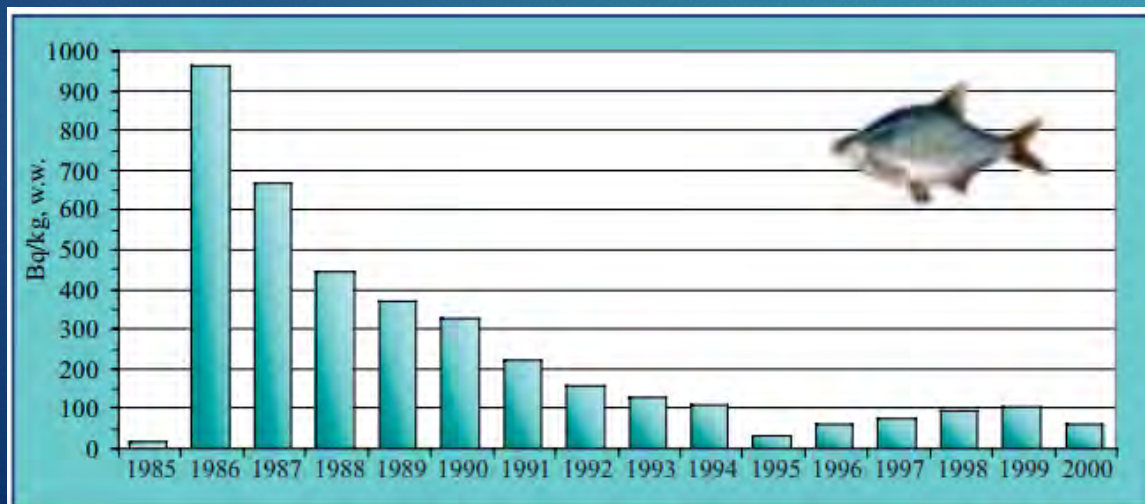
A foto ao fundo foi tirada em julho de 2014 a aproximadamente 2 km de distância do reator acidentado.

- ▶ O radionuclídeo mais presente na fauna e flora nas regiões de floresta foi o céσιο radioativo (céσιο – 137).
- ▶ Esse material é reciclado na cadeia alimentar do ecossistema florestal.
- ▶ Esses altos níveis de céσιο – 137 ocorrem principalmente em cogumelos, frutas silvestres e animais de caça.
- ▶ Em regiões em que há grande consumo de alimentos oriundos da floresta ainda haverá ingestão de céσιο – 137. Esses serão os elementos responsáveis pelas doses internas nas populações consumidoras desses alimentos.



Contaminação: ambientes aquáticos

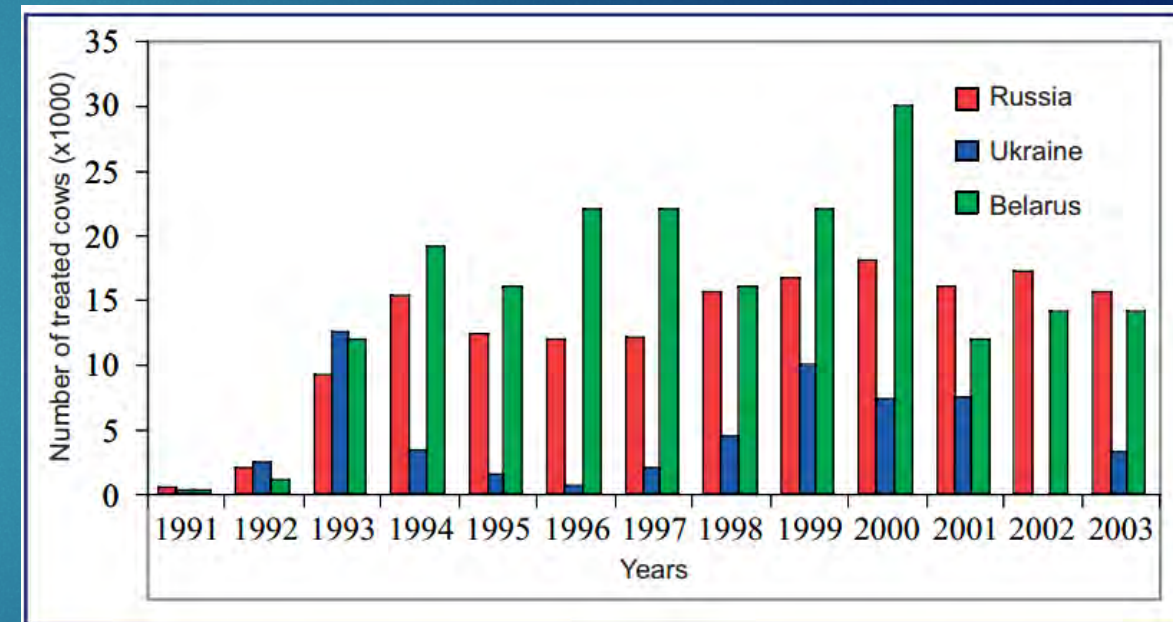
- ▶ Houve deposição de radionuclídeos liberados pelo reator 4 na superfície de diversos sistemas aquáticos do seu entorno e outras partes da Europa;
- ▶ No início, as principais preocupações eram com os sistemas de fornecimento de água potável para Kiev, Ucrânia. O principal elemento contaminante nesta fase foi a iodina – 131;
- ▶ Atualmente, os principais elementos radioativos em sistemas aquáticos são o céσιο – 137 e o estrôncio – 90, porém em baixas quantidades;
- ▶ Ao longo do tempo, houve diluição dos elementos radioativos ou sua deposição no fundo dos sistemas aquáticos;
- ▶ Isto tornou seguro o uso, para irrigação, das águas próximas à superfícies aquáticas;
- ▶ Lagos sem interligação com outros sistemas aquáticos ainda apresentam níveis mais altos de contaminação.
- ▶ Os mares Negro e Báltico, devido à grande distância de Chernobyl, e diluição, não apresentam concentrações que devem causar preocupação.



Níveis de radioatividade em peixes do reservatório de Kiev, Ucrânia. A esquerda e direita os peixes não-predadores e predadores, respectivamente. Os níveis de radioatividade são apresentados no eixo vertical em Bq/kg.

Medidas de remediação

- ▶ Diversas medidas de curto e longo prazo foram tomadas visando a proteção ambiental e mitigação de efeitos negativos do acidente;
- ▶ Houve descontaminação em diversas áreas habitadas visando reduzir doses externas [6];
- ▶ Essa descontaminação tornou necessário o descarte de material emitindo baixos níveis de radiação [7], que é uma operação de rotina do setor nuclear. Não houve contaminação das vizinhanças das áreas descontaminadas.
- ▶ Inicialmente, os pastos contaminados foram excluídos como fontes de alimentação do gado. O leite a altos níveis de radiação foi tirado de circulação. A alimentação do gado de corte ou leiteiro passou a ser a base de ração não contaminada.
- ▶ No longo prazo, a contaminação do gado por césio – 137 é a principal fonte de preocupação.
- ▶ Para enfrentar esse problema, os animais são tratados com comprimidos de azul da Prússia [8]. O azul da Prússia é um elemento que se liga ao césio radioativo e é eliminado pelo organismo. Inclusive, esses elementos foram utilizados nas vítimas do acidente radiativo de Goiânia, GO, Brasil.
- ▶ Em regiões florestais outras medidas foram tomadas: restrições ao acesso; à colheita de frutas silvestres ou cogumelos e caça; à coleta de madeira para uso como lenha. As práticas de caça foram alteradas.



Quantidade de gado tratado com comprimidos de azul da Prússia.

Efeitos em plantas e animais



- ▶ Atualmente: a zona de exclusão é um santuário ecológico devido à ausência de população humana;
- ▶ Os efeitos imediatos do acidente foram: incremento da mortalidade em coníferas, invertebrados subterrâneos e mamíferos; houve perda de capacidade reprodutiva em plantas e animais;
- ▶ Um ano após o acidente, a viabilidade de populações vegetais e animais foi recuperada devido a reprodução e imigração a partir de áreas não-afetadas.
- ▶ Não está clara a ocorrência de efeitos genéticos que podem ser atribuídos à radiação. Retornaremos a esse tópico adiante.



Exemplo de como a vegetação foi afetada: a base e o topo estão queimados pela ação de radionuclídeos depositados no solo e copa da planta. A parte intermediária exibe aparência normal.

A águia-rabalva voltou a popular a zona de exclusão. Antes do acidente elas eram raramente vistas na região.

Sarcófago e o futuro de Chernobyl

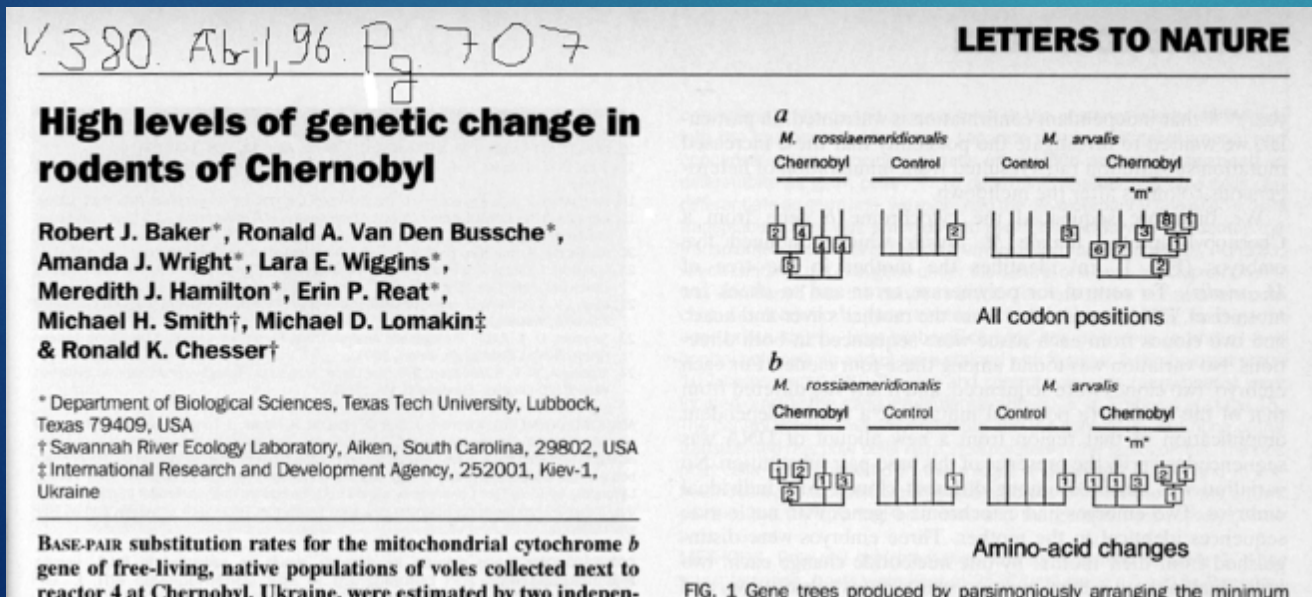


*Estágio atual da construção da nova estrutura de confinamento de segurança.
À direita, o sarcófago construído em 1986.*

- ▶ Entre maio e novembro de 1986 foi construído um sarcófago que isolou o reator 4 do ambiente ao redor. Dadas as condições dessa construção, considera-se que a vida útil desse sarcófago seja limitada.
- ▶ A construção de uma nova estrutura de confinamento, que deverá cobrir o sarcófago, está por concluir-se e dará sobrevida de ~ 100 anos ao isolamento do reator.
- ▶ É esperado que, no futuro, sejam implementadas medidas como: conclusão da construção da nova estrutura isolante do reator; descomissionamento das unidades 1, 2 e 3 vizinhas ao reator 4; construção de instalações destinadas ao tratamento do combustível usado, incluindo um repositório geológico; estabelecimento de reservas naturais em áreas próximas a regiões habitadas; manutenção de monitoramento e atividades de pesquisa.
- ▶ É esperado que sejam estimuladas atividades industriais, ao invés de atividades agrícolas ou uso residencial, em regiões menos afetadas da zona de exclusão.

Erro científico e viés na análise dos efeitos do acidente – I.

- ▶ **Pré-concepção:** a radiação em limiares superiores aos níveis naturais deveria causar aumento nos níveis de mutação nos organismos vivos que habitam o entorno do reator acidentado;
- ▶ Embora existam dados que corroboram a acepção da expectativa acima, o entendimento sobre os efeitos da radiação em organismos vivos ainda é incipiente. Por exemplo: Quais os níveis de radiação necessários para causar mutações maléficas? Os tempos de exposição à radiação influenciam? Há diferenças de efeitos se as doses recebidas são internas ou externas? Diferentes espécies sofrem diferentes efeitos? A idade do organismo interfere nos efeitos? Os efeitos são “locais” ou “globais”, isto é, limitam-se a afetar as células de um determinado órgão ou afetam todas as células do organismo uniformemente? Os efeitos são transmitidos, e assimilados, às novas gerações ou apenas limitam-se ao indivíduo que recebeu a radiação?
- ▶ Em abril de 1996, (10 anos após o acidente!), sem respostas para perguntas como essas, mas sob o viés, a pré-concepção apresentada acima, foi publicado um artigo de grande impacto do periódico Nature:



Principais conclusões do trabalho:

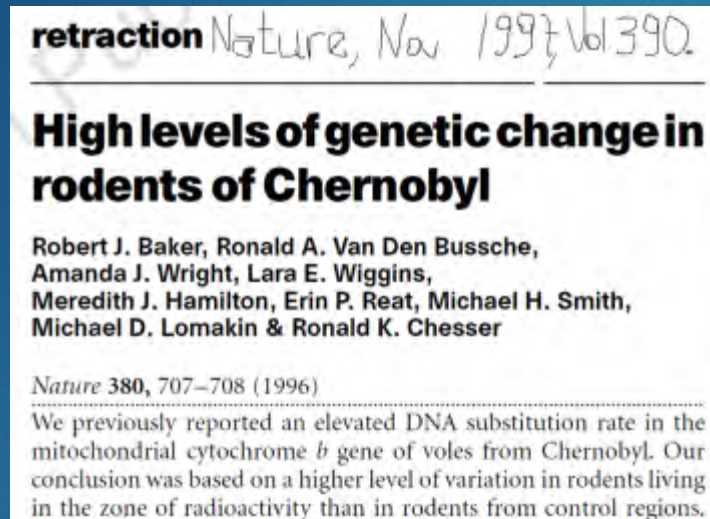
- Estudo de sequenciamento de DNA em roedores da região do reator de número 4;
- Comparação com roedores oriundos de regiões que receberam baixas doses de radiação comparadas com Chernobyl;
- Observação de altas taxas de substituição de nucleotídeos nos roedores oriundos da região do reator acidentado;
- Roedores de Chernobyl: 10^{-4} nucleotídeos por locus por geração;
- Normal: 10^{-6} nucleotídeos por sítio por geração;

Estudo com técnicas manuais: erro humano!

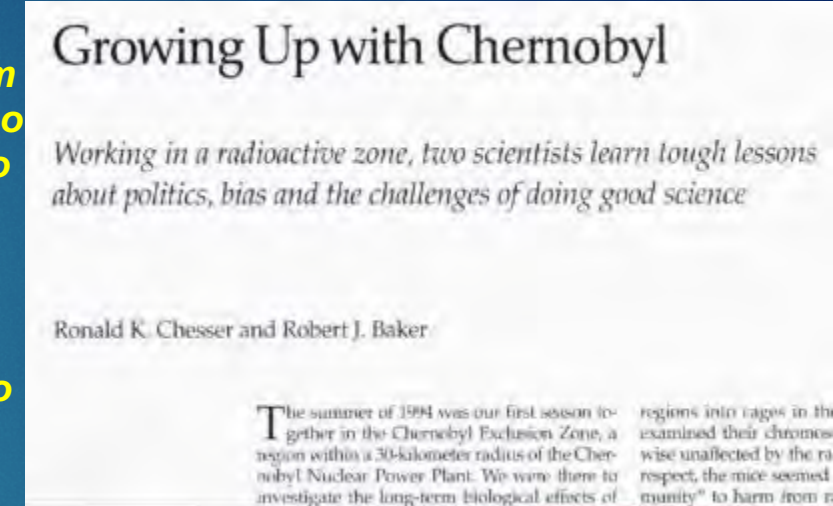
- Repetição do estudo usando técnicas automatizadas: não houve detecção das mesmas taxas de mutação.

Erro científico e viés na análise dos efeitos do acidente – II.

Os autores do trabalho retrataram-se perante a comunidade pelo erro em seu trabalho científico: suas conclusões sobre aumentos nas taxas de mutação estavam erradas.



Os autores principais do trabalho também publicaram um importante artigo sobre o trabalho do cientista e como “pressões sociais” podem afetar suas conclusões. Ademais, consistiu numa lição prática sobre o uso do método científico, útil a todo estudante do ensino superior.



Lições de Chernobyl (Chesser & Baker):

Belas teorias são frequentemente desmentidas pela feiura dos fatos: assumiu-se que as altas taxas de mutação eram devidas a exposição à radiação quando na realidade analisavam espécies distintas de roedores. Os autores eram especialistas em genética evolucionária e não em absorção de radiação ou taxonomia. A população de controle talvez não tenha sofrido as mesmas pressões evolutivas. É recomendável preservar um certo grau de humildade: Há uma grande diversidade de estudos sobre os impactos de exposição prolongada à radiação. Seus resultados são contraditórios, devido às conclusões que não são sustentadas pelos dados obtidos.

Lições de Chernobyl (Chesser & Baker):

Cientistas *devem* ter uma única agenda: a verdade! A retratação enviada à revista Nature deve-se a uma estudante de doutoramento que em uma reunião de laboratório trouxe seu caderno de notas e, chorando, disse que não conseguia reproduzir os dados do estudo prévio; Resultados incríveis requerem evidências incríveis; Boas ideias não necessariamente atrairão fundos; Prepare-se para ser impopular e sentir-se desconfortável; O rigor com a apresentação de conclusões, obtenção de dados e sua apresentação é fundamental;

Agradecimentos



- ▶ Prof. José Eduardo M. Hornos;

Referências

1. **Chernobyl's Legacy: health, environmental and socio-economic impacts and recommendations to the governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine. The Chernobyl Forum: 2003 – 2005.**
2. **The 1986 Chernobyl accident. Kerner, A.; Stuck, R.; Weiss, F.P. Atw. Internationale Zeitschrift fuer Kernenergie; v. 57(2). 2001; pg. 80 – 87.**
3. **Natural radionuclide distribution in soils of Cáceres (Spain): dosimetry implications. Baeza, A.; Del Rio, M.; Paniagua, J. Journal of Environmental Radioactivity; v. 23, pg. 19 – 37.**
4. **25 years after the Chernobyl accident: safety for the future. National Report of Ukraine**
5. **Iodina – 131 é um isótopo de iodo, que possui meia-vida de 7 dias. Esse isótopo, ao ser ingerido por animais, acumula-se na tireoide podendo causar câncer. Todavia, vale ressaltar a possibilidade de uso da iodina no tratamento do câncer da tireoide.**
6. **Dose externa: doses de radiação recebidas de fontes externas ao organismo. Dose interna: quando as fontes adentram o organismo por ingestão ou respiração.**
7. **Os materiais radioativos são classificados segundo sua atividade. Elementos de baixo nível de atividade são aqueles que tornaram-se radioativos pelo contato com outros elementos radioativos ou por terem sofrido bombardeio por nêutrons. Em geral têm curta meia-vida.**
8. **https://en.wikipedia.org/wiki/Prussian_blue**