

# **Modelli Matematici applicati al lago più contaminato del pianeta**

Annamaria Mazzia

Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate

Università degli Studi di Padova

via Belzoni 7 - 35131 Padova - ITALY

Seminario presso il Dipartimento di Informatica dell'Università di Venezia

27 marzo 2003

## Sommario

Il lago Karachai, situato negli Urali del Sud, in Russia, fu utilizzato per immagazzinare residui radioattivi provenienti da esperimenti nucleari e come discarica dei rifiuti liquidi radioattivi della vicina centrale nucleare di Mayak, attiva per oltre quarant'anni.

Nel 1997 ha avuto inizio il progetto RaCoS (*Radionuclide Contamination of Soil and groundwater at the Lake Karachai waste disposal site (Russia) and the Chernobyl accident site (Ukraine): field analysis and modelling study*) finanziato dalla Comunità Europea, guidato dall'Università di Padova, avente come partners il Centro per Studi Avanzati, Ricerche e Sviluppo (CRS4) della Sardegna, l'Università di Delft, l'Istituto Minerario di San Pietroburgo e l'Accademia Nazionale delle Scienze dell'Ucraina. Nei tre anni della durata del progetto, è stato elaborato uno studio teorico e modellistico del movimento di sostanze radioattive che per immissione diretta o per il fenomeno della ricaduta radioattiva (*fallout*), sono penetrate nel terreno, inquinando sia il suolo che le falde acquifere per l'approvvigionamento idrico delle popolazioni limitrofe.

I modelli matematici che traducono il fenomeno fisico del flusso e trasporto di sostanze radioattive, supportate da robusti ed efficaci algoritmi di risoluzione numerica, sono potenti strumenti predittivi per l'evoluzione dell'inquinante e per la pianificazione di strategie di bonifica e recupero dei suoli contaminati.

Nel caso del lago Karachai, perdite e infiltrazioni hanno causato la formazione di un pennacchio di inquinante che, muovendosi verso le aree di ricarica delle falde, diventa una seria minaccia per l'approvvigionamento di acqua potabile.

## 1 Il luogo più contaminato del pianeta

Nessuno sa niente di noi,

C'è stato Chernobyl, ma lì è Europa.

Le radiazioni raggiunsero l'Europa, e tutto il mondo fu messo in subbuglio.

Ma noi, qui nelle foreste sconosciute della Russia?

Nessuno sa niente di noi,

nessuno, nel mondo, si interessa del destino

che ha chiuso le nostre vite in questo luogo.

Farida Shaimardanova, insegnante di Muslyumovo

Quando, dopo il *successo* americano di Hiroshima e Nagasaki, ebbe inizio il programma per la creazione di armi nucleari da parte di Stalin, plutonio e tritio furono prodotti in tre *luoghi fortificati*, vale a dire in tre zone della Russia, ognuna delle quali costituita da impianti nucleari e da città *chiuse* dove gli abitanti vivevano in relegazione forzata. Queste città non appaiono nelle mappe geografiche e fino a pochi anni fa era proibito viaggiare da e verso questi luoghi. Inoltre, solo dal gennaio del 1991 è stato permesso anche ai visitatori stranieri di poter accedere ad alcuni di questi luoghi (alcuni, non tutti). Ciascuna di queste città ha un nome seguito da un numero che indica un indirizzo di ufficio postale, ma spesso sono conosciute con altri nomi. Si tratta di Chelyabinsk-40, vicino a Kyshtym; Tomsk-7 in Siberia, e Dodonovo-27, tra Dodonovo e Krasnoyarsk, sempre in Siberia.

Noi ci soffermiamo sul complesso ufficiale noto come Chelyabinsk-40, nella provincia di Chelyabinsk, sul fianco orientale degli Urali del Sud, a 15 km a est della città di Kyshtym, in un'area di circa 90 km<sup>2</sup>. È situato in una regione di laghi (i maggiori sono il Kyzyltash e l'Irtyash) e attraversato dal fiume Techa. Oltre a Chelyabinsk-40 qui è stata costruita anche Chelyabinsk-65, zona militare-industriale e di forza-lavoro. Nel 1955, subito dopo l'apertura del Lawrence Livermore National Laboratory negli Stati Uniti, fu costruita un'altra città conosciuta come Chelyabinsk-70, laboratorio di esperimenti fisici collegati alla produzione di Chelyabinsk-40.

Chelyabinsk-40 è meglio noto come Mayak (parola che significa *faro*): fu costruito a partire dal 1945 e reso operativo per la produzione di plutonio già dal giugno del 1948. La prima bomba atomica sovietica, fatta esplodere nell'agosto del 1949, giusto in tempo per il settantesimo compleanno di Stalin, fu costruita utilizzando plutonio prodotto a Mayak.

Tutta la zona che è legata a Mayak è stata definita come la zona più contaminata del pianeta.

Per oltre sei anni, fino al 1951, scorie liquide radioattive di medio e alto livello vennero sistematicamente rilasciate in enormi quantità dalla centrale di Mayak nel fiume Techa, l'unica risorsa idrica per i 24 villaggi che si affacciavano lungo il fiume, esponendo alla contaminazione radioattiva più di centomila abitanti della zona. I quattro villaggi più

popolati e più esposti alle radiazioni non sono stati mai evacuati e solo recentemente (dopo 35 anni di silenzio) le autorità hanno svelato i motivi per cui avevano proibito l'accesso al fiume con una rete di filo spinato lungo le sue rive.

C'è da dire, inoltre, che nel primo periodo di apertura e avvio dell'impianto, non ci fu un controllo della radioattività nemmeno nelle fasi di produzione stessa. Durante il primo anno, gli operai ricevettero una dose media di radioattività pari a 93.6 rem - tre volte gli standards che furono decisi successivamente e che erano comunque alti, cioè 30 rem per anno. Ora questi standards sono di 5 rem per anno, sebbene negli Stati Uniti vogliono abbassare ancora la soglia a 2 rem all'anno.

Nel 1951, la radioattività del fiume Techa raggiunse l'oceano Artico, sebbene il 99% del materiale radioattivo era depositato nei primi 35 km dalla centrale di Mayak. Questa scoperta portò ad un cambiamento nella politica della discarica del materiale radioattivo. Perciò fu proibito l'uso dell'acqua del fiume e dei suoi affluenti per uso umano e alcuni abitanti furono evacuati da quelle zone. Furono costruite dighe e riserve artificiali in modo da evitare che la radioattività fosse portata via dalle zone più contaminate, e gli scarichi dell'impianto furono rilasciati sempre più nel lago Karachai, senza sbocchi diretti nell'oceano, piuttosto che nel fiume.

Nel 1957 un serbatoio di sedimenti radioattivi esplose, irradiando di plutonio una regione di 23.000 chilometri quadrati (più o meno quanto la Toscana). Secondo solo a Chernobyl, è stato uno dei più grandi incidenti nucleari della storia. Per motivi militari, la notizia non venne diffusa e solo alcuni villaggi furono evacuati (ma erano già passati oltre dieci giorni) e trasferiti in zone limitrofe comunque a rischio radioattivo. Tutti gli altri furono lasciati all'oscuro del pericolo che stavano vivendo.

Dieci anni dopo, avvenne il terzo disastro.

Durante un periodo di siccità, il lago Karachai si ritirò parzialmente - era l'estate del 1967 - lasciando tutto intorno a sé della melma altamente radioattiva che, dopo essersi seccata, fu portata via dal vento. Dal lago si sollevò dunque polvere radioattiva che ricoprì un'area di oltre duemila chilometri quadrati (per fare un confronto, circa la metà della Valle d'Aosta).

In termini di radioattività rilasciata durante questi disastri (e per avere un'idea di quanto grandi siano stati) facciamo un confronto con il rilascio di radioattività avvenuto

a Chernobyl, o in seguito alla bomba di Hiroshima. I dati sono in tabella - 1 TBq = 1 TeraBequerel corrisponde a  $2.7 \times 10^{-11}$  Curie (Ci):

	TBq
Mayak: rilascio totale di radionuclidi nel lago Karachai	20.000.000
Attività della bomba su Hiroshima dopo 12 ore dall'esplosione	5.550.000
Presente attività del lago Karachai	4.400.000
Incidente di Chernobil del 1986	1.850.000
Incidente di Mayak del 1957	740.000
Scarico di sostanze radioattive nel fiume Techa	100.000
Polvere radioattiva sparsa dal lago Karachai nel 1967	22

## 1.1 Effetti della Radioattività

Oggi la radioattività del lago Karachai è tale che basta un'ora lungo le sue sponde per ricevere una dose letale di radiazioni. Allo stesso modo, il fiume Techa continua ad avere 400 milioni di metri cubi di acqua radioattiva a cielo aperto: un pesce pescato nelle sue acque è 100 volte più radioattivo del normale.

Come risultato del deliberato o accidentale rilascio di materiale radioattivo nell'ambiente circostante, coloro che lavorano nell'impianto di Mayak e le popolazioni circostanti sono state esposte ad un totale di radiazioni e di materiale radioattivo davvero incredibile. In molti casi, le dosi ricevute sono confrontabili con quelle ricevute dai superstiti di Hiroshima e Nagasaki. Circa 272.000 persone sono state esposte a radiazioni di alto livello. Le risorse idriche per 124.000 persone sono state contaminate con isotopi radioattivi di alto livello (come plutonio, strozio-90 e cesio-137). Nel 1992, l'Istituto di Biofisica per il ministero della salute in Russia ha compilato un rapporto nel quale ha dichiarato che 28.000 persone sono "severamente irradiate" dagli scarichi di Mayak, 8015 sono morti in conseguenza dell'esposizione alle radiazioni e 935 soffrono di malattie croniche dovute alle radiazioni. C'è stato un aumento del 78% di malati di leucemia e un aumento di persone che muoiono di cancro - in particolare, cancro del sistema digestivo, pelle, ossa, polmoni. Il 30% dei bambini nasce con difetti e malformazioni genetiche, malattie del sistema nervoso, al cuore. Il 50% degli uomini e delle donne sono sterili.

Una o due volte all'anno, gli abitanti di queste aree colpite dalle radiazioni erano chiamati per dei controlli medici nel centro di ricerca degli Urali a Chelyabinsk. Fino agli anni novanta nessuno di loro sapeva i motivi per cui erano chiamati a questi controlli medici. Il governo, invece, sapeva che gli incidenti di Mayak avevano esposto gli abitanti dei villaggi a radiazioni fortemente pericolose e sapevano che ne stavano pagando le conseguenze, ma, invece di informare gli abitanti, metteva al corrente dei dati di cui era in possesso centri di ricerca in Giappone, Stati Uniti, Germania, Francia e Svezia.

Se la popolazione fosse stata evacuata immediatamente dalle zone contaminate, forse avrebbero avuto una possibilità di riabilitazione fisica. Ora non ci sono rimedi se non palliativi medici contro le infiammazioni e i dolori, vitamine e fisioterapia - e questa situazione si è ulteriormente aggravata con il collasso dei servizi pubblici nell'epoca post sovietica. Perciò, la regione di Chelyabinsk, con 32 milioni di abitanti, vede oltre 1 milione e mezzo di abitanti colpiti dalle radiazioni.

## 1.2 Vivere a Mayak

Muslyumovo è uno dei villaggi contaminati già dagli anni in cui il materiale radioattivo veniva direttamente scaricato nel fiume Techa. Il villaggio non fu mai evacuato e la maggior parte dei suoi abitanti ha contratto malattie correlate alle radiazioni. Si trova a circa 40 km da Mayak ed è il villaggio più contaminato del pianeta: l'acqua del fiume è talmente radioattiva che i pesci sono scomparsi... Per altri questo posto è unico per la possibilità di studiare gli effetti delle radiazioni sulla vita umana nel corso di mezzo secolo...

Dopo l'incidente di Mayak, gli ufficiali di polizia andarono nel campo dove lavorava Wafir Gusmanov e gli ordinarono di aiutarli a pulire il banco del fiume. Il ponte era rotto e lui guidò il suo trattore tra le acque del fiume varie volte. Dopo, i poliziotti gli bruciarono i vestiti ma non ci fu una decontaminazione nè di Wafir nè del suo trattore. Wafir Gusmanov ha contratto una malattia alle ossa che le ha rese dure e fragili: può camminare sulle stampelle solo per brevi distanze e deve stare sulla sedia a rotelle quasi tutta la giornata.

Anna Fedorova si trasferì in un villaggio nei pressi di Mayak proprio nel 1957, pochi mesi prima dell'esplosione al complesso nucleare: è diventata cieca e soffre di diabete, il

cui sviluppo è correlato alla radiazione.

Le persone che soffrono per la contaminazione non muoiono necessariamente in tempo brevi, però possono trasmettere geni modificati a generazioni future... Di tanti aborti spontanei avvenuti a Muslyumovo, quasi tutti sono feti con grosse anomalie.

Non tutti i bambini che nascono sono malati. Molti di loro sono sani, ma tanti altri nascono con handicap fisici o mentali. Arrivati all'età scolare non sono ammessi a causa del loro handicap mentale. Altri sono sottoposti a vari interventi chirurgici per poter usare braccia e gambe, anche se i loro movimenti saranno comunque sempre limitati. C'è anche una discoteca nel villaggio - una sala messa a disposizione dalla comunità, scarna e povera. I giovani vogliono andar via dalla regione a causa dell'inquinamento nucleare, della povertà e dei problemi sociali. Tutti i villaggi della zona di Mayak sono tra i primi posti in Russia per i consumi di stupefacenti; la droga viene addirittura venduta sui posti di lavoro. Il crimine è aumentato a causa della situazione economica disastrosa: una ragazza che aveva avuto la fortuna di trovare un lavoro lontano da Mayak è stata poi derubata e uccisa in casa.

Gli abitanti di Muslyumovo ricevono ogni mese una piccola somma come *risarcimento danni*, ma se lasciano il villaggio perdono anche questo.

Anni fa, si era deciso di trasferire il villaggio da un'altra parte ma i fondi necessari per avviare il progetto non si sono mai visti.

Le città come Muslyumovo continuano ad essere città chiuse, la gente è destinata a vivere e a morire in luoghi come questi.

Anche i divieti di pescare nel fiume Techa o di raccogliere funghi non sono più tenuti in considerazione: le mucche continuano a pascolare, la gente raccoglie funghi e frutta e se li mangia, pur sapendo che sono contaminati. Il governo aveva promesso che la zona sarebbe stata bonificata e che entro 30 anni l'acqua sarebbe stata di nuovo potabile. I 30 anni sono passati e non si è fatto niente. Queste terre verdi e in apparenza *normali* devono aspettare ancora 240.000 anni prima che passi il pericolo del plutonio, se non si interviene in qualche altro modo prima... I bambini sono tornati a nuotare nelle acque del Techa, come i loro genitori nella loro infanzia. Non si prende più l'acqua per cucinare, come quando gli abitanti del villaggio erano tenuti all'oscuro delle radiazioni, ma anche l'acqua del rubinetto è radioattiva...

### 1.3 Mayak oggi

Anche se molti dei reattori di produzione presenti a Mayak non sono più operativi, Mayak rimane ancora un centro per riprocessare le scorie atomiche provenienti dalle centrali, dai reattori di ricerca, e dalla flotta atomica russa. Il plutonio è separato dal combustibile nucleare spento. Inoltre, Mayak possiede un impianto per il trattamento delle scorie radioattive con immagazzinamento provvisorio e strutture per la produzione di combustibile di Ossido Misto (MOX) e per la vetrificazione di scorie liquide radioattive.

Decine di sommergibili nucleari sono abbandonati nelle rade segrete dell'Artico e del Pacifico, trasformati in rottami contaminati che non si sa più come neutralizzare. L'accordo internazionale ha previsto la demolizione di 160 sottomarini atomici con capitali americani e norvegesi, i più esposti alla contaminazione dell'Artico. I lavori vanno però a rilento nel recupero dei reattori nucleari (con una nuova minaccia di contaminazione degli oceani). Una volta estratto il reattore, esso viene messo in un apposito contenitore a prova di radiazioni, il cui carico è trasferito su uno speciale vagone ferroviario che lo trasferirà fino a Mayak in un viaggio lungo 4.000 km che attraversa mezza Russia, dall'Artico agli Urali. Tutto si svolge nel massimo segreto. Il riciclaggio e la riconversione delle scorie radioattive sono operazioni estremamente costose che i russi non sono in grado di sostenere. Presumibilmente, a Mayak c'è un crescente accumulo di scorie non trattate. A Mayak è in costruzione un deposito dove verranno conservate 50 tonnellate di plutonio, estratto dalle testate nucleari russe. La costruzione del deposito è finanziata dagli Stati Uniti, ma non si conosce nè la data di ultimazione nè quella di entrata in funzione.

Nel lago Karachai si sta cercando di calare sul fondo blocchi di cemento per evitare che il vento risollevi la polvere contaminata nei periodi di secca. Se il materiale radioattivo presente nell'acqua del lago Karachai raggiungesse il sistema idrico del fiume Irtysh, la contaminazione potrebbe raggiungere anche l'oceano Artico. Il pennacchio di inquinante si sta muovendo dal lago verso il sistema dell'Irtysh ad una velocità di 80 metri all'anno...

La minaccia di una nuova catastrofe per i cittadini della regione di Mayak, si è prospettata nel 2001, quando il ministero dell'Industria Atomica (MINATOM) della Russia ha offerto la centrale di Mayak come luogo di scarico di scorie e rifiuti radioattivi provenienti da potenziali clienti come Germania, Gran Bretagna, Svizzera, Spagna, Giappone, Corea

del Sud, Taiwan - con la prospettiva di ricevere 20 milioni di tonnellate di combustibile nucleare esaurito, per un totale di 20 miliardi di dollari. A fine maggio del 2002, questi piani per il trasporto, l'immagazzinamento e il riprocessamento del combustibile nucleare esaurito provenienti da paesi stranieri sono stati respinti dal corpo regolatore della Russia per la sicurezza nucleare. Come si legge nella lettera scritta in data 25 maggio 2002, le ragioni sono le seguenti: *le possibilità tecniche che dovrebbero garantire l'appropriata amministrazione delle scorie radioattive in accordo con le richieste normative e legislative approvate nel campo dell'uso dell'energia nucleare, della sicurezza radioattiva per la popolazione e per la protezione dell'ambiente sono assenti. Manca il necessario equipaggiamento per il trattamento e la vetrificazione delle scorie radioattive (gli esperimenti effettuati nella fornace di vetrificazione sono insoddisfacenti). Tutto ciò rappresenta una conferma dell'impossibilità di accettare il combustibile nucleare spento dai paesi stranieri per il loro riprocessamento, senza una modernizzazione generale dell'impianto di Mayak.*

## 2 Progetto RaCoS

Nel 1997 ha avuto inizio il progetto RaCoS (*Radionuclide Contamination of Soil and groundwater at the Lake Karachai waste disposal site (Russia) and the Chernobyl accident site (Ukraine): field analysis and modelling study*) finanziato dalla Comunità Europea, guidato dall'Università di Padova e aventi come partners il CRS4 della Sardegna, l'Università di Delft, l'Istituto Minerario di San Pietroburgo e l'Accademia Nazionale delle Scienze dell'Ucraina. Nei tre anni della durata del progetto, si è fatto uno studio teorico e modellistico del movimento di sostanze radioattive che per immissione diretta o per il fenomeno della ricaduta radioattiva (*fallout*), sono penetrate nel terreno, inquinando sia il suolo che le falde acquifere per l'approvvigionamento idrico delle popolazioni limitrofe.

I modelli matematici che traducono il fenomeno fisico del flusso e trasporto di sostanze radioattive, supportate da robusti ed efficaci algoritmi di risoluzione numerica, possono essere dunque usati come potenti strumenti predittivi per l'evoluzione dell'inquinante e per la pianificazione di strategie opportune per la bonifica e il recupero dei suoli contaminati. Nel caso del lago Karachai, infatti, perdite e infiltrazioni hanno causato la formazione di

un pennacchio di inquinante che, muovendosi verso le aree di ricarica delle falde, diventa una seria minaccia per l'approvvigionamento di acqua potabile.

I principali obiettivi del progetto RaCos (con particolare riferimento al lago Karachai) sono:

- caratterizzare il sito contaminato
- implementare appropriate tecniche di teoria e modellizzazione numerica dei più rilevanti processi chimici e fisici, in modo da approfondire le caratteristiche dei contaminanti radioattivi e il processo che controlla la loro espansione, e per accertare la situazione presente e predire quella futura rispetto all'area contaminata, in ordine alla valutazione di misure di contenimento e di recupero delle risorse del sottosuolo della zona del lago Karachai.

A tal fine, la scelta di codici e software (opportunamente calibrati, validati e testati) servono per la simulazione numerica dei modelli che traducono "numericamente" i modelli matematici che descrivono il fenomeno, in modo da poter valutare lo spostamento del pennacchio radioattivo, determinare l'impatto sulla qualità delle acque sotterranee e determinare un'analisi di strategie di recupero del lago Karachai e di protezione dei laghi vicini a rischio di contaminazione.

Nell'ambito del progetto, le maggiori difficoltà incontrate sono state il recupero, l'analisi e l'organizzazione delle informazioni e dei dati disponibili; l'esecuzione di appropriati esperimenti; la selezione, la calibrazione e il confronto di codici per la risoluzione numerica del modello matematico e, infine, la simulazione degli scenari più "probabili" per una corretta predizione dello spostamento e della migrazione dei radionuclidi.

## **2.1 Il movimento dei nitrati radioattivi**

Lo studio del fenomeno della radioattività del lago Karachai è strettamente collegato alla simulazione del movimento dei nitrati che trascinano con sé i radionuclidi, infiltrandosi dal lago nell'aquifero Quaternario che circonda, appunto, il lago, con la minaccia di contaminare i fiumi che si trovano nella zona stessa (il Mishelyak è quello a più alto rischio di contaminazione).

Il pennacchio contaminato si muove dal lago verso il sistema del fiume Irtysh ad una velocità di 80 metri/anno. Una volta raggiunto, l'Irtysh la contaminazione potrebbe propagarsi fino all'Oceano Artico. Il pennacchio è costituito principalmente di nitrati che, essendo più pesanti dell'acqua, si spostano verso il basso per effetto della gravità e si allargano lateralmente per effetto del regime di flusso regionale. A causa della forte densità dei nitrati, gli effetti di gravità introducono instabilità nel regime di flusso causando *fingering* nella concentrazione del pennacchio. La direzione principale del flusso è verso il basso e gli inquinanti tendono ad accumularsi sul fondo dell'aquifero. Un'analisi dei dati monitorati mostra che il pennacchio è di forma ellissoidale vedendolo in un piano mentre la direzione preferenziale di flusso dei nitrati è molto diversa dalla direzione naturale del gradiente di flusso regionale.

Una sezione verticale della zona circostante il lago Karachai ci mostra come esso sia collocato dentro il bacino delle valli dei fiumi Techa e Mishelyak, valli che sono poi l'area di scarico delle acque sotterranee dal lago Karachai.

C'è inoltre da tenere presente che in superficie, i contaminanti radioattivi del Karachai non legati ai nitrati pesanti si muovono principalmente per infiltrazione dell'acqua attraverso i depositi del fondo del lago e attraverso le rocce sottostanti. Quest'acqua non segue il percorso del pennacchio, che è molto più denso, ma segue il flusso principale dell'aquifero, muovendosi in direzione del Mishelyak. In tal caso i radionuclidi non sono controllati attraverso il movimento del pennacchio dei nitrati, il che rende più difficile il controllo del flusso dei radionuclidi verso il fiume. I nitrati tendono a muoversi verso la parte bassa dell'aquifero mentre i radionuclidi che non sono legati ai nitrati, più leggeri, tendono a muoversi in zone più alte verso il Mishelyak. Quindi misure protettive anche per l'acqua di superficie devono essere necessariamente prese in considerazione.

Un'altra difficoltà che bisogna considerare è che nessuno fino ad ora ha studiato (con la creazione di appositi pozzi) la situazione che c'è al di sotto dell'aquifero Quaternario. Per il modello e gli studi fatti la zona sottostante è assunta impermeabile, ma in realtà non è detto che lo sia...

## 2.2 Modello matematico e approccio numerico

Il modello matematico che traduce il fenomeno legato al lago Karachai tiene conto della dinamica dei nitrati. Dal momento che i nitrati influiscono sulla densità del fluido e che la dispersione idrodinamica dipende dal campo locale delle velocità e dal gradiente della concentrazione dei nitrati, il modello matematico è rappresentato da un sistema accoppiato di flusso e di trasporto advettivo-dispersivo dei nitrati:

$$\sigma \frac{\partial \psi}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \left[ K_s \frac{1 + \epsilon c}{1 + \epsilon' c} K_r (\vec{\nabla} \psi + (1 + \epsilon c) \eta_z) \right] + \quad (1)$$

$$- \phi S_w \epsilon \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\rho}{\rho_0} q^* + q$$

$$\vec{v} = -K_s \frac{1 + \epsilon c}{1 + \epsilon' c} K_r (\vec{\nabla} \psi + (1 + \epsilon c) \eta_z) \quad (2)$$

$$\phi \frac{\partial S_w c}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (D \vec{\nabla} c) - \vec{\nabla} \cdot (c \vec{v}) + q c^* + f \quad (3)$$

dove (1) è l'equazione del flusso, (2) è la velocità di Darcy (il campo delle velocità) mentre (3) è l'equazione di trasporto.  $\psi$  rappresenta la pressione,  $\vec{v}$  la velocità e  $c$  la concentrazione del contaminante (dei nitrati che trascinano contaminanti radioattivi).

Il sistema è fortemente accoppiato: sono presenti non linearità nelle equazioni e non è possibile trovare soluzioni analitiche del sistema stesso. Un'altro motivo di non linearità è dovuto alla velocità che dipende dalla dispersione idrodinamica e al trasporto advettivo. Le simulazioni numeriche devono permettere, dunque, di valutare accuratamente il campo delle velocità e la parte advettiva dell'equazione del trasporto in modo da poter ottenere accurate simulazioni del movimento dei nitrati.

A tal fine, per verificare l'affidabilità dei codici tridimensionali - durante il corso del progetto sono nati dei dubbi sugli effetti della diffusione numerica necessariamente introdotta per mantenere la stabilità, in questi codici - e per verificare se la dispersione artificiale e possibili presenze di concentrazioni negative (anche se piccole in valore assoluto) potessero drasticamente influenzare la simulazione del movimento dei contaminanti, si è deciso di sviluppare un codice bidimensionale altamente accurato in modo da verificare i risultati dei codici tridimensionali. La combinazione degli Elementi Finiti Misti e dei Volumi Finiti ha permesso di creare un codice bidimensionale altamente accurato, con l'introduzione di

minima diffusione numerica, capace di garantire stabilità e di non introdurre valori negativi delle concentrazioni.

I risultati numerici bidimensionali, confrontati con quelli ottenuti dai codici tridimensionali su analoghe sezioni verticali, indicano che il fronte dispersivo introdotto globalmente dai codici tridimensionali non influenzano in maniera drammatica il comportamento qualitativo globale del pennacchio. Da un punto di vista quantitativo, è necessario imporre maggiore accuratezza possibile e questo può essere dato utilizzando in maniera interattiva l'approccio tri- e bi- dimensionale.

## **2.3 Strategie di contenimento**

Per quanto riguarda strategie di contenimento, tecniche per ridurre la radioattività e impedire che la contaminazione raggiunga il Mishelyak sono abbastanza difficili da pronosticare e da attuare. La misura più drastica di "pompate e trattare" l'acqua è quella più difficile da realizzare nella pratica. Altre misure potrebbero essere quella di pompare acqua contaminata dall'aquifero in modo da ridurre il potenziale del trasporto dei nitrati radioattivi. Oppure si potrebbe operare un drenaggio lungo il lato del Mishelyak in modo da controllare lo scarico dei contaminanti dal Karachai. La strategia più naturale è quella, infine, di iniettare acqua non contaminata in punti scelti opportunamente in modo da forzare il movimento dei contaminanti radioattivi a espandersi nella parte bassa dell'aquifero senza avvicinarsi al Mishelyak. Da un punto di vista pratico, i tempi per realizzare uno di questi scenari sarebbero molto lunghi e l'economia della Russia non sarebbe in grado di supportarli. Inoltre ci sarebbe bisogno di maggiori dati per poter preparare un piano di contenimento veramente realizzabile.

Tutto ciò rende più realistico e realizzabile l'approccio della naturale attenuazione del fenomeno (che richiede ovviamente tempi lunghi), operando maggiori controlli e restrizioni perchè i fiumi minacciati o contaminati non vengano utilizzati.

## **Riferimenti bibliografici**

[1] *sito ufficiale su Chelyabinsk*, <http://www.logtv.com/chelya/default.html>

- [2] *La pattumiera nucleare: tratto dalla puntata di Report, Rai 3 del 19-11-2000, ore 23*  
<http://www.report.rai.it/2liv.asp?s=2>
- [3] *dall'archivio di Greenpeace su Mayak* <http://archive.greenpeace.org/mayak/index.html>
- [4] *dall'archivio di Greenpeace sugli scarichi nucleari in Russia*  
[http://archive.greenpeace.org/~nuclear/waste/russianwaste\\_background.html](http://archive.greenpeace.org/~nuclear/waste/russianwaste_background.html)