

# Modelli Matematici applicati al lago più contaminato del pianeta

Annamaria Mazzia

Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le  
Scienze Applicate  
Università di Padova

# Sommario

- il luogo più contaminato del pianeta
  - impianto di Mayak
  - lago Karachai
  - villaggi contaminati
- progetto RaCos
  - obiettivi
  - simulazioni numeriche
  - strategie di protezione e recupero sul lago Karachai



# Mayak

Regione di Chelyabinsk,  
negli Urali del Sud,  
Russia:  
qui (e in altre due zone della  
Russia) dopo il successo  
della bomba americana su  
Hiroshima e Nagasaki  
fu costruita una città  
chiusa, destinata alla produ-  
zione di plutonio e tritio...





Città chiuse...

... città dove gli abitanti vivevano (e vivono)  
in relegazione forzata

... città che non appaiono sulle carte  
geografiche e che fino a un decennio fa  
erano irraggiungibili per i visitatori  
stranieri

... città con un nome seguito da un numero:

- Chelyabinsk-40 a 15 km da Kyshtym
- Chelyabinsk-65 altra zona militare e di forza-lavoro
- Chelyabinsk-70, laboratorio di esperimenti fisici legati alla produzione di Chelyabinsk-40.



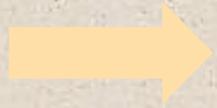
Chelyabinsk-40 è meglio nota come **MAYAK**  
parola che significa FARO.

Fu costruita a partire dal 1945.

Era operativa già dal giugno del 1948.

La prima bomba atomica sovietica, fatta esplodere nell'agosto del 1949, in occasione del 70° compleanno di Stalin, fu costruita con plutonio prodotto a Mayak.

**TUTTA LA ZONA CHE CIRCONDA MAYAK È STATA DEFINITA  
LA ZONA PIÙ CONTAMINATA DEL PIANETA.**

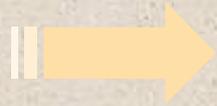


## I DISASTRI DI MAYAK

- Per oltre 6 anni, fino al 1951, scorie liquide radioattive di medio e alto livello vennero sistematicamente riversate da Mayak nel fiume TECHA – unica risorsa idrica per i 24 villaggi che si affacciavano lungo il fiume, esponendo alla contaminazione radioattiva più di 100.000 abitanti della zona.
- Nei primi anni di apertura dell'impianto, non ci fu un controllo della radioattività nemmeno nelle fasi di produzione stessa. Gli operai ricevettero una dose media di radiazioni pari a 3 volte gli standards di allora (pari a 30 rem per anno – ora questi standards sono di 5 rem per anno...)

- Nel 1951, la radioattività del Techa raggiunse l'oceano Artico (anche se il 99% del materiale radioattivo rimaneva concentrato nei primi 35 km dalla centrale di Mayak). Fu allora proibito l'uso dell'acqua del fiume e dei suoi affluenti e alcuni villaggi furono evacuati. Furono costruite dighe e riserve artificiali, e gli scarichi di Mayak vennero rilasciati sempre più nel lago KARACHAI, senza sbocchi diretti nell'oceano.
- Nel 1957, un serbatoio di sedimenti radioattivi esplose, irradiando di plutonio una regione di 23.000 Km<sup>2</sup>. Secondo solo a Chernobyl, è stato uno dei più gravi incidenti nucleari della storia.
- Nel 1967, il lago Karachai fu in secca: polveri radioattive, portate via dal vento, ricoprirono un'area di 2000 km<sup>2</sup>.

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



## EFFETTI DELLA RADIOATTIVITÀ

Un'ora lungo le sponde del lago Karachai basta per ricevere una dose fatale di radiazioni.



Il fiume Techa ha 400 milioni di metri cubi di acqua radioattiva a cielo aperto: un pesce pescato nel Techa è 100 volte più radioattivo del normale.



- **272.000** persone sono state esposte a radiazioni di alto livello
- risorse idriche per **124.000** abitanti sono state contaminate con isotopi radioattivi di alto livello
- aumento del **78%** di malati di leucemia e di cancro
- il **30%** dei bambini nasce con difetti e malformazioni genetiche
- il **50%** degli uomini e delle donne sono sterili



Dhenghiz Khazajev, Kunashak 2001.



September 2000 - BASHAKUL/RUSSIA



## Vivere vicino a Mayak: Muslyumovo



September 2001 - MUSLOMOVO/RUSSIA



September 2001 - OLD KURMUNOVARUSSIA

GREENPEACE

A circa 40 km da Mayak, il villaggio non fu mai evacuato.  
La maggior parte dei suoi abitanti ha contratto malattie legate alle radiazioni.  
È un posto unico al mondo per la possibilità di studiare gli effetti delle radiazioni sulla vita umana nel corso di mezzo secolo...



September 2001 - MUSLOMOVO/RUSSIA



©1998 Nicolai Fuglsig



September 2001 - TECHA RIVER, MUSLOMUVOIRUSSIA

## Mayak oggi

Molti reattori non sono operativi. Ma Mayak è ancora un centro per riprocessare scorie atomiche, per trattare scorie radioattive e per produrre combustibile MOX.

Nel 2001, il ministro dell'Industria Atomica Russa (MINATOM) ha offerto la centrale di Mayak come luogo di scarico di scorie e rifiuti radioattivi provenienti da paesi stranieri – 20 milioni di tonnellate di combustibile nucleare esaurito per 20 miliardi di dollari.

A fine maggio 2002, questo progetto è stato respinto dal corpo regolatore della Russia per la sicurezza nucleare.



## 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

Inizio del progetto: aprile 1997  
Chiusura dei lavori: giugno 2001  
Finanziamenti: 310,000 euro

Collaboratori

Dip. Metodi e Modelli per le Scienze Applicate - Padova

Centro Studi e Ricerche CRS4 - Cagliari

Università Tecnologica di Delft

Istituto di Geologia Ambientale dell'Accademia delle Scienze Russa – San Pietroburgo

Centro Ricerche e Sviluppo di Studi Radioecologici - Kyiv



## Obiettivi (con particolare riferimento al lago Karachai)

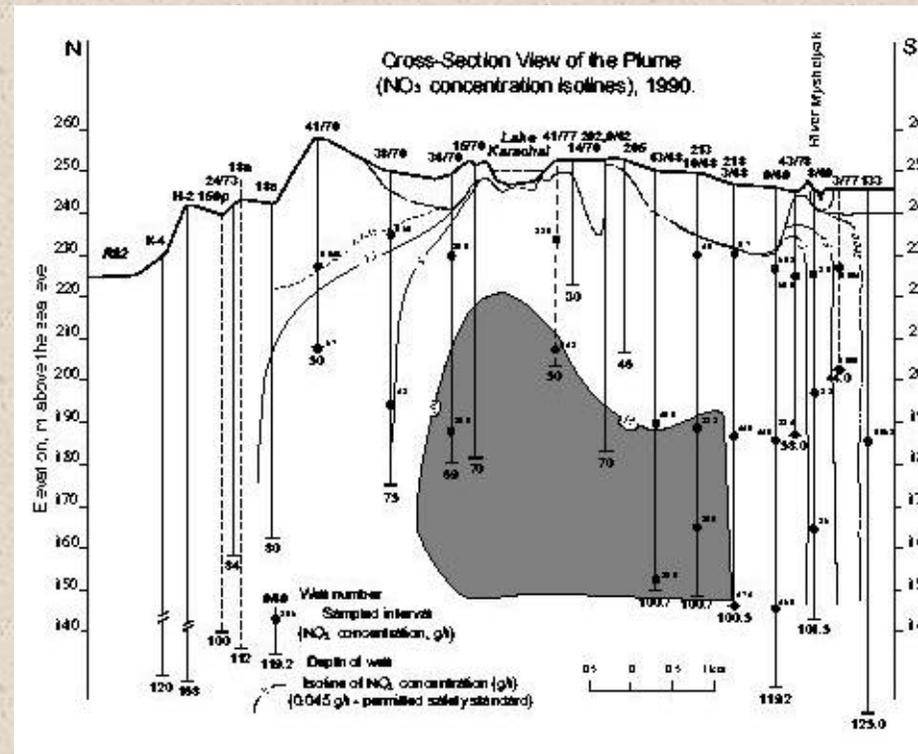
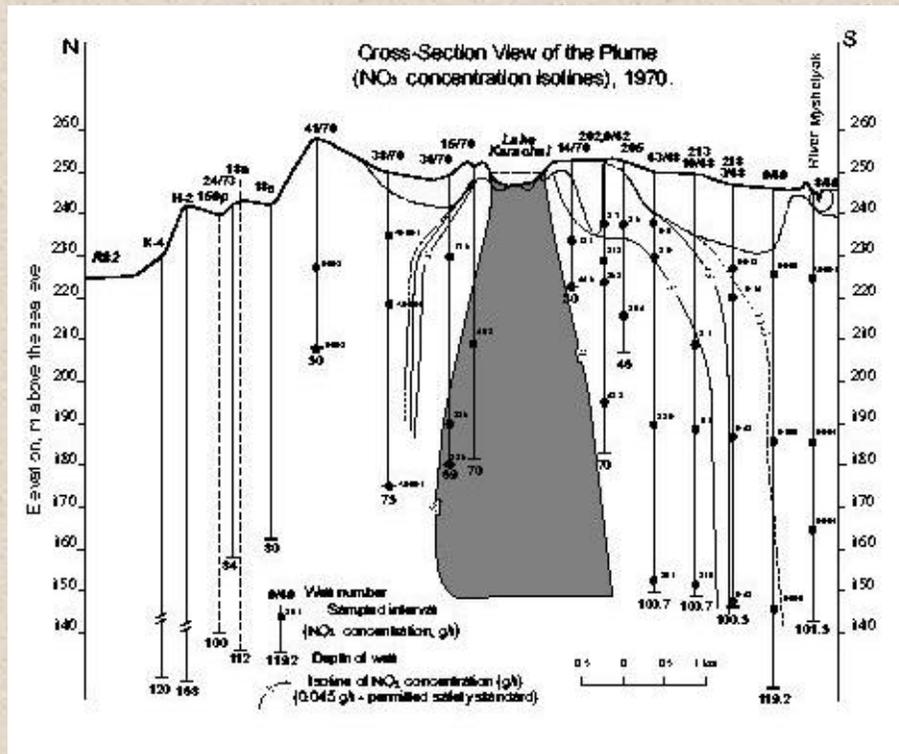
- caratterizzazione del sito contaminato
- sviluppi teorici e modellizzazione numerica dei più rilevanti processi chimici e fisici
- scelta di codici e software (calibrati, validati e testati) da applicare ai modelli numerici in modo da
  - ❖ valutare lo spostamento del pennacchio radioattivo
  - ❖ determinare l'impatto sulla qualità delle acque sotterranee
  - ❖ determinare un'analisi di strategie di protezione e di recupero del lago Karachai



## Maggiori difficoltà incontrate

- ✓ recupero, analisi e organizzazione delle informazioni disponibili
- ✓ *performance* di appropriati esperimenti
- ✓ selezione, calibrazione e confronto di codici per la risoluzione numerica del modello matematico
- ✓ simulazione degli scenari più "probabili" per una corretta predizione della migrazione dei radionuclidi

## Descrizione del processo di migrazione dei radionuclidi



Basato sul monitoraggio dei nitrati di sodio.

Il pennacchio va sul fondo dell'aquifero e migra lateralmente.

La frontiera del pennacchio si muove a sud e nord del bacino alla velocità di 70, 80 m/anno.



## Il modello matematico di flusso e trasporto

$$S \frac{\partial y}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \left[ K_s \frac{1+e c}{1+e' c} K_r (\vec{\nabla} y + (1+e c) h_z) \right] - j S_w e \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{r}{r_0} q^* + q$$

flusso



$$\vec{v} = -K_s \frac{1+e c}{1+e' c} K_r (\vec{\nabla} y + (1+e c) h_z)$$

velocità di Darcy



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



trasporto



## Simulazioni numeriche 3D

Sono stati utilizzati vari software 3D basati sulla formulazione agli Elementi Finiti di Galerkin delle equazioni alle derivate parziali che descrivono il flusso e il trasporto delle sostanze dissolte:

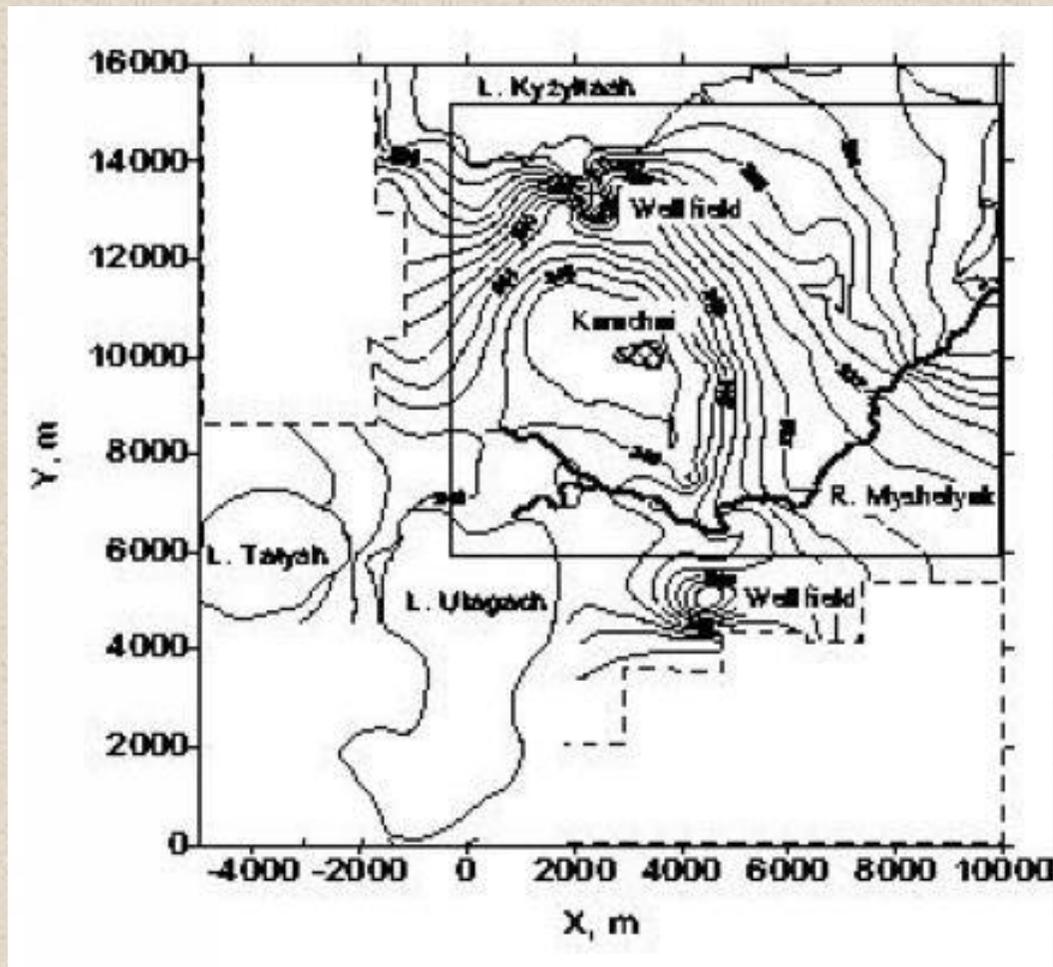
- METROPOL
- CODESA-3D
- DENSFLOW
- TOUGH2



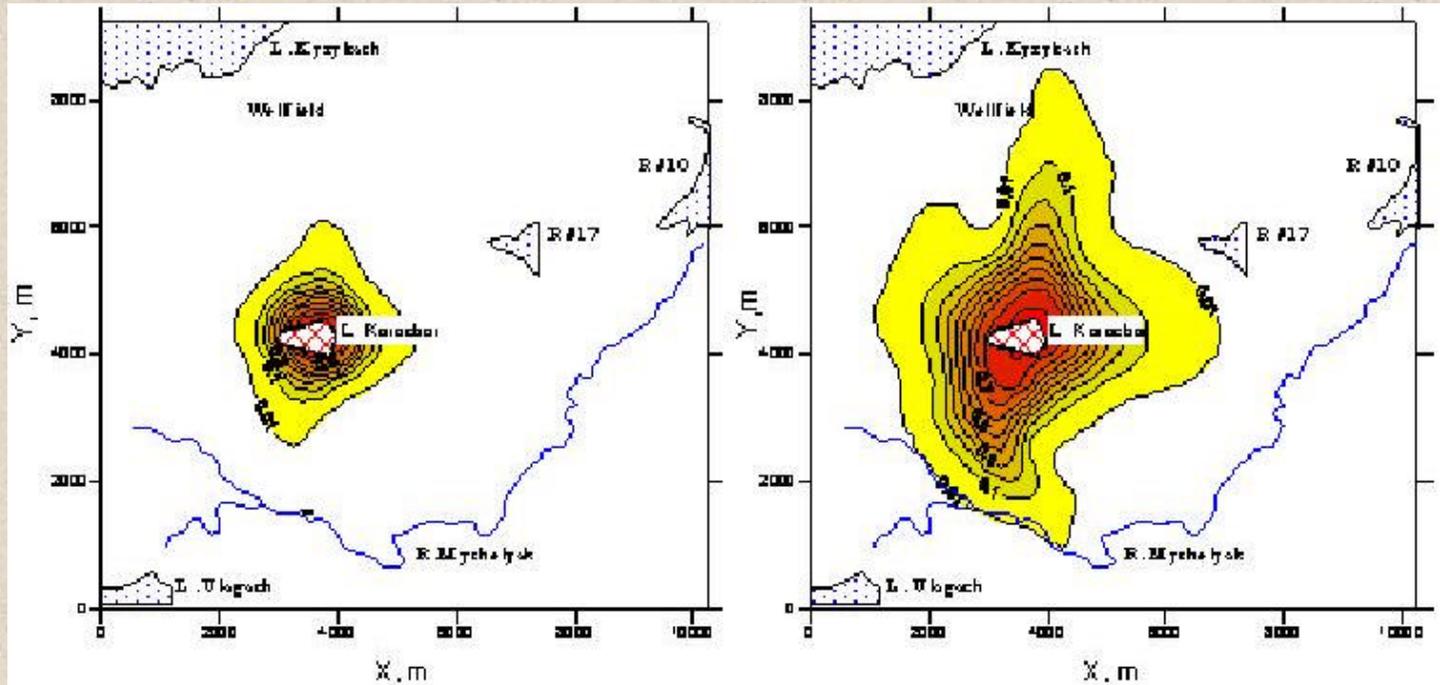
## Simulazioni numeriche 2D

Approccio basato su una tecnica agli Elementi Finiti Misti e ai Volumi Finiti, altamente accurato e robusto, al fine di verificare l'accuratezza dei modelli 3D nella simulazione del movimento del contaminante radioattivo su sezioni verticali 2D.

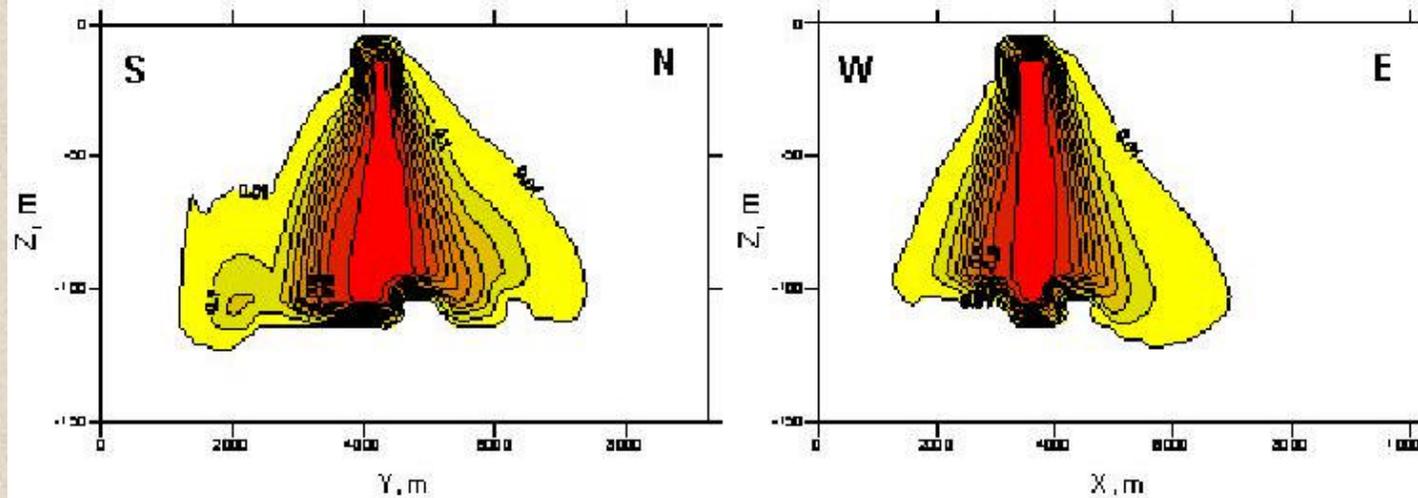
## Modello regionale del lago Karachai



Simulazione ottenuta con il codice TOUGH2 al tempo finale di 40 anni

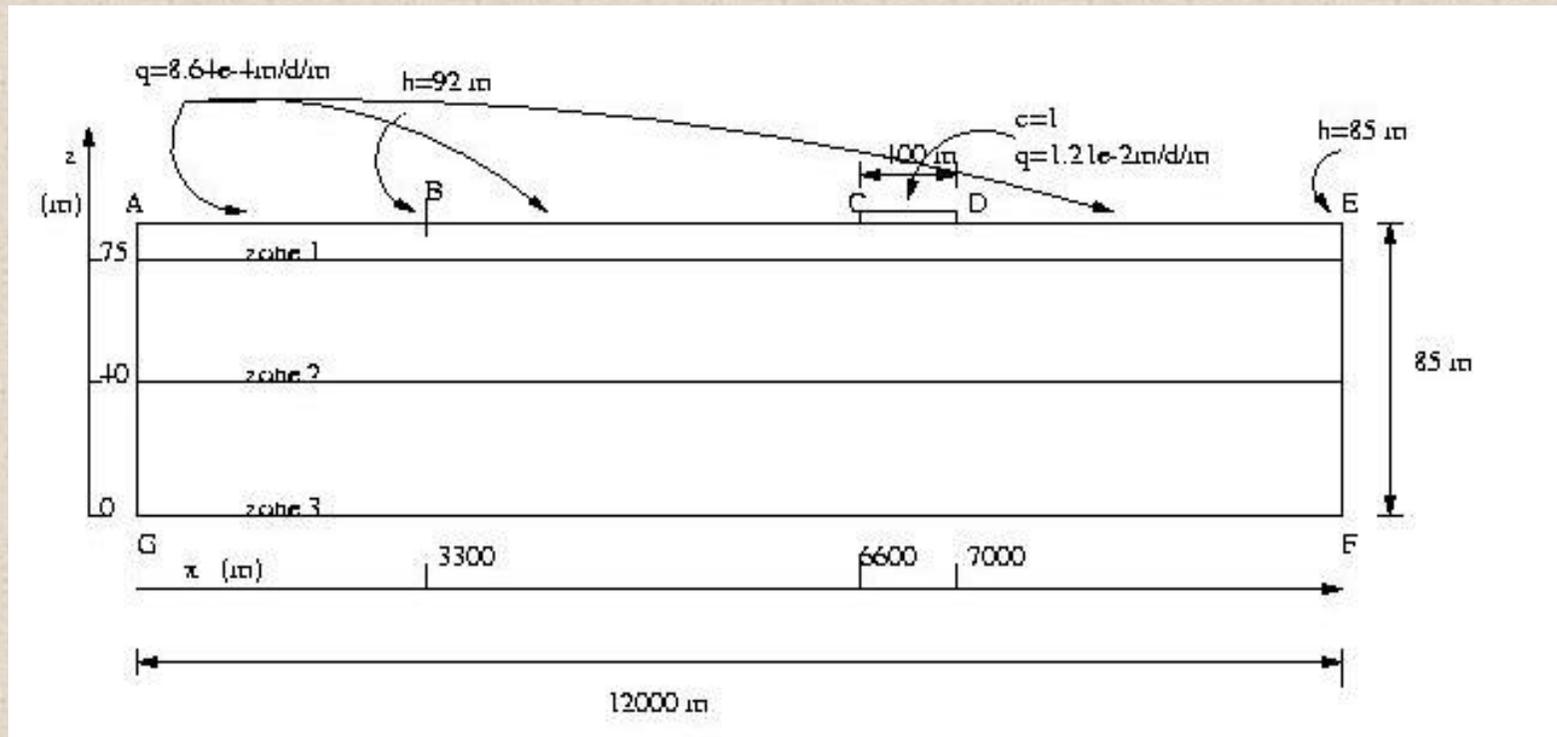


profondità:  
15 m  
(sinistra)  
90m  
(destra)



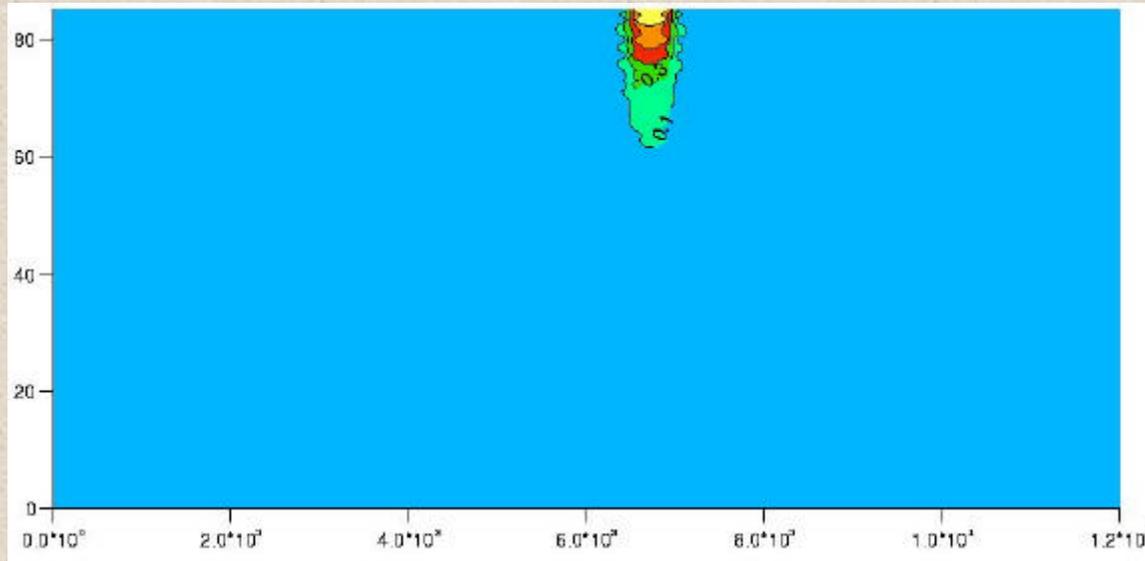
sezioni  
verticali:  
Nord-Sud  
(sinistra)  
Est-Ovest  
(destra)

# Sezione verticale 2D del lago Karachai

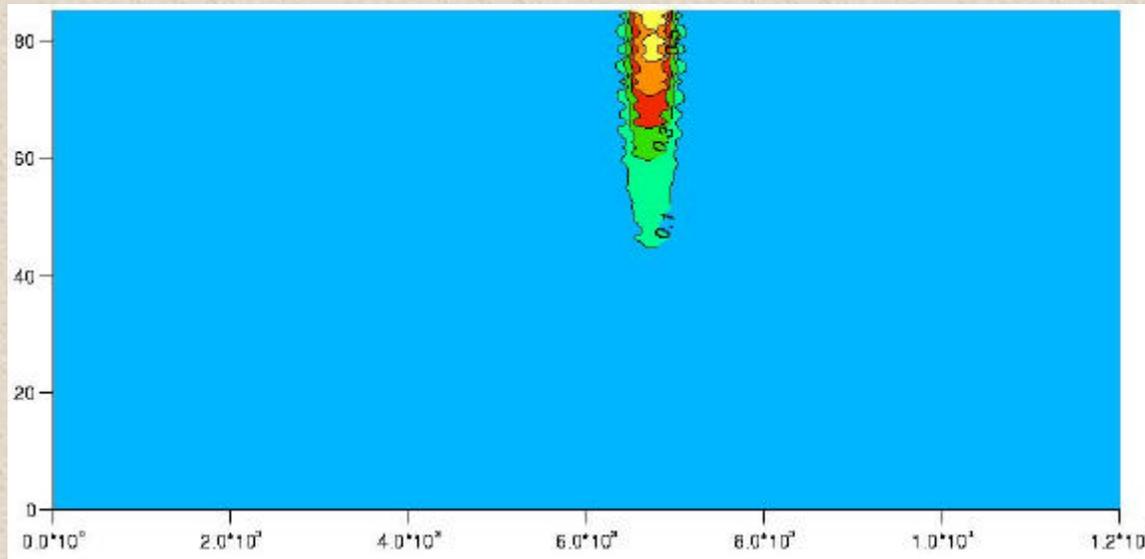




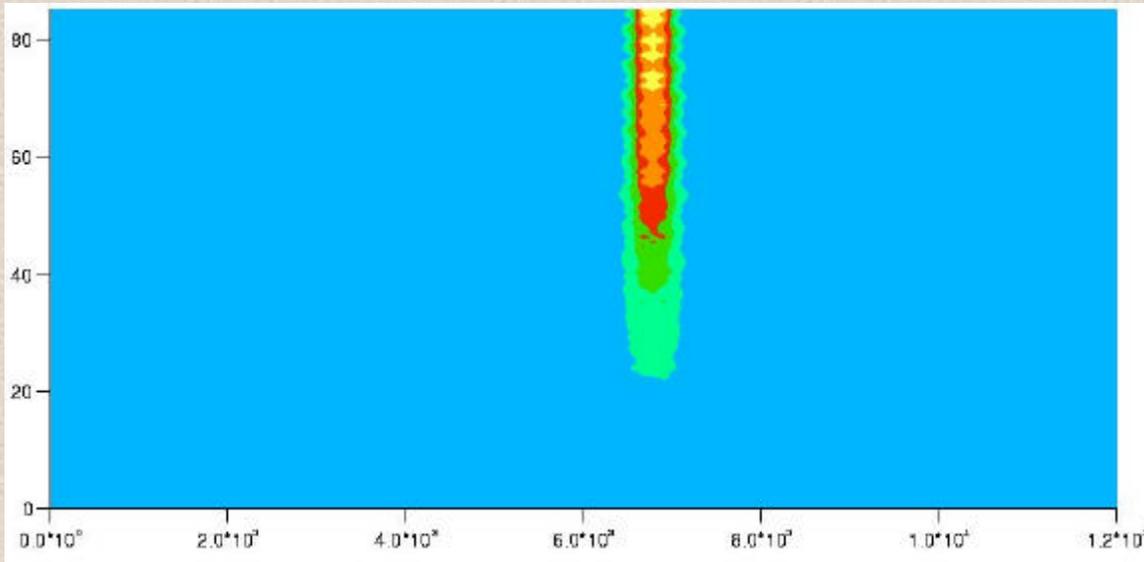
## Simulazioni 2D



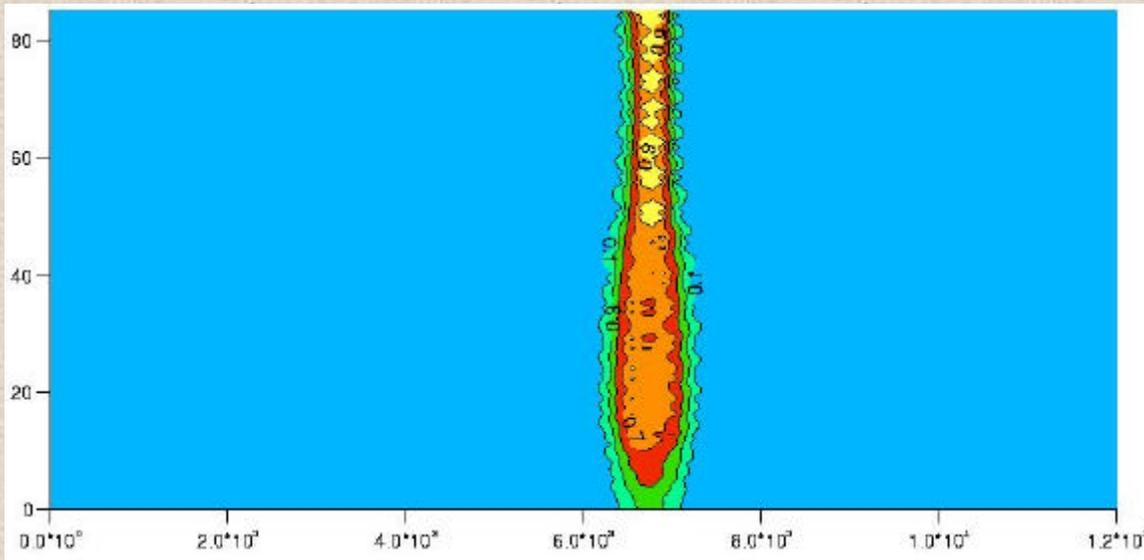
dopo 1 anno



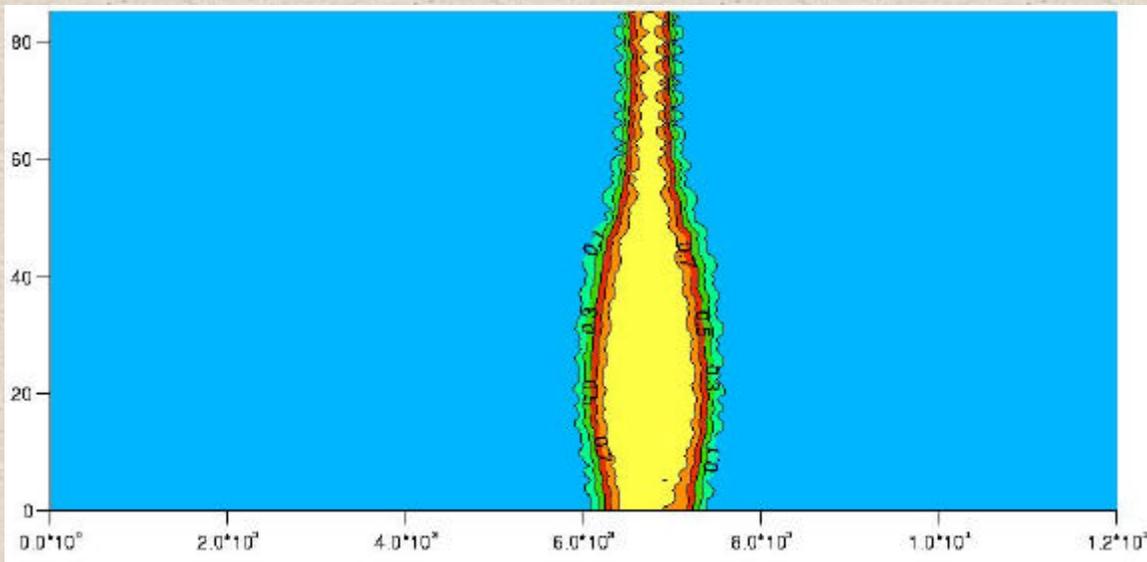
dopo 2 anni



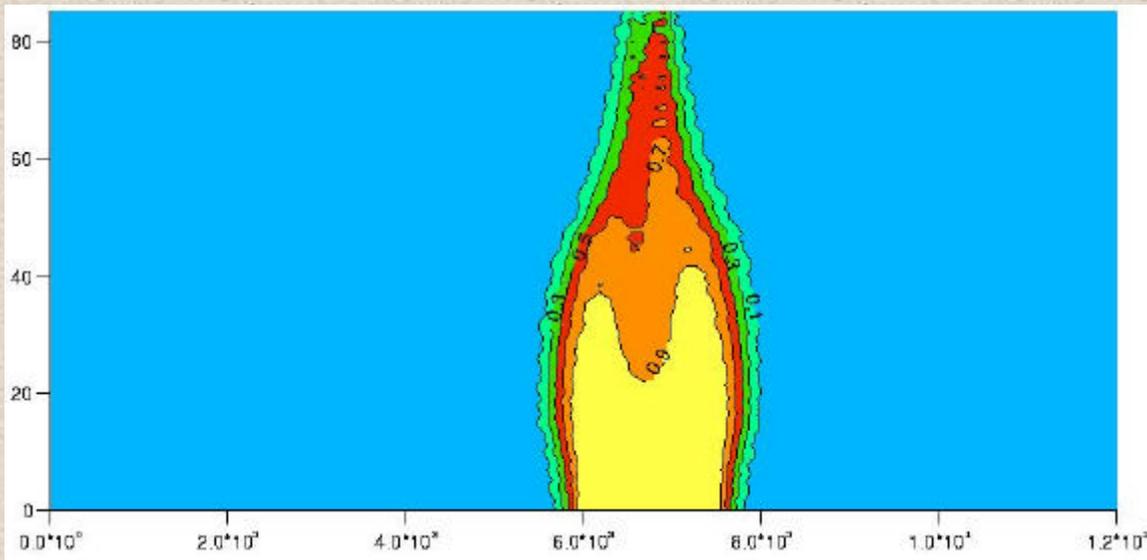
dopo 4 anni



dopo 8 anni



dopo 10 anni



dopo 15 anni

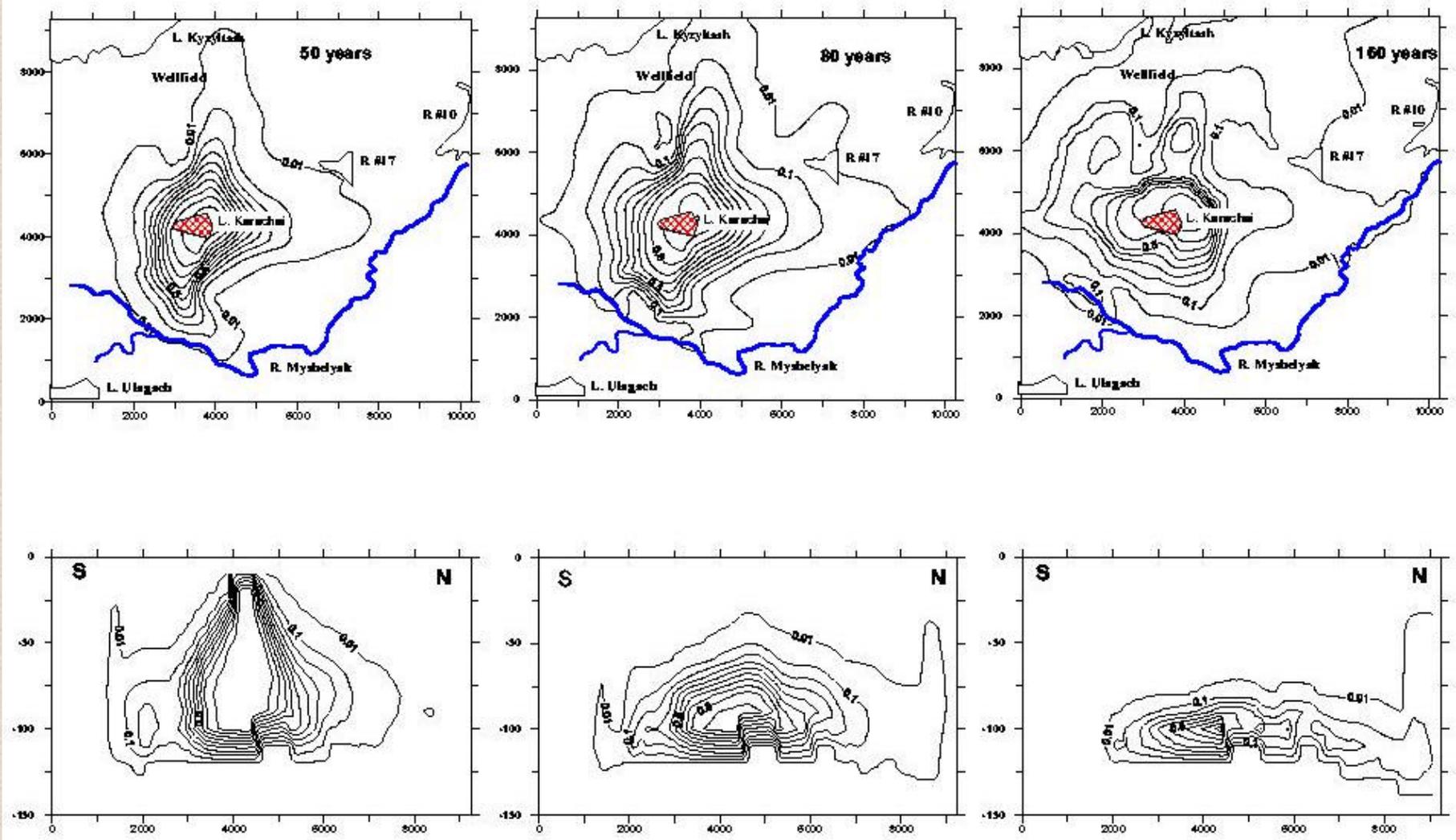
## Strategie di contenimento

I risultati delle modellizzazioni e simulazioni numeriche non lasciano ottimisti sulle concentrazioni di radionuclidi che andranno a contaminare, dal lago Karachai, il fiume Mishelyak... Vari **scenari** per attenuare il fenomeno possono essere presi in considerazione (supponendo che il lago non sia più usato come discarica di rifiuti radioattivi):

- Iniettare acqua non contaminata in punti strategici in modo tale da forzare i contaminanti radioattivi a espandersi nella parte bassa dell'aquifero senza avvicinarsi al fiume Mishelyak;
- Pompare acqua contaminata dall'aquifero in modo da ridurre il potenziale del trasporto dei nitrati radioattivi;
- Operare un drenaggio lungo il lato del fiume Mishelyak in modo da controllare lo scarico dei contaminanti dal lago Karachai.



# Scenario: pompare acqua non contaminata





## Possibile realizzazione di misure di contenimento della contaminazione dal lago Karachai

- complicazioni tecniche
- necessità di avere più dati di quelli a disposizione
- tempi di "recupero" lunghi
- necessità di un'economia più solida e capace di operare adeguatamente sul lago Karachai:

TUTTO CIÒ RENDE PIÙ REALISTICO E REALIZZABILE L'APPROCCIO DELLA NATURALE ATTENUAZIONE DEL FENOMENO – OPERANDO MAGGIORI CONTROLLI E RESTRIZIONI PERCHÈ TUTTI I FIUMI CONTAMINATI O A RISCHIO DI CONTAMINAZIONE NON SIANO UTILIZZATI.