

**VETERINARIA
ITALIANA**

COLLANA DI MONOGRAFIE

***Gestione dell'agricoltura
nelle zone
della contaminazione
radioattiva***

Radionuclidi negli alimenti

B.N. Annenkov - V.S. Averin

Monografia **22**



Istituto Zooprofilattico Sperimentale
dell'Abruzzo e del Molise "G. Caporale"
Campo Boario, 64100 TERAMO, Italia
Telefono +39 0861 3321
Fax +39 0861 332251
www.izs.it



*Questa rivista
è nata nel 1950 con il
nome di Croce Azzurra.
Dal 1954 si chiamerà
Veterinaria Italiana.*

EDIZIONE ORIGINALE

Б. Н. Анненков, В. С. Аверин.
Ведение сельского хозяйства
в районах радиоактивного
загрязнения
(радионуклиды в продуктах
питания)

© Оформление. ПроPILEI, 2003

ISBN 985-6329-33-7

EDIZIONE ITALIANA

B.N. Annenkov - V.S. Averin

***Gestione dell'agricoltura nelle zone della
contaminazione radioattiva
Radionuclidi negli alimenti***

© 2011 Istituto Zooprofilattico Sperimentale
dell'Abruzzo e del Molise "G. Caporale",
Campo Boario, 64100 Teramo, Italia

ISBN 88-901725-2-5

Direttore responsabile

Vincenzo Caporale

Segreteria di redazione

Monica Bucciarelli, Silvano Calvarese,
Guido Mosca, Luigi Sgattone, Carlo Turilli

Traduzione

Natallia Nesterovich

Revisione testi

Anna Abass

Amministrazione

Istituto Zooprofilattico Sperimentale
dell'Abruzzo e del Molise "G. Caporale",
Campo Boario, 64100 Teramo, Italia

Progetto grafico e impaginazione

Paola Di Giuseppe, Istituto G. Caporale

http://www.izs.it/vet_italiana/index.html

Aut. Trib. Teramo n. 299 del 16/05/1990 –
Sped. In Abb. Post. Art. 2 comma 20/c –
L. 662/96 DCB/DC Abruzzo Pescara

Introduzione	7
Alimenti di origine agricola, zootecnica e naturale come fonti di radionuclidi	10
La migrazione dei radionuclidi negli ecosistemi agricoli	13
Aziende private nelle zone contaminate	36
Provvedimenti per la riduzione delle conseguenze delle catastrofi nucleari nel settore agrario	40
Campi agricoli nei territori contaminati, isolati e spopolati	48
Conclusione	58
Termini e definizioni	59
Ringraziamenti	59
Bibliografia	60

*Nel volume vengono descritti i processi di migrazione
di ^{90}Sr e ^{137}Cs nella catena biologica:
"terreno-piante-animale-produzione agricola".
Si riportano principi e scelte di base relativi alla gestione agricola
condizionata dall'elevata contaminazione da radionuclidi.
Si esaminano misure e metodi efficaci per diminuire
gli effetti della contaminazione radioattiva
nelle produzioni agricole e negli alimenti.
Il volume è destinato ai professionisti del settore agricolo,
a ricercatori e professori universitari.*

Introduzione

In Russia due incidenti nucleari di elevata entità hanno causato la contaminazione dei territori di diverse regioni con ricaduta nell'atmosfera di sostanze radioattive.

In seguito all'incidente avvenuto nell'azienda radiochimica del complesso industriale chimico "Mayak" (Cheliabinsk-40, 1957) si è formata una traccia ad alto livello radioattivo interessando un territorio di 106 mila ettari.

Con il disastro di Chernobyl, i terreni agricoli di 21 regioni della Federazione Russa hanno subito la contaminazione radioattiva. In un'area di 800 mila ettari la densità di contaminazione del ^{137}Cs è risultata superiore a 185 kBq/m². Nella Repubblica della Bielorussia l'intero territorio è stato sottoposto all'effetto delle radiazioni. L'area contaminata dai radionuclidi (oltre 37 kBq/m² di ^{137}Cs) ha interessato 46,45 mila km² (23% dell'area totale) e 2,1 milioni di abitanti (oltre il 20% della popolazione). I terreni agricoli presenti in un'area di oltre 1,8 milioni di ettari, di cui 264 mila ettari risultati esclusi dall'impiego produttivo, hanno subito la contaminazione radioattiva. Il disastro di Chernobyl ha provocato l'interruzione/alterazione dei rapporti economici e sociali, influenzando negativamente in tutti i settori della vita della popolazione bielorussa. Secondo alcune valutazioni i danni relativi al periodo dal 1986 al 2015 è quantificabile in 5800 miliardi di rubli (valore del 1992).

Attualmente, dopo il decadimento dei radionuclidi a vita breve e media provenienti dal disastro di Chernobyl, nel territorio contaminato sono rimasti due pericolosissimi radionuclidi a vita lunga (tempo di dimezzamento circa 30 anni) lo ^{90}Sr e il ^{137}Cs . Essendo analoghi del calcio e del potassio - elementi naturali e molto diffusi, i due radionuclidi si collocano con facilità nella catena biologica "terreno-piante-animale". Lo ^{90}Sr e il ^{137}Cs , contaminando gli alimenti, si accumulano nell'organismo sottoponendo l'individuo a irradiazione interna. Il ^{137}Cs radionuclide produttore di gamma-emissione, permanendo nell'ambiente, influisce

sull'organismo anche dall'esterno sottoponendolo, di conseguenza, a irradiazione esterna.

La radioattività ha un effetto negativo sugli esseri umani, anche piccole dosi di radiazione possono essere pericolose determinando malattie oncologiche e alterazioni genetiche. Il *Comitato Scientifico sugli Effetti della Radiazione Atomica* dell'Organizzazione delle Nazioni Unite ha espresso la convinzione che "non esiste una dose soglia oltre la quale non ci sia il rischio di contrarre un tumore... ogni piccolissima dose aumenta nell'individuo che l'ha ricevuta la probabilità che si instauri una patologia tumorale, così come ogni dose successiva".

Nella legislazione della Repubblica della Bielorussia "Sulla radiosicurezza della popolazione" e in quella analoga della Federazione Russa è stato prescritto che la dose individuale annuale non debba superare di 1 mSv la dose (2,4 mSv) determinata da fonti radioattive naturali (emissione cosmica e dei radionuclidi naturali distribuiti negli strati superficiali della terra, nell'acqua, negli alimenti e nell'organismo umano).

Nelle regioni sottoposte a contaminazione radioattiva si sta realizzando un complesso di provvedimenti protettivi (contromisure) finalizzato a diminuire l'influenza della radioattività nelle popolazioni. I risultati ottenuti vengono valutati in relazione alla dose individuale annuale e secondo il criterio della "dose collettiva" (la somma delle dosi individuali ricevute da un gruppo di individui) determinate da una o più fonti di radiazione. Una di queste fonti è rappresentata dai prodotti agricoli e zootecnici (grano, patata, verdura, latte, carne, ecc.) provenienti da territori contaminati da radionuclidi.

Il problema dell'abbassamento delle dosi individuali e di quelle collettive dovrebbe essere affrontato ricorrendo a contromisure efficaci, mirate a bloccare la migrazione dei radionuclidi nei diversi livelli della catena biologica "terreno-

piante-animali" mediante nuovi orientamenti di sviluppo per le aziende, al fine di produrre e avviare al mercato prodotti con il minimo contenuto di elementi radioattivi.

In questo volume sono riportati i principali dati sul ciclo dei radionuclidi nel settore agricolo e sintetizzati i risultati delle ricerche e degli esperimenti scientifico-produttivi svolti nel corso di molti anni nei paesi della Unione degli Stati Indipendenti (USI, paesi dell'ex-Unione Sovietica) e in quelli stranieri. Lo scopo è di elaborare misure efficaci per ridurre nel settore agricolo le conseguenze degli incidenti radioattivi della fissione atomica.

Brevi cenni storici

Anni 1945-1980. Sono state provocate nell'atmosfera 423 esplosioni atomiche accompagnate dall'emissione nell'ambiente esterno di circa $5,9 \times 10^{17}$ Bq di ^{90}Sr e $9,5 \times 10^{17}$ Bq di ^{137}Cs . Attualmente alle latitudini nord dell'emisfero boreale la densità di contaminazione dei terreni da parte di questi radionuclidi è, rispettivamente, di 1,1 e 1,8 kBq/m² (risultato delle precipitazioni radioattive totali nel corso degli esperimenti relativi agli armamenti nucleari).

27 settembre 1957. L'incidente nucleare nel complesso industriale chimico "Mayak" ha prodotto con la sua esplosione 70-80 tonnellate di rifiuti altamente radioattivi. L'attività complessiva ha prodotto circa $7,4 \times 10^{17}$ Bq di cui $7,4 \times 10^{16}$ Bq sono stati dissipati nell'ambiente. Il contributo di ^{90}Sr all'attività complessiva è stato di 2×10^{15} Bq e ^{137}Cs -3×10^{13} Bq. L'area totale della traccia radioattiva nel territorio delle regioni di Celiabinsk, Sverdlovsk e Tjumen, con il limite di contaminazione da ^{90}Sr di 74 kBq/m², è stata di circa 1.000 km². In seguito alla decisione governativa dell'URSS, è stata creata la riserva statale degli Urali Orientali con area totale di 16.700 ettari (con contaminazione dei terreni da ^{90}Sr > 3.700 kBq/m²).

Dall'8 al 12 ottobre del 1957. L'incidente nucleare al reattore che produceva plutonio dall'uranio naturale, a Windscale, Inghilterra, ha determinato la contaminazione dell'atmosfera con $2,2 \times 10^{13}$ Bq di ^{137}Cs e 3×10^{12} Bq di ^{90}Sr

che si sono dissipati in un territorio molto esteso nel Sud-Est dell'Inghilterra e nei paesi confinanti (Belgio, Germania, Olanda, Norvegia, Danimarca).

Dal 26 aprile al 6 maggio del 1986. L'incidente della centrale nucleare di Chernobyl è stato accompagnato da fortissime eruzioni di radionuclidi e materiali radioattivi nell'atmosfera. Durante l'incidente dalla zona attiva del reattore sono stati emessi materiali radioattivi con attività complessiva di $1-2 \times 10^{18}$ Bq con i contributi rispettivi di ^{137}Cs ($3,6 \times 10^{16}$ Bq), ^{134}Cs ($1,9 \times 10^{16}$ Bq) e ^{90}Sr ($8,0 \times 10^{15}$ Bq). Secondo i dati del Comitato Scientifico sugli Effetti della Radiazione Atomica dell'ONU (1989), l'emisfero boreale ha ricevuto in totale 70×10^{15} Bq di ^{137}Cs di cui $30,9 \times 10^{15}$ Bq sono rimasti nel territorio dell'URSS e 27×10^{15} Bq nel territorio dei paesi europei. L'area dell'URSS interessata con densità di contaminazione da ^{137}Cs oltre 555 kBq/m² ha avuto un'estensione di circa 10.000 km², con densità di contaminazione da ^{137}Cs di oltre 185 kBq/m² l'area ha superato oltre i 21.000 km². La commissione governativa sulla liquidazione delle conseguenze dell'incidente ha definito nelle cinque regioni (Gomel, Moghilev, Briansk, Kaluga e Chernigov) alcune zone da sottoporre a severo controllo radioattivo. In questi territori sono stati registrati 786 centri abitati e una popolazione di 272,8 mila unità.

Centri di radioecologia agricola

Anno 1947. In seguito all'iniziativa dell'accademico I.V. Kurchatov, nell'Accademia Agricola Timiriasev (Mosca), è stato creato il Laboratorio Biofisico (LBF AAT) diretto, per 25 anni, da Vsevolod Mavrikievich Klechkovskij, membro dell'Accademia Lenin di scienze agricole dell'URSS, vincitore dei premi Stalin e Statale dell'URSS. Nel laboratorio sono state realizzate ricerche di fondamentale importanza sui prodotti della fissione atomica, dall'assorbimento da parte dei diversi tipi di terreno (Klechkovskij V., Tselishtseva G., Sokolova L.), alle modalità di passaggio, all'influenza dei fattori agrotecnici e agrochimici, al passaggio dal terreno alle piante (Klechkovskij V., Guliakin I.,

Yudintseva E., Yegorov A. e altri). Il gruppo di fisiologi degli animali (Filatov G., Annenkov B., Strelchenko N.) diretto dal professore Viktorov K., ha studiato le modalità con cui si verificano: assorbimento, accumulo e distribuzione dei singoli radionuclidi, o di una miscela di prodotti radioattivi, in uccelli e mammiferi.

Anno 1958. In seguito alla decisione governativa dell'URSS, nel complesso industriale chimico "Mayak", situato sulla traccia naturale radioattiva degli Urali Orientali, è stata creata la *Stazione di ricerca scientifica e sperimentale (SRSS)*. Direttore scientifico e Presidente del Consiglio tecnico-scientifico dell'URSS è stato nominato l'accademico V. Klechkovskij. Sulla traccia radioattiva naturale degli Urali Orientali è stato realizzato un esteso programma di ricerche sulla migrazione di ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{137}Cs , ^{106}Ru e altri radionuclidi nel ciclo "terreno-piante" (Kornev N., Fedotov E., Romanov N., Arhipov N., Yegorov A., Kogotkov A., Prister B., Aleksahin R. e altri). Sono state studiate le principali modalità relative al metabolismo dei prodotti della fissione atomica negli animali allevati e il loro trasferimento nei prodotti (Annenkov B., Buldakov L., Burov N., Sirotkin A., Panchenko I., Shilov V. e altri). In seguito come risultato dalle ricerche realizzate nel settore della radioecologia agricola, scientificamente validate e provate in condizioni produttive, sono state create "Le Raccomandazioni sulla gestione agricola e forestale nell'ambiente contaminato da radiazione" (Mosca, 1973). Le raccomandazio-

ni sono state approvate dai Ministeri dell'Agricoltura, della Sanità e dal Comitato Statale dell'URSS sull'impiego dell'energia nucleare.

Anno 1971. Secondo la decisione degli organi amministrativi del Ministero dell'Agricoltura è stato fondato, nella città di Obninsk (regione di Kaluga), l'*Istituto pansovietico di ricerche scientifiche sulla radiologia agricola (IPRSRA)*. Nell'istituto sono state realizzate importanti ricerche nel settore della radiobiologia su piante e animali. È stato elaborato un sistema di provvedimenti per la protezione civile studiando le capacità dei componenti del settore agro-industriale di funzionare nelle condizioni determinate da incidenti nucleari.

Negli ultimi 15 anni l'attività dell'IPRSRA è stata finalizzata a risolvere i problemi relativi all'eliminazione delle conseguenze dovute al disastro di Chernobyl. È stata istituita, presso il *Ministero dell'industria agricola* dell'URSS, la *Commissione di esperti sulla radioattività in ambito agricolo* (Korneev N., Povaliaev A., Annenkov B., Yegorov A., Sokolov V.), alcuni membri sono stati inviati in Bielorussia (Aleksahin R.) altri in Ucraina (Yudintseva E., Panchenko I.).

Il personale dell'istituto e delle filiali create in Bielorussia e Ucraina ha svolto un'ingente quantità di lavoro con l'obiettivo di risolvere i problemi pratici legati all'eliminazione delle conseguenze della catastrofe di Chernobyl nel settore agricolo. In merito sono state elaborate raccomandazioni e normative tecniche.

Alimenti di origine agricola, zootecnica e naturale come fonti di radionuclidi

I primi dati, ottenuti poco tempo dopo l'inizio degli esperimenti atmosferici per gli armamenti nucleari, hanno dimostrato che in seguito alla ricaduta radioattiva nell'ambiente esterno i prodotti alimentari fossero la fonte principale dei radionuclidi responsabili della contaminazione dell'organismo umano, che i radionuclidi fossero presenti in tutti gli alimenti e che la loro concentrazione per unità di massa potesse crescere fino a dieci volte.

Si è potuto dimostrare come nel "paniere alimentare", costituito da alimenti agricoli e zootecnici (pane, farina, cereali, patate, verdura, tuberi, latte, carne) e anche (in quantità ridotte) da "prodotti del bosco" (funghi, bacche e selvaggina) il "contributo" dei singoli alimenti contaminati nel contenuto totale di radionuclidi fosse molto diverso.

Nei primi anni dopo la fine degli esperimenti atmosferici (1963), nelle colture agricole sono state registrate concentrazioni relativamente basse di ^{137}Cs (fino a 10 Bq/kg). I valori più alti sono stati registrati nel latte (33 Bq/l), carne di maiale (68 Bq/kg), carne bovina (35 Bq/kg) e carne ovina (67 Bq/kg). La più alta concentrazione di ^{137}Cs è stata registrata nella carne di caribù (fino a 2.200 Bq/kg), questo risultato è stato spiegato con l'elevato contenuto di radionuclidi nei licheni delle renne (Genere *Cladonia* ndc), nutrimento principale degli stessi caribù.

Due decenni dopo (1985), alla vigilia della catastrofe di Chernobyl, nel territorio dell'URSS il contenuto di cesio radioattivo registrato negli alimenti è stato basso (Bq/kg-Bq/l): 0,15 nel grano, 0,14 nelle patate, 0,15 nel latte, 0,24 nella carne bovina, 0,29 nella carne di maiale e 0,23 in quella di montone. Il contenuto di ^{90}Sr negli alimenti ha evidenziato le stesse quantità (Prokofiev O., Sherghina I., 1993).

I dati sulla contaminazione radioattiva degli alimenti causata dall'incidente di Chernobyl sono di estrema importanza. Nel primo anno dopo

l'incidente, la concentrazione di ^{137}Cs è stata altissima. Il contenuto del radionuclide nel latte e nella carne prodotti nelle 6 zone più contaminate della regione di Briansk è stato, rispettivamente, di 9.092 Bq/kg e 7.815 Bq/kg. Nel 1987 la concentrazione di ^{137}Cs nel latte e nella carne prodotti da alcune aziende della regione di Gomel è stata, rispettivamente, di 1.295 Bq/kg e 5.180 Bq/kg (Karpenko A., Mezenko N. 1995). In questo periodo nelle zone più contaminate dell'URSS il contenuto medio di ^{137}Cs (Bq/kg) negli alimenti è stato di 90 nei latticini, 23 nei cereali, 25 nella verdura, 33 nei legumi e frutta, 200 nella carne (dati ONU, 1988). Attualmente, 17 anni dopo l'incidente di Chernobyl, la concentrazione di ^{137}Cs nella produzione agricola è diminuita di 7-10 volte.

Dal punto di vista radiologico gli alimenti più pericolosi sono risultati i "prodotti del bosco" che, rispetto alla produzione agricola, hanno mostrato un più elevato livello di contaminazione. Ad esempio, una grande quantità di radionuclidi è stata accumulata da alcune specie di funghi (Tabella 1), specialmente da quelli cresciuti su zolle erbose di terreni podzolizzati, sabbiosi e silico-argillosi (Kaduka M., 2001). Prendendo in considerazione il consumo di alcune specie di funghi e la loro contaminazione radioattiva, il contenuto di ^{137}Cs e ^{90}Sr è stato, rispettivamente, di circa 18 Bq/kg e 0,8 Bq/kg del peso fresco alla densità di contaminazione radioattiva del terreno di 1 kBq/m². Sempre più dati evidenziano il ruolo negativo e sottovalutato dei "prodotti del bosco" nella formazione della radiazione interna. Secondo i ricercatori (Istituto di ricerca sull'igiene radioattiva di San Pietroburgo) la dose della radiazione interna rilevata con il consumo dei funghi negli abitanti della regione di Briansk, negli anni 1994-1999, è stata pari a 37% per il ^{137}Cs e 11% per lo ^{90}Sr .

La Figura 1 illustra i risultati sul contributo approssimativo dei singoli alimenti nel totale

dei radionuclidi accumulati nell'organismo di un uomo adulto. Basandosi su dati recenti si è potuto concludere che il ^{137}Cs è passato nell'organismo attraverso alimenti di origine animale (in totale 30,9%), prodotti della panificazione (20,3%), funghi (18,8%), patate (13,3%). Le stesse modalità hanno riguardato il pas-

Tabella 1. Contenuto di ^{137}Cs nei funghi (Bq/kg prodotto fresco) alla densità di contaminazione radioattiva del terreno di 1 kBq/m². (Kaduka M., 2001)

Specie di funghi	Terreni	
	sabbiosi e silico-argillosi	grigi, neri, di bosco
<i>Tricholoma equestre</i> (3,0)	10	30
<i>Suillus</i> spp. (23,4)	31	5,0
<i>Boletus</i> spp. (7,6)	10	1,5
<i>Russula</i> spp. (7,4)	14	0,38
<i>Lactarius rufus</i> (10,7)	213	-
<i>Cantharellus</i> spp. (9,6)	7,2	-
<i>Leccinum</i> spp. (7,4)	14	0,57
<i>Paxillus</i> spp. (7,3)	57	0,83
<i>Lactarius necator</i> (4,2)	14	0,15
<i>Xerocomus badius</i> (3,8)	61	-
<i>Xerocomus</i> spp. (3,8)	45	0,26
<i>Armillaria mellea</i> (2,0)	3	0,87
<i>Lactarius</i> spp. (5,5)	3,3	0,72
<i>Leccinum</i> spp. (1,0)	7,7	0,19
<i>Agaricus</i> spp. (1,0)	0,75	0,56

() Contributo percentuale della specie nel determinare l'irradiazione interna negli abitanti della regione di Briansk.

saggio di ^{90}Sr anche se è stato registrato un più alto contenuto di ^{90}Sr (rispetto a ^{137}Cs) in latte, patate e legumi. Al contrario, i valori sono stati più bassi in funghi e carne.

I dati riportati in Figura 1 sul contributo dei diversi alimenti nell'irradiazione totale caratterizzano le zone in cui la distribuzione dei radionuclidi (in superficie) è stata abbastanza regolare. Nelle zone dove la contaminazione radioattiva del terreno e dei bacini idrici è stata più densa o irregolare il ruolo dei singoli alimenti, come fonti di ^{137}Cs e ^{90}Sr , può essere stata diversa. Ad esempio, in una delle zone più "sporche" (provincia di Narovlia, regione di Gomel) il passaggio di radionuclidi nell'organismo umano (valori medi) è avvenuto, generalmente, con il consumo di latte (47,0%), "prodotti del bosco" (selvaggina, funghi, frutti di bosco) (32,9%) e carne (11,9%) (Zhuchenko Y., 2001).

La Tabella 2 evidenzia il ruolo dei singoli alimenti agricoli e di quelli naturali per l'irradiazione interna complessiva. È evidente che la dose è stata ottenuta, generalmente, con il contributo del consumo di latte di vacca (41,1%), funghi (27,4%), frutti di bosco (10,5%) e carne (8,8%). Il contributo degli altri alimenti ha costituito soltanto il 12,2%. È necessario aggiungere che la maggior parte degli alimenti prodotti nella provincia di Narovlia vengono esportati. In questo modo è stata "espor-

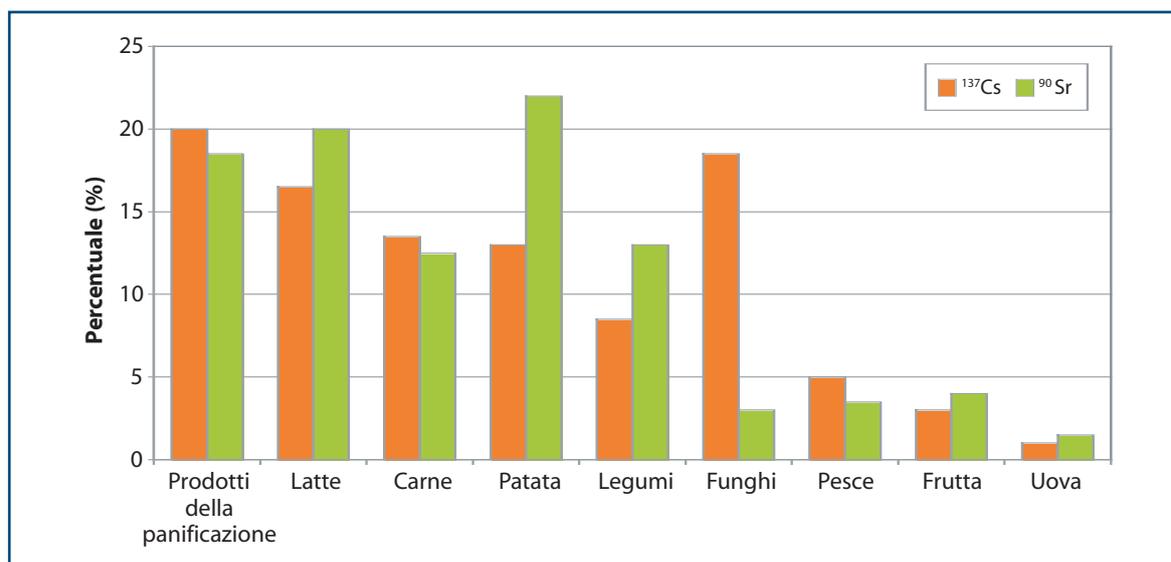


Figura 1. Contributo percentuale degli alimenti nel passaggio dei radionuclidi ^{137}Cs e ^{90}Sr nell'organismo umano.

Tabella 2. Dose collettiva dell'irradiazione interna determinata dagli alimenti prodotti nella provincia di Narovlia, regione di Gomel (dati del 2000).

Alimenti	Raccolta complessiva (tonnellate)	Attività di ¹³⁷ Cs (Bq/kg)	Dose collettiva (mSv-individuo)			Percentuale della dose collettiva complessiva
			Regione	Esportazione	Totale	
Grano	7.259	19	71	699	770	5,4
Patate	5.181	9	155	294	449	3,1
Latte:						
- Aziende statali	3.177	41	1.436	4.436	5.872	41,1
- Aziende private	6.449	77				
Carne bovina	355	171	74	725	799	5,6
Carne suina:						
- Aziende statali	216	44	285	177	462	3,2
- Aziende private	330	67				
Funghi	86	3.975	261	3.651	3.912	27,4
Bacche	80	1.537	196	1.310	1.506	10,5
Selvaggina	27	1.377	505	-	505	3,5
Pesce	4	344	19	-	19	0,2
Totale			3.002	11.292	14.294	100,0
Ecosistema agricolo			2.021	6.331	8.352	58,4
Ecosistema naturale			981	4.961	5.942	41,6

tata" anche la dose collettiva (11,3 Sv) pari a circa il 79% della dose complessiva (14,3 Sv). Una grande quantità (90%) di funghi (86 t) e bacche (80 t) raccolta nella provincia di Narovlia (la contaminazione di ¹³⁷Cs è stata, rispettivamente, di 3.975 Bq/kg e 1.537 Bq/kg) sono state esportate nelle regioni confinanti relativamente "pulite" (Zhuchenko Y., 2001). In conclusione, è necessario evidenziare come i

dati indicati, relativi al ruolo dei singoli alimenti come fonti di radionuclidi, abbiano carattere esclusivamente indicativo. Il contenuto di ¹³⁷Cs e ⁹⁰Sr negli alimenti agricoli, zootecnici e naturali può variare notevolmente in base all'intensità della contaminazione dei radionuclidi, alla contaminazione e alle caratteristiche fisico-chimiche del terreno, al tipo di coltivazione, al sistema di allevamento del bestiame, ecc.

La migrazione dei radionuclidi negli ecosistemi agricoli

Il comportamento dei radionuclidi nel terreno

La migrazione successiva e il coinvolgimento nel ciclo biologico degli elementi radioattivi penetrati nei terreni agricoli vengono definiti da una serie di fattori. Nei pascoli naturali e coltivati la maggior parte dei radionuclidi rimane in superficie (nei prati con cereali pluriennali e nella zolla erbosa densa rimane il 50% di radionuclidi).

La zolla erbosa ha una particolarità sorprendente nel trattenere i radionuclidi presenti. È stato verificato come anche 10 anni dopo l'incidente avvenuto nell'azienda radiochimica "Mayak" nella zolla di cereali ed erbe diverse crescenti nella traccia radioattiva degli Urali Orientali, il contenuto totale di radionuclidi presenti nel complesso terreno-piante fosse, rispettivamente, circa del 70 e 50%. Per molti anni la maggior parte dei radionuclidi passati nel terreno di prati e pascoli sono rimasti alla profondità di 3-5 cm.

Dodici anni dopo l'incidente di Chernobyl, il 93% di ^{137}Cs rilevato alla profondità di un metro dal suolo è risultato presente nei primi 5 centimetri del pascolo naturale (assenza di miglioramento).

Gli scienziati bielorusi (Aheyets V., 2001; Podoliak A., 2001) hanno scoperto che, 15 anni dopo l'incidente la quantità principale di ^{137}Cs (91,7% per le zolle erbose di terreni e prati irrigui; 87,5% per i prati di terreni podzolizzati e privi d'acqua; 73,9% per i prati su terreni di torba e paludosi) è risultata localizzata nei primi 5 centimetri dallo strato superficiale. Nei prati naturali alla profondità di 20 centimetri dello strato superficiale è stato registrato lo 0,8% della quantità totale di ^{137}Cs e il 4,2% per i prati privi d'acqua, irrigui e paludosi. La minima mobilità di ^{137}Cs è stata rilevata nella sezione di terreno di prato irriguo dove, negli anni 1992-2001, la migrazione del radio-

nuclide alla profondità di oltre 5 centimetri è stata del 4,9%. La massima mobilità (12,4%) è stata rilevata nel prato paludoso. Rispetto al ^{137}Cs la migrazione di ^{90}Sr nei terreni in questione ha avuto carattere più intenso. Ad esempio, nell'anno 2001 negli strati più profondi (5-10 e 10-15 centimetri) sono migrati il 34,8 e l'11,9% di ^{90}Sr per i prati privi d'acqua, il 27,8 e l'11,5% per i prati paludosi e il 16,2 e il 3,1% per i prati irrigui. I dati evidenziano come nei terreni studiati la mobilità di ^{90}Sr rispetto al ^{137}Cs sia stata superiore di 2-5 volte. Questa caratteristica è stata determinata dal maggior contenuto di forme mobili (idrosolubuli + di scambio) dello ^{90}Sr rispetto al ^{137}Cs .

Sono due i processi che contribuiscono alla riduzione della contaminazione radioattiva della zona radicolare: lo spostamento dei radionuclidi fuori dallo strato e la loro disintegrazione naturale. Uno dei principali parametri integrali, utilizzati in radioecologia per effettuare previsioni, riguarda il Periodo efficiente di semipurificazione della zona radicolare (T_{eff}). Periodo durante il quale la concentrazione iniziale di radionuclidi nello strato radicolare diminuisce di due volte compresa anche la disintegrazione radioattiva ($T_{1/2}$ di $^{137}\text{Cs}=30,17$ anni; $T_{1/2}$ di $^{90}\text{Sr}=28,1$ anni). Nella maggior parte dei casi questo parametro varia entro i limiti di 5 e 28 anni.

Nei prati privi d'acqua, caratterizzati da terreno sbiancato (zolla erbosa podzolizzata), la semipurificazione dello strato radicolare da ^{137}Cs ha avuto la durata di 11-29 anni, dipendendo direttamente dalla composizione del terreno e aumentando secondo l'ordine: sabbioso>silico-argilloso>argillo-siliceo. Per i prati rappresentati da terreni palustri di torba con diverse potenzialità e genesi, lo stesso parametro ha oscillato tra 13 e 18 anni. In relazione allo ^{90}Sr questo procedimento è stato doppiamente più intenso, variando tra 5 e 15 anni (Sanzharova N., Fesenko S., Belli M. e coll.).

Durante gli studi è stata evidenziato un aspetto importante nel comportamento dei radionuclidi. Si è constatato che alla stessa densità di contaminazione, il contenuto di radionuclidi nelle piante di prato è stato, spesso, più alto che nelle piante dei campi arati. Questo fenomeno può essere spiegato in quanto le piante di prato hanno un'accesso molto facile ai radionuclidi accumulati nella zolla di terreno. Il comportamento dei radionuclidi nei campi arati ha mostrato delle peculiarità. Nel periodo dopo l'incidente i radionuclidi si sono dissipati uniformemente nell'orizzonte (strato) arato, facilitando l'interazione attiva tra le particelle del terreno e i radionuclidi stessi.

Per la prima volta il comportamento delle sostanze radioattive nei terreni è stato analizzato in dettaglio nel Laboratorio Biofisico dell'Accademia agricola Timiriasev (Klechkovskij V. e coll., 1956, 1958). Nel corso degli studi sperimentali sono state scoperte le modalità che hanno caratterizzato l'interazione delle sostanze minerali e organiche del terreno con le quantità microscopiche degli elementi radioattivi.

Com'è noto, la dottrina classica sulle capacità assorbenti del terreno si basa su dati che riguardano l'interazione dei terreni con le macroquantità delle sostanze assorbite e diassorbite. Poiché la massa delle sostanze radioattive è insignificante, ad esempio 1MBq di ^{137}Cs e ^{90}Sr è uguale rispettivamente a $3,0 \times 10^{-4}$ e a $1,9 \times 10^{-4}$ mg, l'individuazione delle modalità di interazione dei terreni con le quantità microscopiche dei prodotti radioattivi è rimasta sospesa.

In seguito alle ricerche di Klechkovskij V. e

coll., è stato scoperto che il ^{137}Cs e lo ^{90}Sr vengono assorbiti dal terreno per mezzo del ruolo chiave di due procedure: lo scambio tra ioni nel corso dell'assorbimento e il diassorbimento. È stato anche dimostrato come la stabilità di fissazione delle quantità microscopiche di ^{137}Cs e ^{90}Sr nel terreno e l'intensità della loro migrazione nel ciclo "terreno-piante" dipendano, in qualche misura, dalla concentrazione dei loro analoghi naturali: calcio e potassio. È stato accertato come il terreno assorba più intensamente le quantità microscopiche di ^{137}Cs che quelle di ^{90}Sr .

Le capacità dei terreni di assorbire le sostanze radioattive ha conseguenze importanti. Tra queste, la formazione di un deposito radioattivo che per molti anni "nutrirà" le radici delle piante e, in certe condizioni (calcinazione dei terreni, trattamento con concimi), il consolidamento della fissazione dei radionuclidi presenti che abbassa la loro accessibilità biologica e, di conseguenza, la contaminazione radioattiva del raccolto.

I radionuclidi presenti nel terreno sono in forme diverse: idrosolubili, di scambio, privi della capacità di scambio, di fissazione solida. La proporzione delle forme è molto variabile, dipende dal tipo e dalle caratteristiche agrochimiche del terreno. Nelle zone con alto livello di contaminazione dove predominano terreni sbiancati (zolla erbosa podzolizzata), sabbiosi e siliceo-argillosi, la quantità di forme dei radionuclidi accessibili alle piante è risultata variare tra il 14,5 e il 23,3%, determinando un elevato passaggio di radionuclidi nelle piante stesse. Nelle zone contaminate delle regioni di

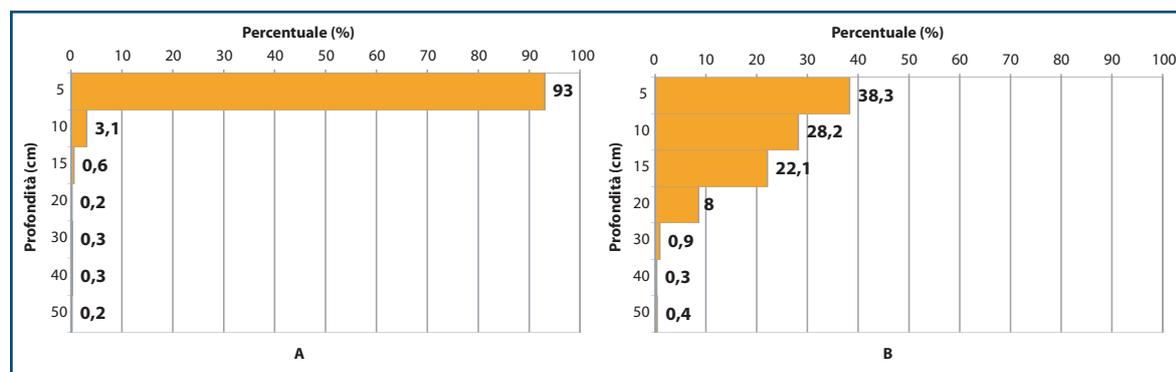


Figura 2. Distribuzione percentuale di ^{137}Cs nella sezione di terreno siliceo-argilloso sbiancato (zolla podzolizzata) prima del miglioramento (A) e in seguito al miglioramento radicale (B).

Tula, Orlovsk, Voronezh e Kursk il terreno (sileo-argilloso sbiancato di zolla, nero di step-pa-foresta, grigio di foresta) ha mostrato una maggiore capacità di fissare i radionuclidi. In questi territori la parte di ^{137}Cs accessibile è stata molto più bassa variando da 4,2 a 15,6% (Sanzharova N., 1997). Secondo i dati del centro di Radiologia agrochimica (Briansk) lo ^{90}Sr è presente tra il 40,7-64,9% in forma accessibile alle piante (Vorobiov G., 2001).

In letteratura le forme dei radionuclidi presenti nell'ambiente vengono definite in base all'estrazione dal terreno con diversi solventi. Vi sono diversi metodi tra questi il più diffuso è quello di Pavlotskaia F. Si tratta dell'estrazione successiva delle forme di ^{137}Cs e di ^{90}Sr secondo lo schema seguente: 1) idrosolubili con acqua distillata; 2) di scambio con soluzione $\text{CH}_3\text{COONH}_4$, 1 M; 3) prive di capacità di scambio con soluzione HCl, 1 M a temperatura di 85°C; 4) di fissazione solida con miscela di acidi idrofluorico e nitrico oppure in base al metodo di calcolo.

Le ricerche effettuate dall'Istituto radiologico (Gomel, Aheyets V., 2001) hanno dimostrato che, 12 anni dopo l'incidente, una gran parte di ^{137}Cs (68-92% del contenuto totale rilevato nello strato da 0 a 10 centimetri) è risultato nella forma di fissazione solida, inaccessibile per le piante. Invece il 28-70% di ^{90}Sr è risultato presente nella sua forma accessibile, quella di scambio. Il più basso contenuto di radionuclidi in forma idrosolubile (0,1-6,0% di ^{137}Cs e 0,3-13,7% di ^{90}Sr) è stato rilevato nei terreni prativi. I terreni palustri di torba hanno mostrato il più alto contenuto dei due radionuclidi in forma idrosolubile. Con il trascorrere del tempo, nella maggioranza dei terreni prativi è stato possibile notare la riduzione della quota di ^{137}Cs e ^{90}Sr nelle forme idrosolubili e di scambio e, nello stesso tempo, l'aumento della quantità di radionuclidi nelle forme acidosolubile e di fissazione solida. Nel terreno sbiancato (zolla erbosa podzolizzata) dei prati con ridotto apporto di acqua, dal 1992 al 1998, il contenuto delle forme di scambio di ^{137}Cs e ^{90}Sr si è ridotto mediamente del 12 e 30%, rispettivamente. Nello stesso tempo il contenuto delle forme acidosolubile e di fissazione solida sono aumentate, rispettivamente, per il ^{137}Cs del 7% e 5% e per lo ^{90}Sr del 27 e 3%.

Il passaggio di radionuclidi dal terreno alle piante

La contaminazione delle colture agricole con i radionuclidi dipende da molti fattori. Il tipo di terreno ha una grande influenza sull'accumulo di radionuclidi nelle piante. Per dimostrare questa interazione è utile citare i dati ottenuti dal Laboratorio di Biofisica dell'Accademia agricola Timiriasev riguardo al frumento e alla segale coltivati in contenitori di vegetazione con immissione, nei terreni più diffusi, di ^{137}Cs e ^{90}Sr . I risultati delle ricerche di Yudintseva E. e Gulaikin I. (1968) hanno confermato che l'accumulo di radionuclidi nel grano delle colture indicate, cresciute nei diversi tipi di terreno, può essere anche 100 volte superiore per unità di massa (Figura 3).

Il passaggio di radionuclidi dipende molto anche dalle caratteristiche biologiche delle colture stesse. La conferma viene dai dati (Figura 4) di ricercatori russi che hanno studiato il coefficiente di passaggio di radionuclidi nelle colture agricole in terreni sabbiosi e sileo-argillosi sbiancati (zolla erbosa podzolizzata) caratteristici delle zone contaminate della regione di Briansk e della Polesia Ucraino-Bielorussa. I coefficienti di passaggio rilevati dagli scienziati russi concordano con quelli dei ricercatori bielorusi che hanno utilizzato i loro coefficienti elaborando, sotto la guida del professor Bogdevich I., "Regole per la gestione agricola in condizioni di contaminazione radioattiva dei terreni della Bielorussia negli anni 2002-2005". Bisogna considerare che i dati sul contenuto di radionuclidi (Bq/kg) nelle colture agricole sono stati calcolati in base al peso naturale (umidità: 14% per il grano, 85% per gli ortaggi). Il contenuto di radionuclidi nella massa aeriforme secca ha permesso di rilevare la maggiore differenza tra le diverse specie di colture agricole. Una differenza considerevole è stata notata anche nelle colture foraggere (Korneev N., 1973). Gli esperimenti effettuati su campo arato con distribuzione regolare di ^{137}Cs , nella sezione di terreno profonda 25 centimetri, hanno rilevato i seguenti coefficienti: massimi valori per le leguminose *Trifolium pratense* (13,8), *Medicago sativa* (12,0), *Vicia villosa* (8,5); valori medi per

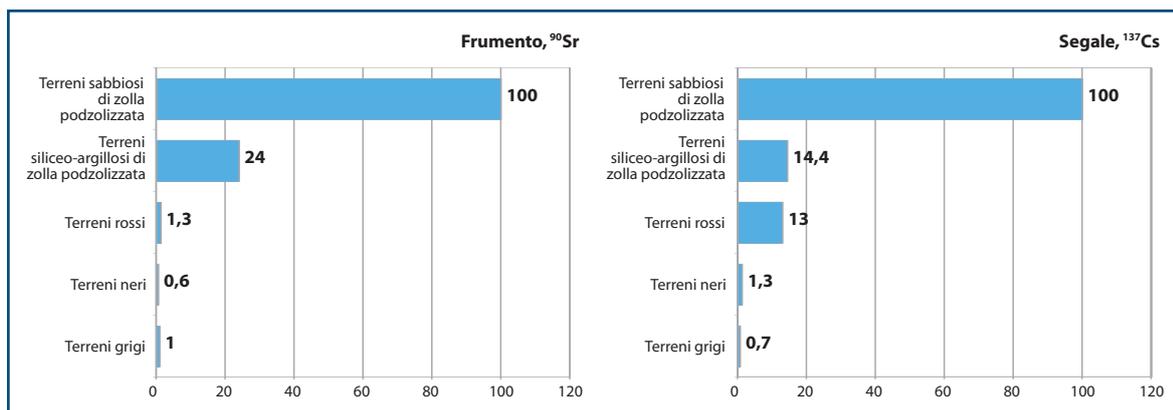


Figura 3. Accumulo dei radionuclidi ¹³⁷Cs e ⁹⁰Sr nei diversi tipi di terreno.

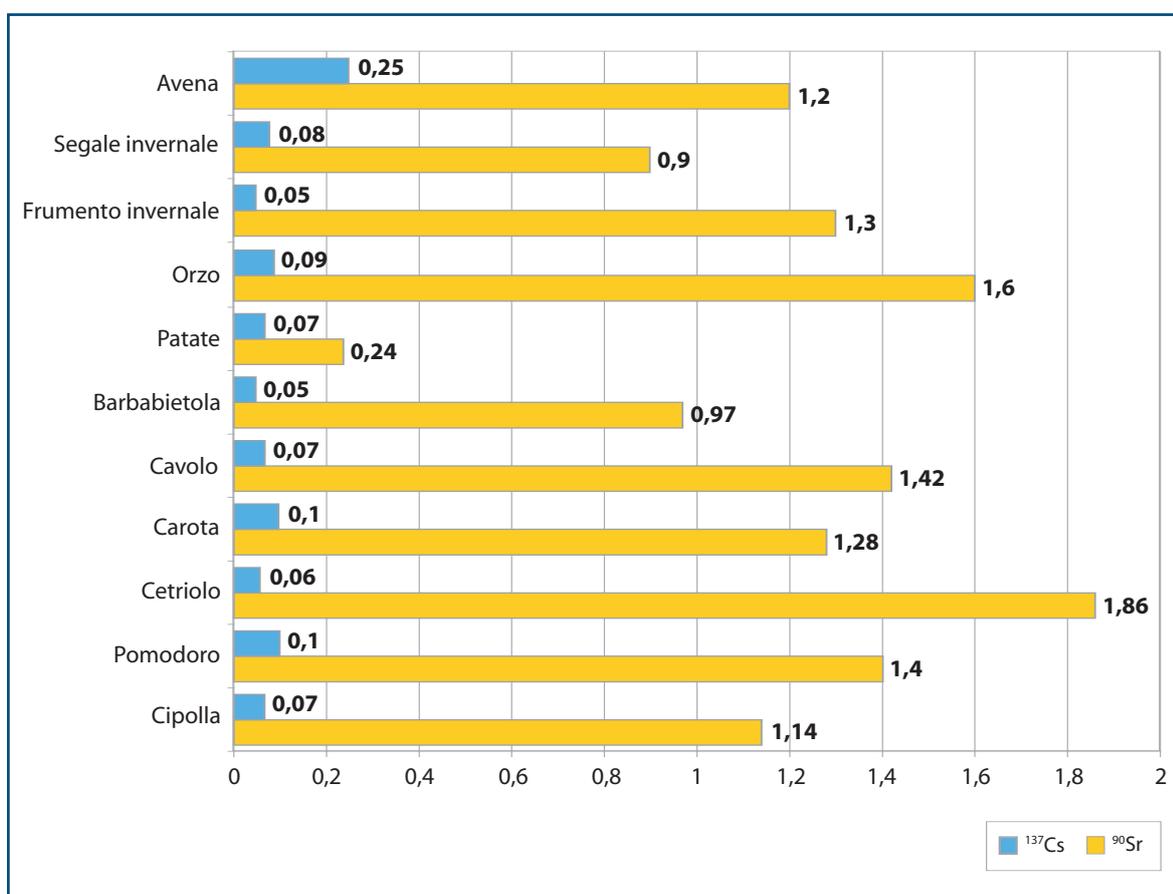


Figura 4. Concentrazione dei radionuclidi ¹³⁷Cs e ⁹⁰Sr (Bq/kg) nelle colture cresciute su terreni sabbiosi sbiancati di erbosa podzolizzata con densità di contaminazione di 1 kBq/m².

Zea mays (5,7), *Phleum pratense* (3,6), massa verde di *Helianthus* (3,5), *Dactylis glomerata* (1,8); minimi per tuberi e radici commestibili *Solanum tuberosum* (0,3), *Beta vulgaris* (1,9). I coefficienti riportati sono stati calcolati in base alla massa essiccata all'aria.

È necessario ricordare il calcio e il potassio di scambio contenuti nel terreno come ulteriori

fattori importanti per il passaggio di ¹³⁷Cs e ⁹⁰Sr dal terreno alle piante. I numerosi dati ottenuti nel corso degli esperimenti di laboratorio e quelli di campo hanno confermato la correlazione tra accumulo di radionuclidi nelle piante e concentrazione di cationi presenti nel terreno. In Figura 5 è possibile verificare come l'aumento di concentrazione del calcio da

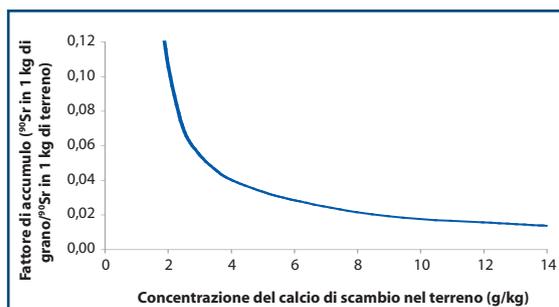


Figura 5. Influenza del calcio di scambio sull'accumulo di ^{90}Sr nel grano.

circa 2g/kg a circa 5 g/kg trattiene il passaggio di ^{90}Sr nel grano quasi in misura quadrupla. La concentrazione successiva del calcio rallenta notevolmente la riduzione del contenuto di ^{90}Sr nel grano. Le stesse modalità caratterizzano la correlazione di ^{137}Cs con il potassio di scambio (Figura 6).

I dati citati non esauriscono la varietà dei fattori che influenzano la migrazione dei radionuclidi nel ciclo "terreno-piante". In letteratura esistono dati sul passaggio dei radionuclidi nelle piante in relazione a proprietà agrochimiche del terreno (pH, contenuto di carbonati, humus), umidità, condizioni meteorologiche, ruolo e importanza della dissipazione dei radionuclidi nel terreno.

Provvedimenti agrotecnici e agrochimici che ostacolano la migrazione dei radionuclidi

Il problema di bloccare o limitare la migrazione dei radionuclidi nel ciclo "terreno-piante" è sorto nel secolo passato in relazione agli esperimenti sugli armamenti nucleari nell'atmosfera. Esperimenti che hanno causato l'intensa contaminazione radioattiva dell'ambiente. Il problema è diventato ancora più importante dopo l'incidente nucleare negli Urali del Sud (1957) e quello di Chernobyl (1986).

Le ricerche riguardanti lo studio della contaminazione delle piante, dovuta all'influenza dei radionuclidi ridistribuiti nella sezione del terreno, hanno avuto tra gli obiettivi quello di ridurre la contaminazione dei prodotti agricoli.

Alla seconda Conferenza Internazionale sull'impiego pacifico dell'energia nucleare (Ginevra, 1958) i collaboratori del LBF AAT,

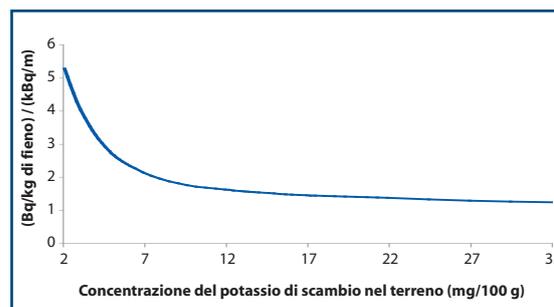


Figura 6. Influenza del potassio di scambio sull'accumulo di ^{90}Sr nel fieno (trifoglio rosso).

Guliakin I. e Yuditseva E., hanno comunicato che il passaggio di radionuclidi alla profondità di 70 centimetri (rispetto a 30 centimetri) ha abbassato la contaminazione del raccolto (avena, piselli, patate, bietole) di 10 volte.

Il problema legato al passaggio di radionuclidi nelle piante secondo il metodo di lavorazione del terreno è stato studiato in dettaglio all'SRSS del complesso industriale "Mayak". È stato rilevato come l'utilizzo dell'aratro rotante e quello a versoio per lavorare il prato naturale, in cui il 94,8% dei radionuclidi è risultato presente alla profondità di 0-5 centimetri, ha portato alla distribuzione irregolare dei radionuclidi nella sezione del terreno: circa 40% di ^{90}Sr è rimasto alla profondità indicata, mentre il 45-55% si è distribuito alla profondità da 5 a 15 centimetri. In seguito alla lavorazione del prato con aratro da scasso i radionuclidi sono passati alla profondità di 35-60 centimetri. Questi metodi di lavorazione della terra hanno limitato la contaminazione delle piante: la fresatura di 2,2 volte, l'aratura alla profondità di 25 e 60 centimetri di 3,7 e 4,0 volte rispettivamente. Gli esperimenti sono stati eseguiti su prati di terreno nero.

Il noto radioecologo accademico Korneev N. ha raccomandato di utilizzare con prudenza aratri a versoio e altri attrezzi rimuoventi la superficie del terreno, ritenendo che questo metodo di seppellimento delle sostanze radioattive, sotto gli strati arabili del terreno, potessero causare la distruzione della struttura e l'abbassamento della fertilità del terreno stesso. Secondo il suo parere, l'aratura profonda è possibile anche su terreni sbiancati (zolla erbosa podzolizzata) se l'abbassamento della fertilità naturale viene bilanciata per mezzo di

concimi chimici e organici. Le ricerche (Korneev N. e coll, 1976) hanno evidenziato che con l'immissione della dose intera di concimi chimici il raccolto delle colture foraggere è stato quasi uguale nonostante la diversa profondità di lavorazione del terreno. Il passaggio di ^{90}Sr si è dimezzato (Tabella 3).

Un ulteriore indirizzo importante per bloccare la migrazione di radionuclidi nel ciclo "terreno-piante" consiste nella realizzazione di provvedimenti agrochimici. Le prime ricerche sono state effettuate all'LBF AAT (Guliakin I. e Yudinseva E., 1956, 1958, 1962) e in seguito proseguite all'SRSS del complesso industriale "Mayak" sulla traccia radioattiva degli Urali Orientali e, negli ultimi anni, nei campi di esperimento e nelle aziende contaminate in seguito all'incidente della centrale nucleare di Chernobyl.

In seguito agli studi agrochimici si è giunti ad alcune conclusioni:

- l'introduzione dei provvedimenti agrochimici mirati a migliorare la fertilità del terreno e aumentare la resa delle colture agricole permette di abbassare il passaggio di radionuclidi nelle piante;
- la calcinatura dei terreni acidi e l'introduzione di concimi chimici, finalizzate a ridurre il passaggio di radionuclidi nel

raccolto, sono una misura efficace per i terreni con basso contenuto di sostanze nutritive e humus;

- il massimo effetto per bloccare il passaggio dei radionuclidi dal terreno alle piante si ottiene con l'applicazione di un complesso di provvedimenti: calcinatura (dei terreni acidi), immissione di concimi organici e inorganici (con prevalenza di fosforo e calcio rispetto all'azoto) nel rispetto del fabbisogno delle piante.
- il miglioramento radicale dei terreni foraggeri arabili, per limitare la migrazione di radionuclidi nella catena "foraggio-bovini-latte (carne bovina)", deve essere effettuato con provvedimenti agrotecnici, agrochimici e agronomici che devono comprendere la lavorazione del terreno, l'immissione dei concimi organici e inorganici, la creazione di un nuovo erbaggio foraggero con seminazione di erbe pluriennali.

Studiando l'efficienza dei diversi metodi che ostacolano la migrazione dei radionuclidi nel ciclo "terreno-piante" è stato possibile evidenziare un fenomeno singolare. I provvedimenti protettivi abbassano la contaminazione della

Tabella 3. Produttività delle colture foraggere e accumulazione di ^{90}Sr alla diversa profondità di lavorazione del terreno sbiancato di zolla podzolizzata.

Coltura	0-20 centimetri		0-50 centimetri	
	Resa (kg/m ²)	^{90}Sr (Bq/Kg)	Resa (kg/m ²)	^{90}Sr (Bq/Kg)
Vicia con avena (fieno)	1,06	488,4	1,10	196,1
Avena	0,69	273,8	0,64	107,3
Vicia	0,39	995,3	0,46	347,8
Trifoglio del primo anno (fieno)				
<i>primo taglio</i>	1,49	703,0	1,64	307,1
<i>secondo taglio</i>	0,49	536,5	0,60	370,0
Trifoglio del secondo anno (fieno)				
<i>primo taglio</i>	1,85	492,1	1,80	236,8
<i>secondo taglio</i>	0,54	529,1	0,47	392,2
Patata (tubero)	1,58	29,6	1,52	1,11
Mais: massa verde	2,87	173,9	2,62	66,6
Chicchi	0,85	7,4	0,69	7,4
Orzo: paglia	0,58	281,2	0,61	162,8
Lolla	0,15	148,0	0,15	114,7
Chicchi	0,54	25,9	0,52	18,5

produzione agricola, in riferimento all'unità di massa, riducendo il passaggio di radionuclidi nell'organismo umano in favore della diminuzione della dose individuale. Con l'applicazione dei provvedimenti indicati la resa del raccolto nei campi agricoli è notevolmente aumentata, ma in seguito si è potuto constatare come il contenuto totale di radionuclidi nel raccolto non differisse di molto rispetto a quello antecedente la realizzazione delle contromisure. A questo proposito è evidente come le contromisure intraprese non sempre abbassino la dose collettiva dell'irradiazione interna della quantità prevista.

La contaminazione radioattiva della base foraggera nell'allevamento del bestiame

Per le zone densamente contaminate il problema del passaggio dei radionuclidi nei foraggi ha una notevole importanza. Secondo i dati già citati (Figura 1, Tabella 2), una considerevole concentrazione di radionuclidi è stata rilevata negli alimenti di origine animale (latte, carne bovina e suina) che rappresentano la fonte principale di tutti i radionuclidi che passano nell'organismo umano con il cibo. L'erbaggio dei prati naturali ha la capacità di accumulare una grande quantità di radionuclidi. I più alti coefficienti del passaggio di radionuclidi nell'erbaggio sono stati rilevati nei prati a bassa altitudine e, in particolare, in quelli paludosi: 110 per lo ^{90}Sr e 48 per il ^{137}Cs (Figura 7), riferiti alla massa secca. Per i prati carenti di acqua e per quelli soggetti ad allagamenti, che si trovano su terreni sbiancati (zolla erbosa podzolizzata) sabbiosi e siliceo-argillosi, il coefficiente di passaggio è stato più basso: 15,8 e 11,7 per lo ^{90}Sr e 4,9 e 5,1 per il ^{137}Cs . Purtroppo nelle zone contaminate i prati paludosi hanno rappresentato una buona parte dei pascoli foraggeri naturali. Alla stessa densità di contaminazione e ad altre condizioni identiche i foraggi coltivati nei campi arati hanno accumulato meno radionuclidi rispetto alle piante di prati e pascoli. Per evidenziare questo aspetto, in Tabella 4 sono stati riportati i dati sulla contaminazione delle piante foraggere coltivate

nel periodo del pascolo estivo per nutrire gli animali in condizioni di insufficienza di erbe foraggere. In media la concentrazione di radionuclidi nei foraggi raccolti nei campi arati è stata circa 5 volte più bassa di quelli raccolti in prati e pascoli.

Per studiare il grado di contaminazione dei foraggi sono stati utilizzati come indici le concentrazioni di radionuclidi nella massa naturale (Bq/kg) e nella massa seccata all'aria. Dal punto di vista zootecnico è stata data preferenza ai dati sulla concentrazione dei radionuclidi calcolati per ogni singola unità foraggera. Avendo valori nutritivi simili, le piante foraggere possono avere diversa concentrazione di radionuclidi (valori opposti fino a dieci volte). La Figura 8 rappresenta i dati calcolati sul contenuto eventuale di ^{90}Sr e ^{137}Cs nei diversi foraggi in relazione al loro valore nutritivo per singola unità foraggera. A tale scopo sono stati utilizzati i coefficienti di passaggio dei radionuclidi nei foraggi raccolti sui terreni sabbiosi sbiancati di zolla erbosa, tipici delle zone altamente contaminate. Per gli altri terreni, con diverse caratteristiche agrochimiche, i coefficienti di passaggio dei radionuclidi, quelli di concentrazione sull'unità di massa nonché quelli contati sull'unità foraggera sono risultati diversi da quelli citati.

Nelle stesse condizioni di coltivazione e alla stessa densità di contaminazione radioattiva ($1\text{kBq}/\text{m}^2$) il contenuto di ^{90}Sr nei foraggi è stato molto più alto rispetto a quello di ^{137}Cs . In effetti, in una serie di aziende e regioni soggette alla contaminazione radioattiva, in seguito all'incidente di Chernobyl, la componente radioattiva dei foraggi è stata rappresentata in prevalenza da ^{137}Cs . Questo aspetto è risultato legato alla quantità superiore di ^{137}Cs rispetto allo ^{90}Sr contenuti nel terreno: molto spesso il rapporto $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ si è collocato nell'intervallo tra i limiti 0,01 - 0,06.

Nel caso in cui il terreno venga fortemente contaminato da due radionuclidi che si distinguono considerevolmente dai coefficienti di passaggio nella catena "terreno-piante-animali - produzione agricola - individuo", sorge la necessità di un indice obiettivo che permetta di valutare diversi tipi di foraggi caratterizzati dal diverso contenuto di ^{90}Sr e ^{137}Cs . Questo

indice potrebbe rappresentare la dose dell'irradiazione interna accumulata dagli individui attraverso gli alimenti (ad esempio il latte) prodotti da animali la cui razione alimentare comprende foraggi contaminati. Nello stesso tempo, bisogna prendere in considerazione come ogni volta gli animali consumino una quantità di foraggi contaminati superiore ad una singola unità foraggera. Si presuppone, inoltre, che pur tra diversi componenti la razione comprenda esclusivamente il tipo di foraggio contaminato da ^{90}Sr e ^{137}Cs .

La Figura 9 riporta la "gradazione" dei diversi foraggi prodotti in campi agricoli costituiti da terreno siliceo-argilloso di zolla erbosa podzolizzata, con densità di contaminazione di 340 kBq/m² per il ^{137}Cs e 37 kBq/m² per lo ^{90}Sr . In merito, è stato possibile evidenziare come con il basso rapporto $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ (<0,11) nel terreno la dose potenziale dell'irradiazione interna negli individui, determinata dal consumo di latte contaminato sia stata apportata (in quantità considerevole) dal ^{137}Cs contenuto nei foraggi destinati alle vacche in lattazione.

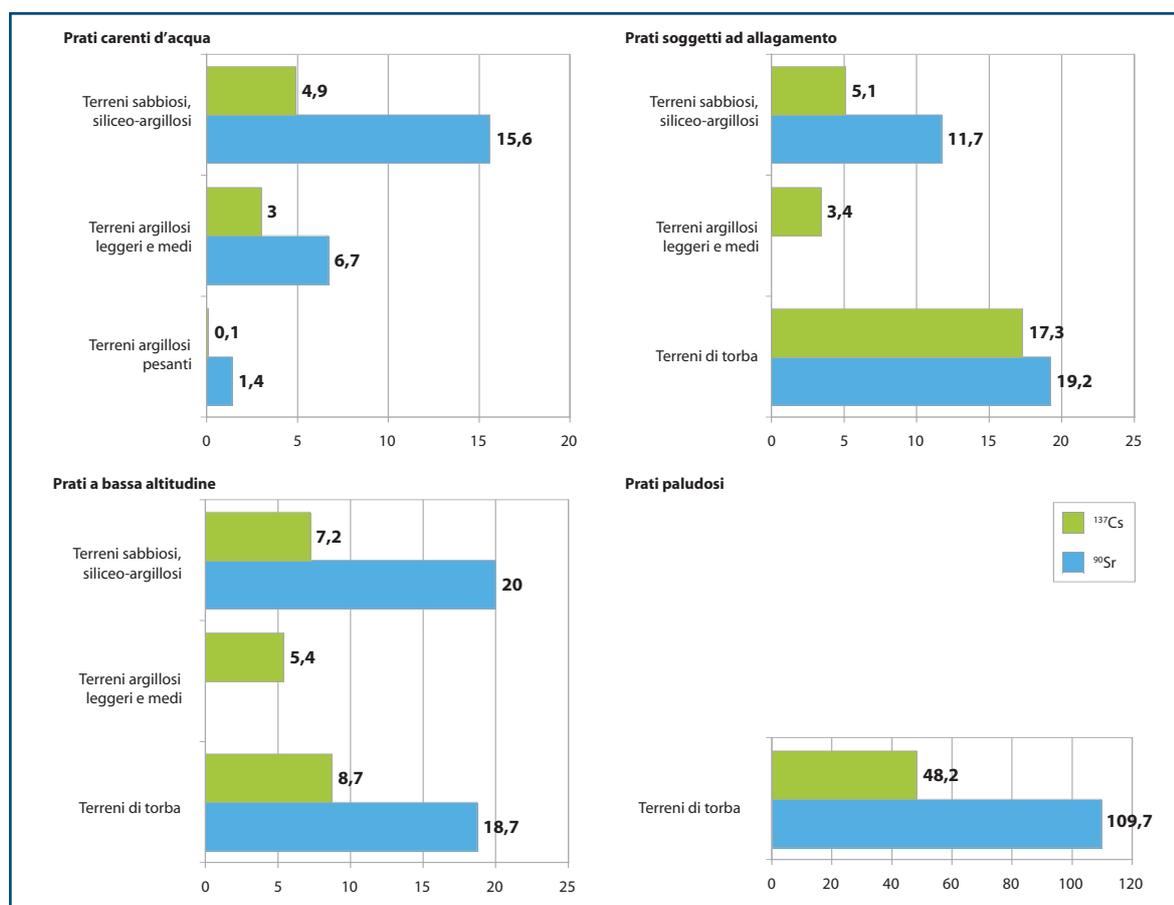


Figura 7. Coefficienti di passaggio dei radionuclidi ^{137}Cs e ^{90}Sr nell'erbaggio dei prati di tipo diverso, Bq x kg⁻¹/kBq x m⁻² (Sanzharova N., 1997).

Tabella 4. Coefficienti di passaggio dei radionuclidi ^{137}Cs e ^{90}Sr nei foraggi (Bq/kg di piante)/(kBq/m²)*.

Coltura	Sostanza secca (kg)	
	^{137}Cs	^{90}Sr
Frumento invernale	0,33	4,52
Mais	0,89	8,50
Erbe graminacee pluriennali da foraggio	1,72	9,89
Erbe graminacee-leguminose annue da foraggio	0,50	11,63

*Foraggi raccolti su terreni siliceo-argillosi sbiancati di zolla.

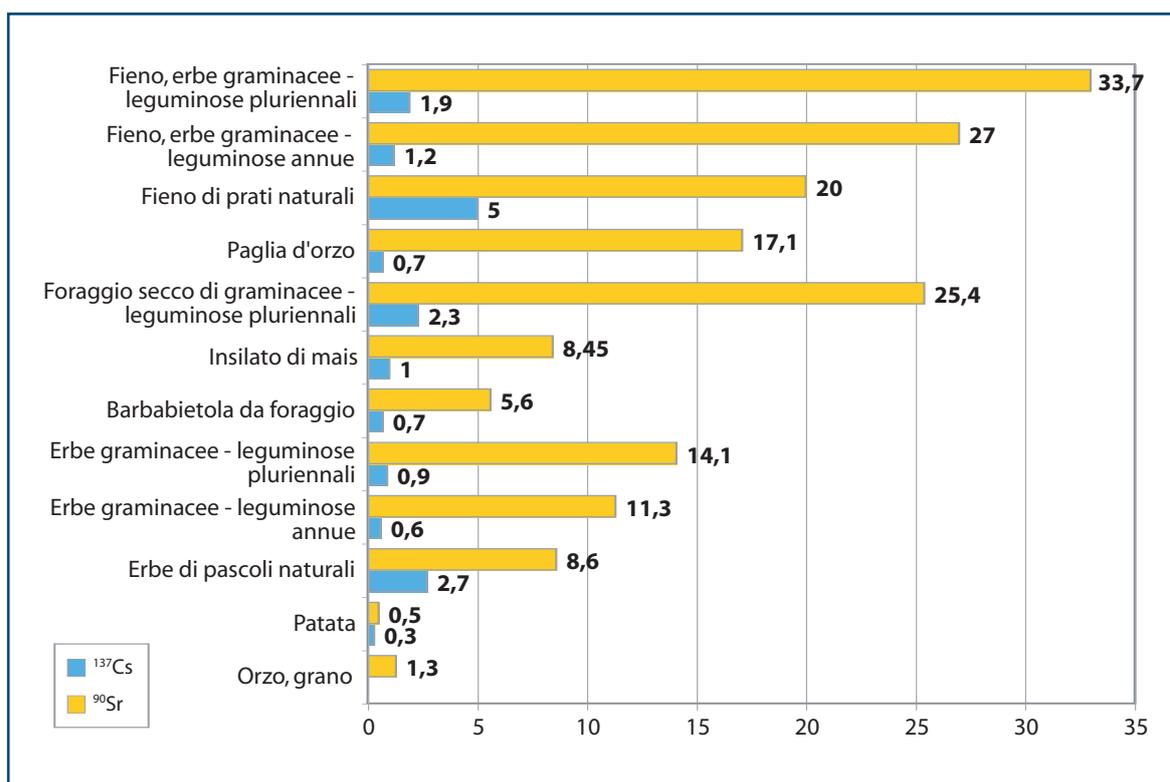


Figura 8. Contenuto dei radionuclidi ^{137}Cs e ^{90}Sr nei foraggi calcolato per una singola unità foraggera, Bq (terreni sabbiosi sbiancati di zolla podzolizzata, alla densità di contaminazione normalizzata su 1 kBq/m²).

Nel caso di una più alta proporzione di $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ "il contributo" di ^{90}Sr nel formare la dose totale dell'irradiazione interna è, ovviamente, maggiore (Figura 10).

Il totale dei radionuclidi penetrati con i foraggi non è stato uguale. Questo aspetto può essere documentato dai dati rilevati in un'azienda statisticamente media (in relazione all'area e alla struttura dei terreni agricoli, e alla resa delle colture zootecniche) della provincia di Khoiniki, regione di Gomel (1986-1991). I calcoli di riferimento hanno evidenziato (Figura 11) come nel totale dei radionuclidi contenuti nella produzione (^{90}Sr -2.439 MBq, ^{137}Cs -2.824 MBq) la parte determinata dai foraggi di prati-pascoli comprendesse circa il 40 e 62% e, nel totale della produzione coltivata, il contenuto di ^{90}Sr (60%) fosse superiore a quello di ^{137}Cs (38%). Il valore nutritivo dei foraggi di prati e pascoli è stato di circa 1,33 mila tonnellate di unità foraggere, nello stesso tempo questo indice di tutta la produzione proveniente dai campi arabili è stato 5,5 volte più alto (7,36 mila tonnellate di unità foraggere).

I dati citati permettono di concludere come, in

relazione alle caratteristiche biologiche delle piante e alle modalità di distribuzione dello ^{90}Sr e del ^{137}Cs (la parte riproduttiva delle piante concentra meno i radionuclidi rispetto alla parte vegetativa) nei diversi tipi di foraggi prodotti in condizioni identiche, la concentrazione dei radionuclidi differisca notevolmente. Questo aspetto permette di impiegare la base foraggera nel modo più efficace possibile sia in fase di produzione che di composizione della razione per gli animali.

Penetrazione dei radionuclidi negli alimenti di origine zootecnica

Gli animali da reddito sono i principali consumatori di prodotti agricoli. Essi "convertono" in modo efficace le materie prime vegetali in fonti alimentari (latte, carne, lardo, uova, ecc) ed energetiche, proteine, vitamine e sostanze minerali, importanti per l'uomo. Pertanto gli animali allevati su terreni contaminati diventano elementi rilevanti per la trasmissione di radionuclidi all'uomo.

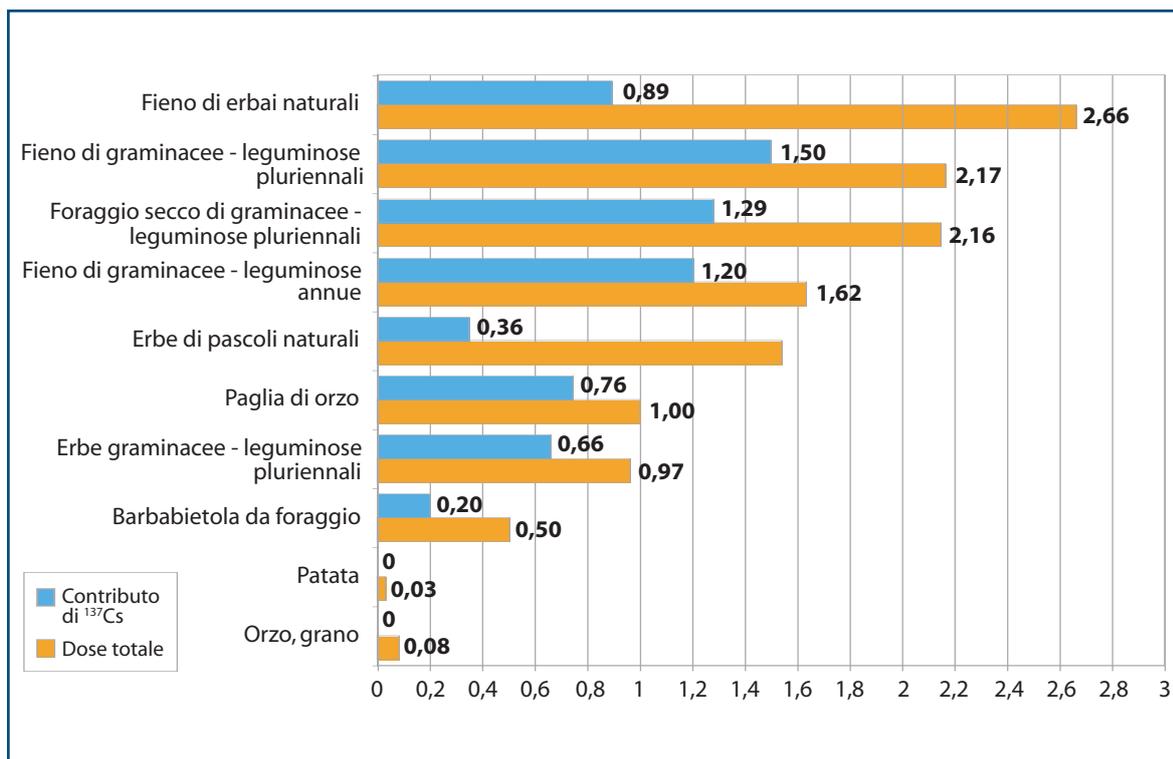


Figura 9. Gradazione dei foraggi contaminati dai radionuclidi ¹³⁷Cs e ⁹⁰Sr secondo la dose potenziale dell'irradiazione interna degli individui che hanno consumato latte di vacca, mkSv.

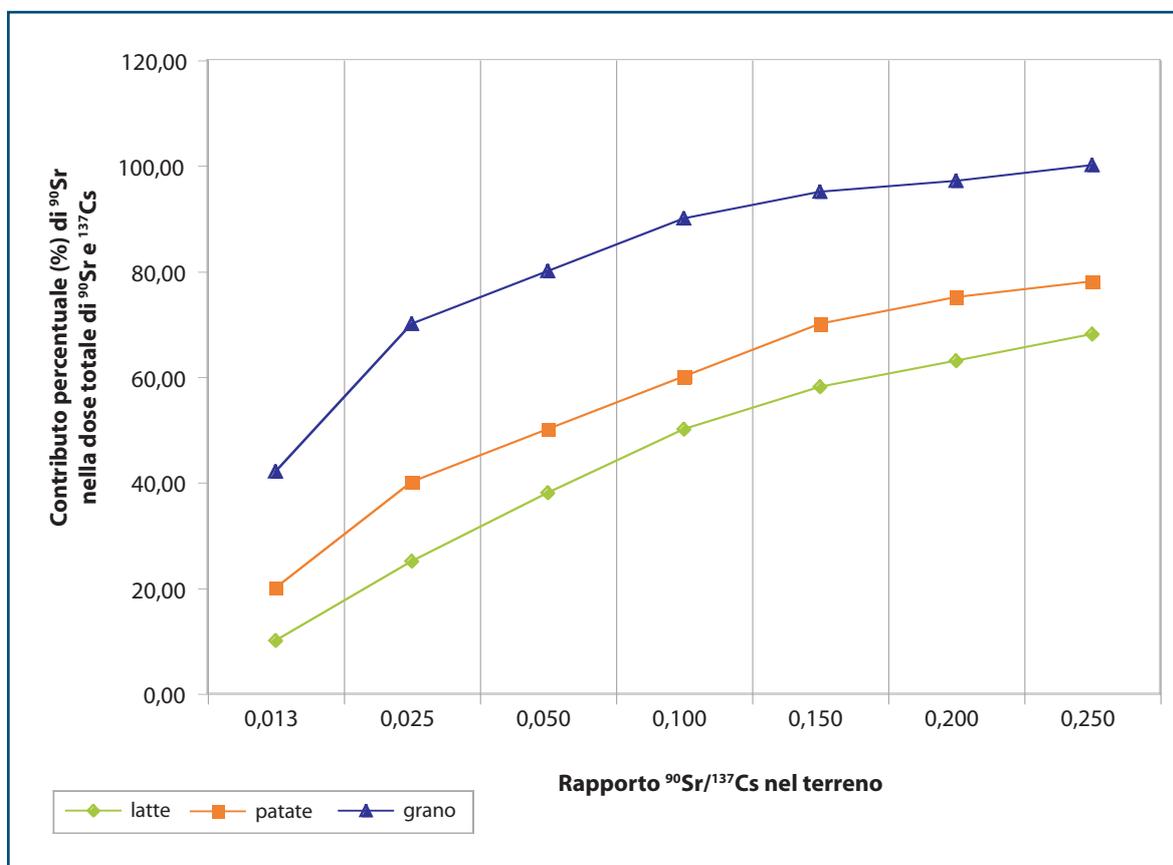


Figura 10. Contributo percentuale di ⁹⁰Sr nella dose radioattiva interna dovuta al consumo di foraggi prodotti in terreni con diverse proporzioni di ⁹⁰Sr e ¹³⁷Cs.

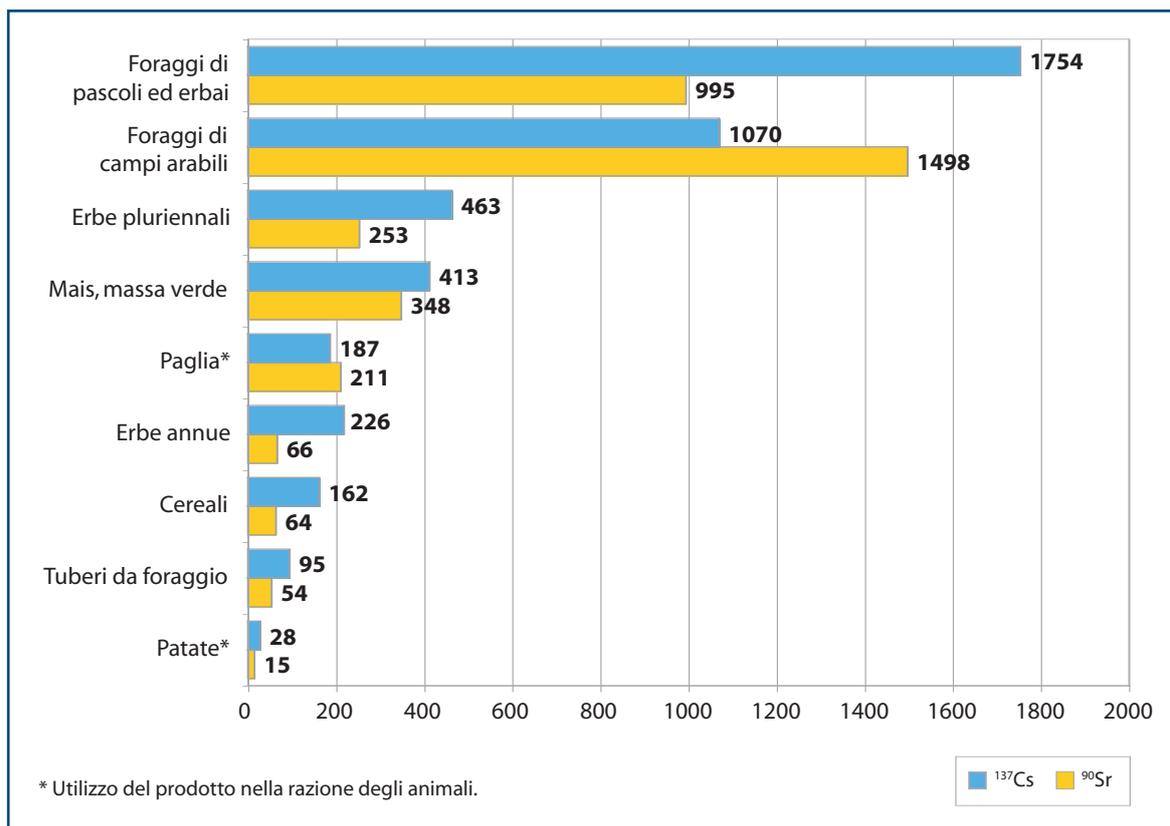


Figura 11. Contenuto dei radionuclidi ¹³⁷Cs e ⁹⁰Sr nei diversi foraggi (MBq/raccolto), prodotti in terreni siliceo-argillosi sbiancati di zolla erbosa podzolizzata con densità di contaminazione di 340 kBq/m² per ¹³⁷Cs e 37 kBq/m² per ⁹⁰Sr.

A grandi linee le sostanze radioattive penetrano nell'organismo degli animali allevati con i mangimi o con l'erba e le particelle del terreno durante il pascolo.

Passaggio dei radionuclidi nel latte

I principali aspetti relativi alla contaminazione del latte da parte di radionuclidi sono stati individuati nel corso delle esperienze tecnico-scientifiche realizzate dalla Stazione sperimentale della ditta chimica "Mayak". Sono stati impiegati mangimi prodotti in terreni agricoli posti nella traccia radioattiva degli Urali Orientali con densità di ⁹⁰Sr nel terreno fino a 3.700 kBq/m².

Molte sperimentazioni di lunga durata su vacche, con produzione annua di 3.000-4.000 kg di latte, hanno dimostrato come il livello costante del contenuto di stronzio radioattivo in questo prodotto venga rilevato 4-6 giorni dopo il passaggio alla razione "sporca". La concentrazione del radionuclide nel latte dipen-

deva direttamente dalla penetrazione quotidiana nella razione. Il contenuto totale di ⁹⁰Sr nella produzione giornaliera di latte era risultata variare tra 0,20 e 6,21% della sua quantità nella razione. È stata registrata anche la stretta correlazione tra livello della produzione giornaliera di latte e contenuto di ⁹⁰Sr.

La concentrazione di ⁹⁰Sr espressa come parte della penetrazione giornaliera del radionuclide nella razione riferita a 1 litro di latte era risultata variare tra 0,06 e 0,38%, anche se nella maggior parte dei casi l'intervallo è stato meno ampio 0,10-0,20%. La concentrazione media di ⁹⁰Sr nel latte calcolata sulla base di 174 campioni provenienti da 10 vacche è stata dello 0,15%. La concentrazione del radionuclide nel latte non è dipesa dalla durata della penetrazione di ⁹⁰Sr nell'organismo degli animali durante la lattazione (ad eccezione dell'ultimo mese quando la concentrazione di ⁹⁰Sr nel latte è aumentata del 15-25%) e dalla specie di mangimi (fieno, cereali, leguminose) usati nelle razioni invernali.

Dopo la sospensione della nutrizione delle vacche in lattazione con i mangimi contaminati la concentrazione di ^{90}Sr nel latte si è abbassata bruscamente. In un esperimento si è potuto dimostrare come per le vacche in lattazione, nutrite per 145 giorni con mangimi ad alto contenuto di stronzio radioattivo, dopo due giorni dal passaggio alla razione non contaminata, il contenuto di ^{90}Sr nel latte sia risultato circa del 50% del valore riscontrato nell'ultimo giorno dell'alimentazione con mangimi contaminati (del 14% dopo 10 giorni, del 10% dopo 30 giorni e del 6% dopo 90-150 giorni). La presenza di stronzio radioattivo nel latte, dopo la sospensione della nutrizione delle vacche in lattazione con i mangimi contaminati, è stata determinata dal passaggio del radionuclide dal tessuto osseo dello scheletro (deposito di ^{90}Sr) al sangue e, in seguito, a ghiandole mammarie e latte (Annenkov B., 1961, 1964, 1969).

Il passaggio di cesio radioattivo dalle razioni di mangime al latte è stato maggiore dello stronzio radioattivo. Studiando il passaggio del cesio radioattivo dalla razione di mangime al latte è stato registrato il suo aumento secondo l'incremento della produzione giornaliera. Ad esempio, la produzione di 8 litri al giorno di latte ha fatto registrare una quantità di ^{137}Cs del 4,8%, 11 litri del 7,4%, 14 litri dell'8,8%, 20-23 litri del 13% del contenuto del radionuclide nella razione di mangime.

La rimozione di ^{137}Cs aumenta quando la produzione si abbassa (Vokken G., 1967). Esperimenti sulle vacche con diverse produzioni giornaliere di latte hanno permesso di evidenziare come la concentrazione di ^{137}Cs , in 1 litro di latte, oscilli tra 0,40-1,68% con media dell'0,84%. Il valore di 0,8%/litro, in un progetto dell'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (1997), è stato approvato come valore medio del passaggio di ^{137}Cs dalla razione al latte.

Passaggio di radionuclidi da zolla erbosa e terreno al latte

Per studiare la penetrazione dei radionuclidi negli alimenti di produzione zootecnica è

necessario esaminare la catena trofica "terreno - mangime - animale". In questo caso, purtroppo, non si prende in considerazione un'altra via molto importante per la penetrazione di radionuclidi nell'organismo dell'animale ovvero la catena ridotta "terreno-animale". La mancata considerazione di questa via può provocare errori nel prevedere la contaminazione dei prodotti del settore agricolo e zootecnico. La penetrazione di particelle di terreno nell'organismo degli animali allevati può diventare un problema importante soprattutto nel periodo relativo al pascolo. L'importanza di questo fenomeno aumenta con il cambiamento delle condizioni meteorologiche (precipitazioni atmosferiche, ecc.) e dello stato del pascolo (altezza dell'erba, tipo di terreno, quantità di animali).

Per determinare il ruolo della zolla erbosa e del terreno in qualità di fonti supplementari di contaminazione del latte da radionuclidi (^{90}Sr , ^{137}Cs) provenienti dalla catastrofe di Chernobyl sono state realizzate ricerche sperimentali (Averin V., Kalinichenko S., Nenashev R., 1998) all'«Istituto di radiologia» (Gomel). Per minimizzare l'influenza delle concentrazioni di fondo dei radionuclidi ^{90}Sr e ^{137}Cs nella razione utilizzata, sono state svolte ricerche nella Stazione tecnico-sperimentale dell'Istituto bielorusso di ricerche scientifiche, in un allevamento (Zhodino, regione di Minsk) dove il contenuto dei radionuclidi menzionati nei mangimi è stato determinato esclusivamente dalle precipitazioni radioattive globali.

Nel periodo di rigenerazione dopo l'incidente, il ruolo del terreno come fonte potenziale di contaminazione da radionuclidi degli alimenti di produzione zootecnica è stata insignificante poiché la penetrazione dei radionuclidi nella razione di pascolo ha superato molte volte la "fonte" terreno. I coefficienti di passaggio nel sistema "terreno - latte" hanno fatto registrare valori di 0,02% per il ^{137}Cs e 0,01% per lo ^{90}Sr . I coefficienti di passaggio nel sistema "zolla erbosa - latte" sono stati dello 0,02% per il ^{137}Cs e 0,06% per lo ^{90}Sr .

Passaggio di radionuclidi nella carne e nei sottoprodotti

Dopo la penetrazione di radionuclidi nel sangue, una parte viene rimossa dagli organi escretivi (gli animali in lattazione ne rimuovono una quota con il latte, le galline con le uova) l'altra quantità rimane in organi e tessuti. Nelle condizioni di penetrazione cronica di ^{90}Sr e ^{137}Cs con i mangimi, lo stato equilibrato di radionuclidi in organi e tessuti (Bq/kg) viene raggiunto circa 30-40 giorni dopo l'inizio del consumo della razione di mangimi contaminati. Successivamente, la concentrazione di radionuclidi nel tessuto muscolare e negli organi interni degli animali in crescita non cambia.

Il radionuclide ^{90}Sr rimane quasi completamente nello scheletro, la sua concentrazione nei muscoli e nei visceri costituisce decimi (suini) oppure centesimi (bovini) della percentuale del contenuto del radionuclide nella razione giornaliera (Tabella 5). Il ^{137}Cs è caratterizzato dalla distribuzione regolare nell'organismo con la sola eccezione dello scheletro in cui la sua concentrazione è circa 2-3 volte più bassa rispetto a organi e tessuti molli. In particolare, la concentrazione dei due radionuclidi in grasso interno e lardo è circa 20-30 volte più bassa di quella in carne e relativi sottoprodotti.

I coefficienti di passaggio di ^{90}Sr dalla razione di mangimi alla carne sono stati (percentuale delle dosi giornaliere dei composti attivi nella razione degli animali per kg di peso): 0,06% per la carne bovina, 0,14% per quella di maiale, 0,35% per quella di montone e 0,10% per quella di pollo. Per il ^{137}Cs i coefficienti sono

stati: 2% per la carne bovina, 12% per quella di maiale, 10% per quella di montone e 7% per quella di pollo.

Passaggio di radionuclidi nelle uova

Il livello costante della concentrazione di ^{90}Sr e ^{137}Cs nelle uova è stato osservato dopo 5-7 giorni dall'inizio del consumo della razione di mangimi contaminati. L'albume e il tuorlo hanno accumulato una quantità di ^{90}Sr e ^{137}Cs , rispettivamente, pari a 1,4% e 2,7% del contenuto della razione giornaliera.

In alcuni casi (come per la valutazione rapida della contaminazione degli alimenti), possono essere utili i dati che collegano direttamente la concentrazione dei radionuclidi negli alimenti di produzione zootecnica con la densità di contaminazione del terreno. Questi dati approssimativi sono riportati in Tabella 6. I coefficienti di passaggio sono stati calcolati per le razioni tipiche di foraggi coltivati su terreni di diverso tipo.

Di seguito, viene riportato un esempio dell'utilizzo dei coefficienti di passaggio dei radionuclidi per la valutazione della contaminazione dei prodotti di origine zootecnica. Per determinare il livello della contaminazione del latte da cesio radioattivo, qualora vengano usati foraggi coltivati su terreni agricoli con terra grigia (terreni sabbiosi e siliceo-argillosi) con densità di contaminazione da ^{137}Cs 600 kBq/m², si procede identificando in Tabella 6 il coefficiente corrispondente (0,11), moltiplicandolo per la densità di contaminazione del radionuclide (600). La contaminazione presunta del latte è di $600 \times 0,11 = 66$ Bq/litro.

Tabella 5. Concentrazione dei radionuclidi ^{137}Cs e ^{90}Sr negli organi in relazione alla loro penetrazione cronica con la razione (percentuale delle dosi giornaliere dei composti attivi nella razione degli animali per kg di peso).

Organi e tessuti	Bovini*		Suini**	
	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs
Muscoli	0,011	3,0	0,03	13,0
Fegato	0,029	4,9	0,30	7,4
Polmoni	0,028	4,2	0,63	5,7
Cuore	0,032	5,4	0,40	9,7
Reni	0,024	7,0	0,65	13,3
Scheletro	4,32	0,9	115,5	2,4

*Peso vivo bovini = 400 kg **Peso vivo suini = 100 kg

Mezzi e metodi di riduzione della contaminazione degli alimenti di origine zootecnica

Il problema della riduzione della contaminazione degli alimenti di origine zootecnica deve essere affrontato in due direzioni essenziali. La possibilità di limitare e prevenire la penetrazione dei radionuclidi nell'organismo del bestiame produttivo è, sicuramente, un'attività di primaria importanza. In questo caso i metodi e l'organizzazione sia della nutrizione che della cura delle vacche in lattazione e dei capi da macello hanno particolare importanza. Di conseguenza, nel periodo estivo di pascolo, è necessario impiegare in modo efficace i mangimi economici del pascolo su terreni naturali con il minimo livello di contaminazione. Nello stesso tempo bisogna assicurare la nutrizione degli animali con colture a basso coefficiente di accumulazione di radionuclidi nella massa verde (mais, segale vernina, cereali pluriennali e annuali). Buoni risultati sono stati ottenuti con il pascolo del bestiame su terreni naturali e fornitura alle vacche di foraggi supplementari da campo: la concentrazione di ^{137}Cs nel latte si è abbassata due volte (Iliazov R., 1994).

L'applicazione delle tecnologie di stabulazione nelle aziende con prati e pascoli poco produttivi e contaminati sembra più efficace dal punto di vista radiologico. In questo caso il bestiame si trova fisso in stabulazione e con-

suma la maggior parte dei foraggi verdi con le colture fresche del periodo. Per la razione quotidiana si potrebbero impiegare colture foraggere realizzate in campi arabili. Questo sistema di cura e nutrizione estiva può favorire la riduzione della concentrazione di radionuclidi nel latte di 3-5 volte. Nel periodo di stabulazione invernale, per limitare la penetrazione dei radionuclidi nell'organismo degli animali, si deve porre particolare attenzione alla composizione delle razioni. Di regola le aziende fanno provviste di mangimi con diverso contenuto di radionuclidi. Le cause sono diverse: da una parte la differente densità di contaminazione dei terreni agricoli, dall'altra le particolarità biologiche di alcune colture foraggere. Per esempio, nell'azienda «Krasny Iput» (provincia di Novozybkov, regione di Briansk) il contenuto di ^{137}Cs (Bq/kg) è risultato tra: 30-21.518 nel fieno, 186-1.696 nell'erba da foraggio, 48-105 negli insilati e 4-59 nelle patate.

Utilizzando gli stessi mangimi, coltivati nelle stesse condizioni (su terreni sbiancati siliceo-argillosi con densità di contaminazione di 1 kBq/m^2), è possibile variare notevolmente il livello di contaminazione degli alimenti di origine zootecnica modificando il tipo di nutrizione. I dati riportati nelle Figure 12 e 13 lo confermano. I diversi tipi di nutrizione possono modificare più di due volte la penetrazione dei radionuclidi nell'organismo delle vacche in lattazione. Una differenza sostanziale della

Tabella 6. Valutazione dei coefficienti di passaggio dei radionuclidi ^{137}Cs e ^{90}Sr dal terreno nei prodotti di origine zootecnica.

Coefficienti di passaggio (CP)	Tipo di terreno					
	Terreni sabbiosi e siliceo-argillosi		Terreni sabbioso-argillosi		Terreni torbosi	
	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs
Terreno-latte	0,24	0,11	0,07	0,036	0,54	0,40
Terreno-carne bovina	0,057	0,28	0,02	0,09	0,13	1,00
Terreno-carne suina	0,0075	0,06	0,002	0,023	0,04	0,25
Terreno-carne di montone	0,040	0,12	0,001	0,041	0,09	0,76
Terreno-uova (mista)	0,055	0,006	0,02	0,004	0,17	0,08
Terreno-pollo	0,0004	0,0013	0,0001	0,0004	0,001	0,008

CP = rapporto della concentrazione del radionuclide (Bq/kg di prodotto) alla densità di contaminazione del terreno da parte dello stesso radionuclide (kBq/m^2).

penetrazione dei radionuclidi determinata dal diverso tipo di nutrizione è stata osservata anche nei bovini all'ingrasso.

L'utilizzazione di mezzi con la capacità di bloccare parzialmente l'assorbimento delle sostanze radioattive durante il passaggio dal tratto digerente al sangue può diventare un fattore importante nella riduzione della contaminazione degli alimenti di origine zootecnica. Il calcio può servire per ridurre lo stronzio. Negli esperimenti iniziali prima sugli animali da laboratorio e, in seguito, su quelli da allevamento è stato dimostrato che saturando le razioni a basso contenuto di calcio con i relativi sali è possibile diminuire notevolmente (anche di quattro volte) l'accumulo di ^{90}Sr nell'apparato scheletrico, sorta di "deposito" del radionuclide (Annenkov B., 1961, 1964, 1966) (Figura 14).

Alla Stazione sperimentale della ditta chimica "Mayak" hanno studiato l'influenza delle razioni arricchite di calcio nella penetrazione di ^{90}Sr nel latte delle vacche in lattazione. Nelle razioni usuali è stato aggiunto il carbonato di calcio oppure il fieno delle graminacee (basso contenuto di calcio) è

stato sostituito con quello delle leguminose (alto contenuto di calcio). L'aumento di calcio nella razione da 60 fino a 220-240 g ha permesso di abbassare la concentrazione di ^{90}Sr nel latte di circa un terzo del valore (Annenkov B., 1961, 1964). Gli esperimenti successivi, condotti nella Stazione sperimentale, hanno dimostrato come l'aumento di calcio nelle razioni delle vacche da 30-40 fino a 60-70 g diminuisca la concentrazione di stronzio radioattivo nel latte di 2-2,5 volte (Sirotkin A., 1969).

Esaminando i dati a disposizione, è possibile concludere che nelle aziende dove sono state rispettate tutte le norme correnti di nutrizione minerale delle vacche in lattazione, l'aumento del contenuto di calcio nella razione ha contribuito a una minima riduzione della penetrazione di ^{90}Sr nel latte. Quando le razioni del bestiame sono composte da mangimi a basso contenuto di calcio (fieno di graminacee, insilati di mais, grano foraggero) le aggiunte di minerali a base di calcio sono assolutamente necessarie dal punto di vista zootecnico ma anche radiologico. Questa misura garantisce almeno la doppia diminuzione dell'abbassamento della

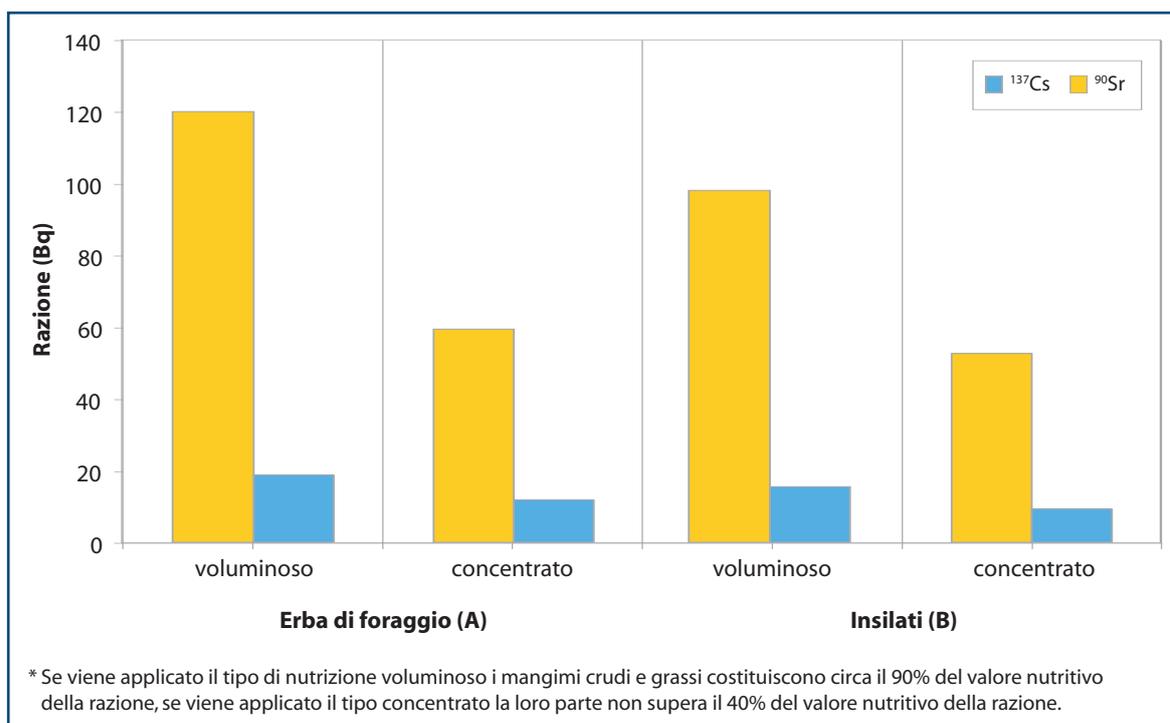


Figura 12. Penetrazione giornaliera dei radionuclidi ^{137}Cs e ^{90}Sr determinata dal diverso tipo di nutrizione delle vacche in lattazione.

penetrazione di stronzio radioattivo negli alimenti di origine zootecnica. Negli ultimi vent'anni è stata prestata grande attenzione nel ridurre l'assorbimento del cesio nel tratto digerente del bestiame. Per risolvere il problema

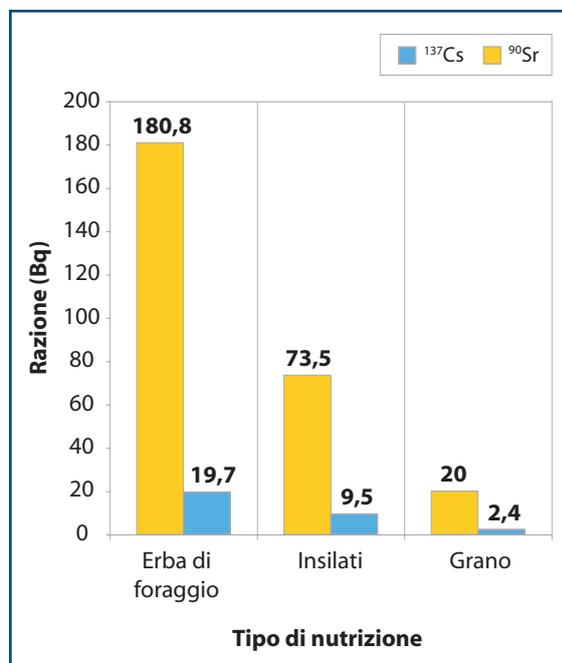


Figura 13. Penetrazione giornaliera dei radionuclidi ¹³⁷Cs e ⁹⁰Sr determinata dal diverso tipo di nutrizione dei bovini all'ingrasso.

sono stati proposti preparati a base di ferrocianuri o azzurro di Berlino (AB). L'efficienza di questi composti chimici è stata esaminata in modo dettagliato in tutte le specie allevate e nelle renne. I preparati di AB sono stati adottati in numerosi paesi al mondo, compresi quelli della USI (paesi dell'ex-Unione Sovietica), in forma di preparati di sale, boli, miscele di concentrati per l'utilizzo successivo, in qualità di aggiunti, a mangimi combinati e crudi.

Negli ultimi 10 anni è stata acquisita una grande esperienza sull'utilizzo dell'AB negli allevamenti di animali da latte. Per le vacche in lattazione, è consigliabile utilizzare 3 g di AB al giorno (circa 6 mg/kg del peso) oppure 2-3 capsule di 200 g con 15-20% di AB ogni 6-8 settimane durante il periodo del pascolo. In seguito, si è visto che la concentrazione di ¹³⁷Cs nel latte si abbassa di circa 2-4 volte (Figura 15). Anche in caso di somministrazione di dosi di AB (sale di Ghise) relativamente piccole, 0,8-1,0 mg/kg di peso, è stato rilevato l'abbassamento doppio del livello di contaminazione.

L'utilizzo di AB ha permesso di ottenere buoni risultati anche per la carne e i relativi sottoprodotti. Agli animali che hanno pascolato per un lungo periodo è risultata più conveniente la somministrazione di preparati di

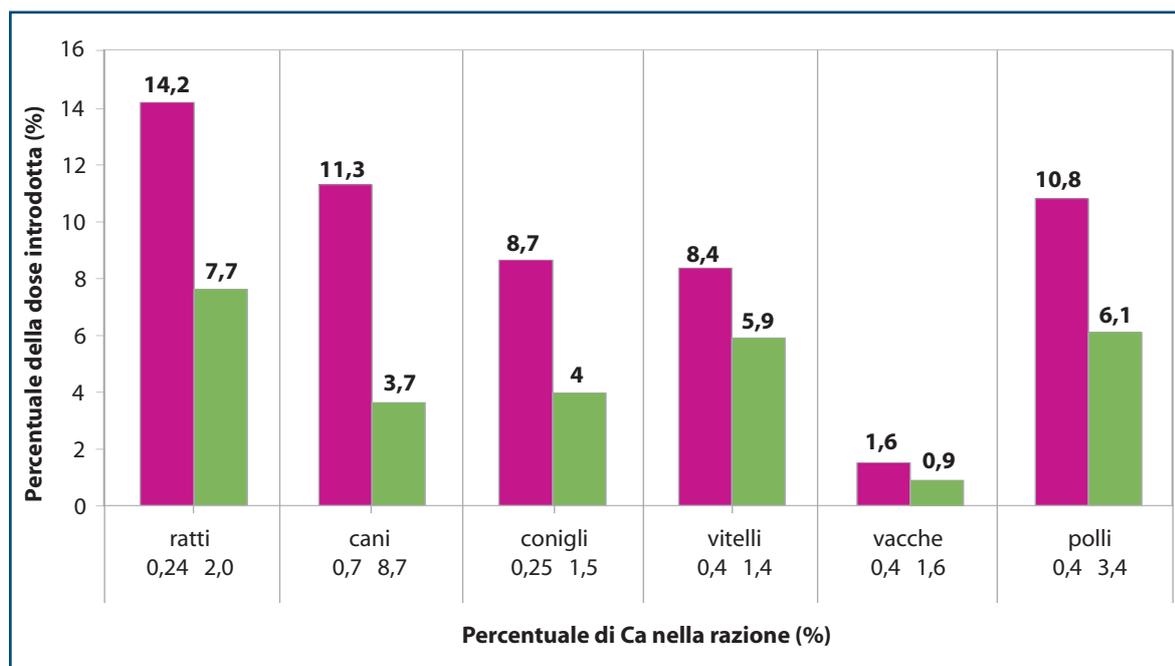


Figura 14. Influenza del contenuto di calcio nella razione sull'accumulo di ⁹⁰Sr nello scheletro degli animali nel caso della sua penetrazione cronica con l'impiego di mangimi.

sale, contenenti AB, realizzati in modo speciale. In Norvegia dal 1989 più di 30.000 pecore hanno ricevuto ogni anno circa 100 tonnellate di preparati di sale contenenti 2,5% di AB. In Bielorussia, nella regione di Gomel, nel 1993 sono stati utilizzati 300.000 contenitori di sale (6% di AB in forma di ferrocianuro) di 5 kg ciascuno. Grazie al consumo di questi preparati la concentrazione di ^{137}Cs nella carne si è ridotta del doppio.

Nelle esperienze di produzione del bestiame da carne, l'inserimento di boli del peso di 200 g (con 15-20% di AB) nel rumine degli animali ha fatto registrare risultati soddisfacenti. La carne e le parti anatomiche degli animali, macellati dopo 90 giorni dall'inserimento del preparato, hanno fatto registrare una concentrazione di cesio radioattivo in media 3,5 volte più bassa. In Figura 16 sono riportati i dati sull'efficienza dell'applicazione dei preparati di ferrocianuro nella riduzione del contenuto di ^{137}Cs nel tessuto muscolare di altre specie di animali allevati (Sirotkin A., Iliazov R., 2000). Attualmente non ci sono dubbi sulla necessità

di somministrare ferrocianuri per ridurre la contaminazione degli alimenti di origine zootecnica, soprattutto nelle aziende situate nelle zone con un alto livello di inquinamento radioattivo. L'utilizzo di questi preparati ha come limitazione l'aspetto economico. Le spese di acquisto, trasporto e applicazione dei preparati di AB sono elevati (circa 3-4 dollari per animale). Queste spese supplementari possono essere inaccettabili per gli allevatori del settore privato impegnati nella produzione di latte. Uno dei metodi di riduzione della concentrazione dei radionuclidi nella carne e nei sottoprodotti degli animali d'allevamento che hanno accumulato nell'organismo, durante l'ingrasso, una grande quantità di ^{90}Sr e ^{137}Cs è il passaggio a mangimi più "puliti". L'elaborazione di metodi di "purificazione" degli animali vivi ha assunto una grande importanza dopo i tragici incidenti nucleari e le precipitazioni radioattive che hanno determinato la formazione di zone ad alta contaminazione radioattiva in cui il bestiame ha accumulato eccessive quantità di radionuclidi

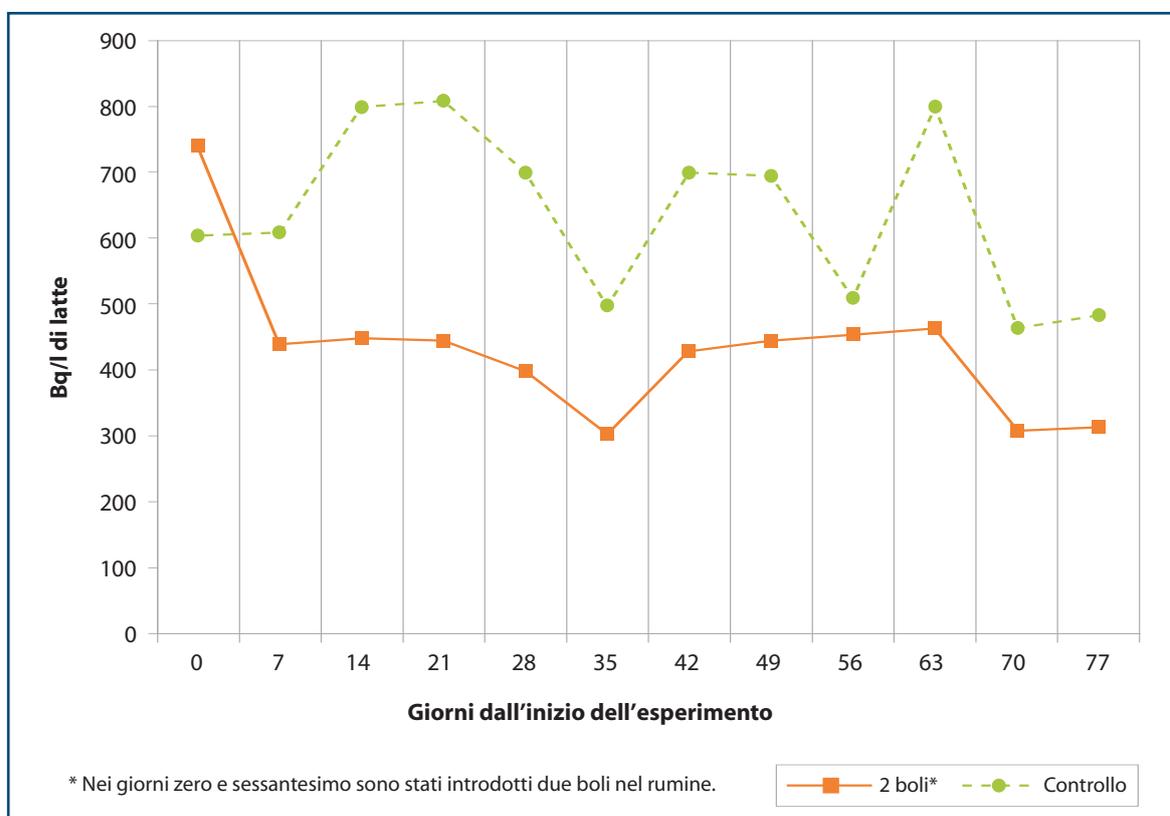


Figura 15. Influenza dei boli di azzurro di Berlino (AB) nel contenuto di ^{137}Cs nel latte di vacche (progetto ONU, EII, 1997).

anche a causa di condizioni sfavorevoli di nutrizione e cura.

Dopo l'incidente radioattivo, quando la situazione generale si è normalizzata (le previsioni vengono realizzate nel corso di 7-10 giorni dopo l'effetto radioattivo) e la probabilità della moria di massa del bestiame è stata esclusa, diventano più evidenti le possibili conseguenze sul bestiame determinate dall'evento. La preservazione degli animali, il ristabilimento delle loro capacità riproduttive, l'ottenimento di alimenti, in particolare della carne e dei sottoprodotti, con livelli ammissibili di radionuclidi diventano obiettivi primari. Il passaggio a razioni "pulite" o "poco sporche" può risolvere il problema della riduzione dei radionuclidi nella carne.

Il metodo di "purificazione" dell'organismo degli animali vivi è basato sul loro metabolismo. Bisogna tener conto di due aspetti particolarmente importanti. Il primo è legato alla concentrazione dei radionuclidi in organi e tessuti (carne e sottoprodotti) attraverso la loro penetrazione cronica nell'organismo degli animali. Il secondo riguarda la maggior parte dei radionuclidi accumulati nei tessuti molli attraverso lo scambio rapido con le componenti del sangue. Quest'ultimo aspetto è estremamente importante poiché permette di abbassare la contaminazione della carne,

facendo passare, nell'ultima fase dell'ingrasso, gli animali "sporchi" ai mangimi "puliti".

Questo effetto è stato dimostrato circa 40 anni fa con indagini tecnico-scientifiche su suinetti svezzati. È stato accertato come la concentrazione dei radionuclidi nei tessuti molli dei suinetti, dopo il consumo di razioni ad alto contenuto di radionuclidi (fino a 7.000 Bq al giorno) per 254 giorni, si abbassasse rapidamente con l'ingrasso mediante razioni di mangimi "puliti". In particolare, è stato dimostrato come dopo la divisione dei suini in 2 gruppi, quelli del secondo gruppo nutriti con mangimi "puliti" per 60 giorni, prima della macellazione, presentassero solo tracce di radiostronzio rispetto a quelli del primo gruppo nutriti solo per 30 giorni con razioni "pulite" (Annenkov B. e coll. 1964).

I risultati di questi studi anche se ormai datati, sono stati confermati nel corso dei lavori di eliminazione delle conseguenze determinate dall'incidente di Chernobyl nel settore agricolo e zootecnico. In luglio-agosto del 1986 sotto la guida dell'autore e con l'attiva partecipazione dei dottori Finov V. e Kruglikov B. nell'azienda "Chyrvony Kastrychnik" (provincia di Braghin, regione di Gomel) sono stati realizzati studi tecnico-scientifici su 55 vacche e 75 tori. Gli animali da esperimento hanno pascolato, nei primi due mesi dopo l'incidente, in territori ad alta contaminazione accumulando grande quantità di ^{137}Cs (37.000 Bq/kg secondo i dati della macellazione di controllo prima dello studio). Nell'azienda è stato possibile, in un solo mese, fornendo mangimi "puliti" agli animali, ottenere la doppia e tripla riduzione, rispettivamente nelle vacche e nei tori, della concentrazione dei radionuclidi nella carne e nei sottoprodotti.

Il Ministero dell'industria agricola dell'URSS ha emanato "Raccomandazioni provvisorie sull'organizzazione del periodo finale di ingrasso del bestiame da carne nei territori della RSFSR (Repubblica Socialista Federativa Sovietica della Russia), della RSS di Bielorussia, della RSS di Ucraina sottoposti alla contaminazione radioattiva", risultate abbastanza efficaci e utili come misure per la riduzione della contaminazione radioattiva degli alimenti di origine zootecnica.

Il metodo dell'ultima fase di nutrizione del

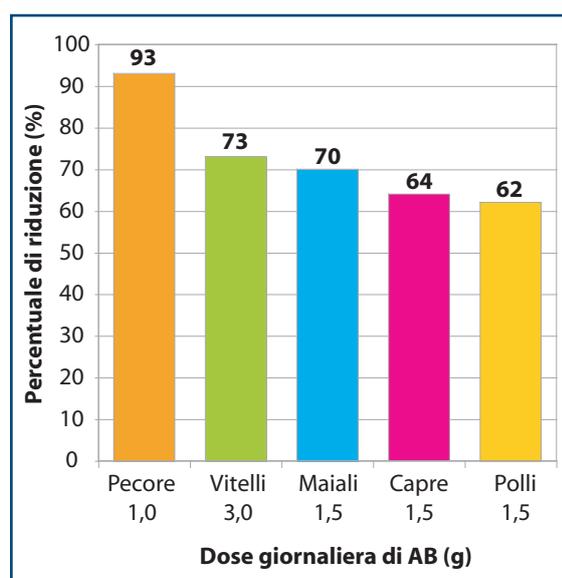


Figura 16. Influenza dei preparati di azzurro di Berlino nella razione per la riduzione del contenuto di ^{137}Cs nell'organismo degli animali.

bestiame con mangimi "puliti" viene applicato con successo da lungo tempo nelle aziende presenti nei terreni contaminati. Ad esempio, nel 1987, in tre aziende della regione di Gomel ("Strelichevo", "Peramozhnik", "60-letia Oktiabria"), selezionate per la realizzazione dell'ingrasso finale del bestiame contaminato con le razioni "pulite", sono stati ingrassati e portati al macello oltre 16 mila capi bovini. Nelle regioni di Zhitomir e Kiev, nel 1996, è stato realizzato l'ingrasso finale con mangimi "puliti" di 1.600 capi, ciò ha assicurato nel corso di 2-3 mesi la riduzione di concentrazione di ^{137}Cs nel tessuto muscolare da 3.000 Bq/kg fino a 130 Bq/kg (Prister B., 1998). Dopo l'incidente di Chernobyl centinaia di migliaia di capi bovini e altre specie animali sono stati sottoposti a "purificazione" da radionuclidi prima di essere macellati. Per la messa in pratica delle conoscenze acquisite sono stati elaborati coefficienti di riduzione della contaminazione della carne da ^{137}Cs facendo passare il bestiame a mangimi "puliti" (Figura 17).

Normalizzazione dei radionuclidi in mangimi e razioni

Per sviluppare l'allevamento nei territori caratterizzati da intenso inquinamento radioattivo sono state applicate misure protettive

mirate all'ottenimento di alimenti con il minimo contenuto di radionuclidi. I più efficaci metodi zootecnici sono la normalizzazione del limite accettabile di radionuclidi nella razione (LACr) e l'applicazione di tecnologie ottimali dal punto di vista radiologico legate alla nutrizione e alla cura degli animali, soprattutto, nel periodo del pascolo estivo.

In Bielorussia, oltre all'utilizzo del criterio del LACr, sono state stabilite norme di concentrazione accettabile dei radionuclidi (CAm) in diversi tipi di mangimi ("Istruzioni per la gestione del complesso industriale agricolo nelle condizioni di inquinamento radioattivo dei terreni in Bielorussia dal 1997-2000", LAS-99). Le norme CAm hanno una grande importanza per la pianificazione e l'utilizzazione razionale dei terreni agricoli allo scopo di produrre mangimi con livelli accettabili di contaminazione radioattiva.

Il calcolo del LACr viene effettuato secondo la formula:

$$\text{LACr} = \text{LAS} \times 100 / \text{CP}, \text{dove}$$

LAS = livelli statali accettabili del contenuto di radionuclidi nel latte ($^{137}\text{Cs} = 100$, $^{90}\text{Sr} = 3,7$ Bq/kg) e nella carne ($^{137}\text{Cs} = 500$ Bq/kg);

CP = coefficiente di passaggio del radionuclide dalla razione all'alimento di origine zootecnica (espresso in percen-

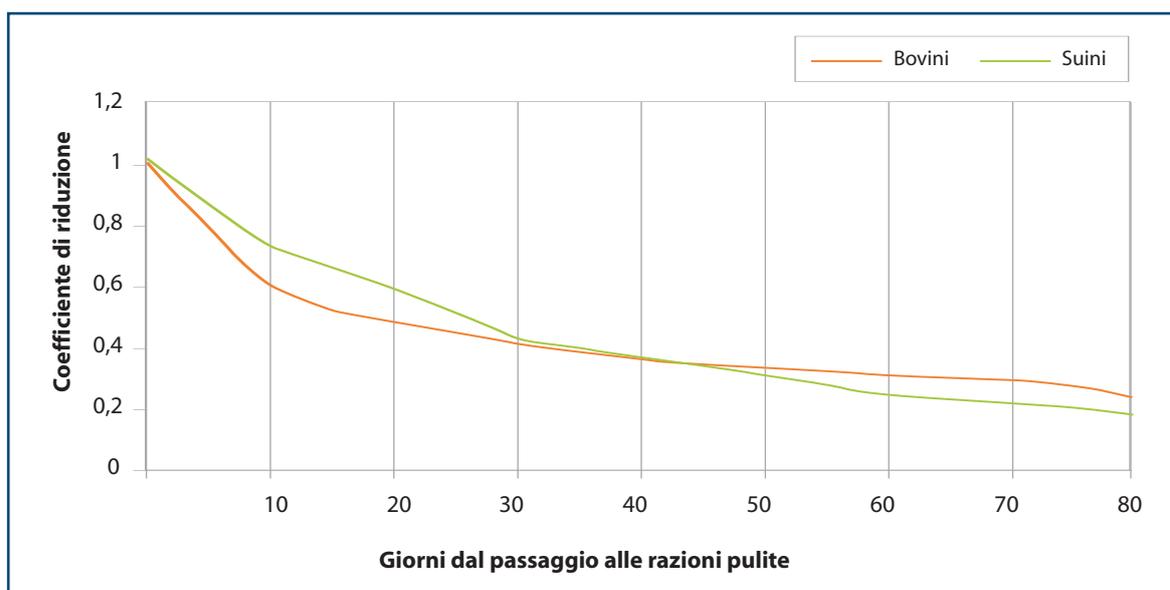


Figura 17. Coefficienti di riduzione di ^{137}Cs nell'organismo di bovini e suini dopo il passaggio alla nutrizione con mangimi "puliti".

tuale) del contenuto giornaliero in 1 l oppure 1 kg. CP coefficiente del radionuclide nel latte per $^{137}\text{Cs} = 0,83\%/l$, per $^{90}\text{Sr} = 0,15\%/l$. CP della razione nella carne costituisce 2,0%/kg per la carne bovina, 12,0% per la carne suina, 10,0% per la carne di montone e 7,0% per la carne di pollo.

Dati sul LACr sono riportati in Tabella 7. I valori del LACr riportati sono esatti solo per LAS-99 e CP razione-alimento che sono indicati in Tabella 7 e nel testo.

La questione relativa alla normalizzazione del contenuto dei radionuclidi nei mangimi è ancora discutibile. Valutando i possibili livelli di contaminazione del latte è stato impiegato come parametro la concentrazione di radionuclide in 1 kg di fieno o erba (Buldakov L., Moskalev Y., 1968). Si potrebbe determinare la CAM basandosi sull'ipotesi che un tipo di mangime sia l'unico componente della razione. In questo caso dividendo il valore del LACr delle vacche in lattazione (12.500 Bq ^{137}Cs) per la massima quantità di mangime che potrebbe consumare l'animale (ad esempio: fino a 17 kg di fieno, 40 di insilati, 33 di erba da foraggio e 40 kg di tuberi) si potrebbe conoscere la CAM di ^{137}Cs che sarebbe rispettivamente 735, 312, 357 e 312 Bq/kg. A questo punto, è necessario chiedersi se questo approccio sia giusto. La risposta può essere solo negativa. In realtà, nelle aziende, le razioni delle vacche in lattazione sono composte da tanti tipi di mangimi e grano foraggero in diverse proporzioni. Inoltre, a causa della fisiologia dei ruminanti e della loro digestione, l'utilizzazione di qualsiasi mangime come monomangime non assicurerebbe la nutrizione bilanciata e completa delle vacche in lattazione non permet-

tendo di ottenere il potenziale genetico di produttività del latte.

Le norme per la CAM proposte da LAS-99 sono state "scelte" senza l'elaborazione e la spiegazione di approcci metodologici per la soluzione del problema. Tra l'altro queste norme non sono molto corrette. In effetti, applicandole alle razioni delle vacche in lattazione nel periodo della stabulazione invernale si è potuto constatare come la contaminazione del latte da ^{137}Cs possa essere di 143-145 Bq/litro e da ^{90}Sr di 5,60-5,97 Bq/litro, valori che superano le norme LAS-99 per il latte di 1,5 volte (Tabelle 8-10). A questo proposito è necessario proseguire il lavoro sulla precisione delle norme CAM nei limiti di LAS-99 vigente.

Elaborando le nuove norme CAM nei mangimi ci si dovrebbe basare sui seguenti principi. In primo luogo, è necessario accettare che i radionuclidi dei diversi mangimi e delle razioni vengano assimilati dagli animali allo stesso modo e che il loro passaggio negli alimenti sia caratterizzato dai rispettivi coefficienti in modo esatto (Tabelle 8 e 9). Il principio è discutibile ma altri dati scientifici più validi su questi aspetti, per ora, non esistono.

Elaborando le norme è necessario prendere in considerazione la fisiologia degli animali da reddito. I ruminanti, in particolare, grazie alla struttura del loro stomaco hanno bisogno di mangimi voluminosi (fieno, paglia, insilati, erba da foraggio, ecc.). I concentrati anche se rappresentano l'ingrediente indispensabile nelle razioni (soprattutto per gli animali di alta produzione), dal punto di vista radiologico non danno un apporto notevole alla contaminazione radioattiva della razione. Secondo calcoli effettuati dal-

Tabella 7. Limiti accettabili del contenuto dei radionuclidi ^{137}Cs e ^{90}Sr nella razione.

Animali	Alimenti	LAS-99 (Bq/kg)		CP ₂ raz-alim		LACr (Bq)	
		^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs
Vacche	Latte	3,7	100	0,15	0,8	2467	12.500
Bovini	Carne		500		2,0		25.000
Suini	Carne		500		12,0		4.167
Ovini	Carne		500		10,0		5.000
Pollame	Carne		500		7,0		7.143

l'autore, le vacche in lattazione con i mangimi concentrati consumano in media il 3% di ^{90}Sr e il 6% di ^{137}Cs del loro contenuto totale nella razione.

Calcolando la CAM per i ruminanti un particolare riguardo deve essere prestato ai mangimi voluminosi. Il calcolo deve tener conto della sostanza secca poichè l'umidità dei diversi mangimi può essere molto variabile, dal 15% (mangimi crudi) fino all'88% (tuberi). Uno dei parametri più importanti che caratterizzano la qualità della razione degli animali è il contenuto di sostanza secca. Le vacche in lattazione consumano in media 13,9 kg di sostanza secca al giorno della composizione dei mangimi voluminosi. Questa cifra è stata considerata per calcolare la CAM dei radionuclidi nei mangimi per le vacche in lattazione (7,6 kg per il bestiame da carne con peso di 400 kg).

Per calcolare la CAM dei radionuclidi nei mangimi per le vacche in lattazione vengono usate le seguenti formule:

$$CA_{\text{Sr}} = (\text{LACr} \times 0,97 \times \text{SS}) / 13,9 \times 100$$

$$CA_{\text{Cs}} = (\text{LACr} \times 0,94 \times \text{SS}) / 13,9 \times 100$$

dove

$CA_{\text{Sr}}, CA_{\text{Cs}}$ = concentrazioni accettabili di ^{90}Sr e ^{137}Cs nei mangimi, Bq/kg;

$LAC_{\text{Sr}}, LAC_{\text{Cs}}$ = limiti accettabili dei contenuti dei radionuclidi nella razione, Bq (Tabella 7);

0,97 e 0,94 = coefficienti relativi alle parti di ^{90}Sr e ^{137}Cs nei mangimi voluminosi rispetto al contenuto totale di radionuclidi nella razione;

SS = percentuale di sostanza secca nel mangime.

Calcolando la CAM dei radionuclidi nei mangimi per i bovini da carne e per le pecore, il coefficiente che prende in considerazione le parti di ^{90}Sr e ^{137}Cs nei mangimi voluminosi per il bestiame da carne è di 0,978, per le pecore 0,995. I dati sulla CAM dei radionuclidi nei mangimi sono riportati nelle Tabelle 8 e 9.

Tabella 8. Concentrazioni accettabili dei radionuclidi ^{137}Cs e ^{90}Sr nei mangimi bovini per l'ottenimento di latte e carne nel rispetto delle norme LAS-99.

Tipo di mangime	Percentuale di sostanza secca	CA nei mangimi (Bq/kg)		
		Vacche da latte		Bovini da carne
		^{90}Sr	^{137}Cs	^{137}Cs
Mangimi crudi	85	150 (260)	720 (1300)	2.733
Insilati	25	43 (50)	210 (240)	804
Erbe da foraggio	45	77 (100)	380 (500)	1.447
Tuberi	12	21 (37)	100 (160)	386
Patate	22	38	185	707
Massa verde, erba	15	26	130	482
Massa verde, erba	25	43 (37)	210 (165)	804
Massa verde, erba	35	60	295	1.125
Concentrati, cereali	85	63 (100)	210 (180)	210

() Valori CAM secondo le norme LAS-99.

Tabella 9. Concentrazioni accettabili di ^{137}Cs nei mangimi per l'ottenimento di carne di pecora nel rispetto delle norme LAS-99.

Tipo di mangime	Percentuale di sostanza secca	CA nei mangimi (Bq/kg)
Mangimi crudi	85	1565
Insilati	25	460
Massa verde, erba	25	460
Massa verde, erba	35	644

Tabella 10. Concentrazione dei radionuclidi ^{137}Cs e ^{90}Sr nel latte di vacca in relazione alla diversa composizione della razione.

Composizione della razione	Dose giornaliera (kg)	Sostanza secca (kg)	Razione (Bq)	
			^{90}Sr	^{137}Cs
Razione di insilati				
Fieno di cereali pluriennali	4	3,4	600 (1.040)*	2.880 (5.200)
Paglia d'orzo	2	1,7	300 (370)	1.440 (660)
Insilati di mais	28	7,0	1.204 (1.400)	5.880 (6.720)
Barbabietola da foraggio	10	1,2	210 (1.000)	1.000 (1.600)
Concentrati	1,6	1,4	101 (160)	336 (288)
Totale	45,6	14,7	2.415 (3.970)	11.536 (14.468)
In 1 litro di latte			3,6 (5,6)	92 (145)
Razione di insilati e erba da foraggio				
Fieno di leguminose e cereali	3	2,5	450 (780)	2.160 (3.900)
Paglia d'orzo	2	1,7	300 (370)	420 (660)
Insilati di mais	20	5	860 (2.000)	4.200 (4.800)
Erba da foraggio di leguminose e cereali	8	3,6	616 (800)	3.040 (4.000)
Barbabietola da foraggio	4	0,5	84 (148)	400 (640)
Concentrati	1,7	1,4	107 (170)	357 (306)
Totale	38,7	14,7	2.417 (4.268)	10.577 (14.306)
In 1 litro di latte			3,6 (5,97)	85 (143)
Razione da pascolo estivo				
Erba di pascoli naturali	25	8,8	1.500	7.375
Mais per il nutrimento supplementare	25	3,8	650 (1.850)	3.250 (8.250)
Concentrati	2	1,7	170 (126)	420 (306)
Totale	52	14,3	2.276 (2.020)	11.045 (8.556)
In 1 litro di latte			3,4 (2,8)	88 (86)

* () Valori dei LAS-99 con utilizzo della CAM.

La questione sulla normalizzazione della CAM dei radionuclidi nei mangimi utilizzati per l'ingrasso dei suini risulta più complicata di quanto sembri a prima vista. Nel periodo invernale, infatti, per l'ingrasso dei suini vengono applicate le seguenti razioni: miscela di concentrati e patate, miscela di concentrati e altri tuberi, oppure quella di soli concentrati. I cereali, i tuberi e le Tuberacee accumulano relativamente poca quantità di radionuclidi, è difficile immaginare la probabilità di penetrazione con i mangimi di 4.167 Bq di ^{137}Cs (Tabella 7). La questione sulla normalizzazione della CAM di radionuclidi per i suini (e polame) nei mangimi menzionati non è in vigore. L'ingrasso dei suini, quindi, può essere condotto senza restrizioni. Nel periodo estivo, comunque, la situazione dell'ingrasso di questi animali è diversa. Nel settore privato e

nelle aziende statali i suini vengono mandati al pascolo. Durante l'ingrasso da carne i suinetti di 4-6 mesi consumano fino a 5-6 kg di massa verde, i suini fino a 10-12 kg. I suini al pascolo si nutrono dell'erba ma anche di altre fonti di radionuclidi. Per questo nelle regioni con terreni agricoli caratterizzati da alti livelli di contaminazione radioattiva nel loro organismo può penetrare una grande quantità di radionuclidi. Il valore di 500 Bq/kg potrebbe essere quello indicativo della CAM di ^{137}Cs proposto per la massa verde.

Gli scienziati dell'Istituto di ricerca sull'igiene radioattiva (San Pietroburgo) studiando il contenuto di ^{137}Cs nella carne bovina (2.078 prelievi) e nella carne suina (354 prelievi) hanno chiarito che le concentrazioni (Bq/kg) del radionuclide sono risultate poco diverse. Il rapporto dell'attività radioattiva carne

Tabella 11. Caratteristiche economiche e radiologiche di generi alimentari nel territorio della provincia di Narovlia, regione di Gomel, nel 2000 (Giuchenko Y., 2001).

Generi alimentari	Raccolta complessiva (tonnellate)	Attività di ¹³⁷ Cs (Bq/kg)	Dose collettiva (mSv-persona)			Percentuale della dose collettiva totale
			In provincia	Esportazione	Totale	
Grano	7.259	19	71	699	770	5,4
Patate	5.181	9	155	294	449	3,1
Latte (settore pubblico)	3.177	41	1.436	4.436	5.872	41,1
Latte (AIP)	6.449	77				
Carne bovina	355	171	74	725	799	5,6
Carne suina (settore pubblico)	216	44	285	177	462	3,2
Carne suina (AIP)	330	67				
Funghi	86	3.975	261	3.651	3.912	27,4
Frutti di bosco	80	1.537	196	1.310	1.506	10,5
Selvaggina	27	1.377	505	-	505	3,5
Pesce	4	344	19	-	19	0,2
Totale			3.002	11.292	14.294	100,0
Terreni agricoli			2.021	6.331	8.352	58,4
Ecosistemi naturali			981	4.961	5.942	41,6

AIP = Aziende Individuali Private

suina/carne bovina secondo i calcoli dell'autore ha fatto registrare il valore di 0,71. Questo aspetto conferma la necessità di controllare i livelli di accumulo del cesio nella carne bovina ma anche in quella suina poichè quest'ultima entra in gran parte nel paniere alimentare. Le norme elaborate relative al contenuto accettabile di radionuclidi nella razione (Figura 7) e nei mangimi (Figure 8 e 9), a condizione del loro rispetto durante la nutrizione degli animali allevati, garantiscono la produzione di alimenti di origine zootecnica con livelli accettabili di radionuclidi secondo le norme LAS-99. Questo risultato viene confermato dai dati delle Tabelle 10 e 11 in cui sono determinati i livelli possibili della contaminazione radioattiva di latte e carne di origine bovina in

caso di utilizzo per l'ingrasso dei più diffusi tipi di razione.

Le norme per il LACr e la CAM sono buoni punti di riferimento per il personale specializzato e i direttori delle aziende per l'elaborazione di un sistema di gestione della produzione agricola. È d'obbligo sottolineare che per l'ottenimento degli alimenti "puliti" l'osservanza delle norme per il contenuto di radionuclidi nella razione ha un valore determinante.

Per quanto riguarda le norme relative alla CAM di radionuclidi nei mangimi, è possibile modificarle (nel senso di un aumento della concentrazione) a condizione che nel caso di razioni a base di mangimi con diversi livelli di contaminazione radioattiva le norme del LACr non vengano oltrepassate.

Aziende private nelle zone contaminate

Nelle zone colpite dall'incidente di Chernobyl le aziende individuali private (AIP) devono prestare particolari attenzioni. La popolazione rurale, in seguito al proprio stile di vita e alle proprie attività specifiche, consuma alimenti più contaminati rispetto agli abitanti di città. Ciò è stato confermato da dati comparativi (Figura 18) sui livelli dell'irradiazione esterna e interna degli abitanti nelle città e nei villaggi delle regioni di Briansk e Tula (Panov A., 2001). Queste regioni si distinguono per la scala di contaminazione radioattiva e per le caratteristiche dei terreni. I dati sulle dosi individuali (mSv) sono correlati alla densità di contaminazione del terreno da ^{137}Cs : 1 MBq/m^2 .

Le dosi dell'irradiazione esterna della popolazione nelle diverse regioni prese in considerazione sono state simili ma le dosi dell'irradiazione interna sono state diverse tra gli abitanti di città (1,77-1,83 mSv/anno) e quelli di campagna (2,39-2,40 mSv/anno) con un valore più alto del 33%. Le differenze tra gli abi-

tanti di città e quelli di campagna, per quanto riguarda le dosi individuali dell'irradiazione interna, sono state notevoli: 2,6 volte per la regione di Briansk, 2,5 volte per quella di Tula. I valori delle dosi dell'irradiazione interna nella regione di Tula sono risultati bassi poiché in questo territorio predominano le terre nere liscivate con bassi coefficienti di passaggio dei radionuclidi dal terreno agli alimenti di origine zootecnica (Figura 3). Di conseguenza, in questa regione anche se la densità di contaminazione del terreno è identica, gli abitanti consumano cibi con meno sostanze radioattive.

È importante sottolineare come le aziende private abbiano prodotto, relativamente, una grande quantità di alimenti agricoli. Per esempio, nella provincia di Khoïniki (regione di Gomel) anche nei primi anni dopo l'incidente di Chernobyl le AIP hanno fatto registrare la produzione di 26.095 tonnellate di patate e 2.750 tonnellate di verdure diverse. Nello stesso tempo il settore pubblico ne ha

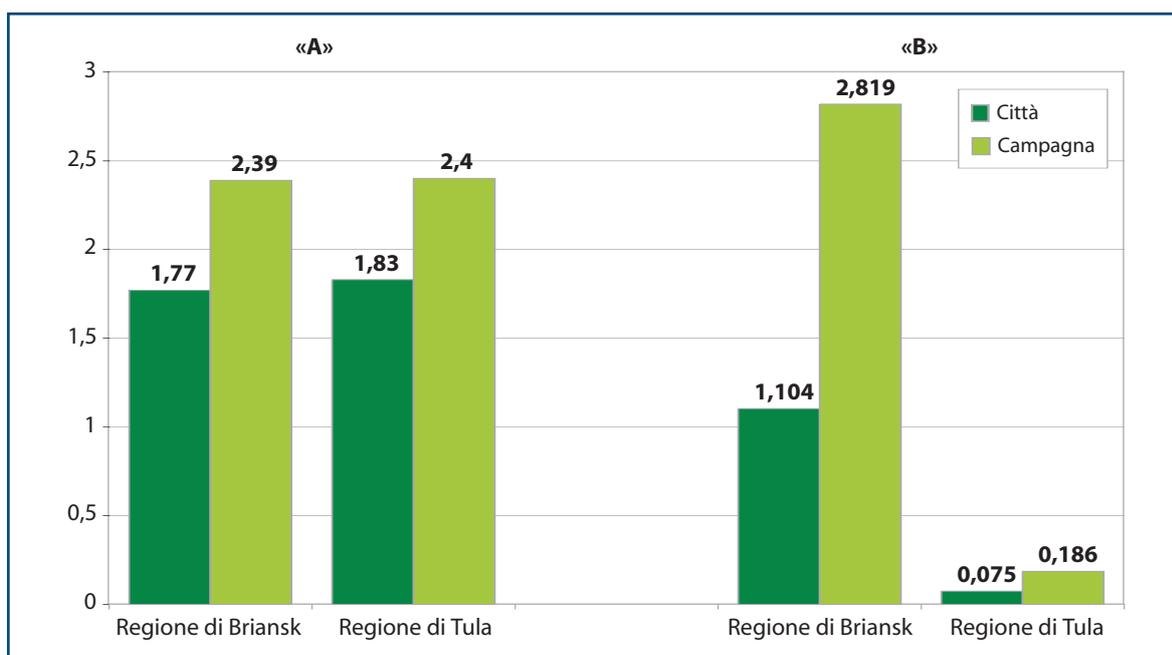


Figura 18. Rapporto tra la dose dell'irradiazione («A» esterna e «B» interna) e la densità di contaminazione della località (mSv/MBqxm²).

prodotte, rispettivamente, 32.419 e 1.343 tonnellate. Nel 1990 le AIP hanno prodotto 776 tonnellate di carne suina, il settore pubblico 573 tonnellate. Attualmente si ha una situazione uguale per la produzione di latte e di carne suina (Tabella 11).

Di solito gli alimenti prodotti nelle AIP sono molto più "sporchi" di quelli del settore pubblico. Il controllo pluriennale del contenuto di ^{90}Sr nel latte delle AIP e delle aziende statali situate nella traccia radioattiva degli Urali Orientali ha evidenziato (Nikopelov B., 1989) che se la concentrazione di radiostronzio nel latte durante il 1971-1987 si è abbassata gradualmente, nelle AIP da 8,1 fino a 5,2 Bq/l, nelle aziende statali da 1,2 fino a 0,4 Bq/l, il rapporto della concentrazione di ^{90}Sr nel latte del settore privato e quella del settore pubblico è stata sempre oltre il valore di 4,8 (Figura 19).

Nelle aziende colpite dall'incidente di Chernobyl la situazione relativa alla contaminazione del latte da cesio radioattivo è stata simile. Nei primi anni dopo l'incidente la concentrazione di ^{137}Cs nel latte del settore privato è stata 40-80 volte più alta di quella del latte del settore pubblico (Ivanov Y., 1997). Comunque, negli anni successivi, grazie alla realizzazione delle misure protettive, il livello di contaminazione del latte nel settore priva-

to si è abbassato e la differenza riguardo a questo parametro tra le AIP e le aziende statali è stata di 3-5 volte.

È difficile definire l'influenza dei diversi fattori sul valore assoluto della contaminazione del latte da ^{137}Cs nelle aziende locali per la mancanza dei dati retrospettivi riguardanti: 1) l'attività economica delle aziende orientate alla creazione di terreni foraggeri migliori per il settore privato; 2) i dati idrometeorologici; 3) l'incostante politica monetaria e di formazione dei prezzi. Tutte queste circostanze hanno influenzato negativamente l'ottenimento nelle aziende private di latte rispondente alle norme per quanto riguarda il fattore radiologico. In Figura 20 è presentata la dinamica del superamento percentuale delle norme di concentrazione di ^{137}Cs nel latte nei settori pubblico e privato della provincia di Lelchitsi (regione di Gomel) dal 1991 fino al 1999. Nella figura si vede come nel settore pubblico dal 1990 il superamento percentuale delle norme sia stato insignificante (da 0,3 fino a 0,9 nei diversi anni). Anche nel settore privato il superamento percentuale si è abbassato visibilmente rispetto agli anni precedenti ma è stato notevolmente più alto che nel settore pubblico, sorpassando quasi costantemente, il 10%.

Secondo i dati dell'Agenzia Internazionale per

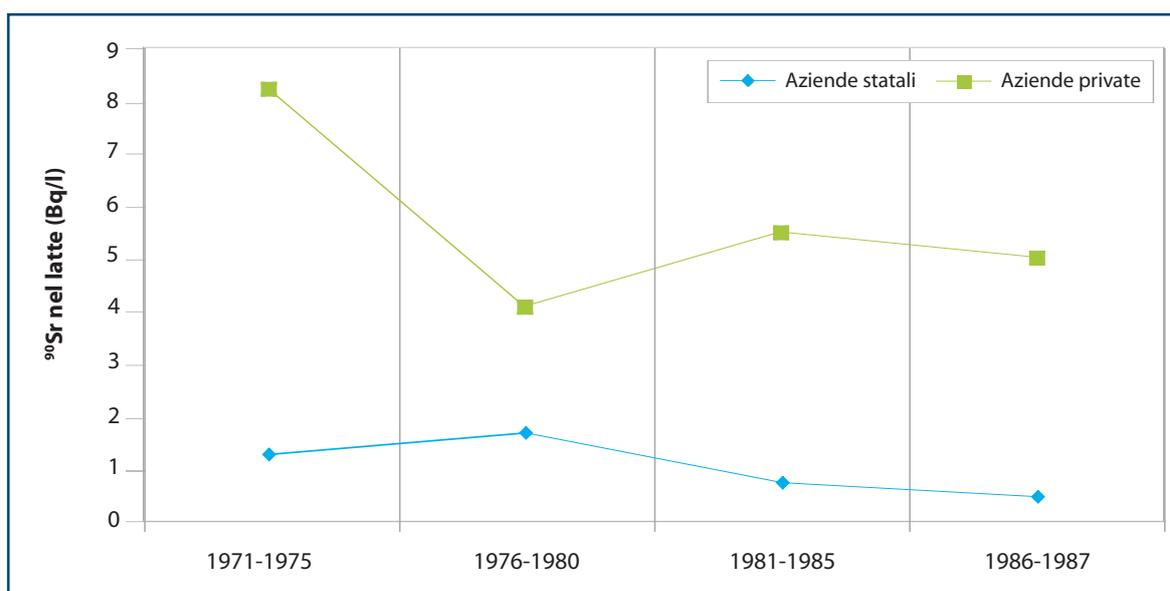


Figura 19. Dinamica della concentrazione di ^{90}Sr nel latte di vacca prodotto nelle aziende private e statali (regione di Cheliabinsk).

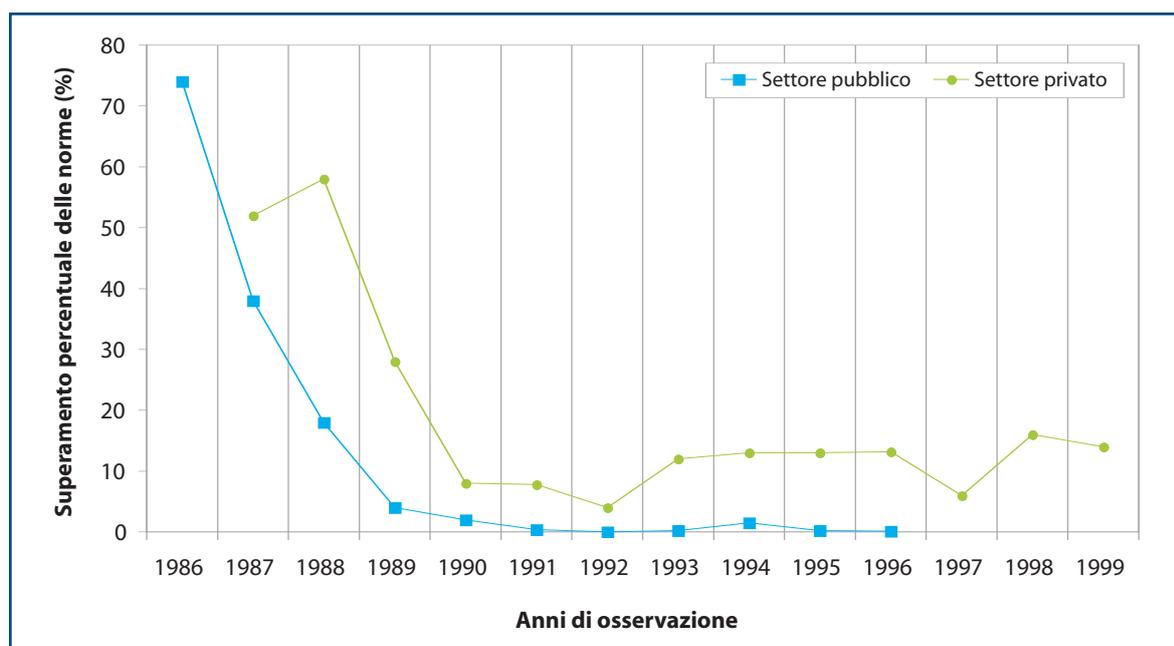


Figura 20. Dinamica del superamento percentuale delle norme di concentrazione di ^{137}Cs nel latte nei settori pubblico e privato (Provincia di Lelchitsi, regione di Gomel).

l'Energia Atomica (AIEA, 1997) nei paesi dell'Unione degli Stati Indipendenti (USI, paesi dell'ex-Unione Sovietica) sottoposti alla contaminazione radioattiva in seguito alla catastrofe di Chernobyl, oltre 71.000 vacche nelle AIP, durante il periodo 1992-1994, hanno prodotto latte con una contaminazione radioattiva che ha superato i livelli accettabili provvisori. Anche se le leggi hanno vietato di utilizzare il latte prodotto come nutrimento per la popolazione, in realtà una grande quantità di questo alimento contaminato è stata consumata dagli abitanti di campagna, aumentando notevolmente la dose individuale dell'irradiazione interna. Per esempio, nella località Shelomy (regione di Briansk) gli abitanti che hanno consumato il latte di vacca delle aziende private hanno fatto registrare come dose dell'irradiazione interna il valore di 0,97 mSv/anno (55,3% determinato dal latte), mentre altri abitanti che non hanno usato il latte del settore privato, hanno fatto registrare la dose di 0,34 mSv/anno (Panov A., 2001). Per gli abitanti delle zone rurali, la riduzione delle dosi individuali dell'irradiazione fino ai livelli accettabili rappresenta ancora oggi un problema attuale. Secondo i dati di Panov A., nel territorio russo sottoposto a inquinamento

radioattivo, dopo l'incidente di Chernobyl nel 1996, sono stati contati più di 4.500 agglomerati urbani di cui 307 con una popolazione maggiore di 48.000 individui aventi una dose individuale d'irradiazione di oltre 1 mSv l'anno. Oltre 17.557 individui, nello stesso periodo, hanno fatto registrare una dose individuale solo per irradiazione interna di oltre 1 mSv/anno.

In conformità alla Legge della Federazione Russa "Sulla protezione sociale dei cittadini sottoposti all'effetto della radiazione in seguito all'incidente alla centrale nucleare di Chernobyl" (art. 6) e al Decreto governativo n. 1582 del 18.12.1997 in alcune località (secondo l'elenco approvato) è stato disposto di realizzare il complesso di provvedimenti protettivi finalizzati a ridurre costantemente il carico radioattivo, compreso l'abbassamento di contaminazione degli alimenti da radionuclidi. Per gli abitanti delle zone rurali e per le aziende private sono stati molto importanti i seguenti provvedimenti: assegnazione di terreni arabili meno contaminati per la realizzazione di orti, assegnazione dei migliori terreni foraggeri per il bestiame, fornitura di grano foraggero e altri mangimi con livelli accettabili di contaminazione radioattiva.

Negli ultimi anni una grande attenzione è stata rivolta alla possibilità di rifornire le aziende private, proprietarie delle vacche in lattazione, di preparati a base di ferrocianuro risultati molto efficaci. Secondo i dati del Dipartimento delle situazioni straordinarie del Ministero dell'agricoltura della Federazione Russa (Kurganov A. e altri, 2001) dal 1993 i laboratori radiologici veterinari nelle province del sud-ovest della regione di Briansk hanno integrato, ogni anno, i mangimi con questi preparati per soddisfare circa 5.000 vacche del settore privato, ciò ha sicuramente contribuito alla normalizzazione della situazione radiologica nelle zone più contaminate. In Bielorussia, il volume di produzione dei mangimi combinati con questo tipo di preparati, nel 2002, è stato di 1.300

tonnellate nella regione di Gomel, 1.460 tonnellate nella regione di Brest, 180 tonnellate nella regione di Moghilev.

Le aziende private hanno fornito sul mercato non solo i propri prodotti agricoli più o meno contaminati ma, ciò che è importante, gli abitanti di campagna hanno raccolto e portato in città una grande quantità di funghi e frutti di bosco contenenti alte concentrazioni di radionuclidi.

Si deve constatare come nelle zone di contaminazione radioattiva intensa, tra le misure più importanti ci siano state l'assistenza e l'appoggio alle aziende private per la massima riduzione delle dosi individuali e collettive di irradiazione. Nello stesso tempo si è prestato particolare attenzione nell'applicazione delle misure mirate, principalmente, all'abbas-

Provvedimenti per la riduzione delle conseguenze delle catastrofi nucleari nel settore agrario

I provvedimenti in agricoltura e loro efficacia

Durante gli ultimi 16 anni, i paesi dell'Unione degli Stati Indipendenti (USI, paesi dell'ex-Unione Sovietica) che hanno risentito della catastrofe di Chernobyl hanno acquisito una grande esperienza nell'eliminazione delle conseguenze radioattive nel settore della produzione agraria e zootecnica. Dopo la catastrofe di Chernobyl 1,4 milioni di ettari di terreno a destinazione agricola sono stati contaminati, di conseguenza, lo stato ha dovuto emanare provvedimenti urgenti per proteggere la popolazione. Per la prima volta questo problema è apparso all'inizio degli anni 50 del secolo passato quando nel fiume Tecià (Urali del Sud) sono stati emessi scarichi radioattivi dalla fabbrica chimica "Mayak" con l'attività complessiva di circa 1×10^{17} Bq. L'acqua del fiume e il terreno agricolo circostanti sono stati contaminati da radionuclidi. Nei paesi vicini (Metlino, Muslimumovo, Brodokolmak, ecc.) sono stati effettuati annunci in cui, senza spiegazione, è stato vietato: l'uso di acqua per gli abitanti, l'irrigazione degli orti, pescare, fare bagni, pascolare il bestiame, far provvista di mangimi, ecc. Questo divieto non è stato assolutamente efficace, la popolazione ha continuato la propria vita quotidiana utilizzando tutti i vantaggi derivanti dalla presenza del fiume. Nell'estate del 1955 lavorando con la spedizione del Ministero di Sanità dell'URSS, Annenkov B.N. e alcuni suoi colleghi hanno notato come tutti i generi alimentari di origine zootecnica, soprattutto, latte, carne di montone e pollo contenessero un'alta quantità di radionuclidi.

Per diminuire gli effetti dell'irradiazione esterna e, soprattutto, interna (mangiando gli alimenti radioattivi) sono stati adottati provvedimenti indirizzati allo spostamento dello strato del suolo superficiale contaminato

negli strati più profondi. Per esempio, nella traccia radioattiva nella zona degli Urali Orientali, dopo la catastrofe del 1958-1959, è stata effettuata l'aratura di un territorio di circa 20 mila ettari e, nel 1960-1961, con l'utilizzo di aratri lo strato superficiale è stato dislocato a 40-50 cm di profondità, in questo modo sono stati lavorati 6.400 ettari di superfici agrarie contaminate, compresi gli orti privati in alcuni paesini. Questa iniziativa ha fatto diminuire il fondo radioattivo di 2-3 volte e l'entrata dei radionuclidi nelle colture agrarie di 3-4 volte (Korneev N. A., 1996).

Per ridurre le dosi d'irradiazione interna della popolazione sono risultati molto efficaci i metodi diretti alla diminuzione di contaminazione del latte. Per escludere la possibilità del pascolo di bestiame e l'uso di erba per fare provviste di mangime, nei prati contaminati si è praticata l'aratura per ottenere colture agricole a basso contenuto di radionuclidi. Le zone maggiormente contaminate sono state destinate a bosco. Si è cercato di "decontaminare" i bovini giovani da ingrassare permettendo il loro passaggio, prima della macellazione, a mangimi puliti.

Durante l'eliminazione delle conseguenze determinate dalle catastrofi nucleari, in agricoltura si è fatta molta attenzione al miglioramento di prati e pascoli. In totale il contributo delle contromisure per la diminuzione dell'entrata di ^{137}Cs negli erbai è stato del 50-75% (Alexahin R.M., Firsakova S. K., 1996).

L'insieme delle azioni contro la contaminazione radioattiva ha fatto diminuire bruscamente la concentrazione di ^{137}Cs anche negli alimenti di origine animale.

Nei paesi dell'USI (paesi dell'ex-Unione Sovietica), dopo la catastrofe di Chernobyl, i volumi di acquisto di latte e carne, nel 1989, sono cresciuti rispetto al 1986 quasi di 2 volte. Durante questi anni l'acquisto di latte con tasso di contaminazione da ^{137}Cs temporaneamente

Ammissibile (TTA) eccedente è diminuito di 10,6 volte, l'acquisto di carne con TTA eccedente di 57 volte (Tabella 12).

In relazione ai problemi di economia che hanno un ruolo non secondario nella scelta di contromisure per proteggere la popolazione dall'irradiazione, si intuisce come il principio più importante dovrebbe essere il "vantaggio massimo" (dose d'irradiazione prevenuta) con "spesa minima". In questo principio di solito il costo della dose prevenuta (1Sv-individuo) è apprezzabile da un punto di vista economico. La Commissione Internazionale sulla protezione radioattiva (CIPR), nell'articolo 37 dedicato all'ottimizzazione della protezione radioattiva sulla base dell'analisi del rapporto "costo-beneficio", ha considerato che le contromisure sul territorio contaminato da radionuclidi siano giustificate qualora il costo della dose prevenuta di Sv per individuo sia nei limiti di 10-20 mila dollari.

È necessario, prima di tutto, far attenzione che la riduzione della dose collettiva d'irradiazione della popolazione si possa raggiungere solo con la diminuzione della dose d'irradiazione esterna e/o interna. Come hanno dimostrato gli studi del Centro ricerche scientifiche di igiene radioattiva di San Pietroburgo, al termine dei grandi lavori di disattivazione nei paesi della regione di Briansk (93 paesi contaminati con una popolazione complessiva di circa 90 mila abitanti), la riduzione della dose d'irradiazione esterna in un anno è stata pari

solo al 15% (Ponomarev A.V., 1997). Secondo gli specialisti di radiologia ed ecologia agricola (Panov A.V., 2001) il costo della dose prevenuta (Sv-individuo) è stata pari a circa 307 mila dollari USA.

La riduzione della dose interna della popolazione è legata direttamente alla diminuzione del tasso di contaminazione della produzione agricola ovvero dei generi alimentari. Il costo della dose prevenuta d'irradiazione, dopo aver adottato provvedimenti protettivi, è dipesa principalmente dal tasso iniziale di contaminazione degli alimenti (per es. latte, carne) prima della realizzazione delle relative contromisure.

Questo aspetto si evince dai dati in Figura 21 in cui è stato documentato come le contromisure (somministrazione di 3 g di azzurro di Berlino alle vacche) inizino a realizzarsi quando la concentrazione di ¹³⁷Cs nel latte è di 1100Bq/l (con il prezzo di azzurro di Berlino a 10 dollari il kg). La dose prevenuta risulta avere il costo di 315 dollari per Sv-individuo. Qualora le contromisure comincino a realizzarsi quando la concentrazione di ¹³⁷Cs nel latte è di 450 e 210 Bq/l allora la dose prevenuta costerà, rispettivamente, 769 e 1649 dollari per Sv-individuo.

Dai dati presenti (Fesenko S.V. e colleghi, 1999) il costo della dose prevenuta d'irradiazione interna in seguito al miglioramento radicale degli spazi foraggeri naturali (blocco della migrazione di ¹³⁷Cs nell'anello "terreno-

Tabella 12. Dinamica dei volumi di acquisto degli alimenti di origine animale nei territori di Russia, Bielorussia, Ucraina.

Tipo di produzione	Indice	Anni seguenti la catastrofe			
		1986	1987	1988	1989
Latte	Volumi di acquisti (per 1000 tonnellate)	4.415,5	5.017,1	3.926,3	8.634,7
	TTA eccedente (per 1000 tonnellate)	1.313,7	555,3	300,6	246,0
	TTA eccedente (%)	29,8	11,1	7,7	2,8
Carne	Volumi di acquisti (per 1000 tonnellate)	550,7	631,8	520,0	986,6
	TTA eccedente (per 1000 tonnellate)	31,3	12,4	2,8	1,0
	TTA eccedente (%)	5,7	2,0	0,54	0,1

TTA di latte = 370 Bq/l; TTA di carne = 2960 Bq/kg.

erba-vacca-latte”) è stata in media pari a 12,5 mila dollari/Sv-individuo.

In Figura 22 viene riportata la dinamica di riduzione della concentrazione di ^{137}Cs nel latte delle mucche del settore pubblico della provincia di Norovlia, nella regione di Gomel, dal 1991 al 1998. È possibile notare come, nonostante tanti anni passati dal disastro di

Chernobyl, l'efficacia dei provvedimenti realizzati sia stata abbastanza elevata.

Dal punto di vista economico, alle contromisure a basso costo possono essere inclusi anche i metodi zootecnici (scelta delle componenti ottimali dei mangimi e mantenimento degli animali produttivi, passaggio ai mangimi “puliti” e poco contaminati) diretti

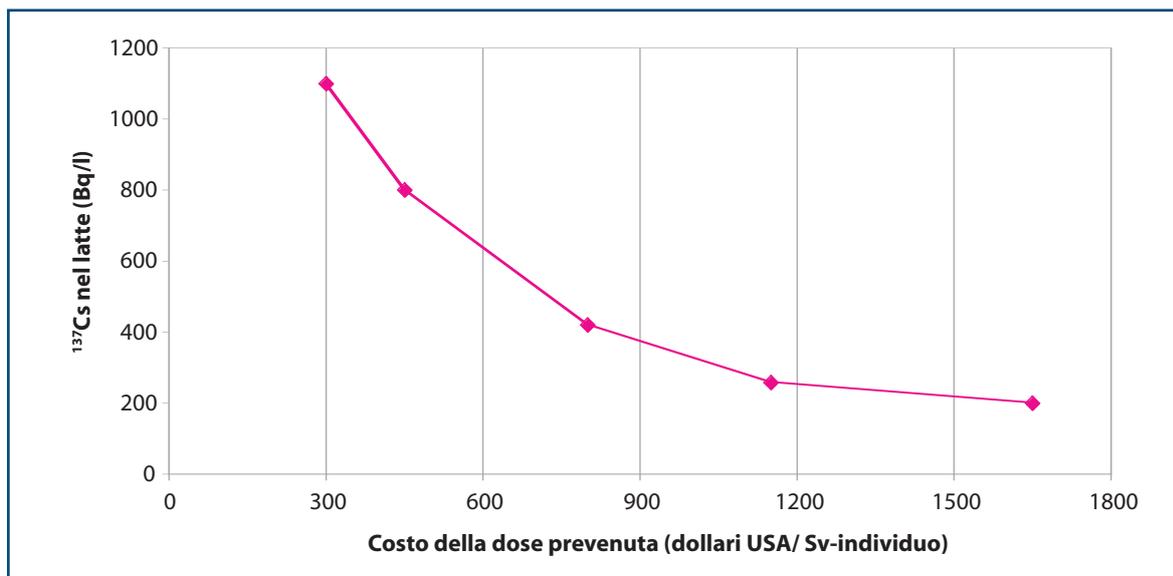


Figura 21. Dipendenza del costo della dose prevenuta d'irradiazione dal tasso iniziale della contaminazione del latte con ^{137}Cs mediante utilizzo di preparati a base di azzurro di Berlino.

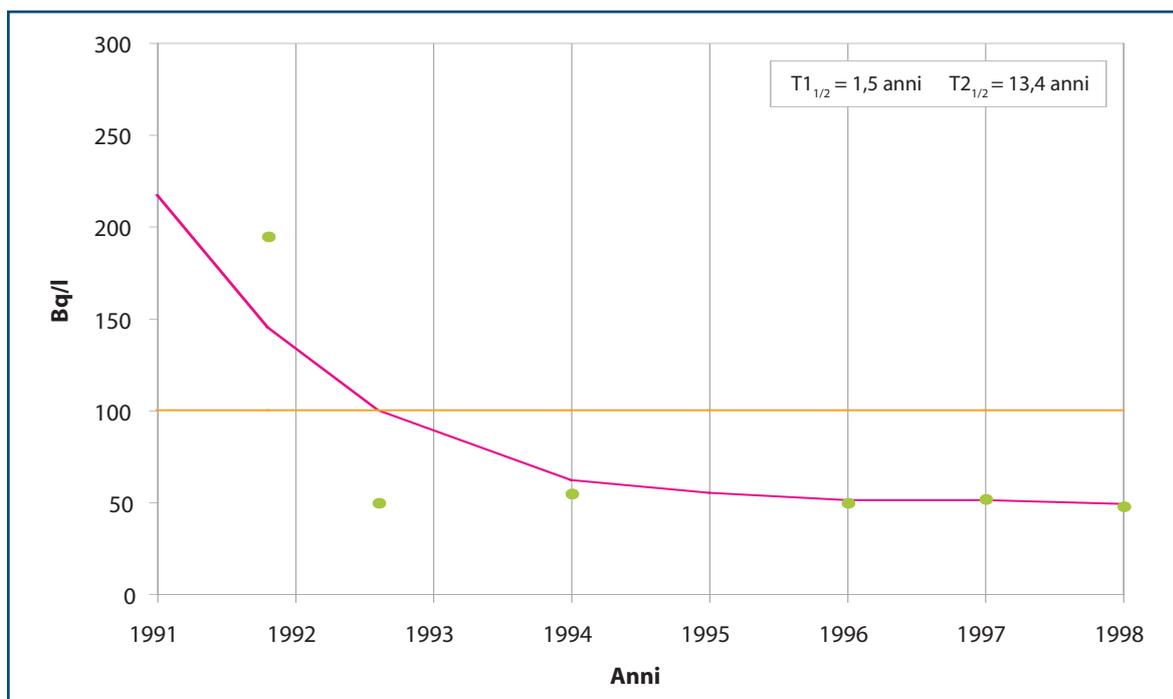


Figura 22. Dinamica della variazione della concentrazione di ^{137}Cs nel latte delle vacche del settore pubblico della provincia di Norovlia, regione di Gomel, e tempi di semipurificazione del latte da ^{137}Cs .

alla riduzione della contaminazione con i radionuclidi presenti negli alimenti di origine animale. Per esempio, il passaggio del bestiame da carne contaminato (secondo il sistema pianificato) al mangime concentrato o semiconcentrato permette di ridurre la concentrazione di ^{137}Cs di 3-4 volte. Con questa soluzione, in 1,5-2 mesi, l'incremento di ogni capo di bestiame è non meno di 50-60 kg, questo incremento ponderale copre le spese legate al passaggio del bestiame, nel periodo antecedente la macellazione, al mangime più costoso. Quindi, il costo della dose collettiva prevenuta d'irradiazione interna (grazie alla riduzione della concentrazione di ^{137}Cs nella carne bovina) non sarà relativamente elevata.

Trattamento dei generi alimentari contaminati con radionuclidi

Precedentemente sono stati presentati i metodi più efficaci in agricoltura e zootecnia che consentono una riduzione significativa dell'entrata dei radionuclidi nei prodotti vegetali e negli alimenti di origine animale. Una riduzione complementare del tasso di contaminazione, talvolta notevole, si raggiunge anche in seguito al modo di cucinare e alla rielaborazione dei generi alimentari radioattivi.

Trattamento meccanico. Procedure non complicate come, per esempio, il lavaggio di ortaggi, frutta, funghi, ecc. e anche la loro eventuale sbucciatura permettono di ridurre la quantità di radionuclidi di un 30-50%

(Tabella 13).

Il trattamento preventivo della carne tagliata in piccoli pezzi nell'acqua, oppure in soluzione con 0,85% di sale, permette di ridurre la quantità di Cs radioattivo di un 30-60%. Durante il processo di preparazione del pesce, togliendo squame, branchie, interiora, pinne, ecc. la maggior parte di radionuclidi viene eliminata.

Trattamento termico. Il trattamento termico, di alimenti radioattivi, senza l'uso di acqua (frittura) o con poca acqua (stufato) riduce la quantità di radionuclidi nel prodotto pronto per il consumo di circa il 15-20% rispetto alla concentrazione iniziale. Al contrario, nei liquidi di cottura (brodo) passa un'alta quantità di radionuclidi, soprattutto, Cs radioattivo.

Durante la cottura della carne bovina si è visto che nel brodo passano quasi il 50% di ^{90}Sr e l'80% di ^{137}Cs . Durante la cottura del pesce privo delle interiora nel brodo vengono trasferiti il 44% di ^{137}Cs e lo 0,8% di ^{90}Sr , il 60% di ^{137}Cs e il 2% di ^{90}Sr dai muscoli, il 74% di ^{137}Cs e dallo 0,2 al 2 % di ^{90}Sr dalle lisce.

Durante la cottura delle patate il passaggio dei radionuclidi nel brodo è favorito da due fattori. Se durante la cottura si aggiungono 6 g di sale nell'acqua, nelle patate cotte rimane solo il 37% di ^{90}Sr e il 40% di ^{137}Cs . La mancanza di sale nell'acqua ha fatto registrare nelle patate cotte la rimanenza di quasi il 65% dei radionuclidi rispetto alla concentrazione iniziale. L'effetto dell'aggiunta di sale è risultato notevole se le patate prima di essere cotte vengono tagliate a piccoli pezzi. Il secondo fattore è

Tabella 13. Influenza dei trattamenti meccanico e termico di generi alimentari sulla riduzione della quantità dei radionuclidi ^{137}Cs e ^{90}Sr nel prodotto finale.

Generi alimentari	Tipo di trattamento	Prodotto finale	Percentuale del livello iniziale di radionuclidi	
			^{90}Sr	^{137}Cs
Patata	Lavaggio, sbucciatura	Patata	30	40
	Cottura		80	70
Cavolo	Eliminazione foglie esterne	Cavolo	5-10	5-10
Radici commestibili	Eliminazione superficie esterna	Radice commestibile	5-10	5-10
Ossa	Cottura	Brodo	0,05	70
Carne	Cottura	Brodo	60	85
Lardo	Scaldamento	Grasso fuso	2	5

dato dalla presenza di buccia nelle patate. Durante la cottura delle patate non sbucciate il passaggio dei radionuclidi al brodo di cottura diminuisce del 20% (Marey A.N., 1976).

Salatura. In caso di salatura di cetrioli, cavoli, funghi, ecc. alla salamoia passa quasi metà del contenuto dei radionuclidi presenti negli ortaggi prima della loro lavorazione. È stato verificato che il trattamento preventivo della carne nell'acqua e la successiva stagionatura nella salamoia al 25% (per 3 mesi) possa ridurre il tasso di radionuclidi nella carne cotta di 10 volte la concentrazione iniziale.

Trattamento tecnico. La ventilazione e areazione del grano (frumento, segale) permettono di ridurre i tassi di contaminazione del 15-20%. Con la sgusciatura di orzo, avena, grano saraceno e riso, con l'eliminazione della pellicola e con la macinatura di frumento e segale il contenuto dei radionuclidi nei prodotti finali della lavorazione (grano, farina) diminuisce di 1,5-2 volte. Particolarmente efficace è risultato il trattamento di prodotti agricoli per ottenere zucchero, alcool, olio, fecola (Tabella 14). In questi prodotti i radionuclidi non ci sono affatto oppure sono presenti in quantità ridottissime. Molto interesse hanno destato i dati di passaggio dei radionuclidi dal latte contaminato ai prodotti lattiero-caseari. Con la separazione dei componenti del latte, l'85% dei radionuclidi passa alla parte scremata (magro) mentre nella panna con il 20% di grasso è stata verificata la presenza del 15% circa di radionuclidi. Durante la lavorazione successi-

va per ottenere il burro, la maggior parte di ^{90}Sr , e ^{137}Cs contenuti nella panna passano al siero e al latticello. Nel burro rimangono solo l'1,3% di ^{90}Sr e il 2,3% di ^{137}Cs presenti inizialmente nel latte contaminato. Il burro fuso (russo) non contiene quasi radionuclidi. La distribuzione del ^{137}Cs nei diversi prodotti lattiero-caseari è mostrata in Figura 23.

Bisogna tener conto che se con i rifiuti di lavorazione del latte viene eliminata un'alta quantità di radionuclidi, la loro concentrazione (Bq/kg) nei prodotti lattiero-caseari può essere uguale al latte (o anche più alta). Questo inconveniente si giustifica con la grande quantità di latte impiegata per la realizzazione di questo tipo di prodotti. Per esempio, per produrre 1 kg di burro bisogna utilizzare 20-25 kg di latte, per 1 kg di ricotta, invece, vengono impiegati 8-10 kg di latte, ecc. I dati approssimativi sulla contaminazione dei prodotti lattiero-caseari, relativamente al latte, sono riportati in Tabella 15.

Il parametro di valutazione dell'influenza del trattamento tecnico della materia prima sul passaggio di radionuclidi al prodotto finale è il coefficiente di trattenuta dell'attività nel prodotto (F), che si definisce come la dose di attività iniziale del radionuclide che rimane nel prodotto dopo il trattamento della materia prima.

Nell'industria alimentare la produzione di salumi riveste una quota importante. Il significato di coefficiente di trattenuta di ^{137}Cs nella produzione di questi prodotti è molto variabile.

Secondo i dati del controllo radiologico della carne ricevuta dal complesso industriale per

Tabella 14. Influenza del trattamento tecnico sul contenuto dei radionuclidi ^{137}Cs e ^{90}Sr nel prodotto finale.

Prodotti iniziali	Prodotti finali	Percentuale dei radionuclidi nei prodotti finali	
		^{90}Sr	^{137}Cs
Barbabietola da zucchero	Zucchero	0,02	0,5
	Melassa	53	0,5
	Fettuccia esaurita	0,8	16
Patata	Fecola	2	5
	Alcool	0	0
	Borlanda	95	95
Girasole	Olio	0	0
Frumento, segale	Farina	60	60
Orzo, avena, grano saraceno	Grano	70	70

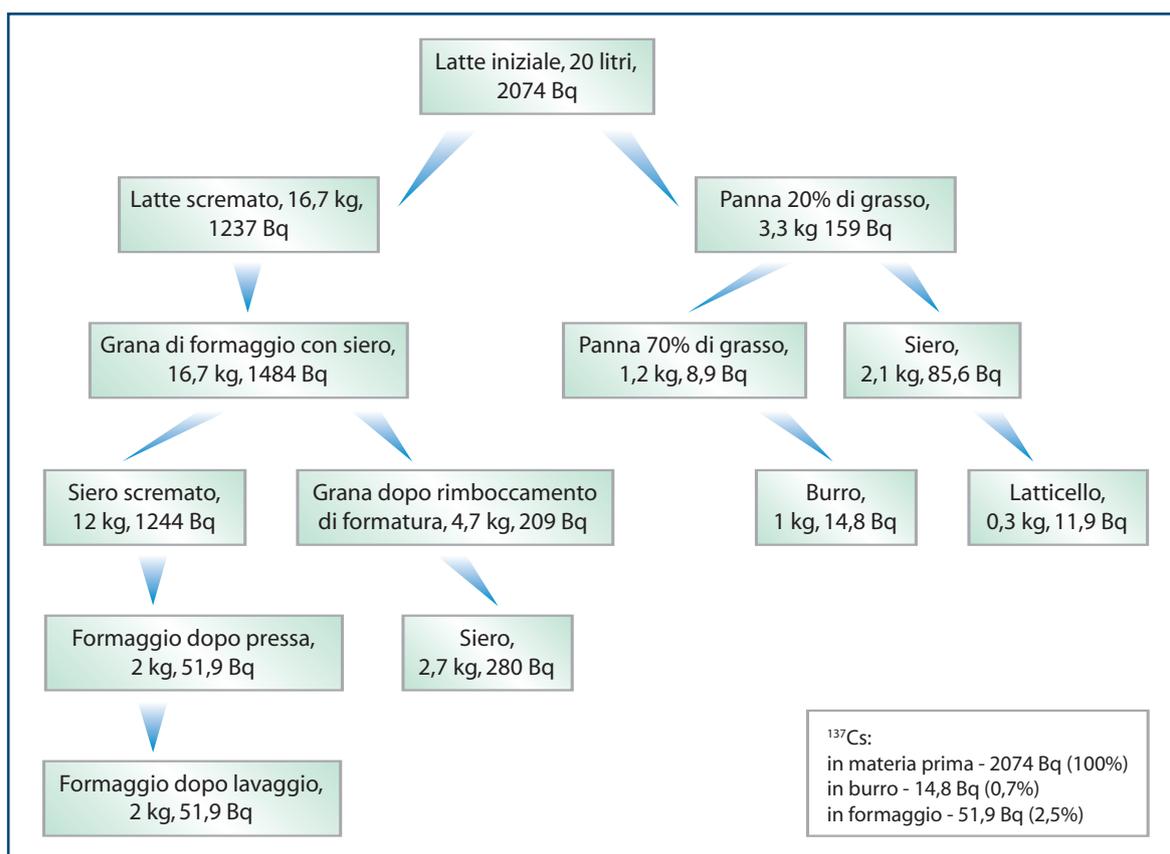


Figura 23. Passaggio di ^{137}Cs dal latte al formaggio, burro, sottoprodotti di lavorazione e rifiuti tecnici di produzione (Donskaya G.A. e altri, 1995).

Tabella 15. Passaggio dei radionuclidi ^{137}Cs e ^{90}Sr dal latte ai latticini.

Tipo di produzione	CP* latte-prodotto	
	^{90}Sr	^{137}Cs
Panna (20% di grasso)	0,78	0,60
Burro	0,09	0,12
Burro fuso	0	0,01
Ricotta acida	0,7	0,8
Formaggio duro	5,8	0,5
Formaggio molle	4,0	0,7

*CP = Coefficiente di passaggio

la lavorazione della carne di Gomel dal 01.01.99 al 01.10.99, la carne bovina ha fatto registrare un alto tasso di ^{137}Cs a differenza di quella di maiale che ha fatto rilevare valori di attività inferiore a 20 Bq/kg.

Per valutare l'efficienza del trattamento tecnico della carne durante la produzione di insaccati, in relazione alla riduzione di ^{137}Cs , è stata misurata l'attività specifica dei seguenti prodotti durante le fasi di lavorazione: carne bovi-

na, carne macinata prima di riempire i relativi involucri, insaccati pronti per il consumo. L'attività specifica del prodotto intermedio del processo tecnico si è dimostrata più bassa sia della materia prima sia del prodotto finale. La contaminazione più alta di ^{137}Cs è stata registrata proprio nel prodotto finale contenente carne bovina (Tabella 16).

Dai dati ottenuti si può concludere che il fattore principale che determina il contenuto di ^{137}Cs nei prodotti a base di carne è il contenuto specifico di carne bovina. I prodotti con un basso contenuto di carne bovina si caratterizzano con una più bassa attività specifica di ^{137}Cs rispetto ai prodotti realizzati esclusivamente con carne bovina. È stata segnalata anche la differenza di passaggio di ^{137}Cs nella produzione di diversi tipi di insaccati. Così, per esempio, con il contenuto uguale di carne bovina nella composizione, i salami cotti e le salsicce hanno un contenuto di radionuclidi più basso rispetto ai salami affumicati e ai prosciutti. Questo dato si spiega con le differenti

sostanze impiegate nella loro produzione. Le fasi di affumicatura ed essiccazione alle quali sono sottoposti i suddetti prodotti provocano la concentrazione più alta di radionuclidi nel prodotto finale.

All'accumulo di ^{137}Cs nei prodotti finali influisce anche la quantità di umidità eliminata che si determina dalla quantità di prodotto di materia prima non salata. Se la quantità di prodotto è alta e la carne contaminata con ^{137}Cs è più diluita con altri componenti allora l'attività nei prodotti pronti di carne diventa più bassa. Rispecchia meglio il quadro del passaggio dei radionuclidi dalla materia prima di carne ai prodotti finali la relazione del coefficiente di trattenuta Fr del prodotto Pe espresso nei componenti della massa, relativamente alla materia prima. In questo caso si prende in considerazione il contenuto generale di umidità nel prodotto finale. Contenuto che dipende dal trattamento termico e dal cambiamento della massa generale del prodotto grazie alla sua diluizione con gli altri componenti. Così per esempio, se il Pe del

prodotto è di 0,82, si ha che da 1 kg di materia prima si può ricevere solo 0,82 kg di prodotto pronto finale (salame). Con Fr di prodotto uguale a 0,83 la relazione Fr/Pe sarà 1,01 che indica come nella produzione di 1 kg di prodotto la concentrazione di radionuclide non subisca modifiche se paragonata con l'attività specifica della materia prima. I dati sono riportati in Tabella 17.

Comunemente con il rapporto Fr/Pe meno di un'unità c'è la riduzione del contenuto di radionuclide nel prodotto pronto. Le osservazioni effettuate hanno dimostrato che la capacità più alta di concentrare ^{137}Cs durante la fase tecnica "macinato-prodotto" la possiedono gli insaccati semi-affumicati.

La via principale per ridurre il tasso di ^{137}Cs durante il trattamento tecnico della carne bovina per insaccati è la semplice associazione della carne contaminata con componenti che contengono la quantità minore di radionuclidi, per esempio, la carne di maiale. L'influenza delle operazioni tecniche come il trattamento termico, raffreddamento e essic-

Tabella 16. Contenuto relativo di ^{137}Cs nei prodotti intermedi e finali per la produzione di salumi.

Tipo di prodotto	Percentuale del contenuto di carne bovina	Percentuale di attività iniziale		Coefficiente di trattenuta Fr (carne)	Coefficiente di trattenuta Fr (carne macinata)
		Macinato	Prodotto finale		
Salame cotto	35	30,3±3,2	34,1±4,4	0,34	1,13
Salame cotto	98	55,5±3,9	76,6±6,0	0,77	1,38
Salame semi-affumicato	30	32,5±3,1	49,2±5,3	0,49	1,52
Salame semi-affumicato	97	53,9±4,9	82,9±8,5	0,83	1,54
Salsiccia	45	31,7±3,7	35,9±5,2	0,36	1,13
Salsiccia	97	56,6±3,2	70,7±5,0	0,71	1,25
Prosciutto	95	85,3±12,0	109,2±6,5	1,09	1,28

Tabella 17. Significato della quantità di prodotto e relazione del coefficiente di trattenuta Fr del prodotto finale Pe.

Prodotto	Prodotto (Pe)	Relazione Fr (carne) /Pe	Relazione Fr (carne macinata) /Pe
Salame cotto	1,00	0,34	1,13
Salame cotto di bovino	1,10	0,70	1,25
Salame semi-affumicato	0,80	0,62	1,90
Salame semi-cotto di bovino	0,82	1,01	1,87
Salsiccia	1,12	0,32	1,01
Salsiccia di bovino	1,12	0,63	1,12
Prosciutto di bovino	0,96	1,14	1,33

cazione, non ha un grande effetto sulla riduzione della concentrazione dei radionuclidi. Anzi, talvolta, si possono raggiungere risultati opposti, infatti, la perdita di umidità con l'essiccazione porta a una concentrazione dei radionuclidi nei prodotti finali che è notevole nella produzione di salumi e prosciutti.

In conclusione, si sottolinea come la questione del trattamento tecnico di alimenti contaminati con radionuclidi debba essere risolta tenendo conto del tasso di contaminazione della mate-

ria prima, del suggerimento economico di questo provvedimento, della possibilità dell'uso di rifiuti foraggeri validi provenienti dall'industria per ottenere la produzione supplementare. A questo punto gli allevamenti di bestiame possono interpretare il loro ruolo positivo (ingrasso con borlanda, fettucce, uso nella razione di pani di sansa, melassa, ecc.) nella trasformazione dei rifiuti foraggeri dell'industria per prodotti salubri e necessari all'uomo.

Campi agricoli nei territori contaminati, isolati e spopolati

Nota preliminare

Analizzando i problemi dell'agricoltura del territorio contaminato da radionuclidi bisogna far attenzione a numerosi fattori. È necessario ricordare che i radionuclidi principali (^{137}Cs e ^{90}Sr) hanno un periodo di dimezzamento molto lungo: la loro radioattività si riduce a metà solo dopo 30 anni, di conseguenza, il fattore radioattivo esisterà nei territori contaminati per molti anni. La realizzazione dei provvedimenti protettivi è uno dei più importanti elementi per l'eliminazione delle conseguenze dopo il disastro di Chernobyl.

Gli alimenti di origine agricola e zootecnica prodotti nel territorio contaminato si consumano non solo nei luoghi di produzione ma una buona parte viene esportata al di fuori del territorio contaminato. Grazie alle ricerche specifiche (Giuchenko Y.M., 1998) è stato stabilito che il 70% della dose radioattiva collettiva determinata dal consumo di grano, patate e latte contaminati viene esportata. In totale, oltre i confini della Repubblica della Bielorussia, della dose complessiva comune pari a 799,5 Sv-individuo si "esportano" 298,2 Sv-individuo/anno, pari al 37,3%.

Le cooperative agricole statali (aziende) e la loro attività produttiva devono essere al centro dall'attenzione degli organi amministrativi. È sufficiente dire che secondo i dati del centro "Agrochimradiologia" nella regione di Briansk 24 aziende agricole (superficie di 92,3 mila ettari) hanno fatto registrare una densità media di contaminazione del terreno con ^{137}Cs di 585 kBq/m², 12 aziende (52,5 mila ettari) di 888 kBq/m², 10 aziende (26,9 mila ettari) di 1.354 kBq/m² (Vorobiev G.T. e altri, 2001). Con questi tassi di contaminazione dei terreni e con il sistema agricolo esistente ci sono serie difficoltà da superare per ottenere una produzione di alimenti "puliti" tali da corrispondere alle norme sanitarie e igieniche.

Rimane come problema difficile e non completamente risolto quello dell'uso di terreni agricoli resi incolti dopo il disastro di Chernobyl. Durante il primo anno dalla catastrofe sono stati esclusi dall'agricoltura 143,8 mila ettari di terreno. Nelle aziende della regione di Briansk sono stati ridotti i campi da seminare: da 22,9 a 15,7 mila ettari nella provincia di Krasnogorsk, da 15,8 a 11,6 nella provincia di Gordeevsk, da 21,1 a 18,5 mila ettari nella provincia di Novozybkov. Nella regione di Gomel, solo nella provincia di Choiniki, la superficie della zona isolata e spopolata è stata di 666 km² e la superficie dei terreni da seminare è stata ridotta da 30,8 a 22 mila ettari. In tutte queste province sono state diminuite nelle stesse proporzioni anche le superfici di prati e pascoli.

Esaminando il problema della riabilitazione dei terreni agricoli molto contaminati bisogna prendere in considerazione la proporzione tra terreni da seminare e l'insieme di prati naturali e pascoli. Nella zona della Polesia Ucraino-Bielorussa, nelle regioni di Briansk e Kaluga che sono state quelle più contaminate, la maggior parte di terreni agricoli sono rappresentati da prati e pascoli. Così, per esempio, nella regione di Briansk, la provincia di Novozybkov ha avuto il 33,6% dei terreni da foraggio, 42,8% la provincia di Gordeevsk e 35,4% quella di Krasnogorsk. Nella regione di Gomel, nella provincia di Choiniki, i terreni da foraggio sono stati il 50,7% di tutto il territorio agricolo.

Un ulteriore aspetto al quale bisogna far attenzione è la regolarità quantitativa della migrazione di radionuclidi di Cs e Sr nell'anello "terreno-piante (foraggio)-animali domestici-alimenti di origine animale". L'esempio dell'azienda agricola permette di evidenziare (Figura 24) come dal terreno alle piante coltivate passi lo 0,22% di ^{90}Sr e lo 0,02% di ^{137}Cs . Un'alta quantità di radionuclidi passa ai cosiddetti "foraggi di volume" (massa vegetativa di

piante dall'aspetto naturale e secco) pari al 92% del contenuto complessivo di radionuclidi presente in tutta la produzione di piante. Dal settore agricolo al settore zootecnico, da foraggi grossolani, succosi e concentrati passano il 90% di ^{137}Cs e il 76% di ^{90}Sr . Agli alimenti di origine animale con i foraggi passano il 3,7% di ^{137}Cs e un 0,9% di ^{90}Sr .

Specializzazione delle aziende: considerazioni radiologiche ed economiche

La possibilità di sviluppare l'agricoltura "pulita" (dal punto di vista radiologico) nei terreni

molto contaminati è confermata da una grande quantità di materiale scientifico costituito da ricerche e sperimentazioni. La specializzazione finalizzata delle aziende nelle zone di contaminazione radioattiva intensa deve perseguire il fine principale che è quello di ottenere alimenti con basso tasso di radionuclidi. In merito, è molto importante la risoluzione di due problemi: la produzione di alimenti agricoli deve essere economicamente giustificata e la sicurezza radioattiva degli operatori agricoli deve rispettare la legislazione esistente. In tante aziende agricole delle province contaminate le direttive economiche principali

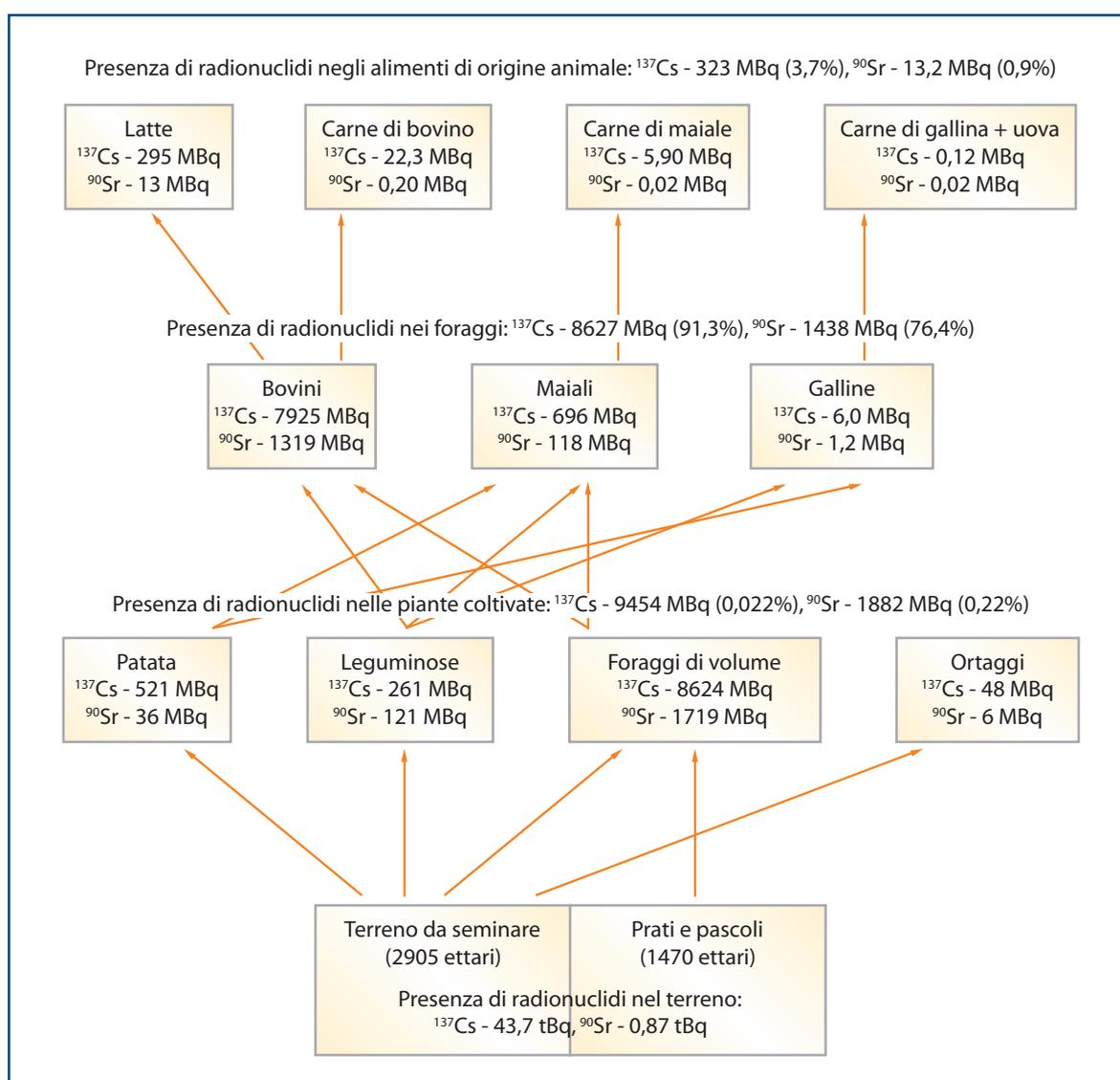


Figura 24. Migrazione dei radionuclidi ^{137}Cs e ^{90}Sr nella catena "terreno - piante - animali domestici - alimenti di origine animale" sull'esempio relativo alla provincia di Novozybkov, regione di Briansk, (densità di contaminazione del terreno: 1000 kBq/m² per il ^{137}Cs e 50 kBq/m² per lo ^{90}Sr).

sono la produzione di patate, grano, bestiame da latte e carne. Le direttive definiscono le modalità di sfruttamento del terreno e la direzione della coltivazione delle piante.

In definitiva la scelta di produzione di un'azienda agricola ha il significato essenziale del proprio contributo nella formazione successiva della dose collettiva d'irradiazione interna della popolazione.

In Tabella 18 è possibile verificare come la raccolta delle colture sia stata utilizzata direttamente per nutrire la popolazione e le dosi collettive d'irradiazione interna da radionuclidi, entrati con il consumo di pane, siano state di 3,8 mSv, di 21,6 mSv per le patate e 38,5 mSv per gli ortaggi. Le dosi collettive sono risultate più basse nei casi in cui il terreno da seminare sia stato usato per coltivare le colture da foraggio per gli animali da cui sono derivati gli alimenti per la popolazione.

Per principio, nei terreni da seminare si possono coltivare tutti i tipi di colture agricole tenendo conto delle condizioni di suolo, clima e tradizioni. È necessario ricordare anche l'aspetto radiologico, i tassi di contaminazione delle raccolte e le dosi d'irradiazione esterne degli operatori agricoli ricevute durante la loro attività.

Analizzando i dati radiologici ed economici (accumulazione di radionuclidi nelle raccolte, dosi collettive d'irradiazione degli operatori, quantità di unità foraggiere per ettaro di seminato, costo del foraggio, ecc.) è possibile concludere che nei terreni molto contaminati è meglio seminare cereali, leguminose, miscele annue di leguminose con cereali, mais e segale vernina (per foraggio verde) (Tabella 19).

Per quanto riguarda le leguminose e le miscele pluriennali di leguminose con cereali, la loro presenza è completamente necessaria nella rotazione agraria ma i foraggi composti da queste colture devono essere utilizzati solo per alimentare il bestiame che non è "produttivo": bestiame giovane e da lavoro.

La maggior parte della coltivazione di piante è composta da foraggi voluminosi che nelle aziende medie vengono prodotti in quantità da 2 a 4 mila tonnellate considerando l'unità foraggera. I consumatori principali di questi foraggi sono i bovini. A questo punto è d'obbligo stabilire che tipo di bestiame (da latte o da carne) allevare nelle zone con terreni ad alta contaminazione.

Una risposta definitiva la si ottiene analizzando i dati presentati in Figura 25. È stato accertato che nelle rotazioni agrarie e nei terreni naturali foraggeri sono stati prodotti diversi tipi di foraggio voluminoso con capacità nutritiva pari a mille tonnellate di unità foraggera. La prima metà (500 t) è stata utilizzata per alimentare le vacche da latte, la seconda per allevare e alimentare il bestiame bovino giovane. Per produrre 1 q di latte sono necessari 1,25 q di unità foraggiere, per 1 q di carne bovina circa 13,4 q della stessa unità.

I calcoli hanno evidenziato come le mucche alimentate con foraggio voluminoso, coltivato nei terreni contaminati con 20 kBq/m² di ⁹⁰Sr e 1000 kBq/m² di ¹³⁷Cs (è stata presa la densità media di contaminazione), producano latte con circa 2,9 MBq di ⁹⁰Sr e 67,6 MBq di ¹³⁷Cs. La popolazione, consumando i prodotti lattiero-caseari, riceve la dose interna d'irradiazione che è risultata uguale a 1112 mSv. Mangiando,

Tabella 18. Dati comparati delle dosi collettive di irradiazione con diverse varianti d'uso del terreno da seminare.

Alimenti	Prodotti (kg)	Contenuto negli alimenti (kBq)		Dose collettiva di irradiazione interna nella popolazione	Dose collettiva di irradiazione esterna negli operai
		¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr		
Grano	2.870	200	63,1	3,8	0,006
Patata	20.820	1.457	99,9	21,6	0,075
Ortaggi	27.960	2.796	376	38,5	0,142
Latte	2.410	265	11,6	4,4	0,046
Carne bovina	242	14	0,1	0,2	0,093
Carne suina	583	12	0,03	0,16	0,050

Tabella 19. Dati radiologici ed economici comparati per diverse colture*.

1 ettaro di terreno						
Indice	Cereali	Patata	Radici commestibili	Erba pluriennale	Fieno	Erba annuale
Produttività (q)	28,7	208,2	343,0	257,7	42,2	157
Lavoro/ora	25,9	295,6	442,5	25,8	37,6	15,7
Quantità di foraggio (q)	33,0	62,5	41,2	51,6	19,0	32,0
In raccolta	2,64	10,6	20,6	35,1	32,5	13,1
(kBq), ¹³⁷ Cs e ⁹⁰ Sr	0,73	1,0	6,7	17,9	16,5	8,4
Dose collettiva d'irradiazione esterna, (mSv)**	4,3	51,0	95,9	4,3	7,2	2,6

1 unità di foraggio (capacità nutritiva del foraggio)						
Indice	Cereali	Patata	Radici commestibili	Erba pluriennale	Fieno	Erba annuale
Lavoro/ora	0,78	3,77	10,8	0,50	1,98	0,55
Costo (rubli)	11,2	42,5	49,8	6,0	9,6	6,4
Dose collettiva d'irradiazione esterna, (mSv)**	0,13	0,82	2,33	0,08	0,38	0,07

* Dati statistici medi dal 1986-1991 della provincia di Novozybkov, regione di Briansk.

** Dosi di irradiazione degli operatori e contenuto di radionuclidi calcolati per la variante di contaminazione del terreno con 1000 kBq/m² di ¹³⁷Cs e 20 kBq/m² di ⁹⁰Sr.

invece, carne bovina alimentata con lo stesso foraggio, la dose collettiva d'irradiazione della popolazione è più bassa, pari a 39,9 mSv (il 3,6% dalla dose ricevuta dopo il consumo del latte radioattivo). In conclusione, è possibile affermare che l'allevamento di bovini da carne, dal punto di vista radiologico, è preferibile rispetto a quello di bovini da latte.

Leguminose e patate hanno avuto, rispettivamente, il secondo posto per i volumi di produzione e il primo per le superfici da semina. È noto come queste colture si distinguano per i coefficienti relativamente bassi di accumulazione dei radionuclidi. Ma nei terreni da seminare, con livelli elevati di contaminazione, la concentrazione di ⁹⁰Sr e ¹³⁷Cs nelle leguminose e nelle patate può superare le norme igieniche e sanitarie in relazione al loro contenuto negli alimenti.

Leguminose e patate con elevato contenuto di radionuclidi possono avere due tipi di impiego: allevamento e ingrasso di animali da carne (bovini, maiali, polli) e produzione di alcool con uso successivo di borlanda per l'ingrasso di bovini. Si è potuto notare come gli animali di allevamento abbiano svolto il ruolo di "filtro biologico" nell'anello di migrazione dei radionuclidi: "piante coltivate - uomo" (Figura 26).

Per un'utile comparazione vengono riportati i risultati della dose collettiva di irradiazione interna relativa al consumo della popolazione di pane prodotto con 500 t di grano contaminato (40 MBq per il ¹³⁷Cs e 22 MBq per lo ⁹⁰Sr). Sono state riportate anche le varianti della dose collettiva relativa al consumo di carne bovina, suina e avicola (polli) proveniente da animali alimentati con la stessa quantità di grano contaminato.

Si può osservare come con il consumo di pane la popolazione abbia ricevuto la dose collettiva di 868 MBq ma con il consumo degli alimenti meno contaminati (carne bovina, suina e avicola) la dose di irradiazione interna sia stata, rispettivamente, di 23,6 mSv - 29,5 mSv - 30,9 mSv. Di conseguenza è possibile constatare come la dose d'irradiazione della popolazione si sia ridotta di 20-30 volte.

Con il coinvolgimento nella rotazione agricola delle zone isolate e spopolate è sempre presente il rischio che la produzione evidenzii un tasso di contaminazione da radionuclidi che non corrisponda alle norme sanitarie. Per questa ragione, nel riabilitare queste zone è necessario pianificare e realizzare provvedimenti con il fine di escludere l'introduzione di alimenti con un contenuto di radionuclidi più

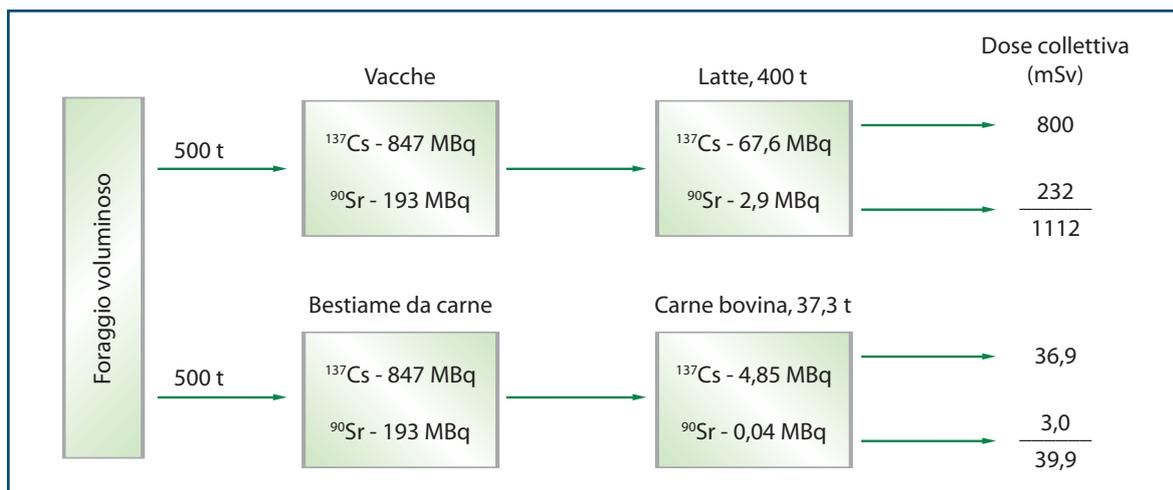


Figura 25. Dosi collettive d'irradiazione della popolazione in relazione al consumo di latte e carne bovina prodotti con quantità uguale di foraggio voluminoso.

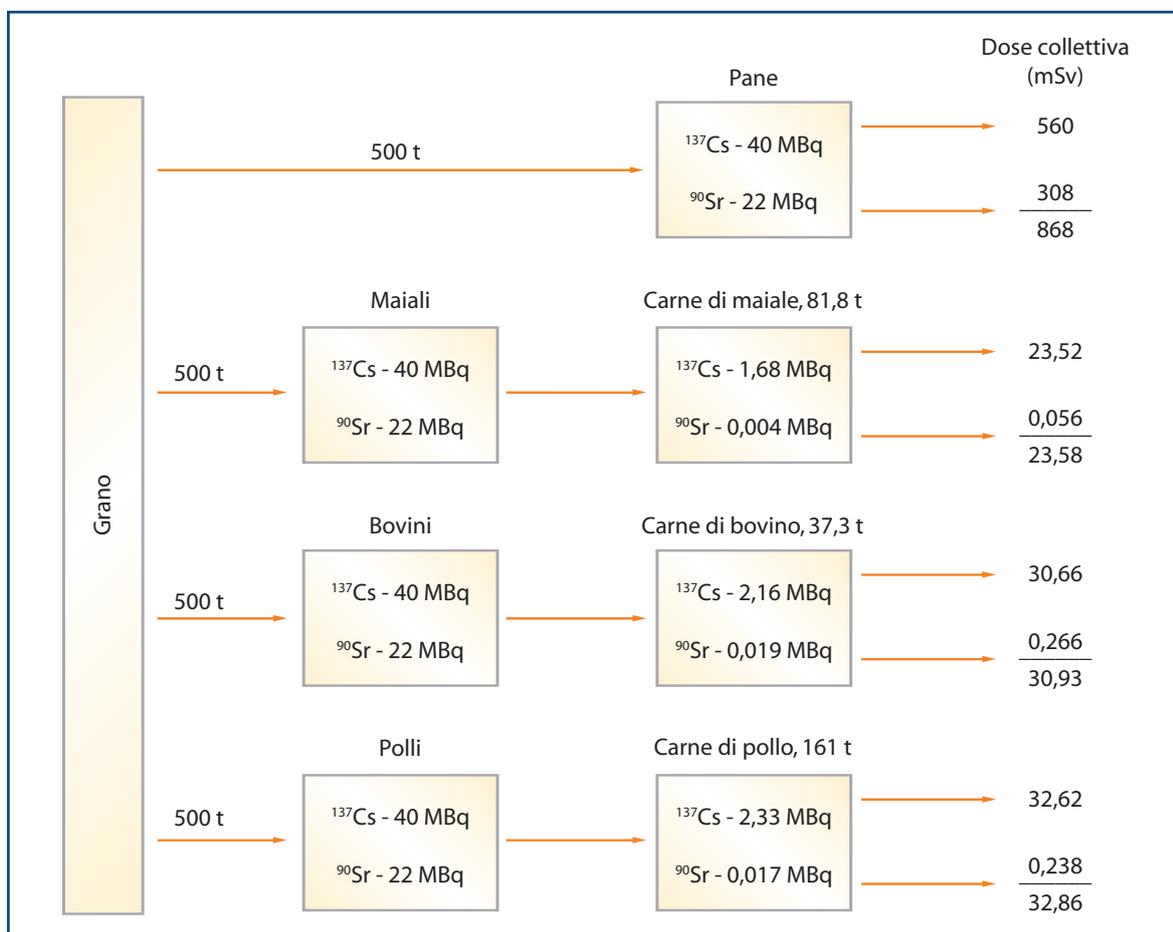


Figura 26. Dosi collettive d'irradiazione della popolazione con diverse varianti d'uso di grano contaminato.

elevato se paragonato a quello proposto dalle Norme Temporaneamente Ammissibili. Norme che hanno previsto, nella regione di Briansk, livelli di contaminazione del latte di 185 Bq/l per il ¹³⁷Cs e 25 Bq/l per lo ⁹⁰Sr e della

carne di 400 Bq/kg per il ¹³⁷Cs e 50 Bq/kg per lo ⁹⁰Sr, nella Repubblica della Bielorussia, 100 Bq/l per il ¹³⁷Cs e 3,7 Bq/l per lo ⁹⁰Sr nel latte, 500 Bq/kg per il ¹³⁷Cs nella carne, 40 Bq/kg per il ¹³⁷Cs e 3,7 Bq/kg per lo ⁹⁰Sr nel pane.

Tra i provvedimenti più validi sono da menzionare quelli che prevedono l'utilizzo di metodi agro-chimici e agro-tecnici diretti alla riduzione del passaggio dei radionuclidi dal terreno alla pianta coltivata anche se non sempre questi metodi hanno dato i risultati attesi.

L'allevamento zootecnico deve prevedere l'applicazione di contromisure protettive come: l'utilizzo razionale di mangimi (compreso il grano foraggero) tenendo conto della loro contaminazione, l'uso di preparati con ferro e zinco e l'ampio impiego di metodi elaborati per la "purificazione" del bestiame da carne nell'ultima fase del loro ingrasso.

In alcuni casi è opportuno il trattamento "profondo" della produzione agricola contaminata per ottenere alimenti "puliti" (n. 2).

I fattori e i metodi descritti permettono di contribuire alla riabilitazione delle zone isolate e spopolate indirizzando la zootecnia verso l'allevamento del bestiame bovino da carne e latte e l'allevamento di maiali e polli. In favore della popolazione rurale delle zone con alto tasso di contaminazione è necessario organizzare nei terreni meno contaminati la produzione di tutti gli altri alimenti che fanno parte del "paniere".

La maggior parte dei territori contraddistinti dall'elevato tasso di contaminazione si caratterizza da un'ampia variabilità di densità di contaminazione del terreno. Come esempio si riporta la differente densità di contaminazione da cesio radioattivo dei terreni agricoli dell'azienda "Uvelie", presente nella provincia di Krasnogorsk, regione di Briansk (Figura 27). Dai dati risulta come la maggior parte dei terreni dell'azienda (88%), dalla classificazione effettuata precedentemente, siano riferibili alle zone isolate e spopolate. A questa quota di terreni vanno aggiunti 365 ettari aventi una densità abbastanza alta di 370-555 kBq/m² e 125 ettari con densità di contaminazione relativa al ¹³⁷Cs non molto elevata (185-370 kBq/m²). Sulla superficie di 490 ettari è stato possibile, quindi, ottenere una diversa produzione agricola utile per rifornire la popolazione locale di alimenti "puliti".

Le provviste di mangimi per il bestiame nelle zone isolate e spopolate e l'eventuale possibilità del loro uso nelle fattorie situate nei terri-

tori con basso tasso di contaminazione radioattiva è un problema di fondamentale importanza che può essere risolto solo a condizione di un severo controllo radiologico (l'impiego di questi mangimi deve essere evitato nell'alimentazione di vacche da latte e bovini da carne negli ultimi mesi d'ingrasso). Per quanto riguarda il letame prodotto dal bestiame alimentato con il foraggio delle zone isolate e spopolate, non ci sono limiti per il relativo uso come concime organico. Si è potuto evidenziare come usando il letame del bestiame nutrito con foraggio proveniente dai terreni con densità di contaminazione di 2.000 kBq/m² per il ¹³⁷Cs e 50 kBq/m² per lo ⁹⁰Sr, la contaminazione supplementare del terreno sia stata di 0,6 kBq/m² per il ¹³⁷Cs e 0,15 kBq/m² per lo ⁹⁰Sr ovvero decimi e centesimi delle quantità di radionuclidi presenti nel terreno.

Valutazione radiologica delle conseguenze dopo la specializzazione delle aziende agricole

La prima esperienza di riorganizzazione delle aziende agricole rimaste contaminate dopo il disastro radioattivo nel Sud degli Urali è stata effettuata all'inizio degli anni '60 del secolo passato. In relazione alla decisione del Consiglio dei Ministri della Russia, nel territorio contaminato, sono state create sei piccole aziende agricole nella regione di Celiabinsk e tre fattorie specializzate nella regione di Sverdlovsk. È stato predisposto che ogni fattoria avesse la superficie di 50.000 ettari di terreno agricolo (circa 15-26 ettari di terreno da seminare). È documentato come queste estese fattorie, previo consiglio degli esperti, si siano specializzate nella produzione di carne poiché rispetto agli altri tipi di produzione agricola la carne accumula poca quantità di Sr radioattivo (radionuclide principale presente nel territorio contaminato degli Urali del Sud). Con l'attuazione di questa specializzazione, la concentrazione di ⁹⁰Sr in carne e latte è risultata di 2,5-5 volte inferiore rispetto a quella relativa alle fattorie non riorganizzate e 5-12 volte rispetto a quelle private (Romanov G.H. e coll., 1990).

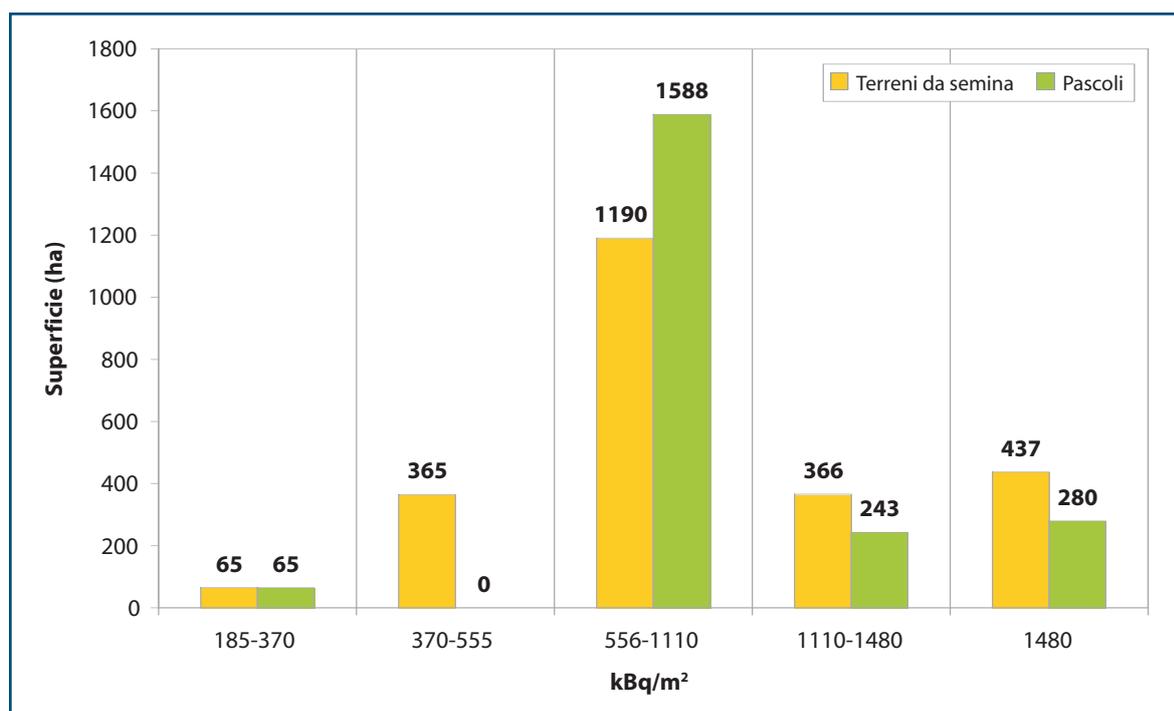


Figura 27. Distribuzione dei terreni agricoli in relazione alla densità di contaminazione del terreno con ¹³⁷Cs nell'azienda "Uvelie", provincia di Krasnogorsk, regione di Briansk (densità media di contaminazione del terreno = 1077 kBq/m², di erbai e pascoli = 1040 kBq/m²).

Nei primi mesi dopo la catastrofe di Chernobyl è diventata evidente la necessità di orientare le aziende agricole delle zone più contaminate. Purtroppo, si è constatato come l'agricoltura in queste zone si sia sviluppata nelle direzioni storicamente definite. Questo aspetto è stato confermato comparando i dati relativi alla struttura dei terreni soggetti a semina nella provincia di Novozybkov, regione di Briansk, e nella provincia di Choiniki, regione di Gomel, sia nel 1985 (prima del disastro) che nel 1991 (cinque anni dopo la catastrofe) (Figura 28). Ulteriore conferma è il dato sulla densità di distribuzione delle vacche in 100 ettari di terreno agricolo. I valori, riferibili al 1985, sono stati di 16,8 nella provincia di Novozybkov e 19,7 nella provincia di Choiniki, nel 1991 di 14,4 e 19,5 rispettivamente. La stessa situazione è stata registrata per i maiali. In molte aziende agricole delle zone contaminate le direzioni principali della produzione sono rimaste le stesse: produzione di patate e grano e allevamenti di bestiame da carne e latte.

La fase iniziale di qualsiasi specializzazione per un'azienda agricola, come la produzione

di carne bovina e suina, dipende dalla classificazione dei terreni da semina e dalla definizione delle varianti ottimali per le rotazioni agrarie allo scopo di rafforzare la base foraggera degli allevamenti di bestiame (Tabella 20). Il problema consiste nell'ottenere dai terreni da semina la quantità massima di unità foraggere con la concentrazione minima di radionuclidi e basso costo dei mangimi. Dopo lo studio di questo problema sono state proposte tre varianti di rotazioni agrarie per le zone isolate di Briansk (Egorov A.V., 1992). Le prime due con cereali (pari al 65% del terreno), la terza rotazione con colture foraggere localizzate nei terreni prossimi alle fattorie sia per facilitare il trasporto delle piante coltivate che il pascolo di bestiame.

Per la valutazione radiologica delle conseguenze ottenute con la specializzazione è stato utile considerare due aziende agricole distinte per la contaminazione radioattiva dei propri terreni agricoli. Un'azienda (identificata con la lettera B) ha rappresentato le aziende della regione di Briansk (con parametri economici e radiologici medi tipici delle aziende contaminate "Rescitolnyj", "Krasnaya lput",

“Druzhba”, “Pravda”) con contaminazione dei terreni elevata (1000 kBq/m²) per il ¹³⁷Cs e relativamente bassa (19 kBq/m²) per lo ⁹⁰Sr. L'altra azienda (identificata con la lettera G) ha rappresentato le aziende della regione di Gomel (“Sudkovo”, “Borisovscina”, “Leninskij sliach”, “21 cieds KPSS”, “Kalinina”) con contaminazione media (422 kBq/m² circa) per il ¹³⁷Cs e abbastanza elevata (82 kBq/m² circa) per lo ⁹⁰Sr.

La superficie di terreni agricoli nell'azienda B è stata di 3478 ettari (1874 da semina e 1594 di erbai e pascoli), quella dell'azienda G di 3850 ettari (1986 da semina e 1864 di erbai e pascoli). Esprimendo i valori della superficie totale in percentuale e in parentesi i dati dell'azienda, i valori dei terreni da semina prima della riabilitazione sono stati di: 45,0 (44,8) cereali e leguminose, 10,8 (9,2) patate, 1,2 (2,2) radici commestibili, 0,7 (0) ortaggi, 12,0 (14,6) erbe pluriennali, 12,1 (14,8) erbe annuali e 9,6 (14,9) mais da foraggio verde. Tenendo conto delle ragioni espresse, le coltivazioni dei terreni da semina dovrebbero prevedere: cereali e leguminose per il 63,8%, erbe pluriennali per il 22,8% e mais da foraggio verde per l'11,5%.

Per meglio inquadrare il problema sono stati

effettuati calcoli supponendo che: 1) la produzione delle colture agrarie e quella di bovini e suini fosse simile a quella antecedente la specializzazione; 2) la raccolta di leguminose fosse completamente utilizzata (escludendo la parte destinata alla semina) per l'ingrasso e l'allevamento del bestiame; 3) una parte di latte fosse impiegata per nutrire vitelli e maialini nei primi due mesi dalla nascita e il rimanente fosse separato come panna per la vendita e latte scremato per l'alimentazione dei maiali compresi quelli da ingrasso. Per i calcoli sono state usate le norme corrispondenti, le razioni di alimentazione del bestiame agricolo e i coefficienti di passaggio dei radionuclidi nei diversi elementi della catena alimentare “terreno-uomo” descritti in precedenza.

L'analisi dei risultati, riportati in Tabella 21, ha permesso di concludere che:

- con la gestione agricola simile a quella antecedente la specializzazione delle aziende, la dose collettiva di irradiazione interna è dovuta al consumo di grano, patate e latte contaminati (fino al 98% della dose totale ricevuta mangiando ali-

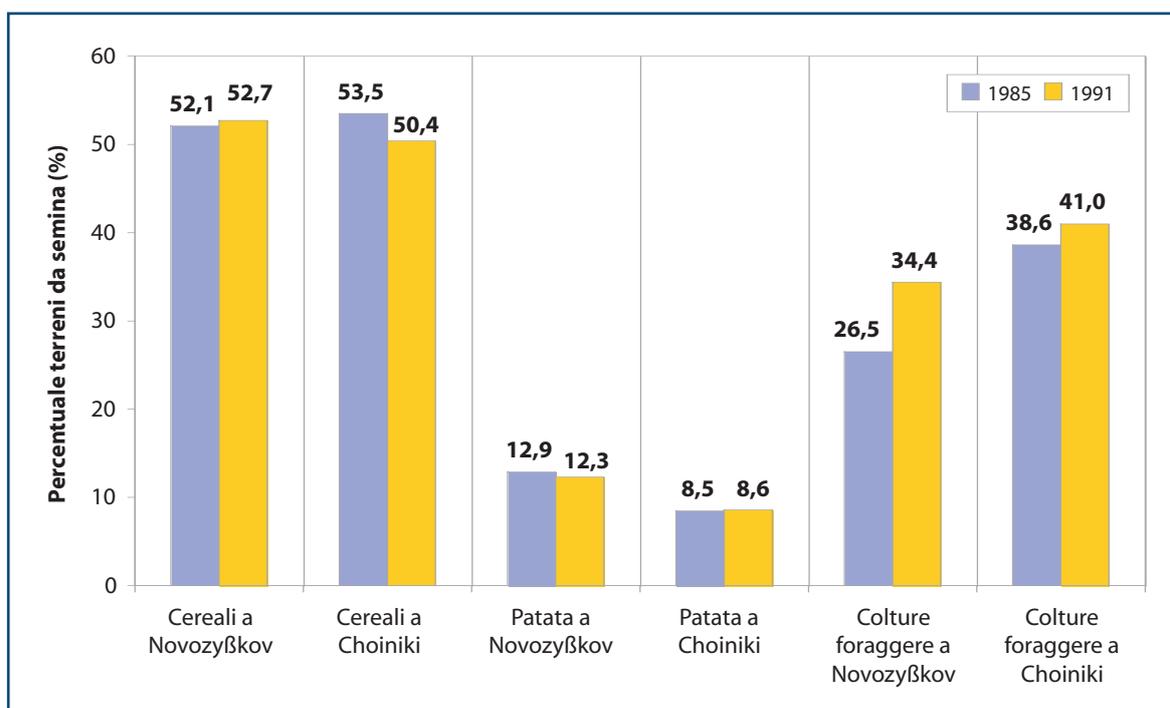


Figura 28. Dati comparativi sulla struttura di terreni da semina con le colture principali nelle province di Novozybkov (regione di Briansk) e Choiniki (regione di Gomel).

Tabella 20. Rotazioni agrarie per le aziende specializzate nelle zone isolate e spopolate.

1. Cereali vernini - leguminose primaverili con semina di erbe - erbe pluriennali - erbe pluriennali - cereali vernini - cereali primaverili - mais da foraggio verde - cereali primaverili
2. Erbe pluriennali - cereali vernini - cereali primaverili - piselli - cereali primaverili - erbe annue - cereali vernini - cereali primaverili con semina di erbe
3. Cereali vernini - cereali primaverili con semina di erbe - erbe pluriennali - erbe pluriennali - cereali vernini-cereali primaverili

Tabella 21. Influenza della specializzazione delle aziende sui volumi di produzione degli alimenti di origine animale e sulla formazione della dose collettiva di irradiazione interna della popolazione.

Azienda "B"							
Indice	Variante	Grano	Patata	Latte	Carne bovina	Carne suina	Dose collettiva di irradiazione (mSv)
Produzione lorda (t)	1	2.033	3.896	1.437	126,8	52,7	
	2	3.382	-	1.800	234,1	288,1	
Vendite (t)	1	775	1.917	1.231	126,8	52,7	
	2 ¹	-	-	148,5 ⁴	234	288,1	
Dose collettiva di irradiazione interna (mSv)	1	1.160	2.347	2.329	108	15,3	6.367 ²
		(726) ³	(874)	(433)	(4,7)	(0,2)	(2.187)
	2	-	-	22,4	198,4	83,6	304
		-	-	(4,4)	(8,7)	(1,1)	(14,2)
Azienda "G"							
Indice	Variante	Grano	Patata	Latte	Carne bovina	Carne suina	Dose collettiva di irradiazione (mSv)
Produzione lorda (t)	1	3.219	1.630	3.618	448,2	86,2	
	2	5.195	-	1.930	205,5	608	
Vendite (t)	1	1.227	802	3.227	448,2	122,9	
	2	-	-	192,2 ⁴	205,5	608	
Dose collettiva di irradiazione interna (mSv)	1	4.885	307	6.390	190	13,0	11.785
		(4.649)	(91)	(4.656)	(67)	(1,2)	(9.464)
	2	-	-	365	66	113	544
		-	-	(210)	(9)	(14)	(233)

1 1^a variante - dati prima della specializzazione.

2^a variante - dati dopo la specializzazione.

2 Compresa la dose del consumo di ortaggi contaminati.

3 Dose formata dall'entrata di ⁹⁰Sr con gli alimenti.

4 Le cifre fanno riferimento alla panna di latte contenente il 20% di grasso.

menti provenienti dall'attività agricola e di allevamento);

- nelle aziende con un basso rapporto di ⁹⁰Sr/¹³⁷Cs (fino a 0,05) nei terreni, il contributo principale alla formazione della dose collettiva di irradiazione interna è data dalla dose di ¹³⁷Cs (60-70% della dose complessiva), viceversa, con il rapporto più elevato nei terreni di ⁹⁰Sr/¹³⁷Cs (0,20-0,25), come è stato rilevato nelle aziende delle province di Choiniki e Braghin, regione di Gomel, la maggior

parte della dose si forma grazie al consumo di alimenti con tasso elevato di ⁹⁰Sr (70-80% della dose complessiva);

- dopo il nuovo orientamento (specializzazione) delle aziende nella produzione di carne bovina e suina, con l'uso interno di prodotti agricoli e latte, le dosi collettive d'irradiazione della popolazione si sono ridotte approssimativamente di 20 volte.

I risultati positivi del nuovo orientamento (riduzione della dose collettiva grazie alla produzione di alimenti con bassa concentra-

zione di radionuclidi, 6,1 Sv-individuo nell'azienda "B" e 11,2 Sv-individuo nell'azienda "G") devono essere stimolati e perseguiti dallo Stato. Secondo la Commissione Internazionale sulla Protezione Radioattiva (CIPR) i provvedimenti protettivi, al costo di 10-20 mila dollari USA, sono consentiti solo se garantiscono la riduzione della dose collettiva d'irradiazione di 1 Sv-individuo.

Dal punto di vista radiologico la necessità della specializzazione per le aziende situate nelle zone con alto tasso di contaminazione radioattiva è palese. Ovviamente i provvedimenti per la relativa realizzazione hanno

bisogno di apporto tecnico e risorse finanziarie adeguate. La specializzazione delle aziende, la creazione dei complessi agrotecnici, la realizzazione di imprese industriali per la rielaborazione e il commercio dei prodotti sono forme molto pratiche per ridurre le conseguenze determinate dalla catastrofe di Chernobyl divenendo una protezione per la popolazione (Annenkov B.N., 1994).

In definitiva la specializzazione delle aziende nelle zone isolate e spopolate impone la realizzazione di un insieme di provvedimenti diretti all'aumento di produttività e redditività delle colture agrarie e degli allevamenti zootecnici.

Conclusione

Negli anni dopo la catastrofe di Chernobyl e dopo il disastro nucleare nel Sud degli Urali è stato effettuato un "buon lavoro" per ridurre le conseguenze di contaminazione radioattiva dei terreni. La concentrazione di radionuclidi nei prodotti di origine agricola e zootecnica provenienti dalle zone contaminate si è ridotta notevolmente se paragonata a quella dei primi anni dopo la catastrofe di Chernobyl. Buoni risultati sono stati ottenuti già negli anni 1987-1990 quando in agricoltura sono stati realizzati provvedimenti agro-zootecnici e veterinari diretti alla riduzione del passaggio dei radionuclidi nell'anello "terreno-piante-animali-prodotti".

Dopo il disastro di Chernobyl, nonostante il successo nella riduzione delle conseguenze, la situazione radiologica nelle zone molto contaminate continua, attualmente, a essere abbastanza complicata.

Il problema di riduzione della dose individuale di irradiazione degli abitanti delle zone contaminate non è così facile come possa sembrare. Gli intenti di diminuirla in alcune zone (riduzione del contributo di irradiazione esterna della dose complessiva) non hanno dato i risultati desiderati. La decontaminazione in 93 zone della regione di Briansk (compreso Novozybkov), con una popolazione di 90 mila persone, ha permesso con provvedimenti costosi la riduzione della dose annua d'irradiazione solo dal 5 al 15% (Ponomarev A.V., 1977). È possibile concludere che la soluzione del problema è nella riduzione dell'irradiazione interna, cioè nella realizzazione di vari provvedimenti per ridurre la concentrazione dei radionuclidi negli alimenti di origine zootecnica e anche nella diminuzione del consumo, nella popolazione, di funghi, frutti di bosco e pesci contaminati.

Il problema più ingente per la produzione nelle zone contaminate è la riduzione dell'en-

trata di radionuclidi negli alimenti. La soluzione di questo problema è nella realizzazione di una serie di provvedimenti diretti alla riduzione della migrazione dei radionuclidi nell'anello biologico "terreno-piante" e "piante (foraggi)-bestiame". Dall'esperienza si evince come utilizzando i metodi protettivi si riesca a ridurre la concentrazione di radionuclidi di 1,5-4 volte nei prodotti agricoli e di 3-7 volte in quelli zootecnici (latte, carne e uova).

È possibile ridurre il passaggio dei radionuclidi dagli alimenti di origine zootecnica all'organismo umano con un nuovo orientamento produttivo (specializzazione) delle aziende. Si tratta dello sviluppo di allevamenti di bovini da carne e da latte, allevamenti di maiali e polli. Questo riguarda soprattutto le aziende che si trovano nelle zone isolate e spopolate. I calcoli evidenziano come il cambiamento di direzione dell'azienda da un tipo di produzione agraria e zootecnica (coltivazione di patate e grano, allevamento bovini da latte) ad un altro (carne bovina e suina, polli, latticini con alta percentuale di grasso) permetta di ridurre l'entrata di radionuclidi negli alimenti fino a 20 volte, così come le dosi collettive di irradiazione interna della popolazione (soprattutto nelle zone confinanti con le zone contaminate).

Negli ultimi 50 anni, dopo il disastro nucleare avvenuto nel Sud degli Urali, è stata studiata la migrazione dei radionuclidi più pericolosi (^{137}Cs e ^{90}Sr) nelle catene alimentari e biologiche. Sono stati elaborati e approvati metodi agro-zootecnici e veterinari che garantiscono la riduzione della penetrazione dei radionuclidi negli alimenti prodotti. Attualmente il problema consiste nell'introduzione di provvedimenti protettivi efficaci sostenuti da un adeguato stanziamento di mezzi finanziari e risorse materiali e tecniche in favore delle aziende, soprattutto, di quelle presenti nelle zone isolate e spopolate.

Termini e definizioni

Attività della sostanza radioattiva: numero del decadimento spontaneo di radionuclidi per unità di tempo.

Becquerel (Bq): unità di misura della radioattività, un becquerel corrisponde a un decadimento al secondo per radionuclide. Unità di misura derivate: kilobecquerel (kBq)= 10^3 Bq, megabecquerel (MBq)= 10^6 Bq, terabecquerel (TBq)= 10^{12} Bq.

Irradiazione esterna: irradiazione dell'individuo da una sorgente di radiazioni ionizzanti esterna.

Irradiazione interna: irradiazione dell'individuo da una sorgente di radiazioni ionizzanti interna all'oggetto.

Sievert (Sv): unità della dose assorbita da un organismo= 1Dj/kg (per raggi X, gamma e beta irradiate); millisievert (mSv)= 1×10^{-3} Sv, microsievert (mkSv)= 10^{-6} Sv.

Dose individuale: dose ricevuta dall'individuo dalla sorgente di radiazioni esterna e interna.

Dose di gruppo: dose ricevuta dal gruppo di individui dalla sorgente di radiazioni, somma delle dosi individuali.

Coefficiente di accumulazione (CA): rapporto della concentrazione di radionuclide nell'unità massa della pianta (Bq/kg) e la concentrazione dello stesso radionuclide nel suolo (Bq/kg).

Coefficiente di passaggio (CP): rapporto tra la concentrazione del radionuclide nel prodotto (Bq/kg,l; kBq/kg,l) e la densità della contaminazione della terra da parte del radionuclide (kBq/m²).

Densità della contaminazione: quantità di radionuclide in 1 m² di terra (kBq/m²).

Radionuclide: atomo radioattivo con numero di massa e numero atomico, il numero di massa è indicato in alto a sinistra del simbolo chimico (⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs).

Ringraziamenti

Si ringraziano: il dott. Alex Kostov, la dott.ssa Ivanka Krasteva e la sig.ra Giuseppina Di Felice per il prezioso contributo.

- AA.VV. 1964. Distribuzione, attività biologica ed eliminazione accelerata degli isotopi radioattivi. Mosca, Medicina, pp. 375.
- AA.VV. 1988. Aspetti medici dall'avaria della centrale di Chernobyl. Kiev, Salute.
- AA.VV. 2000. Guida per la gestione della produzione agro-industriale in condizioni di contaminazione radioattiva della terra nella Repubblica di Bielorussia. 1997-2000.
- AA.VV. 2001. Il ruolo dell'eredità creativa di academic VASHNIL. Klechkovskij V. M. nelle decisioni dei problemi contemporanei per la radiologia agricolturale. Materiali del congresso pratico-scientifico. Mosca, 5-6 dicembre 2000.
- Ageez V. Y. 2001. Sistema radioecologico di contromisura nell'agrosfera in Bielorussia. Minsk, RNIUP, Istituto di radiologia, pp.250.
- Aleksahin R. M. 1982. Energia nucleare e biosfera. Mosca, Energoizdat.
- Aleksahin R. M. 1996. La catastrofe di Chernobyl e la produzione agro-industriale. *Scienze agrarie*, **3**, 5-7.
- Aleksahin R. M., Korneev N. A. 1992. Radioecologia agricolturale. Mosca, Ecologia pp. 400.
- Annenkov B. N. 1961. Raccolta referti di medicina nucleare, Mosca, *Medghiz*, **5**, 83.
- Annenkov B. N. 1969. Metabolismo dello stronzio nell'organismo di animali domestici e da laboratorio. Dr. in scienze biologiche, Mosca, pp. 32.
- Annenkov B. N. 1996. Distribuzione e attività biologica degli isotopi radioattivi /a cura di Moskalev Y. I., Mosca, Atomizdat, 151-158.
- Annenkov B. N., Chuhin S. G., Bahareva Z. A. 1964. Accumulo e distribuzione di ⁹⁰Sr dopo prolungata introduzione di radiostronzio nel suino - Distribuzione, attività biologica, eliminazione accelerata di isotopi radioattivi, a cura di: Moskalev Y. I., Mosca, Medicina, pp. 131.
- Annenkov B. N., Dibobes I. K., Aleksahin R. M. 1973. Radiobiologia e radioecologia degli animali domestici. Mosca, Atomizdat.
- Annenkov B. N., Yudintseva E. V. 1991. Fondamenti di agricoltura radiologica. Mosca, Agropromizdat.
- Averin V. S., Kalinichenko S. A., Nenashev R. A., Tsurankov E. N. 2002. Valutazione dei parametri del passaggio di radionuclidi da terra e piante al latte di bovini durante il pascolo. *Radiobiologia. Radioecologia* **42** (4) 429-433.
- Averin V. S., Nenashev R. A. 2001. Efficienza della tecnologie industriali sulla diminuzione del passaggio di ¹³⁷Cs durante il trattamento delle carni per la produzione di salumi - Le tecnologie innovative. Teoria e pratica. Congresso internazionale di scienze pratiche. Gomel, Giugno 2001, Minsk, 143-148.
- Buldakov L. A., Moskalev Y. I. 1968. Problemi di distribuzione e valutazione sperimentale sui livelli accettabili di ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ¹⁰⁶Ru. Mosca, Atomizdat.
- Burnazian A. I. 1990. Prova di liquidazione delle conseguenze sui territori contaminati da prodotti di scissione dell'uranio. Mosca, Energoatomizdat.
- Fesenko S. V., Sangiarova N. I., Aleksahin R. M. 1998. Valutazione dell'efficienza dell'attività di difesa nel periodo passato dopo l'avaria di Chernobyl. *Radiobiologia. Radioecologia* **38** (3) 354-366.

- Firsakova S. K., Giuchenko Y. M., Grebenshikova N. V., Timofeev S. F. 1996. Influenza dell'attività di difesa sull'agricoltura per diminuire la dose di carico. Risultati della ricerca scientifica in campo radioecologico, nell'ambiente circostante, per un decennio, dopo l'avaria di Chernobyl, a cura di: Firsakova S.K., Gomel, pp. 4-11.
- Giuchenko Y. M. 1998. Modelli matematici sui flussi da radionuclidi in agricoltura e negli ecosistemi naturali per il risanamento radioattivo dei territori contaminati. Dr. in scienze biologiche, Obninsk.
- Giuchenko Y. M., Firsakova S. K., Fesenko S. V., Kuchma N. D., Dvornik A. M. 2001. Risanamento degli ecosistemi boschivi contaminati dai radionuclidi. *Giornale agrochimico*, **3**, 10-12.
- Guliakin I. V., Yudinseva E. V. 1973. Agricoltura radiobiologica. Mosca, Kolos, pp. 272.
- Howard B. J., Vandecasteele C., Mayes R. W., Belli M., Stakelum G., Colgan P. A., Assimakopoulos P. A., Unsworth M. H., Jones B.E.V. 1992. I fattori che hanno effetto sul trasferimento di radiocesio nei ruminanti. Rapporto finale di CEC DGX - D-3, pp. 11-16.
- Iliazov R. G. 1994. Gestione dell'aspetto radioecologico sull'allevamento nelle condizioni di contaminazione delle proprietà agrocolturali in Bielorussia dopo l'avaria della centrale di Chernobyl. Dr. in scienze biologiche, Gomel, pp. 83.
- Ivanov Y. A. 1997. Argomento radioecologico per una prognosi a lungo termine della situazione radiologica delle proprietà agrocolturali nel caso di una grande avaria nucleare. Dr. in scienze biologiche, Obninsk, pp. 50.
- Kalinichenko S. A., Averin V. S., Nenashev R. A., Tsurankov E. N. 2001. Le particelle di terra come fattore complementare per la contaminazione del latte di bovini con radionuclidi provenienti dal Chernobyl: IV convegno di studio radiologico (radiobiologia, radioecologia, sicurezza radiologica). Tesi rapporto. Mosca, 20-24 novembre 2001, V.2, Mosca, Casa Editrice Università di Russia amicizia nazioni, pp. 626.
- Kalinichenko S. A., Averin V. S., Nenashev R. A., Tsurankov E. N., Naumchik A. V. 2001. Penetrazione delle particelle di terra nell'organismo dei bovini durante il pascolo come fattore di contaminazione del latte con radionuclidi: Problemi radiologici nei territori contaminati. Raccolta tematica-commemorativa. Organizzazione unificata repubblicana di ricerca scientifica. Istituto di radiologia. Minsk, pp. 114-120.
- Karpenko A. F., Mezenko N. A., Bordak M. I. 1995. Produzione agricolturale nella regione di Gomel dopo l'avaria della centrale di Chernobyl. Gomel, Polespechat, pp. 103.
- Klechkovskij V. M., Guliakin I. V. 1958. Il comportamento della microquantità di stronzio, cesio, rutenio e zirconio nella terra e nelle piante. *Gestione della terra*, **3**, 1-15.
- Korneev N. A. 1973. Radiobiologia e radioecologia degli animali domestici. Mosca, Atomizdat, 11.
- Korneev N. A., Sirotkin A. N. 1987. Basi della radioecologia degli animali domestici. Mosca, Energoatomizdat.
- Korneev N. A., Sirotkin A. N., Korneeva N. V. 1977. Diminuzione della radioattività in piante e prodotti animali. Mosca, Kolos, pp. 208.
- Marey A. N., Barhudarov R. M., Novikova N. I. 1974. Abbassamento globale di ¹³⁷Cs e uomo. Mosca, Atomizdat.
- Nikipelov B. V., Romanov G. I., Budakov L. A. e coll. 1989. Avaria nucleare nel Sud degli Urali nel 1957/Energia atomica, **67** (2) 74-80.
- Panov A. V., Fesenko S. V., Aleksahin R. M. 2001. Efficienza dell'attività per diminuire la dose della radiazione sugli abitanti dopo un lungo tempo in seguito all'avaria di Chernobyl. *Radiobiologia. Radioecologia* **41** (6) 682-694.

- Podoliak A. G., Grebenshikova N. V., Firsakova S. K., Timofeev S. F., Giuchenko Y. M. 2001. Influenza dei parametri di migrazione verticale, modi per l'individuazione dei radionuclidi nel terreno, accessibilità biologica - Problemi di radioecologia dei territori contaminati. Organizzazione unificata repubblicana di ricerca scientifica. Istituto di radiologia, n. 1, Minsk, 36-45.
- Priester B. S. 1999. La conseguenza dell'avaria della centrale di Chernobyl sull'agricoltura. Ucraina, Kiev, Ucraina, Cherven, pp. 103.
- Prokofev O. N. e coll. 1969. Abbassamento globale di ^{137}Cs nei prodotti alimentari e nell'organismo umano. Mosca, Atomizdat, pp. 250.
- Rassel R. S. 1971. Radioattività e alimenti per l'uomo (traduzione dall'inglese). Mosca, Atomizdat.
- Romanov G. N., Spirin D. A., Aleksahin R. M. 1993. I processi della migrazione di ^{90}Sr nell'ambiente di Kushtum dopo l'avaria. Le conseguenze ecologiche della contaminazione radioattiva nel Sud degli Urali, 70-78.
- Sangiarova N.I. 1997. Monitoraggio radioecologico dell'agroecosistema e gestione dell'agricoltura nelle zone di influenza dell'elettrocentrale atomica. Dr. in scienze biologiche, Obninsk, 1997, pp. 51.
- Sangiarova N.I., Fesenko S.V., Aleksahin R.M. 1994. Dinamica dell'accessibilità biologica di ^{137}Cs nel sistema terreno-piante dopo l'avaria della centrale di Chernobyl. *Rapporto dell'Accademia di scienze* **338** (4) pp. 564-566.
- Sirotkin A. N., Burov N. I., Korneev N. A., Sarapultsev I. A. 1969. L'influenza del livello di calcio nella razione sull'eliminazione dello ^{90}Sr nell'organismo delle vacche. Isotopi radioattivi e organismo. Mosca, Medicina.
- Sirotkin A. N., Iliazov R. G. 2000. Radioecologia degli animali domestici. Kazan, Casa Editrice Fen, pp. 381.
- Vokken G. G. 1967. Radiobiologia. Mosca, Scuola Superiore.
- Yudintseva E. V., Guliakin I. V. 1968. Agrochimica degli isotopi radioattivi dello stronzio e cesio. Mosca, Atomizdat, pp. 472.

