

GUGLIELMO ZANELLA

L'INQUINAMENTO ATMOSFERICO IGNORA I CONFINI: L'ESEMPLARE EPISODIO DI ČERNOBYL'

Introduzione. — Le modificazioni nel grado di purezza dell'aria, com'è noto, possono avvenire con l'introduzione nell'atmosfera di sostanze emesse nei processi di combustione normale o incompleta, di prodotti liberati nelle reazioni chimiche utilizzate nelle industrie o di particelle rilasciate a seguito di fenomeni meccanici, sia naturali che artificiali. Le diverse matrici ambientali posseggono di per sé una elevata capacità depurativa che si estrinseca per mezzo di processi fisico-chimici e biologici assai diversificati e complessi. In particolare, la capacità che ha l'aria di autodepurarsi e quindi di rigenerarsi è in funzione della propria mobilità oltre che del dilavamento in essa operato dalle precipitazioni. Un'intensa circolazione atmosferica fa sì che gas, aerosoli e particelle, soprattutto quelle più piccole, siano mescolati con una grande quantità di aria e ne sia quindi accentuata la loro diluizione, mentre l'impatto con un'area di precipitazioni ne provoca per buona parte l'abbattimento al suolo. L'efficacia di questo meccanismo naturale di evacuazione e di depurazione è invece ostacolata quando i movimenti orizzontali e quelli verticali sono scarsi: ciò si verifica soprattutto in presenza di tempo anticiclonico, una condizione spesso accompagnata da inversioni termiche negli strati d'aria più vicini al suolo che rendono l'atmosfera stabile.

Nella geografia dell'inquinamento un aspetto importante è quello relativo alla tipologia dei polluenti che entrano in gioco. L'atmosfera è divenuta un po' ovunque, soprattutto negli ultimi decenni, sempre più il ricettacolo di una grande quantità di sostanze inquinanti, delle quali un certo numero presenta una particolare pericolosità per le conseguenze che può avere per l'ambiente e per la salute dell'uomo. Sono ben note, ad esempio, le preoccupazioni espresse negli ultimi tempi da scienziati di tutto il mondo riguardo all'*effetto serra* provocato dall'aumento progressivo di CO₂ nell'aria, oppure riguardo ai *buchi* nell'ozonofera operati dai clorofluorometani, o alle conseguenze delle piogge

acide. Per ciò che si riferisce più direttamente alla salute dell'uomo, ormai non vi sono più dubbi sugli effetti negativi derivanti da certi tipi di inquinanti che incombono, ed in concentrazioni elevate, sulle aree urbane e sulle zone industriali, dove si addensa una grande quantità di popolazione (1). Tali conseguenze possono essere immediate o verificarsi a breve scadenza oppure nel lungo termine.

Particolare rilevanza per la salute dell'uomo è venuto ad assumere negli ultimi tempi l'inquinamento radioattivo. La radioattività, si sa, è diventata una inseparabile parte dell'ambiente sin da quando la Terra si è formata. Nella fig. 1 è riportata, ad esempio, la radiazione di fondo naturale per ciò che riguarda il nostro territorio. Ricordiamo che essa può derivare dal cosmo che ci circonda, dal suolo che calpestiamo, ma anche dall'aria che respiriamo, dall'acqua che beviamo, dal cibo che mangiamo, dalle case che abitiamo, ed è persino presente nel nostro corpo. A questa radioattività naturale si è aggiunta in tempi relativamente recenti la contaminazione radioattiva di origine antropica, derivante dalle esplosioni in atmosfera ed anche sotterranee, per motivi bellici o sperimentali, di ordigni nucleari, da rilasci nell'uso pacifico dell'atomo per la produzione di energia, dall'uso di sostanze radioattive nella medicina, nell'industria, nella ricerca. Come avviene per gli inquinanti «tradizionali», la pericolosità della contaminazione radioattiva è in funzione della tipologia e della concentrazione, ma i radionuclidi risultano assai più pericolosi per l'uomo perché, a differenza di quanto succede per altre sostanze inquinanti, essi possono rimanere a lungo attivi prolungando quindi nel tempo i loro effetti nocivi. Non va inoltre trascurato il trasferimento della radioattività all'organismo umano attraverso le diverse catene alimentari al termine delle quali si trova l'uomo.

In tutta la sua drammaticità, il recente episodio di Černobyl' ha posto di fronte agli uomini di scienza, ai politici e alla stessa opinione pubblica tutta una serie di inquietanti problematiche e particolarmente quelle connesse alla salvaguardia della salute pubblica. Per la vastità dei territori che ha interessato, il rilascio accidentale di una grande quantità di radionuclidi da quella centrale nucleare sovietica si è presentato in effetti come caso esemplare ed emblematico di contaminazione radioattiva e offre quindi l'opportunità di raccogliere alcune riflessioni sulla funzione dell'aria come fattore geografico. Il presente studio, che vuole essere di carattere meteorologico e geografico insieme, costituisce un tentativo di ricostruire cronologicamente, sulla base dell'evoluzione delle condizioni del tempo in Europa, il percorso

(1) Sulla qualità della vita nelle città, v. G. Zanella, 1986. Una rassegna degli aspetti salienti del clima urbano si trova in H.E. Landsberg, 1981.

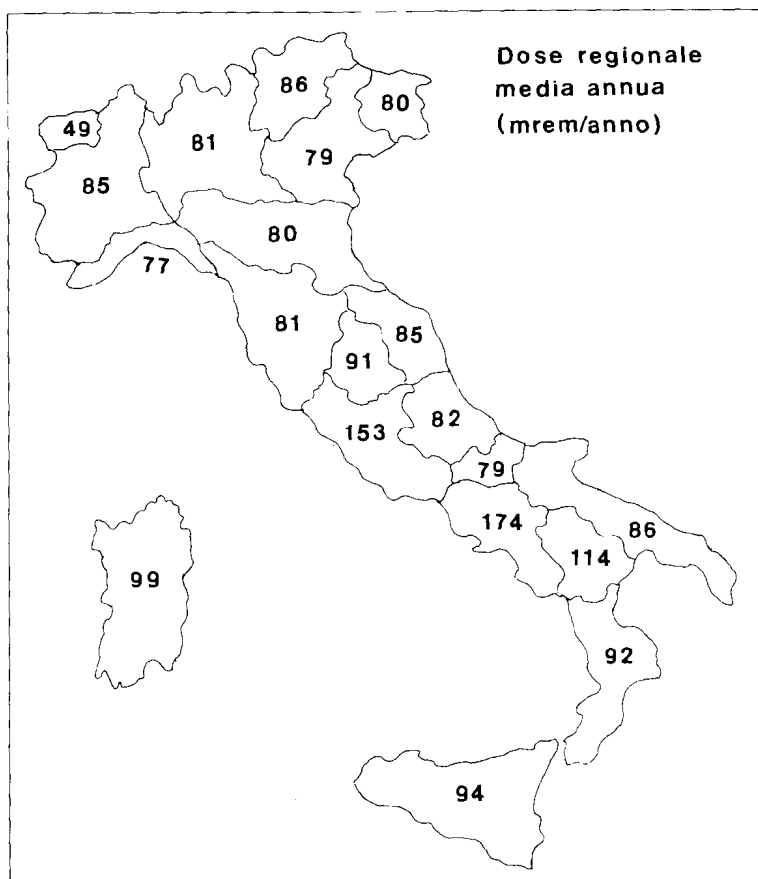


FIG. 1 — RADIAZIONE DI FONDO NATURALE IN ITALIA.

N.B. — Il fondo naturale in Italia comporta una dose media individuale intorno a 100 mrem/anno.

Fonte: A. Cardinale e altri, 1975.

compiuto dalla nube radioattiva e quindi di individuare di volta in volta le aree geografiche da essa interessate; pertanto non prenderò in esame, se non marginalmente ed a titolo esemplificativo, gli aspetti quantitativi e qualitativi della contaminazione prodotta e le conseguenze da questa derivate, esulando tali problemi dalla competenza del geografo.

Lo scenario meteorologico e le traiettorie della nube radioattiva sull'Europa. — Tra il 25 ed il 26 aprile 1986 il tempo in Europa era dominato da un esteso campo di alta pressione con il suo centro nella

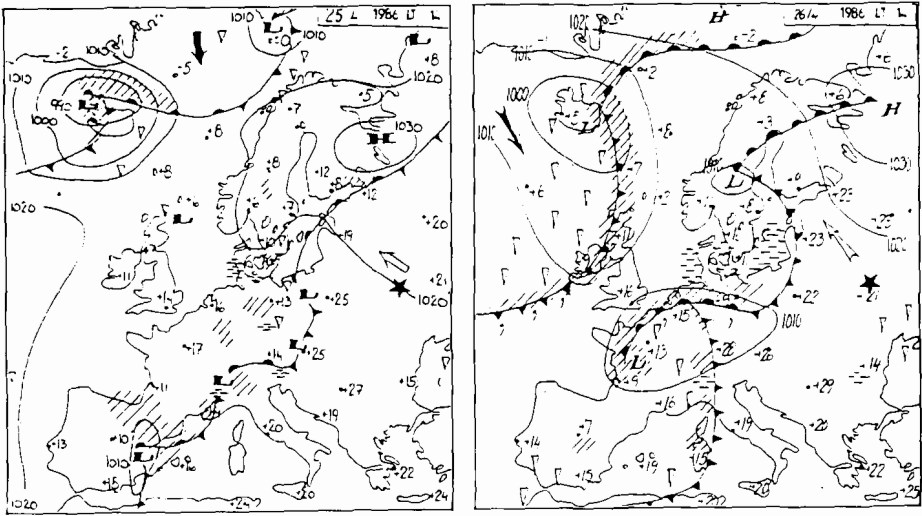


FIG. 2 — CARTA DEL TEMPO IN EUROPA ALLE ORE 12 UTC DEL 25 E DEL 26 APRILE 1986.

Fonte: C. Persson, H. Rhode e L.E. De Greer, 1986.

parte nord-occidentale della Russia e da una depressione allineata dalla Spagna alla Penisola Scandinava (fig. 2). Al momento dell'incidente (1^h23^m locali del 26, corrispondenti alle 21^h23^m UTC del 25 aprile) nella zona di Černobyl' (51°17'N, 30°15'E), ai margini dell'anticiclone, il cielo era sereno, i venti al suolo deboli di direzione variabile. Secondo quanto indicato dai radiosondaggi, lo strato d'aria fino ad un'altezza di 400-500 m dal suolo era interessato da una inversione termica con gradiente il 2-4°C. Al di sopra dell'inversione i radiosondaggi eseguiti a nord e a nord-ovest di Černobyl' indicavano la presenza di venti forti da est e sud-est con una velocità di 12-14 m/sec. Salendo in quota la velocità del vento decresceva ed all'altezza di 1500 m era di 8-10 m/sec con direzione da sud-est (fig. 3). Per le caratteristiche dell'incidente (esplosione di uno dei quattro reattori della centrale) e dell'elevata temperatura del rilascio per l'incendio che ne è seguito, si è sollevato un alto pennacchio che ha liberato nell'aria materiali radioattivi a varie altitudini; esso però dovrebbe aver trovato, nel suo movimento verso l'alto, un primo ostacolo nell'inversione termica presente fino alla quota di circa 500 m e successivamente nei venti forti spiranti al di sopra di quella quota. Nonostante queste condizioni sfavorevoli, la nube sprigionatasi dalla centrale di Černobyl' dovrebbe aver raggiunto temporaneamente, subito dopo l'esplosione, un'altezza di 1500-2000 m. Calcoli teorici indicano, tuttavia, che la maggior parte dell'emissione

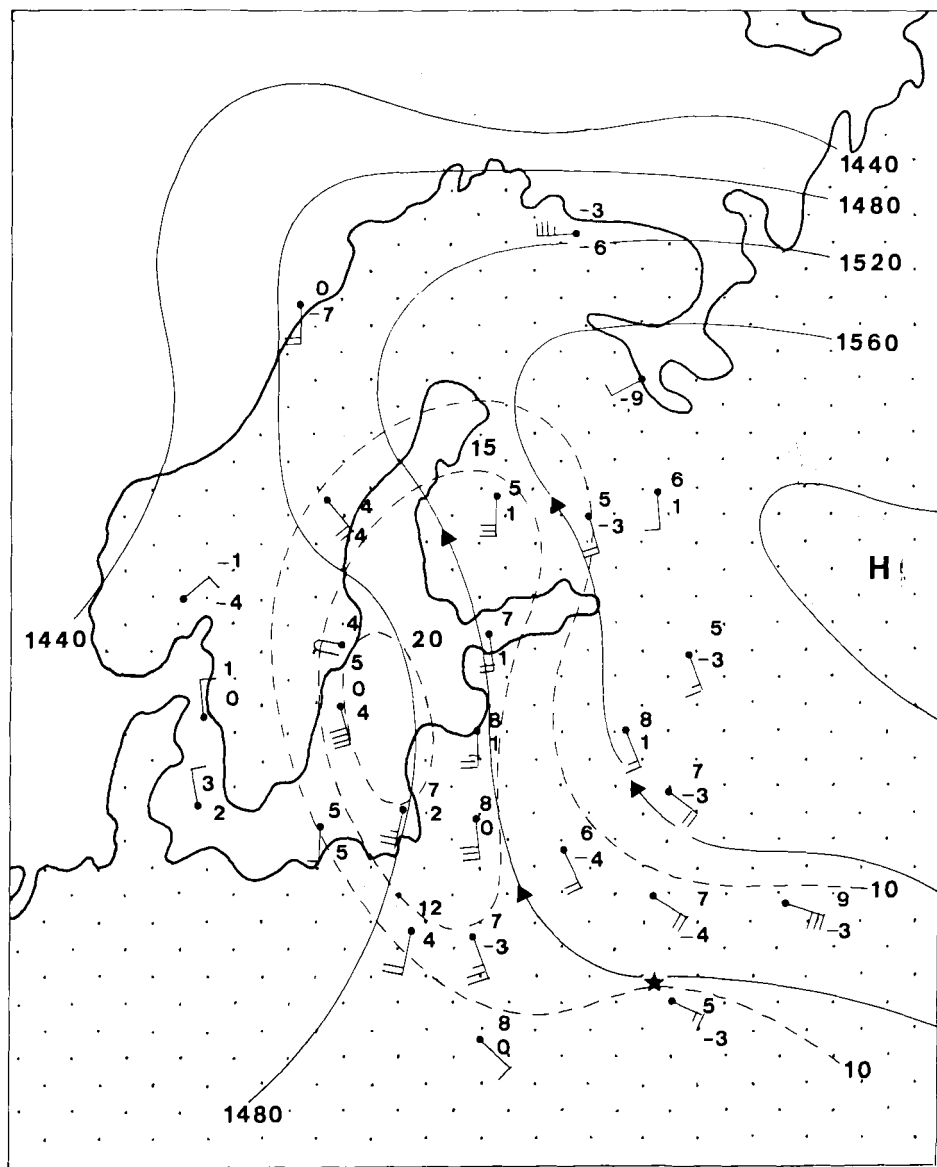


FIG. 3 — TOPOGRAFIA DEL LIVELLO ISOBARICO DI 850 hPa ALLE ORE 00 UTC DEL 26 APRILE 1986 (altezza media circa 1500 m).

Le linee tratteggiate indicano la velocità dei venti in m/sec.

Fonte: A.L. Savolainen e altri, 1986 (ridisegnata).

delle prime ore dovrebbe essere stata trasportata fino ad un'altezza di 1000 m (2).

Per ciò che riguarda i sistemi di dispersione del contenuto in radionuclidi nell'aria, oltre al meccanismo della diffusione atmosferica ed al trasporto operato dai venti, altri due processi hanno contribuito a ridurre progressivamente la concentrazione: la deposizione secca e la deposizione umida. La prima è il risultato della caduta al suolo per gravità delle particelle e degli aerosoli con una sequenza cronologica, e quindi con una distribuzione spaziale, che ha interessato queste sostanze a seconda delle loro dimensioni: le sostanze più pesanti si sono depositate prima e più vicino al luogo dell'incidente rispetto a quelle più leggere che hanno raggiunto aree sempre più lontane. Le precipitazioni sono state un importante ed efficace mezzo di deplezione. In presenza di piogge, l'atmosfera è stata dilavata nei suoi bassi strati ed il risultato è stato il trascinamento al suolo in forma di deposito umido di gran parte degli elementi radioattivi in essa contenuti (3).

Venendo ora a considerare in dettaglio le vicissitudini della nube radioattiva contenente le varie emissioni e quindi la distribuzione geografica della contaminazione nucleare che ne è seguita, ricordiamo che al momento dell'incidente sopra l'area di Černobyl' ed a partire dalla quota di 500 m era in atto un flusso di aria verso nord e nord-ovest, richiamato dalla depressione sulla Scandinavia. Trascinata da questi venti, nella mattinata del 26 aprile la nube emessa nell'esplosione ha raggiunto lo strato limite convettivo al di sopra delle regioni nord-occidentali della Russia Bianca. In quest'area il cielo era inizialmente sereno. Con il progressivo riscaldamento del suolo, la stratificazione

(2) Nella ricostruzione delle prime fasi della diffusione e del trasporto del materiale radioattivo emesso è stato utilizzato in questo studio, oltre all'ampia e ben documentata relazione predisposta dall'Istituto Svedese di Meteorologia e Idrologia (C. Persson, H. Rodhe e L.E. De Geer, 1986), anche l'interessante lavoro curato dall'Istituto Meteorologico Finlandese: A.L. Savolainen e altri, 1986.

Nel rapporto presentato dalle autorità sovietiche all'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA) di Vienna (USSR State Committee on the Utilization of Atomic Energy, 1986) viene fatto qualche accenno alla quota raggiunta dal pennacchio. Per il giorno 27 aprile, ad esempio, viene indicata una quota massima di 1200 m, ma questo valore è probabilmente riferito alle ore diurne, quando le condizioni meteorologiche erano favorevoli ai moti ascendenti. Lo stesso calore prodotto nelle disintegrazioni radioattive avvenute all'interno della nube può teoricamente aver provocato un innalzamento del pennacchio; tuttavia la quantità di calore emesso in questo processo non dovrebbe aver raggiunto valori tali da esercitare una significativa influenza.

(3) Le precipitazioni possono catturare le particelle sospese nell'aria, direttamente durante i processi che portano alla loro formazione (catture in nube) oppure durante la loro caduta (cattura sotto nube). Il *deposito umido* al suolo in conseguenza della cattura in nube o sotto nube è tanto maggiore quanto più intense sono le piogge, mentre il *deposito secco*, che si verifica per gravità o per impatto diretto delle particelle con il terreno e con la vegetazione, è in genere una frazione molto piccola della concentrazione in aria dei contaminanti. In prima approssimazione il valore del rapporto tra deposito umido e deposito secco, in un dato intervallo di tempo, è pari a cento volte la quantità di pioggia caduta espressa in mm. Pertanto, una pioggia di 1 millimetro su una zona può far aumentare fino a cento volte il deposito al suolo rispetto ad una zona limitrofa dove non ha piovuto, a parità di concentrazione nell'aria di contaminanti nelle due zone messe a confronto.

dell'aria è divenuta sempre più instabile con rimescolamenti che hanno raggiunto quote fino oltre i 2000 m. Una certa quantità di radionuclidi è stata quindi sollevata verso l'alto a seguito della formazione di nubi cumuliformi che hanno provocato anche rovesci di pioggia. Sempre sospinta dai venti di sud-est, la nube radioattiva ha raggiunto le regioni baltiche nel corso del giorno 27 aprile, quando ancora le autorità sovietiche non avevano dato notizia dell'incidente. In Svezia il primo rilevamento di *fall-out* è avvenuto nello Svealand orientale, presso la centrale nucleare di Forsmark situata sulla costa del Mar Baltico, 100 km a nord di Stoccolma, mentre in Finlandia la contaminazione radioattiva è stata osservata per la prima volta presso la stazione di monitoraggio di Kajaani, circa 500 km a nord di Helsinki, dove nella serata del 27 sono stati misurati livelli di esposizione tra i 70 ed i 100 $\mu\text{R/h}$ dovuti alle forti precipitazioni cadute in quella regione.

Fino alla sera di domenica 28 aprile, quando le autorità sovietiche hanno annunciato ufficialmente quanto era accaduto a Černobyl', gli anomali valori di radioattività osservati in Svezia ed in Finlandia hanno dato luogo a diverse congetture. Si è pensato in un primo tempo che ciò poteva essere la conseguenza dell'esplosione di un ordigno nucleare in territorio sovietico, ma lo spettro delle radiazioni gamma misurate in diverse località svedesi lungo la costa baltica indicava una quantità elevata di ^{134}Cs e di ^{137}Cs , presenza questa che induceva lo Swedish Radiation Protection Institute ad escludere tale eventualità. Si è pensato allora ad un rilascio anomalo da un reattore nucleare situato nell'area a sud-est della Svezia e della Finlandia per cui si è ricostruito l'andamento dei venti dal Mar Nero verso le regioni baltiche e la prima supposizione è stata che la sorgente del rilascio poteva essere una grande centrale nucleare situata in Lettonia.

Chiariti con l'annuncio sovietico luogo e data dell'incidente nucleare, i servizi di protezione civile dei vari paesi europei hanno attuato piani di emergenza e da quel momento particolarmente efficace è stato il contributo fornito dai servizi meteorologici (4). Sulla base delle carte del tempo e dei campi del vento previsti nel breve e nel medio termine i meteorologi hanno tracciato giorno per giorno le traiettorie che presumibilmente avrebbe seguito la nube radioattiva con indicazioni quindi delle aree geografiche di volta in volta interessate potenzialmente dalla contaminazione. Inoltre, tenendo conto delle diverse ipotesi sull'altezza raggiunta dal pennacchio radioattivo, queste traiettorie sono state tracciate a varie quote comprese generalmente tra i 750 e i 3000 m. In questi giorni, di valido aiuto per i meteorologi sono state le informazioni fornite dall'European Center for Medium Range

(4) Per ciò che riguarda il nostro paese, veramente puntuali sono state le informazioni fornite dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare Italiana (F. Falcone, 1986).



FIG. 4 — TRAIETTORIE CALCOLATE DEL TRASPORTO, NEI VARI TEMPI (UTC) E ALLE VARIE QUOTE, DELLA PRIMA EMISSIONE.

Fonte: C. Persson, H. Rodhe e L.E. De Geer, 1986 (ridisegnata).

Weather Forecast (ECMWF) di Reading, in Gran Bretagna. È da sottolineare che, sebbene le localizzazioni geografiche della nube radioattiva previste dagli esperti nella fase più acuta dell'emergenza di Černobyl' fossero solo indicative dell'area potenziale di contaminazio-

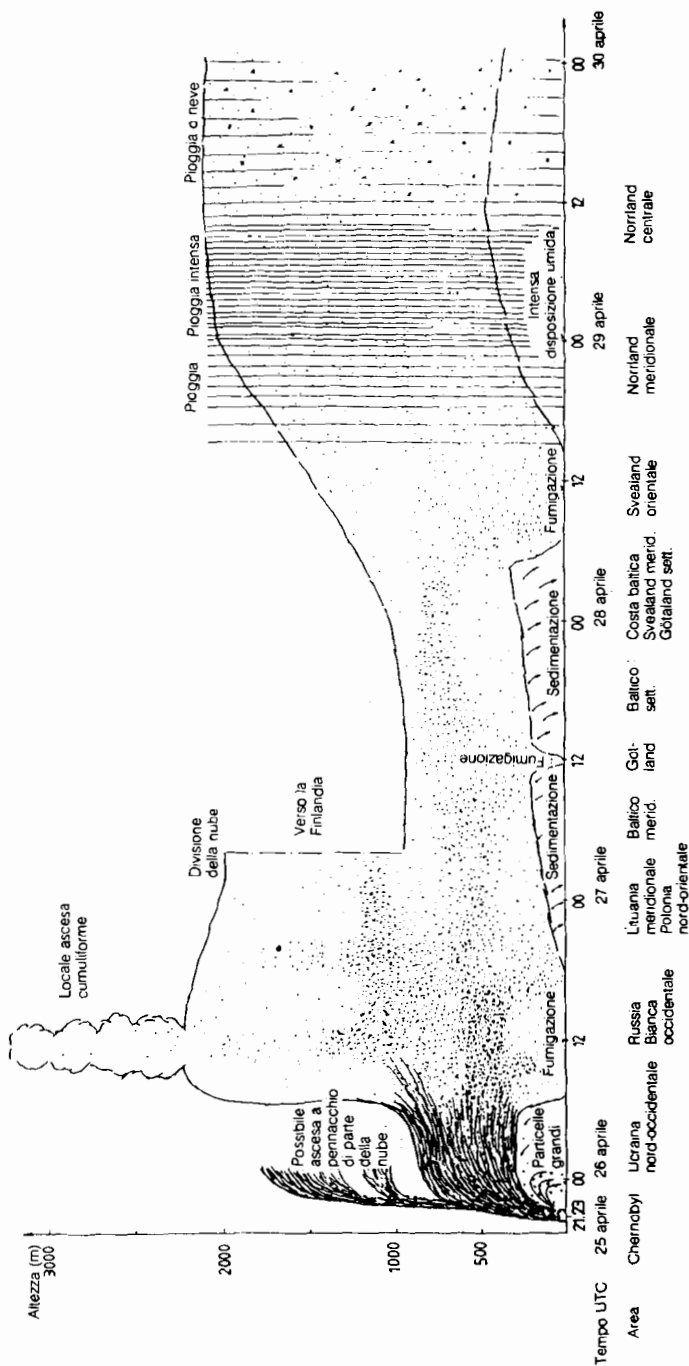


FIG. 5 — DESCRIZIONE QUALITATIVA DEL TRASPORTO E DELLA DISPERSIONE DELLA PRIMA EMISSIONE.

Fonte: C. Persson, H. Rodhe e L.E. De Geer, 1986.

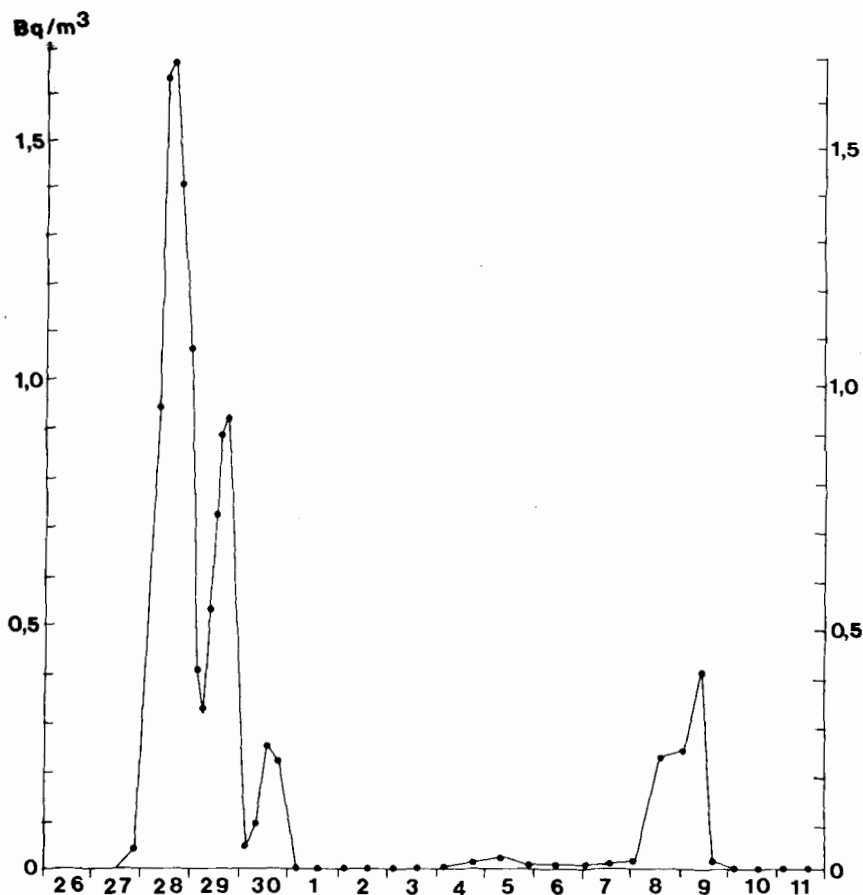


FIG. 6 — CONCENTRAZIONE NELL'ARIA, IN PROSSIMITÀ DEL SICLO DI ^{137}Cs (in Bq/m³) A STOC-COLMA NEL PERIODO 26 APRILE - 11 MAGGIO

Fonte: C. Persson, H. Rodhe e L.E. De Geer, 1986 (ridisegnata).

ne, è pur vero che le misurazioni fatte nelle varie regioni d'Europa della concentrazione nell'aria, nell'acqua caduta e sul suolo di radionuclidi hanno poi dato risultati che sono in buona parte concordanti con le informazioni e le previsioni fornite dai meteorologi (5). È da aggiunge-

(5) A proposito delle misure della radioattività, dopo 'Cernobyl' è emersa la questione relativa ai sistemi di rilevamento dei dati dal momento che sulla loro affidabilità ed attendibilità molto si è discusso in quei giorni. Ebbene, l'esperienza acquisita impone in effetti la necessità di organizzare in ogni paese una rete di stazioni di monitoraggio, sia per ciò che riguarda l'inquinamento dell'aria che quello del suolo, più capillare, geograficamente meglio distribuita e che utilizzi metodologie di analisi omogenee e uniformi.

re che le traiettorie disegnate dai meteorologi, che nei momenti caldi dell'emergenza erano per forza di cose tracciate con una certa approssimazione, sono state in seguito, utilizzando ulteriori e più precise informazioni meteorologiche e sofisticate elaborazioni elettroniche, perfezionate e ridisegnate con riferimenti, partendo dal luogo dell'incidente e per le diverse quote, dei tempi di spostamento e quindi delle aree progressivamente interessate dal passaggio della nube radioattiva. Consideriamo, ad esempio, il grafico della fig. 4, che riporta le traiettorie ricostruite dall'Istituto Svedese di Meteorologia e Idrologia relative alla prima emissione e che coprono un periodo di 4,5 giorni. Da esso si ricava che nel primo mattino del 27 aprile la nube radioattiva ha subito, in vicinanza della costa baltica, una suddivisione in tre rami: quello più basso si è diretto verso le regioni meridionali del Götaland, quello attorno ai 750 m si è portato più a nord andando ad interessare la parte orientale dello Svealand e quella meridionale del Norrland (soffermandosi su quest'area per due giorni), mentre il ramo a più alta quota ha continuato a dirigersi verso nord e successivamente verso nord-est passando sopra la Finlandia. È da notare come la nube radioattiva contenente l'emissione del 26 aprile abbia comunque raggiunto la Penisola Scandinava e la Finlandia quasi simultaneamente. Secondo i meteorologi svedesi, la contaminazione osservata per la prima volta in Svezia nello Svealand orientale è stata probabilmente trasportata sopra il Baltico ad elevata altitudine (approssimativamente a 1500 m) ed ha poi raggiunto il suolo attraverso un processo di fumigazione (6). La fig. 5 offre una schematica ricostruzione cronologica e geografica delle fasi di trasporto e dei processi di dispersione della nube radioattiva, con particolare riferimento al territorio svedese, mentre il grafico della fig. 6 ci dimostra che la contaminazione dell'aria ha raggiunto in Svezia livelli particolarmente elevati nel corso del giorno 28 aprile e che la ricaduta al suolo di radionuclidi è stata decisamente influenzata dalle precipitazioni, come del resto è avvenuto in tutte le regioni attraversate dalla nube. Dalle isoiete della fig. 7 risulta che negli ultimi giorni di aprile il territorio svedese è stato interessato da precipitazioni, che soprattutto il 28 hanno assunto sulla costa baltica centrale una elevata intensità, con punte fino a 27 mm di pioggia nella parte sud-orientale del Norrland. A testimoniare l'importante ruolo

(6) Com'è noto, il processo di *fumigazione* consiste nel fatto che un pennacchio di fumo trasportato entro uno strato d'aria stabile ad una certa altezza tende a scendere rapidamente verso il suolo a causa del rimescolamento che si produce quando lo strato d'aria viene a contatto con un'area di instabilità. Il giorno 27 aprile, mentre la stratificazione dell'aria risultava stabile sopra il Baltico, che mostrava una temperatura superficiale molto bassa (circa 2°), come capita di norma in questo periodo dell'anno, era instabile invece sopra la parte sud-orientale della Svezia, con una turbolenza che raggiungeva i 1000 m di quota. Secondo gli esperti svedesi, con tale situazione vi erano in quell'area condizioni favorevoli per un processo di fumigazione della nube radioattiva.

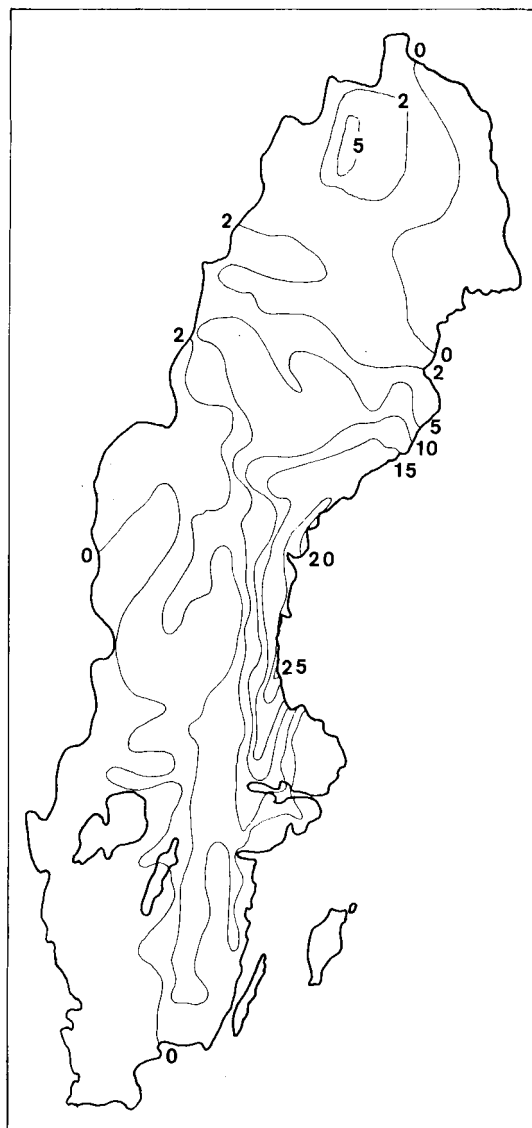


FIG. 7 — PRECIPITAZIONI (in mm)
CADUTE IN SVEZIA DAL-
LE ORE 06 UTC DEL 28
ALLE 06 UTC DEL 30
APRILE.

Fonte: C. Persson, H. Rodhe e L.E.
De Geer, 1986 (ridisegnata).

giocato dalle precipitazioni nella deposizione al suolo di radionuclidi si offrono i dati sulla concentrazione media di ^{137}Cs nelle piogge raccolte nel periodo 28-30 aprile in varie località della Svezia, riportati nel cartogramma della fig. 8. È evidente come le maggiori concentra-

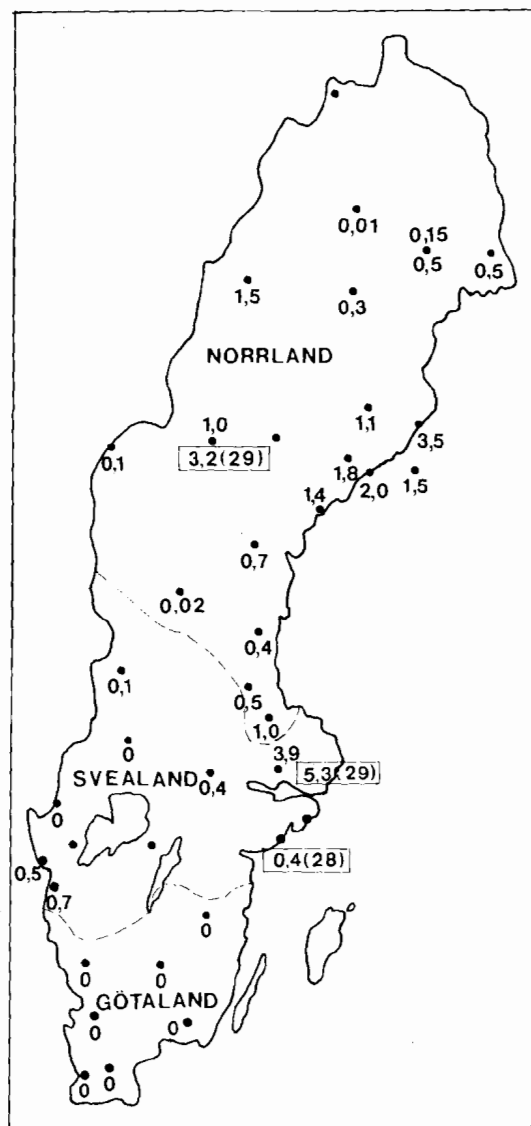


FIG. 8 — CONCENTRAZIONE MEDIA DI ^{137}Cs MISURATA NELLE PRECIPITAZIONI CADUTE IN SVEZIA NEI GIORNI 28-30 APRILE.

Nei rettangoli i valori giornalieri con l'indicazione, tra parentesi, del giorno.

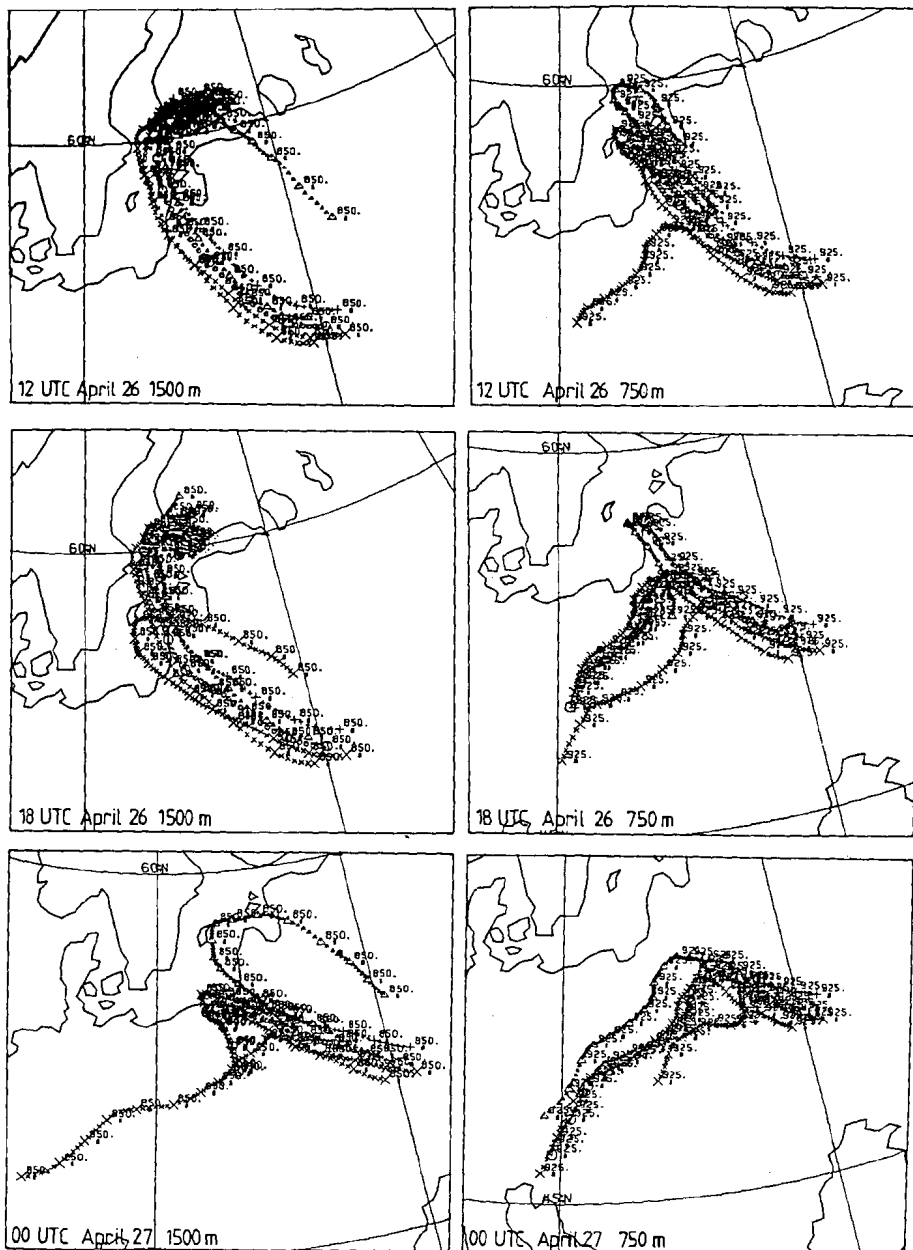
Fonte: C. Persson, H. Rodhe e L.E. De Geer (ridisegnata).

zioni si riscontrino là dove più intense sono state le precipitazioni. La figura, che indica per alcune località anche il valore massimo giornaliero, ci dimostra che la punta più alta di attività (5,1 kBq di ^{137}Cs per litro) è stata misurata a Uppsala il 29 aprile. Infine, un'ulteriore prova

della efficacia del dilavamento operato dalle piogge, quindi dell'importanza di questo evento meteorologico nella distribuzione sul suolo della contaminazione, risulta dal rapporto tra la concentrazione di radio-nuclidi misurata nelle precipitazioni e quella misurata nell'aria. Ebbene, per ciò che riguarda il ^{137}Cs , nelle località svedesi dove i due parametri, espressi nella stessa unità di volume, sono stati rilevati quasi simultaneamente, questo rapporto ha oscillato tra $0,3 \times 10^6$ e 5×10^6 (C. Persson, H. Rodhe e L.E. De Geer, 1986).

Le regioni baltiche sono state interessate dalla nube radioattiva emessa al momento dell'esplosione e nella mattinata del 26 nei giorni che vanno dal 27 al 30 aprile (7). Intanto, già a partire dal pomeriggio del 26 la direzione dei venti nell'area di Černobyl' inizia a evolversi per il progressivo spostamento verso est dell'anticiclone russo ed il contemporaneo consolidamento di un'area depressionaria sul Mediterraneo centro-occidentale. Come si ricava dalle traiettorie calcolate della fig. 9, il cambiamento di direzione dei venti ha inizio al livello isobarico di 925 hPa corrispondente ad una quota di circa 750 m dove prende corpo il trasporto della contaminazione verso le regioni sud-occidentali dell'Europa. Al livello di 850 hPa (1500 m) il trasporto si arresta per un certo tempo sulle regioni nord-orientali della Polonia e quindi si dirige anch'esso verso sud-ovest. È da osservare che i grafici della fig. 9 mostrano delle incertezze nei calcoli del trasporto. Nel caso, ad esempio, dell'emissione del 26 aprile alle 12 UTC, quattro delle cinque traiettorie tracciate a 750 m si muovono verso il Baltico settentrionale, mentre una si dirige verso sud-ovest. Al livello di 1500 e per la stessa emissione, invece, le cinque traiettorie tracciate hanno un andamento tra loro coerente, il che significa che le incertezze nel loro calcolo sono relativamente scarse. A seguito di un deciso cambiamento della direzione del vento nell'area dell'incidente, il materiale radioattivo liberato il giorno 27 viene progressivamente trasportato verso ovest-sudovest e quindi più decisamente verso sud-ovest. In effetti i radionuclidi emessi intorno alle 00 UTC del 27 aprile trasportati al livello isobarico di 850 hPa si sono diretti verso ovest interessando successivamente varie regioni europee fino alla Francia, dove la nube radioattiva è giunta nel pomeriggio del giorno 30 aprile (fig. 10), mentre quelli emessi alle 12 UTC del giorno 27 hanno seguito una traiettoria più meridionale. A partire dal 27-28 aprile, dunque, le regioni dell'Europa centro-orientale e centro-meridionale, e cioè la Polonia, la Repub-

(7) La pesante contaminazione subita dalla Svezia ha destato una viva preoccupazione nelle autorità locali, che hanno usato i vari mezzi di comunicazione di massa per informare la popolazione, compresi gli immigrati stranieri, sui modi di comportamento da attuare in quella circostanza. Si veda, ad esempio, l'edizione italiana del bollettino diffuso in dodici lingue diverse tra gli stranieri presenti in Svezia: (Dipartimento Sicurezza e Protezione Nucleare Svedese, 1986).



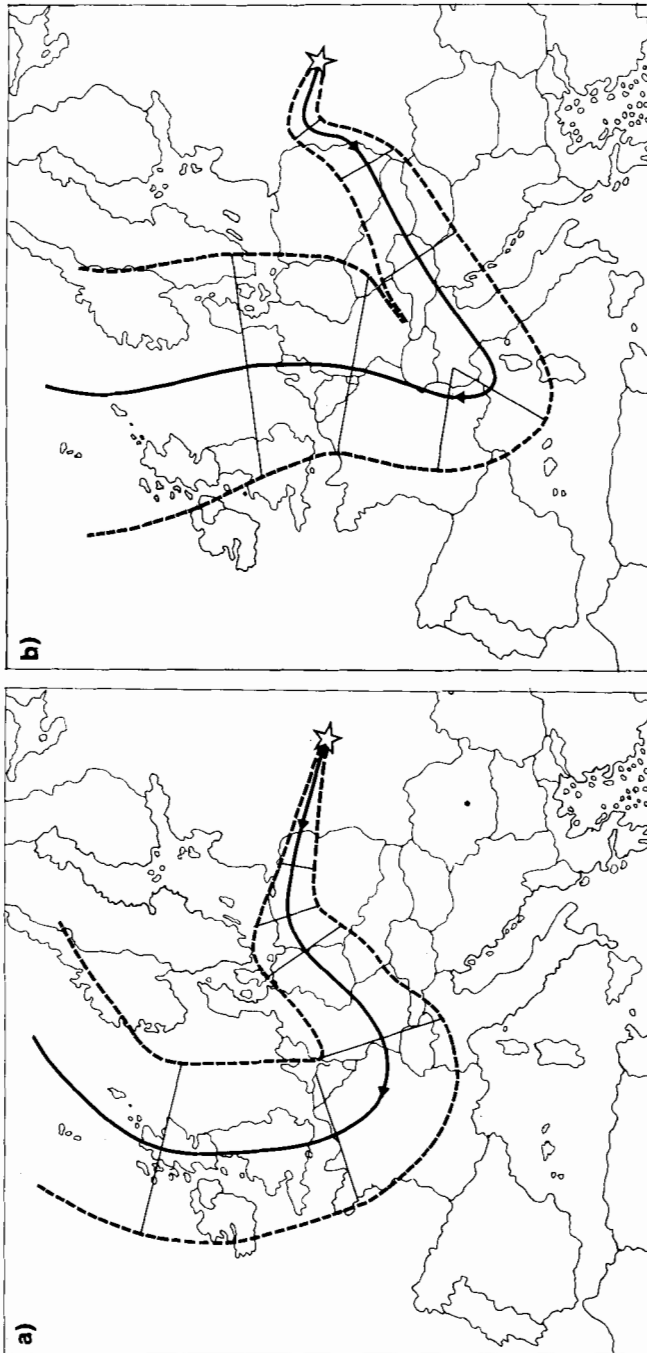


FIG. 10 — TRAIETTORIE A 850 hPa DELLE EMISSIONI DEL 27 APRILE ALLE ORE 00 UTC (a) E 12 UTC (b).

In tratteggio, il limite del pennacchio (luogo dei punti dove la concentrazione di ^{137}Cs non supera il decimo di quella presente sull'asse delle traiettorie). I tratti trasversali sono tracciati ogni 24 ore dopo la partenza.

Fonte: B. Straus e J.M. Gros, 1986 (ridisegnata).

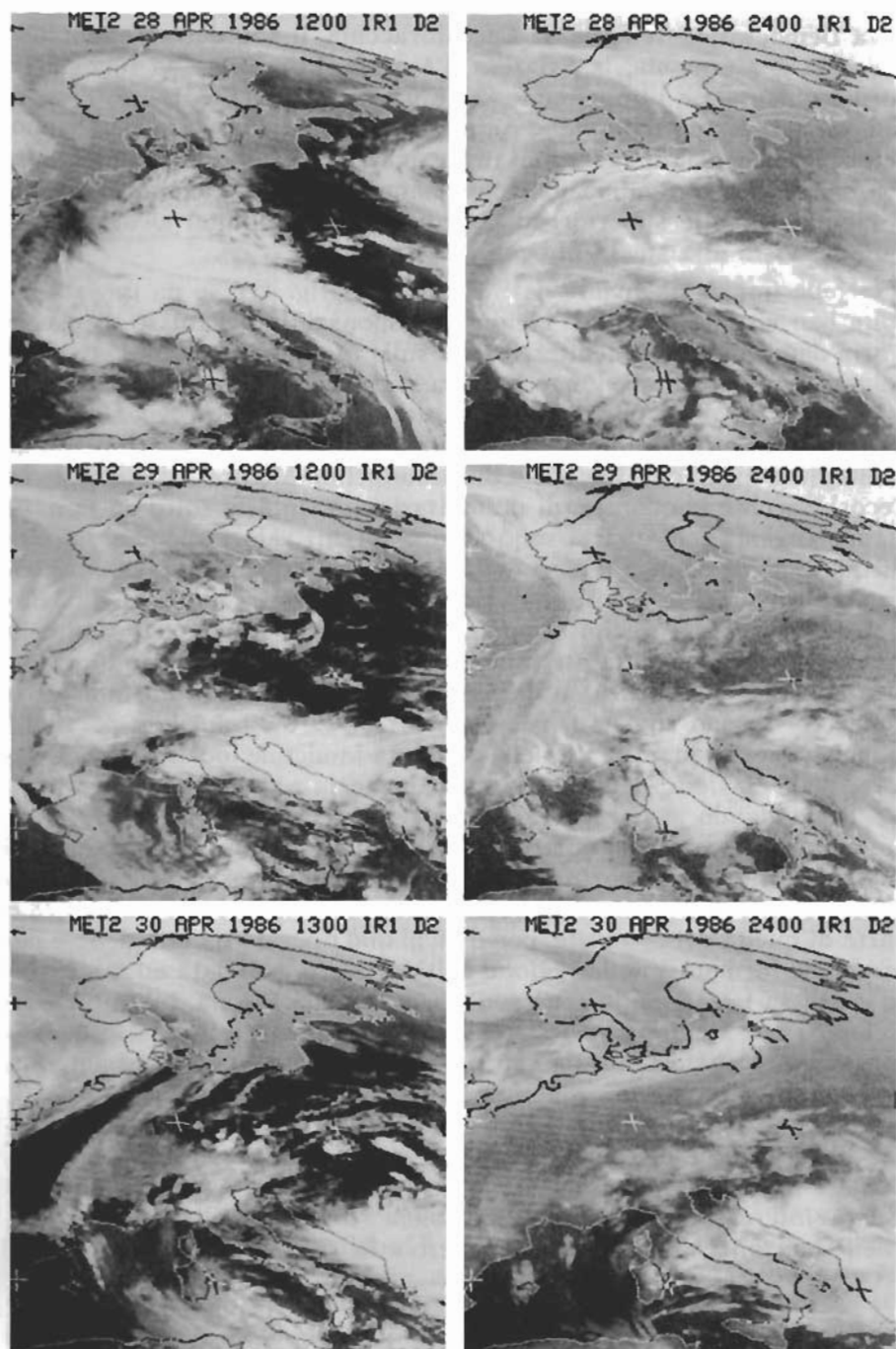


FIG. 11 — IMMAGINI METEOSAT NELLA FINESTRA INFRAROSSA DI DUE DIVERSE ORE PER I GIORNI 28, 29 E 30 APRILE.

blica Democratica Tedesca, la Cecoslovacchia, il sud della Repubblica Federale di Germania, la Svizzera, l'Austria, l'Ungheria, la Jugoslavia nord-occidentale e l'Italia, sono state progressivamente, da nord-est a sud-ovest, investite dalla nube radioattiva. Localmente le piogge hanno determinato sensibili variazioni nella ricaduta al suolo di radionuclidi, con *macchie* di contaminazione che hanno mostrato in alcuni casi valori cinquanta volte superiori alla media rilevata all'interno di una regione esposta alla stessa nube.

Nelle immagini inviate dal METEOSAT (fig. 11), se da un lato risulta ben visibile il vortice ciclonico responsabile del flusso di masse d'aria da nord-est sul Mediterraneo e sulle regioni alpine, dall'altro appaiono pure ben chiare lungo la rotta seguita dalla nube radioattiva le formazioni nuvolose che di volta in volta hanno anche provocato precipitazioni più o meno intense, determinando quindi un abbattimento al suolo più o meno considerevole di radionuclidi. Mentre, ad esempio, in Cecoslovacchia la quantità di precipitazioni è rimasta sotto i 5 mm, in alcune regioni dell'Austria sono stati osservati valori anche assai elevati di pioggia, come è il caso della regione di Salisburgo-Linz dove sono stati misurati fino a 38 mm. Ed ancora, nell'area di Monaco di Baviera una copiosa precipitazione caduta nel pomeriggio del 30 aprile ha causato una ricaduta attiva di radionuclidi che ha elevato in poche ore il livello di esposizione da 8 $\mu\text{R/h}$ a 110 $\mu\text{R/h}$. A titolo indicativo nella tab. 1 sono riportati, per i giorni 28, 29 e 30 aprile e per il 1° maggio 1986, le quantità di pioggia caduta in alcune località della Svizzera, della Baviera, dell'Austria, dell'Ungheria e della Jugoslavia (8).

Rimandando al paragrafo successivo ogni considerazione relativa a quanto è successo nel nostro paese, continuiamo la nostra descrizione sommaria del trasporto e della dispersione delle sostanze contaminanti liberate nell'aria a Černobyl' osservando che l'emissione del 28 e parte di quella del 29 aprile, per il richiamo operato da una *debole* depressione formatasi nella regione del Mar Nero, è andata ad interessare la stessa Ucraina e le zone sud-orientali della Russia. Intanto l'area ciclonica sul Mediterraneo si va spostando in direzione est e questo spostamento, assieme ad una situazione di blocco che si è organizzata in seno alla circolazione generale, fa ruotare progressivamente i venti, e dunque le traiettorie della nube radioattiva contenente le emissioni del 29-30 aprile e dei giorni seguenti, sempre più verso sud e sud-est. Come è indicato schematicamente nella fig. 12, le regioni più direttamente interessate dalla contaminazione divengono, in successione, quelle balcaniche, quelle del Mar Nero e la Turchia. L'emissione del 5

(8) I dati sono stati forniti dal CRTN dell'ENEL di Milano, che qui vivamente ringrazio per la preziosa collaborazione prestata nella stesura anche di altre parti del presente studio.

TAB. 1

**PRECIPITAZIONI GIORNALIERE (in mm) IN ALCUNE LOCALITÀ
SVIZZERE, BAVARESÌ, AUSTRIACHE, UNGHERESI E IUGOSLAVE
NEL PERIODO 28 APRILE - 4 MAGGIO 1986**

Località	Altitudine (m)	28	29	30	1	2	3	4
<i>Svizzera</i>								
Payerne	489	3,0	8,0	0,3	0,0	0,2 *	2,0	0,0
Zurigo	432	6,0	9,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ginevra	416	0,0	0,9	0,0	0,0	0,9	1,5	0,0
Vaduz (Liecht.)	460	0,1	8,0	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Baviera</i>								
Ulm	522	4,1 *	32,0	13,0 *	0,0	0,0	0,1	0,0
Monaco	530	11,3	15,0	6,0	0,0	0,0	0,7	0,0
Costanza	443	2,7	5,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Zugspitze	2960	0,4	20,9	5,8	0,0	0,0	0,0 *	0,0 *
<i>Austria</i>								
Landeck	818	0,0	3,6	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Innsbruck	581	0,0	9,0	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Brennero	1372	0,1	7,5	1,7	0,0	0,3	0,0	0,0
Sonnblick	3106	5,0	12,0	10,0	1,0	0,0	0,0	0,0
Salisburgo	430	2,0	4,0	21,0	2,0	0,0	0,0	0,0
Linz	297	3,0	0,0	23,0	11,0	0,0	0,0	0,0
Mariazell	872	12,1	4,0	3,2	1,0	0,0	0,0	0,0
Vienna	203	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Villacheralpe	2140	5,0	7,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
Klagenfurt	448	5,0	8,0	0,4	5,0	0,0	0,0	0,0
Graz	340	20,0	11,0	0,8	0,5	0,0	2,0	0,0
<i>Ungheria</i>								
Szombathely	224	10,0	2,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0
Győr	115	2,0	0,6	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0
Budapest	139	2,0	14,0	0,2	1,0	0,0	0,0	0,0
Kesathely	116	12,0	14,0	1,0	6,0	0,0	0,0	0,0
Siofok	107	18,0	5,9	0,4	2,2	0,0	0,0	0,0
Baja	109	5,2	0,7	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0
<i>Iugoslavia</i>								
Lubiana	299*	1,2	10,0	4,0	1,1	0,4	0,1	0,0
Maribor	264	2,0	8,0	0,0	0,3	0,0	0,0	4,0
Portorose	92	0,1	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fiume	85	1,1	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Zagabria	106	0,3	24,9	1,0	3,6	0,4	0,5	0,0
Slavonski	88	1,0	5,0	0,0	4,1	0,0	0,0	0,0 *
Bihac	246	8,0	28,9	1,9	37,0	0,0	13,0	0,0 *
Zara	82	3,8	12,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0 *
Sarajevo	630	0,7	5,0	2,0	0,0	8,0	0,0	0,0

*Dato incompleto

maggio, ultimo giorno prima dell'arresto definitivo della fuoriuscita di materiale radioattivo dalla centrale di Černobyl', va ad interessare in un primo momento la Polonia e quindi ancora la Svezia e la Finlandia nel corso dell'8 e del 9 maggio, come dimostra il picco secondario registrato in quei giorni a Stoccolma nella concentrazione nell'aria di ^{137}Cs della fig. 6. Similmente a quanto era successo per l'emissione del 26 aprile, la situazione meteorologica che ha determinato l'afflusso sulle

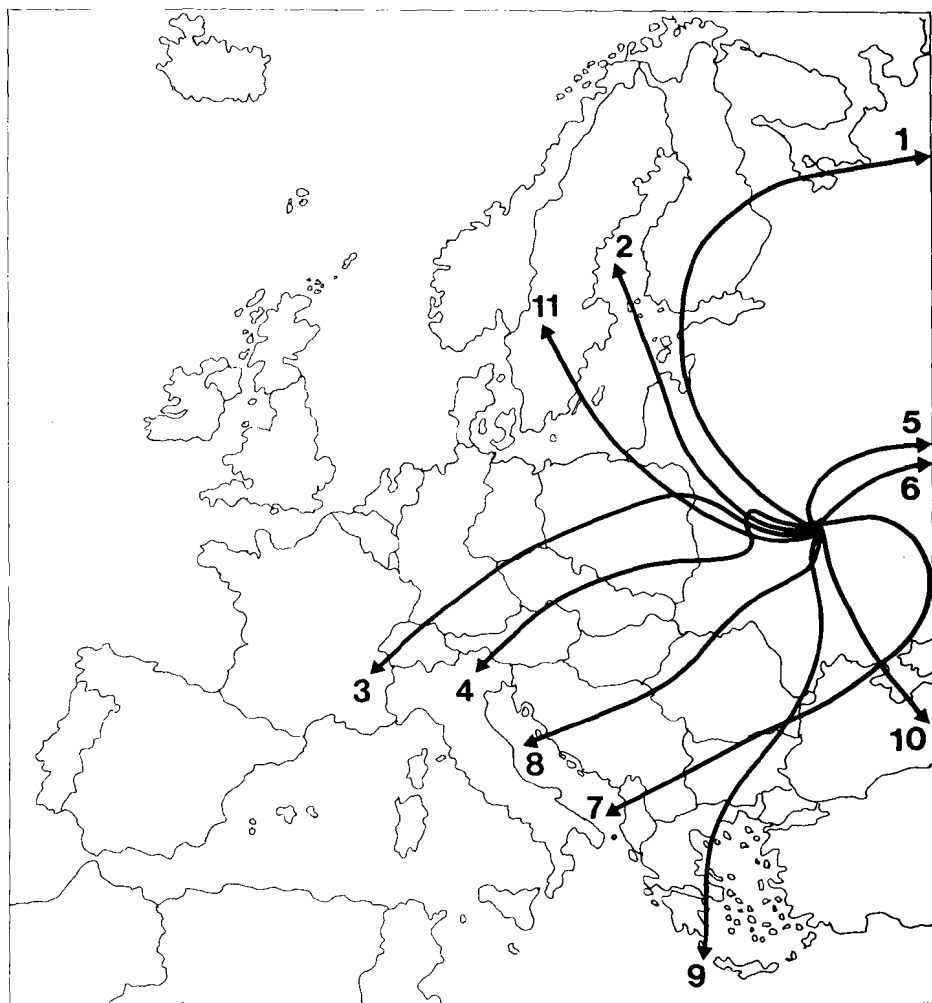


FIG. 12 — TRAIETTORIE SEGUITE DALLA NUBE RADIOATTIVA SULL'EUROPA.

Le aree interessate in successione dalle traiettorie e le date di rilascio e di arrivo sono riportate nella tab. 2.

Fonte: V. Zwatz-Meise, 1986 (ridisegnata e completata).

regioni baltiche degli inquinanti radioattivi è anche questa volta dominata da un'alta pressione nella parte nord-occidentale della Russia e da una bassa pressione estesa dalle Isole Britanniche alla Penisola Scandinava.

Al termine di questo paragrafo, nel quale si è cercato di ricostruire lo scenario meteorologico che ha fatto da «regista» ai vari processi di trasporto e di dispersione della contaminazione radioattiva emessa

TAB. 2

**AREE GEOGRAFICHE INTERESSATE DALLA TRAIETTORIA DELLA
NUBE RADIOATTIVA E DATE DEI RILASCI E DEGLI ARRIVI**

Traiettorie	Aree interessate	Data rilascio	Data arrivo
1 - 2	Paesi baltici, Penisola Scandinava, Finlandia	26 aprile	27-30 aprile
3 - 4	Europa centro-orientale, Germania meridionale, Francia, Svizzera, Austria, Jugoslavia, Italia	27 aprile	28 aprile-2 maggio
5 - 6	Ucraina, Russia	28-29 aprile	28 aprile-2 maggio
7 - 8 - 9	Romania, Bulgaria, Jugoslavia, Grecia	29-30 aprile	1-4 maggio
10	Mar Nero, Turchia	1-4 maggio	2-7 maggio
11	Polonia, paesi baltici, Penisola Scandinava, Finlandia	5 maggio	6-9 maggio

dal reattore esploso nel periodo 26 aprile-5 maggio 1986, ci pare opportuno aggiungere qualche altra considerazione. Come risulta dalla fig. 13, gli esperti ritengono che la contaminazione della Svezia e della Finlandia e quella dei paesi dell'Europa centrale, quella cioè provocata dalle emissioni dei primi due giorni e di cui nella figura in esame è tracciata schematicamente l'area di diffusione, dominò la situazione dell'esposizione nel nostro continente. La contaminazione rilevata in altre regioni è relativamente secondaria, poiché dovuta a processi di dispersione operati da masse d'aria contenenti materiale radioattivo in circolazione da almeno cinque giorni a partire dal momento del suo rilascio. È il caso, ad esempio, di paesi come la Danimarca, gli Stati del BeNeLux e la Gran Bretagna che, sebbene non interessati direttamente da nessuna delle traiettorie seguite dalla nube radioattiva, sono stati in parte contaminati. Nel caso della Penisola Iberica, in particolare, la dominanza persistente in questa regione dei venti occidentali o meridionali ha invece preservato il territorio da ogni contaminazione.

Un'ultima annotazione riguarda l'andamento cronologico della quantità e della qualità delle sostanze radioattive emesse dal reattore dal momento della sua esplosione fino al 6 maggio. Un ragguaglio a questo proposito è stato fornito dalle autorità sovietiche nel Rapporto presentato a Vienna all'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA) nell'agosto del 1986 e citato nella nota 2. Come risulta dagli

Le linee tratteggiate rappresentano le traiettorie delle emissioni del 26 e del 27 aprile.
Fonte: World Health Organization, 1986.

56

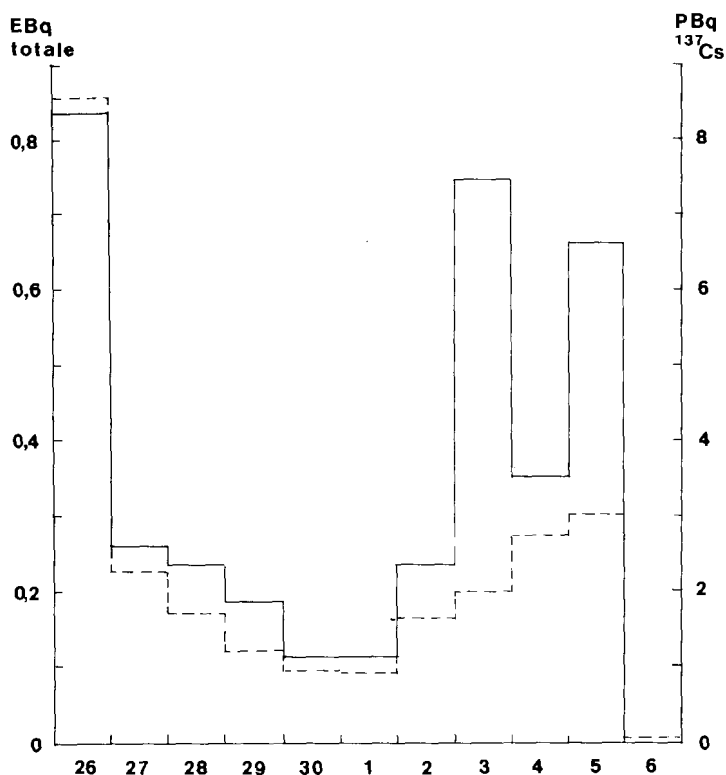


FIG. 14 — EMISSIONI GIORNALIERE DAL 26 APRILE AL 6 MAGGIO.

La linea tratteggiata indica l'attività totale (esclusi i gas inerti); quella continua, l'emissione di ^{137}Cs .
 N.B. — 1EBq = 10^{18}Bq ; 1PBq = 10^{15}Bq . •

La contaminazione radioattiva nel nostro paese. — Come attestano i tempi di rilevamento dei primi dati significativi di contaminazione, il nostro paese è stato interessato dalla nube radioattiva contenente l'emissione del 27 aprile a partire dal giorno 30 nella sua parte settentrionale e dal 1° maggio in quella centro-meridionale. Alle ore 12 UTC del 30 le correnti in quota sull'Italia settentrionale e su quella centrale erano da nord-est, determinate da una situazione di blocco composta da un'area di alta pressione sulla Germania e dall'area ciclonica stazionante sul Mediterraneo centrale (fig. 15). Questa situazione si è mantenuta nei giorni successivi, ma si è spinta un po' più a sud, così da favorire l'ingresso delle correnti da nord-est su tutta la penisola. Considerata la direzione di provenienza delle masse d'aria inquinate, è evidente come le regioni di nord-est siano state le prime ad essere in-

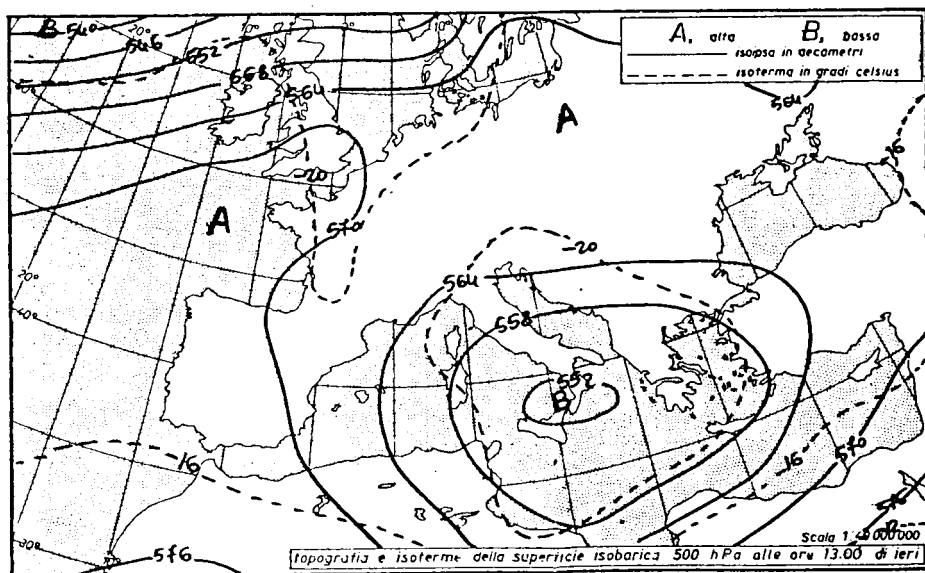


FIG. 15 — CARTA ISOBARICA E ISOBARICA RELATIVA ALLE ORE 12 UTC DEL 30 APRILE.

Fonte: Serv. Meteorol. dell'Aeron. Mil., Roma.

vestite. Secondo i risultati di uno studio del CRTN dell'ENEL (9), l'afflusso della contaminazione sulla Padania è stato dominato da fenomeni catabatici (la bora nel Friuli-Venezia Giulia e nel Veneto, il föhn nelle Alpi Centrali e in Lombardia) generati dalla diversa densità dell'aria sopra e sottovento alla catena alpina. L'afflusso di aria contaminata ha raggiunto la sua massima intensità nella notte tra il 1° ed il 2 maggio ed ha interessato particolarmente le zone dell'arco alpino, la pianura veneta e lombarda, ma anche altre regioni. Nelle immagini del METEOSAT (figg. 16-17-18) è illustrata, per i giorni 1, 2 e 3 maggio, la distribuzione, alle ore indicate, della nuvolosità sul nostro territorio e nelle altre regioni europee, nonché lo spostamento verso est della depressione sul Mediterraneo e l'avanzamento verso ovest di una perturbazione atlantica.

Secondo uno studio fondato sui dati raccolti dalla rete di monitoraggio e di controllo della radioattività atmosferica in Italia e condotto congiuntamente dall'Istituto di Fisica dell'Atmosfera del CNR e dal

(9) P. Bonelli, N. Tronci e B. Villone, 1987. Lo scenario meteorologico che ha fatto da sfondo nel nostro paese all'episodio d'inquinamento radioattivo è stato ricostruito, a scale diverse in altri studi (ad es., ENEA, 1986; G. Simonini, 1986; G. Zanella, 1987).

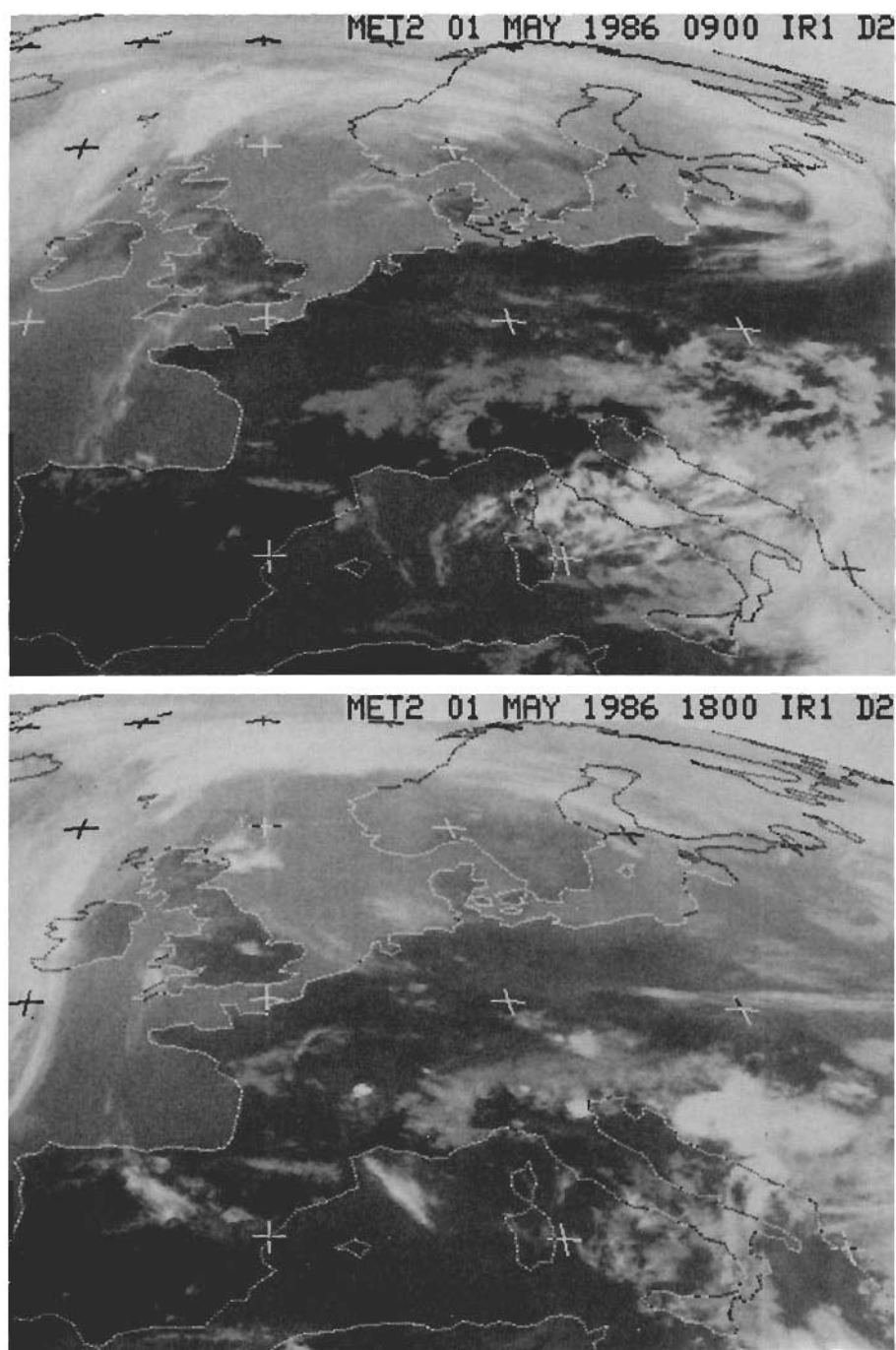


FIG. 16 — IMMAGINI METEOSAT NELL'INFRAROSSO ALLE ORE 9 E 18 UTC DEL 1° MAGGIO.

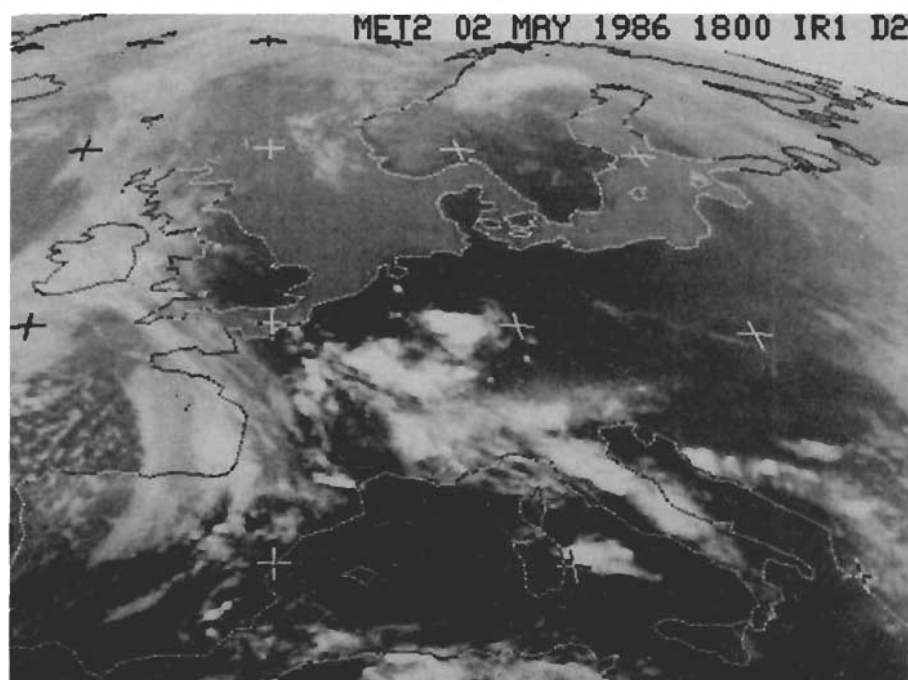
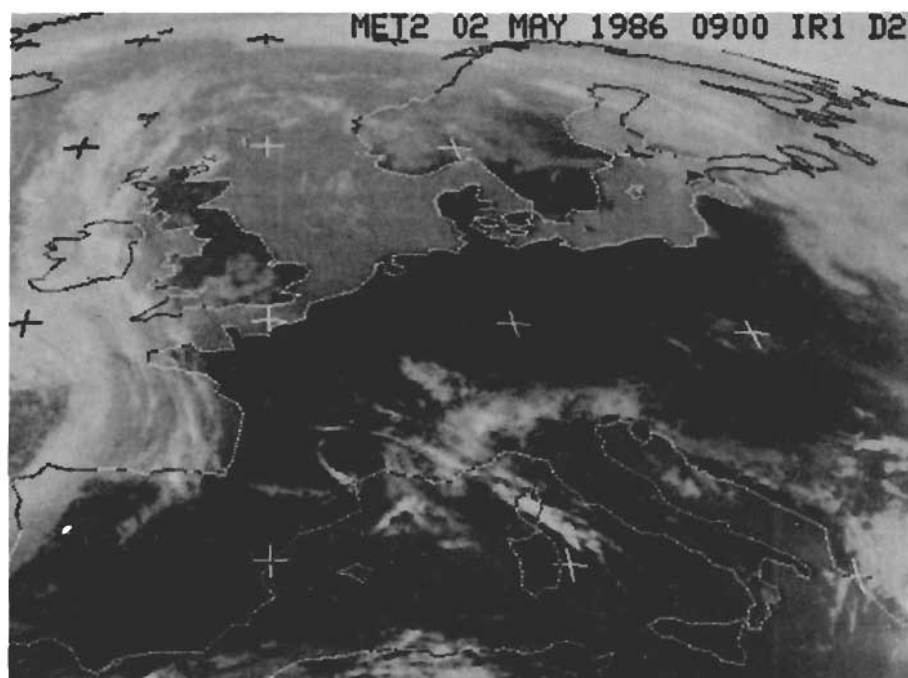


FIG. 17 — IMMAGINI METEOSAT NELL'INFRAROSSO ALLE ORE 9 E 18 UTC DEL 2 MAGGIO

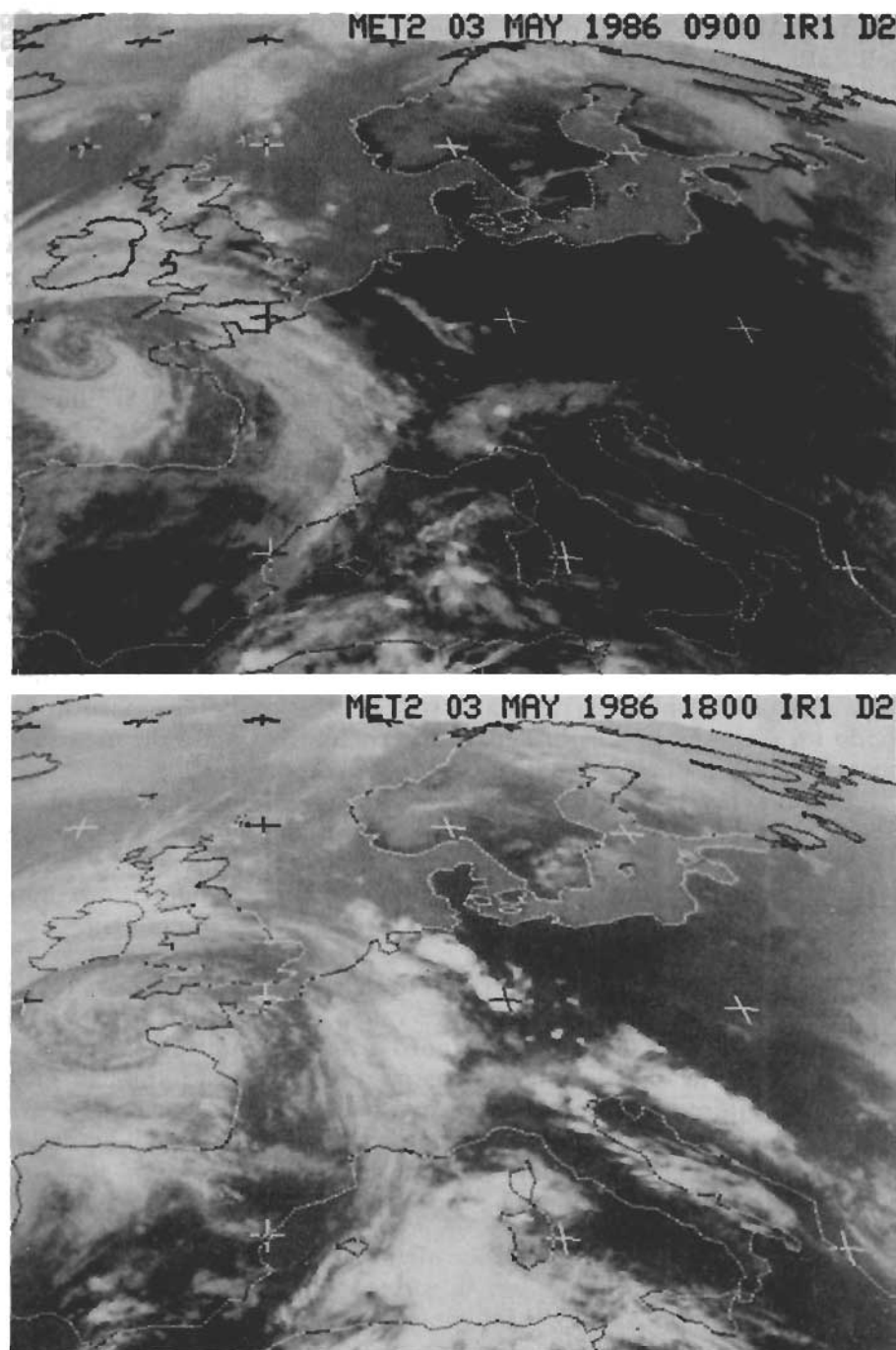


FIG. 18 — IMMAGINI METEOSAT NELL'INFRAROSSO ALLE ORE 9 E 18 UTC DEL 3 MAGGIO.

Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare (10), risulta che nell'Italia settentrionale il primo segnale di inquinamento radioattivo dell'aria si è verificato tra il 29 ed il 30 aprile, mentre la polluzione ha investito l'Italia centrale e la costa adriatica nelle successive 24 ore ed ha raggiunto le regioni bagnate dal Tirreno meridionale, la Sicilia e la Sardegna tra il 2 ed il 3 maggio. Dallo studio citato risulta inoltre che l'incremento della contaminazione dell'aria è stato abbastanza elevato su tutta la penisola anche se con valori massimi sensibilmente diversi da luogo a luogo. Le regioni maggiormente esposte sono state quelle settentrionali e quelle costiere adriatiche, mentre relativamente bassi livelli di attività sono stati riscontrati in Calabria, in Sicilia ed in Sardegna. Il materiale radioattivo, sempre secondo questo studio, è stato trasportato lungo lo strato d'aria compreso tra il suolo ed il livello isobarico di 500 hPa (circa 5000 m) e questa ipotesi sarebbe confermata, come sostengono gli autori, dal fatto che il grado di inquinamento misurato nelle stazioni di alta quota (es., Pian Rosà, 3488 m, con un valore estremo pari a 3936 pCi/m³) è risultato assai più elevato (fig. 19) rispetto a quello misurato a bassa quota (es., Verona, 67 m, con un picco inferiore a 1000 pCi/m³). In quasi tutte le stazioni di monitoraggio è stato registrato nell'aria un massimo secondario di concentrazione radioattiva intorno al 6 maggio (fig. 20) e ciò può essere stato una conseguenza dell'inversione nella direzione di provenienza del vento iniziata nelle nostre regioni a partire dal 3 maggio che ha determinato in tal modo un secondo passaggio della nube radioattiva nella direzione opposta rispetto a quella seguita nei giorni precedenti.

Per ciò che riguarda la deposizione al suolo del materiale radioattivo, è da osservare che questa è stata significativamente influenzata dal dilavamento dell'atmosfera operato dalle precipitazioni e quindi dalla distribuzione geografica, dalla intensità e dall'andamento temporale delle piogge che hanno interessato l'Italia (v. tab. 3) nei primi giorni di maggio.

Queste piogge sono state provocate dallo scontro di masse d'aria umide e temperate di origine mediterranea e masse d'aria fresche e asciutte provenienti dai quadranti nord-orientali. In effetti le precipitazioni cadute in quei giorni sul nostro territorio sono state in gran parte a carattere temporalesco o di rovescio, e si sono pertanto distribuite in modo piuttosto discontinuo essenzialmente in funzione dell'orografia, determinando quindi una deposizione al suolo della contaminazione pure molto irregolare. Le piogge dei primi giorni di maggio so-

(10) M. Colacino e altri, 1987. Sulle misure della radioattività atmosferica in Italia si vedano anche due note tecniche dell'IFA-CNR (M. Colacino e altri, 1986).

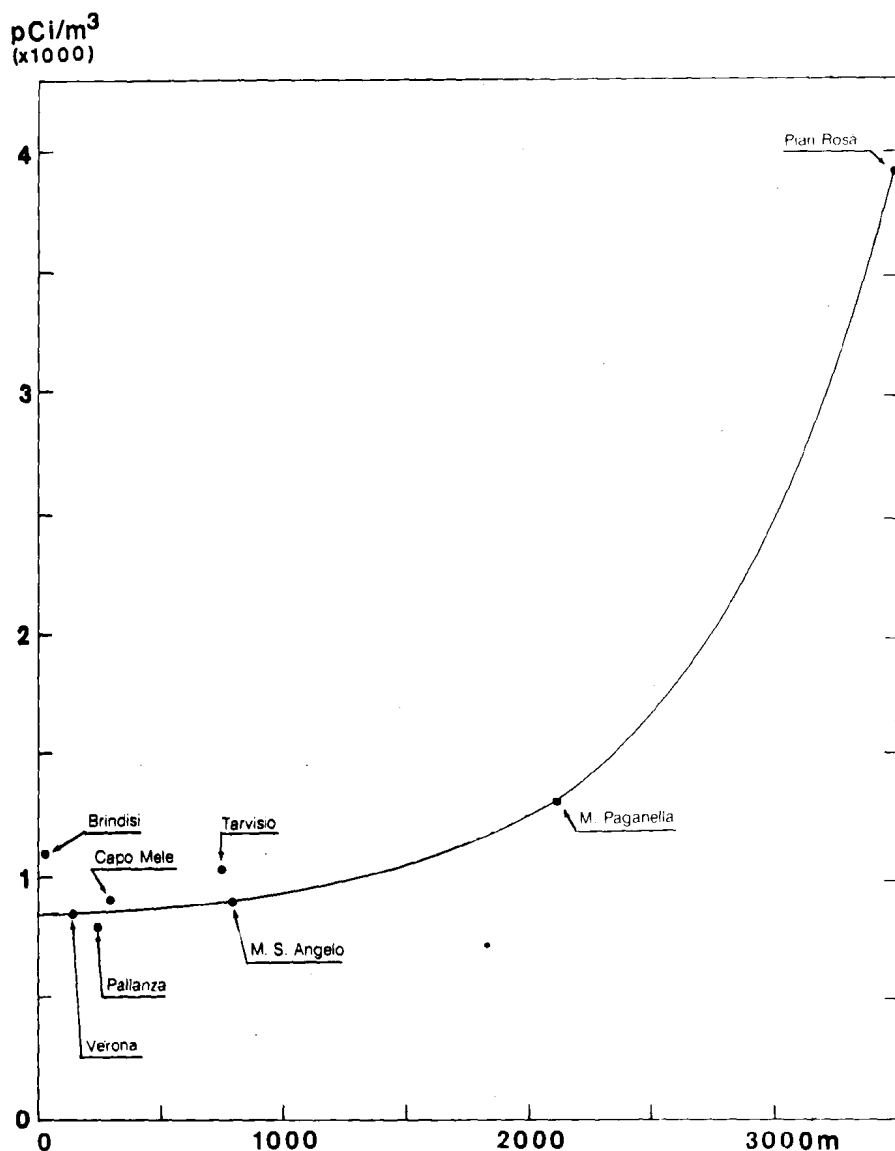


FIG. 19 — ANDAMENTO DEI PICCHI DI CONCENTRAZIONE DELLA RADIOATTIVITÀ DELL'ARIA PER ALCUNE LOCALITÀ ITALIANE IN FUNZIONE DELLA LORO QUOTA.

Fonte: M. Colacino e altri, 1987 (ridisegnata).

no cadute abbondanti specie nelle zone prealpine ed hanno qui trascinato al suolo consistenti quantità di radionuclidi. Se si considera, ad esempio, la concentrazione sul suolo del ^{137}Cs , secondo uno studio condotto da ricercatori dell'Istituto di Fisica Generale Applicata dell'Uni-

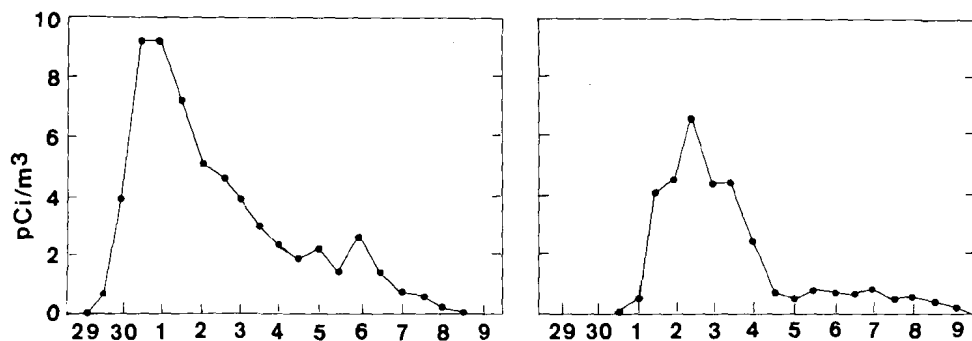


FIG. 20 — ANDAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE TOTALE DI RADIONUCLIDI NELL'ARIA IN ITALIA NEL PERIODO 29 APRILE-9 MAGGIO.

A sinistra, Italia settentrionale e centrale; a destra, Italia meridionale e insulare.

Fonte: M. Colacino e altri, 1987 (semplificata).

versità di Milano, del Centro Comune di Ricerca di Ispra, del Centro di Cultura Scientifica di Como e dell'ENEL-CRTN di Milano sulla base di *misure effettuate in oltre ottanta stazioni dell'Italia settentrionale* (P. Bacci e altri, 1987), emergono questi dati: bassi livelli di concentrazione ($200\text{-}300\text{ nCi/m}^2$), dovuti in prevalenza a deposizione secca, nella pianura veneta ed in quella lombarda orientale e meridionale e in Emilia-Romagna; valori ancor più bassi in Piemonte e soprattutto in Val d'Aosta; alti livelli nelle Alpi Centrali, e in particolare nella regione dei laghi di Como e di Lugano, territori questi ultimi dove più intense sono state le precipitazioni. Ad esempio, a Cernobbio di Bellagio (100 mm di pioggia nei primi sette giorni di maggio) è stata misurata una concentrazione di ^{137}Cs pari a 1882 nCi/m^2 e a Lugano (109,7 mm di pioggia nello stesso periodo) di 1596 nCi/m^2 . Assieme al *wash-out*, anche l'altitudine (come si è osservato per la contaminazione dell'aria) è stata un fattore importante nella quantità di radionuclidi depositati: sulla vetta di Monte Bisbino (1319 m, 87 mm di pioggia in sette giorni) la concentrazione di ^{137}Cs è risultata pari a 2299 nCi/m^2 , mentre a Carona nell'alta Val Brembana (1096 m, 60 mm di pioggia) si sono avuti ben 2832 nCi/m^2 . Alti livelli di contaminazione radioattiva del suolo nelle zone alpine e appenniniche e nelle aree di pedemonte possono essere state la conseguenza di ristagni o di ricambi d'aria nelle vallate: può essere infatti successo che, per un certo tempo, il gioco delle brezze di monte e di valle abbia portato periodicamente ora verso la pianura ora verso la montagna masse d'aria inquinata determinando in tal modo una progressiva concentrazione al suolo di radionuclidi (11).

(11) La distribuzione quantitativa e qualitativa della radioattività in particolari aree del nostro paese è stata oggetto di molti studi, tra i quali segnaliamo: per la Lombardia, E. Bellotti e altri, 1986; per il Padovano, S. Galassini e altri, 1986; per il Piemonte, G.C. Bonazzola e R. Ropolo, 1986; per la Campania, G. Gialanella e altri, 1986; per la Padania in genere, G. Queirazza e L. Guzzi, 1987.

**PRECIPITAZIONI GIORNALIERE (in mm) IN ALCUNE LOCALITÀ
DELL'ITALIA SETTENTRIONALE E DELLA SVIZZERA ITALIANA
NEL PERIODO 1-7 MAGGIO 1986**

Località	Altitudine (m)	1	2	3	4	5	6	7
<i>Alpi Orientali</i>								
Tarvisio	777	4,2	0,0	0,4	0,0	0,0	0,6	0,4
Dobbiaco	1222	0,0	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Passo Rolle	2004	0,0	4,2	1,2	0,4	4,4	3,0	7,6
S. Valentino	1459	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Bolzano	241	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	1,4
M. Paganella	2129	3,4	4,8	0,0	0,6	0,4	3,2	2,6
<i>Alpi Centr. e Occident.</i>								
Boazzo (Lago)	1200	0,0	2,0	0,0	2,0	1,0	3,0	4,0
Sellero (S. Fiorano)	500	0,0	2,0	8,0	2,0	0,0	5,0	1,0
Carona	1096	0,0	8,0	20,0	13,0	5,0	3,0	11,0
Lanzada	1000	0,0	6,0	10,0	4,0	0,0	1,0	5,0
Poschiavo	1001	0,3	0,2	1,8	5,9	0,3	0,2	2,0
Mesocco	785	0,0	10,3	7,2	23,4	2,0	21,8	25,7
Airolo	1145	0,2	4,0	7,0	25,7	15,1	12,0	34,5
Torino Bric	709	0,0	0,0	6,2	18,4	8,4	0,2	2,6
Aosta	583	0,0	5,4	1,4	2,8	1,6	1,6	0,0
<i>Pianura veneta e lombarda orient., Emilia-Romagna</i>								
Trieste	8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Udine Rivolto	51	3,6	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Treviso Istriana	45	0,8	0,0	0,6	0,0	0,0	2,6	0,0
Venezia Tessera	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Padova	13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
Vicenza	39	0,0	0,0	7,2	0,0	0,0	1,2	13,6
Verona Villàfranca	67	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Brescia	102	0,0	6,0	2,4	1,2	0,2	0,2	0,0
Bergamo	238	0,0	8,4	0,0	11,8	1,8	0,0	0,0
Piacenza	134	0,0	0,0	1,0	3,0	4,6	1,6	0,0
Parma	54	0,0	0,0	0,0	3,4	0,0	2,4	8,6
Bologna	36	0,0	0,0	0,0	1,1	0,6	0,0	0,0
Ferrara	15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cervia	6	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
Rimini	12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
<i>Regione dei laghi</i>								
Como	200	0,0	0,0	9,2	10,6	0,2	0,0	0,0
Monte Bisbino	1319	15,8	2,4	20,8	31,8	12,8	1,4	2,0
Cernobbio	201	0,0	12,0	20,0	35,0	23,0	0,0	10,0
Mese	275	0,0	7,0	5,0	17,0	2,0	7,0	28,0
Ardenno	950	0,0	4,0	2,0	8,0	2,0	1,0	3,0
Pedesina	700	0,0	11,0	8,0	16,0	0,0	1,0	2,0
Milano Malpensa	234	0,0	2,2	10,8	21,6	6,2	0,0	0,0
Ispra	220	0,2	1,8	1,2	28,0	7,0	0,0	0,0
Ponte Tresa	285	0,0	5,1	28,2	28,8	5,7	8,2	7,5
Lugano	275	0,0	2,1	30,9	40,6	5,6	23,1	7,4
Creva (Luino)	233	0,0	0,0	20,0	10,0	0,0	3,0	0,0
Locarno	200	0,0	1,1	15,0	36,0	8,0	19,3	22,7
<i>Pianura lombarda occident., Piemonte</i>								
Milano Linate	107	0,0	0,0	0,0	6,8	3,6	0,0	0,0
Cesano Maderno	198	0,0	0,0	4,6	20,3	2,8	0,0	0,0
Cassano d'Adda	133	0,8	6,6	1,3	21,6	2,4	0,0	0,0
Tavazzano	85	0,0	0,0	0,8	12,2	2,8	0,0	0,0
Turbigo	146	0,0	1,2	14,0	5,4	1,0	0,0	0,0
Novara	178	0,0	4,6	1,6	25,4	8,8	0,2	0,0
Novi Ligure	187	0,0	0,4	0,0	22,0	1,0	0,2	0,0
Mondovì	560	0,0	0,4	0,6	33,8	10,4	0,4	0,0
Torino	301	0,0	8,8	7,8	2,8	5,0	8,0	0,0

Il disinquinamento dell'aria ha avuto inizio sul nostro territorio a partire dal 3 maggio, quando, a seguito dello spostamento verso est della depressione mediterranea responsabile dell'afflusso della contaminazione radioattiva, si è consolidata sulle nostre regioni una circolazione da sud-ovest. Se il ricambio d'aria tanto atteso è stato inizialmente ostacolato dallo stazionamento a ridosso dell'arco alpino di una perturbazione di origine atlantica e dall'assenza di efficaci gradienti barici sia orizzontali che verticali e quindi da una scarsa circolazione, successivamente, con il maggiore riscaldamento dell'aria in prossimità del suolo ed il conseguente innalzamento dello strato atmosferico di rimescolamento, si sono verificate le condizioni termodinamiche più favorevoli per un progressivo disinquinamento dell'aria.

Alcune considerazioni conclusive. — Nell'arco di dieci giorni, dunque, la nube radioattiva, seguendo gli «umori» del tempo, si è spostata da Černobyl' verso nord-ovest, poi verso ovest e sud-ovest e quindi verso sud-est ed ancora verso nord-ovest, depositando contaminanti dalle regioni del Baltico a quelle del Mar Nero. Secondo stime sovietiche, circa 50 megacurie dei più pericolosi radionuclidi ed altrettanti megacurie di gas radioattivi chimicamente inerti sono stati liberati nell'aria e trasportati sui cieli d'Europa. Se si escludono quelle più immediate e quantificabili relative all'area attorno al punto dove si è verificato l'incidente nucleare (31 morti, circa 116.000 abitanti dell'Ucraina e della Bielorussia costretti ad evacuare entro un raggio di 30 km attorno a Černobyl'), le conseguenze più importanti e gravi di un così vasto e massiccio inquinamento nucleare sono per la maggior parte imprevedibili e pertanto possono essere soltanto oggetto di ipotesi. Limitandoci a considerare, a titolo esemplificativo, la zona più direttamente e immediatamente interessata dall'evento, è stimato dagli esperti in 24.000 il numero delle persone, tra le 116.000 evacuate, che ha ricevuto una dose di radiazione intorno ai 45 rem, quando è pari a 5 rem in un anno la dose considerata accettabile e quindi non pericolosa. Ebbene, tra queste 24.000 persone gli scienziati prevedono nei prossimi decenni una incidenza della mortalità per cancro tra 100 e 200. Se si amplia l'orizzonte a tutte le aree geografiche coinvolte dalla contaminazione prodotta dalla nube radioattiva, le stime degli esperti sono largamente in disaccordo: per la parte occidentale dell'Unione Sovietica e per il resto dell'Europa le ipotesi sui decessi per cancro in conseguenza dell'incidente di Černobyl' variano da 5000 a 75.000, mentre gli scienziati che si oppongono al nucleare non escludono addirittura che tali cifre possano arrivare fino a 280.000 (12).

(12) Sulle problematiche sollevate dall'incidente di Černobyl' e sulle conseguenze dell'evento si veda l'interessante lavoro di M. Edwards, 1987; e anche F. Casali, G. Maltoni Giacomelli e V. Prodi,

L'Organizzazione Mondiale della Sanità, in una riunione che è stata convocata d'urgenza a Copenaghen per analizzare gli sviluppi dell'evento e che ha visto riuniti a consulto scienziati ed esperti nel campo della meteorologia, della protezione nucleare, della biologia nucleare, della tecnologia dei reattori e delle procedure di emergenza sanitaria, ha appuntato in un documento (World Health Organization, 1986) la sua attenzione soprattutto sugli effetti biologici tardivi (cancerogeni, genetici, teratogeni) che potranno derivare dalla contaminazione da ^{137}Cs ; ne è scaturita una raccomandazione rivolta a tutti i paesi interessati a condurre studi approfonditi e sistematici dell'entità e della distribuzione geografica del deposito di questo pericoloso elemento. Altri radionuclidi emessi a Černobyl' hanno rappresentato nel breve termine (ad esempio, lo ^{131}I) un pericolo per l'organismo umano, ma soprattutto in prospettiva sono le conseguenze della contaminazione da ^{137}Cs quelle che in effetti destano le maggiori preoccupazioni, dato che questo elemento domina il problema dell'esposizione a lungo termine avendo, come è noto, una emivita di circa 30 anni. E poiché il trasferimento di radionuclidi all'uomo, oltre che dal meccanismo diretto dell'esposizione esterna (aria e suolo) ed interna (inalazione e ingestione), dipende imponderabilmente da un notevole numero di fattori fisici, chimici, biologici ed ambientali che interagiscono lungo diverse catene alimentari, gli effetti sanitari della contaminazione divengono in questo modo ancora più imprevedibili.

In merito alle conseguenze dell'inquinamento radioattivo seguito all'incidente di Černobyl', un aspetto da non trascurare è quello relativo ai possibili effetti di questo evento su determinate attività umane. Tralasciando di considerare quanto è successo nei giorni subito dopo l'annuncio dell'incidente nel settore della produzione e della commercializzazione dei prodotti agroalimentari, soffermiamoci invece, a titolo esemplificativo, su una particolare e tradizionale attività, tipica di un popolo che vive nelle estreme regioni settentrionali della Svezia, della Norvegia, della Finlandia e della Russia: l'allevamento transumante delle renne nella Lapponia, un genere di vita al limite dell'ecumene al quale la ricerca geografica ha più volte rivolto la propria attenzione. In un'area dove, per le rigide condizioni climatiche e per la povertà dei suoli, la sola attività praticabile è l'allevamento delle renne, questo ruminante è tutto per il lappone: animale da carne, da latte e da pelliccia, animale da soma e da traino. Ebbene, proprio sulle terre dei lapponi si è diretta la prima e forse la più consistente ondata di

1986. Ampio spazio ai vari aspetti dell'incidente di Černobyl' è stato dedicato dal Notiziario dell'E-NEA. «Energia e Innovazione», a partire dal n. 5-6, 1986. Infine, per ciò che riguarda in particolare le conseguenze nel lungo termine della contaminazione radioattiva nell'ecosistema marino si veda l'editoriale apparso in una rivista specializzata sull'inquinamento del mare: M.H. Depledge, 1986).

contaminanti radioattivi fuoriusciti dal reattore esploso a Černobyl'. La deposizione al suolo di radionuclidi è stata qui abbondantemente assorbita dalle distese di licheni e di muschi che costituiscono il pascolo principale delle renne (13). La singolare catena alimentare dai licheni alle renne si è chiusa con gravi conseguenze per i lapponi. Nella carne delle renne allevate in una vasta fascia di territorio nel nord della Penisola Scandinava sono stati infatti rilevati valori elevatissimi di radioattività, per cui ne è stata dichiarata a tempo indeterminato l'incommestibilità per l'uomo. Oltre al danno economico immediato subito per il mancato reddito proveniente dalla vendita della carne di renna, che è di largo consumo nei paesi scandinavi, sui lapponi pesa soprattutto il grande enigma rappresentato dai possibili effetti genetici che potrà avere in futuro sulla specie l'ingente dose di contaminanti assorbiti da questi animali. Un'incognita questa che grava pesantemente sulla sopravvivenza di un genere di vita e quindi su una realtà geografica che si regge su un equilibrio uomo-natura consolidato nel tempo e su un insieme di usi e costumi, su una «cultura», insomma, le cui origini sono assai remote.

Dopo il breve cenno alle conseguenze di questo allarmante episodio di contaminazione, non resta che aggiungere poche altre riflessioni. L'incidente di Černobyl' ha soprattutto messo in evidenza in modo estremamente chiaro, oltre alle problematiche inerenti all'affidabilità ed alla sicurezza degli impianti nucleari, il fatto che, per eventi del genere, la distanza del punto in cui tale evento si verifica non costituisce un fattore di annullamento del rischio. In quella circostanza, infatti, tutti in Europa abbiamo compreso che i chilometri, tanti o pochi, che ci separavano da Černobyl' non rappresentavano di per sé stessi motivo di maggiore o minore sicurezza, ma che questa poteva essere in qualche modo garantita solo da un certo andamento delle traiettorie seguite dalla nube radioattiva, cioè da un ben determinato tipo di circolazione atmosferica. È emersa, insomma, in quei frangenti tutta l'importanza dell'aria come fattore geografico. Come si è già avuto modo di sottolineare, in quei giorni le informazioni meteorologiche hanno in effetti giocato un ruolo assai importante, mettendo a disposizione dei servizi di protezione civile previsioni a breve e medio termine sui movimenti delle masse d'aria contaminate. È indubbio che la ricerca me-

(13) La *Cladonia rangiferina*, il lichene alimento preferito dalle renne, sembra in effetti fatto apposta, data la sua struttura, per trattenere una grande quantità di radionuclidi. Ancor più elevato è il potere assorbente del muschio, chiamato localmente «lave», che nasce e si sviluppa sulle superfici rocciose, rivestendole di chiazze variopinte. Questi vegetali, detti «crostosi» a motivo del loro tallo laminare, non sono alimentati dal suolo bensì dall'aria che filtrano trattenendone il nutrimento, l'umidità e tutte le impurità. Quando piove, questi muschi si trasformano in vere e proprie spugne, per cui l'effetto filtrante viene ulteriormente accresciuto. La presenza nell'aria di radionuclidi li ha quindi «caricati» in modo elevatissimo di radioattività. Su questo argomento si veda A. Vignoli, 1987.

teorologica abbia compiuto in questi ultimi anni notevoli progressi nel campo applicativo e particolarmente in quello delle previsioni del tempo, utilizzando sofisticati e complessi modelli numerici, ma molto resta ancora da fare. Un ulteriore contributo che questa disciplina può offrire riguarda proprio il settore della polluzione. E poiché l'inquinamento atmosferico, come ha esemplarmente dimostrato l'episodio di Černobyl', ignora i confini, nella predisposizione di sistemi di sicurezza e di protezione ambientale è indispensabile il coinvolgimento e la collaborazione dei vari servizi meteorologici nazionali ed un ruolo determinante nel coordinamento delle iniziative che si intraprendono in questo campo può senz'altro essere svolto dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale. Per la peculiarità degli interessi che sostengono, anche altri enti sovranazionali, quali l'OMS, la FAO, l'UNESCO, possono portare un contributo notevole nella definizione di una strategia internazionale di prevenzione e di difesa. A tal proposito, in tema di sicurezza e di protezione radiologica è significativa, ad esempio, l'approvazione da parte dell'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA), nel settembre 1986, di due importanti convenzioni subito entrate in vigore: la prima che impone agli Stati aderenti di dar notizia in modo tempestivo di eventuali incidenti nucleari che si verifichino entro il loro territorio; la seconda che fissa, per eventi di tal genere o per situazioni di emergenza radiologica, interventi coordinati di assistenza ai paesi colpiti da inquinamento radioattivo. La convenzione sulla notificazione rapida di un incidente nucleare riguarda particolarmente da vicino la responsabilità dei servizi meteorologici nazionali ed i programmi di ricerca dell'OMM, soprattutto quello denominato «World Weather Watch» (WWW), in quanto prevede anche l'obbligo di fornire in tempi brevi ai paesi che possono essere interessati fisicamente da rilasci accidentali di radionuclidi, oltre a tutte le informazioni disponibili sulla natura di questi, dati e previsioni meteorologiche necessari per prefigurare le possibili traiettorie di dispersione delle sostanze radioattive liberate nell'atmosfera. A questo punto emerge il ruolo essenziale che può svolgere il Programma WWW con i suoi sistemi internazionali di osservazioni, di trattamento dei dati e di telecomunicazioni. Le informazioni scambiate nel quadro del WWW rivestono in effetti un'importanza vitale per tutte le attività meteorologiche legate alle salvaguardie della sicurezza pubblica ed è per questo motivo che l'OMM ha accolto con vivo interesse l'iniziativa dell'IAEA ed ha quindi assicurato ad essa la propria collaborazione (OMM, 1987). Come primo intervento operativo, l'OMM ha demandato ad un gruppo di esperti la definizione e la pianificazione internazionale di un sistema efficace di allarme ed assieme all'IAEA ha predisposto un piano di ricerche sulla qualità delle informazioni meteorologiche utilizzabili ai fini della modellizzazione della sequenza emissione-trasporto-dispersione-deposizione che dovranno

no essere messe a disposizione degli Stati in caso di emergenza nucleare. Il progetto congiunto IAEA-OMM sulla convalida ed il confronto dei modelli è già divenuto esecutivo per il biennio 1987-1988. Esso ha lo scopo di vagliare i modelli al momento esistenti e di scegliere quelli che sembrano offrire la maggiore affidabilità. In effetti, benché gli studi e le ricerche in questo settore non manchino, non si è ancora arrivati a predisporre su vasta scala modelli dettagliati di trasporto e di dispersione a media e lunga distanza di contaminanti, radioattivi o di altra specie, liberati, accidentalmente o meno, nell'atmosfera. Questi modelli, partendo dalla dislocazione geografica dalle potenziali fonti di emissione e sulla base dei tipi più frequenti di circolazione alle varie quote e nelle varie regioni, consentirebbero di arrivare a dei risultati previsti con qualche giorno di anticipo e non più analizzati semplicemente a inquinamento avvenuto.

L'esperienza di Černobyl' ha dunque ampliato l'orizzonte ai problemi applicativi della meteorologia, mentre l'iniziativa dell'IAEA ha mostrato che si può arrivare in breve tempo ad accordi di collaborazione tra le organizzazioni e le istituzioni internazionali. Si dovrà naturalmente continuare ad operare in modo da prevenire esperienze analoghe per il futuro, ma è nondimeno essenziale predisporre e pianificare sistemi integrati che possano minimizzare le conseguenze di un incidente nucleare, pur piccolo che sia il rischio che esso comporta.

BIBLIOGRAFIA

- BACCI P. e altri, *The Chernobyl Accident: the Radioactive Contamination in the Area of Lake Como and in Other Northern Italy Sites*, in «Il Nuovo Cimento», Bologna, 1987, pp. 285-313.
- BELLOTTI E. e altri, *Misure di attività e di contaminazione radioattiva a seguito dell'incidente al reattore nucleare di Chernobyl*, in «Il Nuovo Saggiatore», Bologna, 1986, n. 4, pp. 65-70.
- BONAZZOLA G.C. e ROPOLO P., *Misure di radioattività ambientale a seguito dell'incidente di Chernobyl*, in «Il Nuovo Saggiatore», Bologna, 1986, n. 6, pp. 38-44.
- BONELLI P., TRONCI N. e VILLONE B., *Study of the Medium - and Long - Range Transport Analysing the Data of the Chernobyl Accident*, in «Il Nuovo Cimento», Bologna, 1987, pp. 265-283.
- CARDINALE A. e altri, *La radiazione gamma naturale: contributo all'esposizione della popolazione in Italia*, in «Notiziario CNEN», Roma, 1975, pp. 107-118.
- CASALI F., MALTONI GIACOMELLI G. e PRODI V., *Riflessioni su Chernobyl*, in «Il Nuovo Saggiatore», Bologna, 1986, n. 4, pp. 40-64.

- COLACINO M., e altri, *Incidente di Chernobyl: misure di radioattività dell'aria in Italia*, Roma, IFA-CNR, 86/45, 1986.
zione al 27-5-1986, DOC/DISP (86), Roma, 1° giugno 1986.
- COLACINO M. e altri, *Incidente di Chernobyl: misure di radioattività del particolato atmosferico raccolto nelle stazioni della rete AM/CNR*, Roma, IFA-CNR, 86/38, 1986.
- COLACINO M. e altri, *The Chernobyl Accident: Air Radioactivity Measurements in Italy*, in «Il Nuovo Cimento», Bologna, 1987, pp. 249-264.
- DEPLEDGE M.H., *Global Implications of Chernobyl*, in «Marine Pollution Bull.», Londra, 1986, pp. 281-282.
- DIPARTIMENTO SICUREZZA E PROTEZIONE NUCLEARE SVEDESE, *Dopo Chernobyl? Informazioni sulle conseguenze per la Svezia dell'incidente di Chernobyl*, numero speciale de «L'Informazione», ediz. italiana, Stoccolma, novembre, 1986.
- EDWARDS M., *Chernobyl-One Years after*, in «National Geographic», Washington, 1987, n. 5, pp. 632-653.
- ENEA, *Traiettorie della nube*, in «Energia e Innovazione», Notiziario dell'ENEA, Roma, anno 32, n. 5-6, 1986, pp. 34-36.
- ENEA-DISP, *L'incidente di Chernobyl. Conseguenze radiologiche in Italia*, Relazione al 27-5-1986, DOC/DISP (86), Roma, 1° giugno 1986.
- FALCONE F., *Il Servizio Meteorologico dell'A.M. nell'emergenza per l'incidente di Chernobyl*, in «Riv. di Meteorol. Aeron.», Roma, 1986, p. 97.
- GALASSINI S. e altri, *Radioattività indotta dal fall-out della nube di Chernobyl*, in «Il Nuovo Saggiatore», Bologna, 1986, n. 4, pp. 71-78.
- GIALANELLA G. e altri, *Stato della radioattività in Campania a seguito dell'incidente alla centrale elettronucleare di Chernobyl*, in «Il Nuovo Saggiatore», Bologna, 1986, n. 4, pp. 44-52.
- KOLB H. e altri., *Diskussion meteorologischer Aspekte der radioaktiven Belastung in Österreich durch den Reaktorunfall von Tschernobyl*, Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, n. 69, Vienna, 1986.
- LANDSBERG H.E., *The Urban Climate*, New York, Academic Press, 1981 («International Geophysics Series», 28).
- LELLI G., *Chernobyl, il disconoscimento dei fatti tecnici ed il trionfo dell'emotività*, in «Il Nuovo Saggiatore», Bologna, 1986, n. 5, pp. 58-65.
- OMM, *Convention sur la notification rapide d'un accident nucléaire. Aspects météorologique et hydrologique*, in «Bull. de l'OMM», Ginevra, 1987, pp. 219-221.
- PERSSON C., RODHE H. e DE GEER L.E., *The Chernobyl Accident. A Meteorological Analysis of how Radionuclides reached Sweden*, Stoccolma, SMHI Reports-Meteorology and Climatology, n. 55, dicembre 1986.
- SAVOLAINEN A.L. e altri, *Dispersion of radioactive Releases following the Chernobyl nuclear Power Plant Accident*, Helsinki, Interim Report n. 1986:2, Finnish Meteorol. Inst., 1986.

- QUEIRAZZA G. e GUZZI L. (a cura di), *Radioecologia e Chernobyl. Analisi dei processi di trasferimento e distribuzione dei radionuclidi nell'ecosistema padano*, in «Acqua Aria», Milano, 1987, pp. 797-887.
- SIMONINI G., *Correnti atmosferiche e loro vicissitudini nel periodo interessato al rilascio di sostanze contaminanti dalla centrale nucleare di Chernobyl (Ucraina)*, Bologna, Serv. Meteorol. Regionale, Nota tecnica, giugno 1986.
- STRAUS B. e GROS J.M., *Information sur l'accident de Chernobyl*, in «La Météorologie», Parigi, n. 15, 1986, pp. 14-15.
- USSR STATE COMMITTEE ON THE UTILIZATION OF ATOMIC ENERGY, *The Accident at the Chernobyl nuclear Power Plant and its Consequences, Report to IAEA Expert Meeting, Vienna 25-29 August 1986*.
- VIGNOLI A., *Le renne avvelenate*, in «Oggi Natura», Milano, 1987, n. 1, pp. 107-117.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION, *Chernobyl Reactor Accident*, Report of a Consultation 6 May 1986, WHO, Regional Office for Europe, Copenhagen, 1986 (traduz. ital. in «Nuovi Argom. di Medic.», Milano 1986, pp. 229-252).
- ZANELLA G., *Aspetti bioclimatici dell'ambiente urbano*, in «Atti del Secondo Seminario Internazionale di Geografia Medica, Ambiente urbano e qualità della vita, Cassino, 1985», pp. 303-322.
- ZANELLA G., *Lo scenario meteorologico*, in *Chernobyl e Salute*, Centro Studi e Ricerche sulla Nutrizione e sugli Alimenti, Università degli Studi di Parma, Ed. Mattioli, 1987, pp. 17-23.
- ZANELLA G., *L'aria come fattore geografico: il caso esemplare di Chernobyl*, in «Atti Conv. Epidemiologia in Italia, Trento, 1987», I, pp. 31-64.
- ZWATZ-MEISE V., *Tschernobyl: Satellitenbilder als Hilfsmittel zur raschen Abschätzung der Bewölkungsverhältnisse längs der Zugbahnen radioaktiv belasteter Luft (26. April bis 1. May 1986)*, in «Wetter und Leben», Vienna, vol. 38, n. 3, 1986, pp. 169-175.

ATMOSPHERIC POLLUTION IGNORES THE FRONTIERS: THE EXEMPLARY EVENT OF ČERNOBYL'. — On the basis of meteorological data, the present work reconstructs the atmospheric transport path, the dispersion and the processes of dry and wet deposition of radioactive material released as a result of the Černobyl' accident. The chronological and geographical behaviour of the trajectories of the radioactive cloud over Europe is analysed. The air and ground-level contamination that occurred in Italy is given particular attention, especially as far as its northern regions are concerned. As far as this subject is concerned, the relationship between height of site and occurrence of precipitations and concentration of radionuclides in the air and at ground-level, respectively, is discussed. In the concluding remarks, the role of the air as an important geographical factor and the need to plan safety precautions against nuclear power accidents at world-wide level are underlined.

Università di Parma, Istituto di Scienze Geografiche e Istituto e Osservatorio Meteorologico dell'Università.