

Il pozzo più profondo del mondo

La perforazione del pozzo di Kola, giunta ora a 12 000 metri, ha rivelato la causa di una discontinuità sismica e ha contribuito allo sviluppo di nuove tecniche per l'esplorazione profonda della crosta della Terra

di Ye. A. Kozlovsky

Dal 1970, nelle nude rocce della Penisola di Kola, 250 chilometri a nord del circolo polare artico, nella regione sovietica di Murmansk, una torre di trivellazione alta come un edificio di 27 piani, sta perforando un pozzo nello scudo continentale baltico. La punta della trivella (o scalpello) che è avanzata per più di metà percorso in rocce cristalline, è arrivata ora a una profondità di oltre 12 000 metri, cosicché il pozzo di Kola è il più profondo del mondo. Supera di gran lunga i pozzi, profondi da 1500 a 7000 metri, utilizzati di solito per l'esplorazione o per l'estrazione di petrolio, carbone, ferro, metalli non ferrosi, diamanti o altre preziose risorse della Terra.

Il primo obiettivo importante del pozzo di Kola è la comprensione della struttura profonda della crosta continentale e delle forze che l'hanno modellata nel corso di quattro miliardi di anni di storia geologica. Le conoscenze attuali derivano in gran parte dallo studio di rocce che affiorano qua e là e che nel complesso riguardano circa 15 000 metri dello spessore totale della crosta che è in media di 30 000 metri. Molte altre informazioni sulla natura della crosta nascosta sono fornite dalla velocità delle onde sismiche, che aumenta con la profondità, ma che varia con la composizione della roccia attraverso cui le onde si propagano, e dai dati raccolti da strumenti a bordo di aerei e di satelliti, che rilevano il campo gravitazionale ed elettromagnetico della Terra. Tuttavia nulla può sostituire l'osservazione diretta in profondità delle strutture e dei processi che vi hanno luogo.

Il pozzo di Kola ha attraversato 1,4 miliardi di anni di storia della Terra, passando da rocce del Proterozoico a rocce dell'Archeano di età compresa tra 2,5 e 2,7 miliardi di anni. Esso ha messo allo scoperto diversi cicli di formazione della crosta attraverso i quali nuova roccia ignea (ossia formata per consolidamento di magma) è stata portata nella crosta dal mantello fuso sottostante, poi frantumata dall'azione degli agenti atmosferici e dalle glaciazioni, quindi divisa e ridistribuita in strati sedimentari e, infine, riconsolidata in roccia

cristallina per metamorfismo, dovuto al calore e alla pressione derivanti da successive intrusioni di roccia ignea. I campioni di roccia, portati in superficie con sempre maggiore difficoltà all'aumentare della profondità del pozzo, hanno fornito un modello termico generale dell'evoluzione della crosta nell'intervallo di tempo in cui si sono delineate le principali configurazioni degli scudi continentali della Terra. La documentazione raccolta permette di stabilire, per lo meno, che la crosta primitiva della Penisola di Kola è granodiorite, una roccia intrusiva con un contenuto in quarzo un poco inferiore al granito.

Uno dei principali obiettivi del pozzo di Kola era quello di attraversare lo strato di crosta superiore di granito e di arrivare al sottostante basamento roccioso di composizione basaltica. I basalti non si trovano frequentemente in superficie e il presunto basamento basaltico, poi, non si trova mai sui continenti. Si ritiene che il passaggio tra i due tipi di crosta sia indicato da un brusco aumento della velocità delle onde sismiche, osservato in tutto il mondo a profondità intermedie della crosta; questa variazione di velocità, nella Penisola di Kola, avviene a 9000 metri di profondità. Tuttavia il pozzo di Kola, che è stato il primo a superare tale limite, al di sotto non ha incontrato basalto.

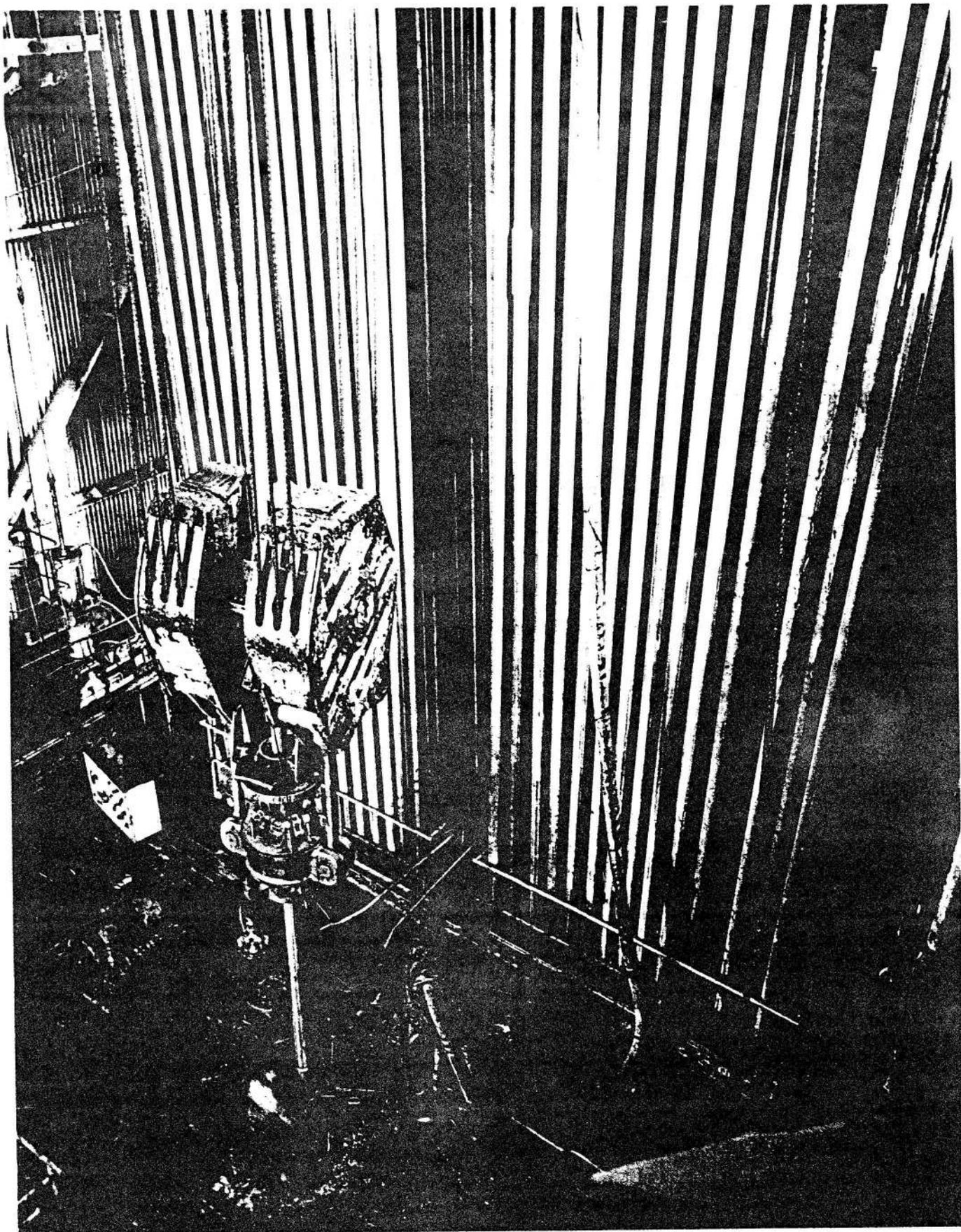
Il pozzo ha invece raggiunto la base di una zona anomala di rocce metamorfiche disgregate che aveva incontrato per la prima volta a 4500 metri. Penetrando in questa zona il pozzo ha incontrato flussi di acqua calda fortemente mineralizzata, sorprendentemente abbondanti. Quest'acqua (detta «acqua di cristallizzazione») deriva dai minerali costituenti le rocce cristalline, viene liberata quando i componenti delle rocce sono soggetti a fusione e a ricristallizzazione durante i processi metamorfici e svolge un ruolo fondamentale nella genesi dei giacimenti minerali. Di solito quest'acqua fluisce via dalla formazione metamorfica e va a depositare il suo carico di minerali in una zona più superficiale della crosta. A Kola l'acqua è stata confinata

nello stesso punto in cui è stata liberata da strati sovrastanti impermeabili di rocce ignee spessi 2000 metri. Per rispingere l'acqua nella roccia sarebbe necessaria una pressione molto elevata che si ha solo a maggiori profondità nella crosta o nel mantello superiore. Poiché la resistenza della roccia alla frattura è solo una frazione di questa pressione idraulica, la disidratazione della roccia è stata accompagnata da una microfratturazione. Questo fenomeno di disgregazione idraulica della roccia metamorfica, mai osservato in precedenza, può avere una funzione significativa nella struttura dei continenti.

I flussi di acqua mineralizzata rinvenuti nella zona di disgregazione, le sottili e ben definite formazioni sottostanti e la scoperta di depositi di minerali ad altri livelli del pozzo di Kola dimostrano che l'uomo, nella ricerca mineraria, ha appena scalfito la superficie terrestre: immense risorse giacciono in profondità in attesa di essere raggiunte dalla tecnologia umana.

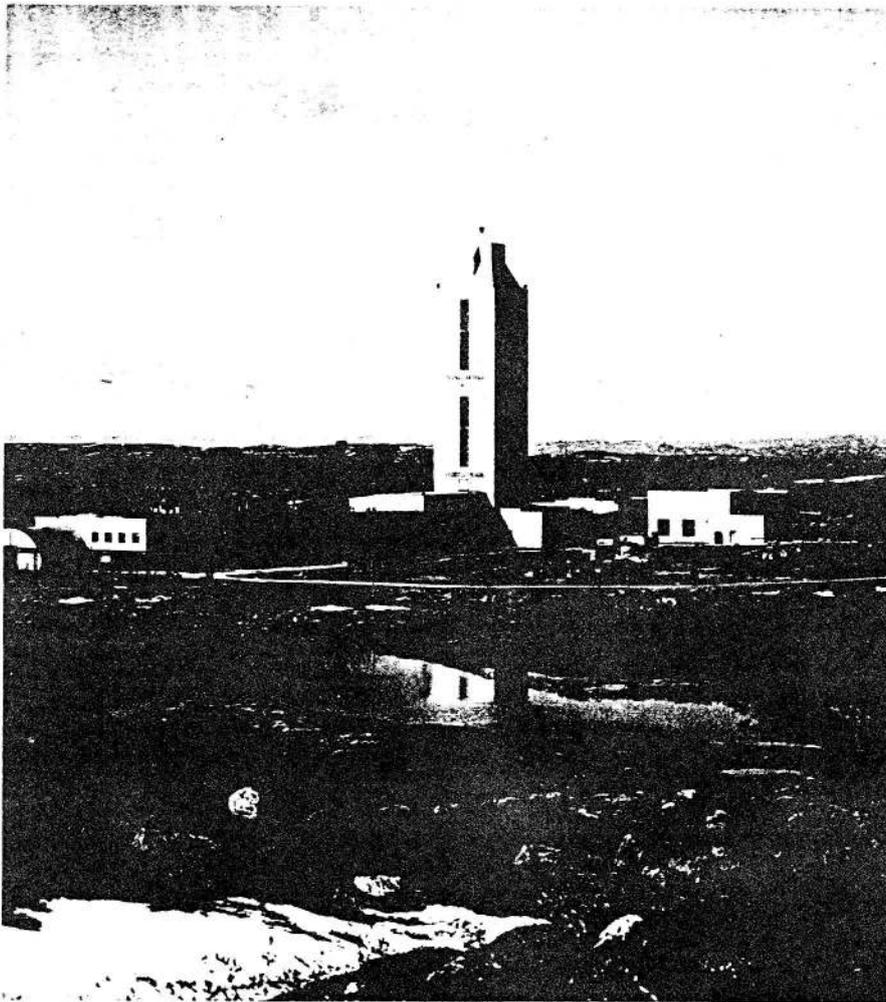
La perforazione del pozzo ha inoltre evidenziato flussi di gas a tutti i livelli. Tra i gas identificati vi sono elio, idrogeno, azoto, metano e altri idrocarburi, infine anidride carbonica. Gli elementi leggeri presenti in essi sono derivati dalla struttura cristallina della roccia in seguito agli stessi processi metamorfici che hanno liberato l'acqua. La composizione isotopica del carbonio suggerisce tuttavia che le fonti di anidride carbonica siano state due, di cui una biogena connessa alla presenza di microrganismi fossili nelle rocce del Proterozoico che risalgono a centinaia di milioni di anni fa.

La perforazione del pozzo di Kola ha inaugurato, in territorio sovietico, un programma a lungo termine di sondaggi sistematici della struttura profonda della crosta terrestre, che proseguirà nel prossimo secolo. Nel 1962, sotto gli auspici del Consiglio interdipartimentale per lo studio dell'interno della Terra e per le perforazioni a grande profondità, geologi e ingegneri minerali hanno cominciato a sviluppare la tecnologia per la perforazione e lo studio dei pozzi profondi. Nel 1970 hanno avuto



Vicino alla testa del pozzo di Kola sono pronte le aste di perforazione in lega di alluminio molto resistente, che verranno a mano a mano utilizzate. La fotografia è stata ripresa all'interno della torre di trivellazione, una struttura alta circa 86 metri, che si innalza al di sopra della

testa del pozzo e che sostiene la batteria di perforazione, con una capacità di carico di 400 tonnellate. Il gruppo motore che è situato al fondo del pozzo è costituito da una turbina che viene azionata dal flusso ad alta pressione del fango di perforazione pompato dalla superficie.



La costruzione che ospita la torre di trivellazione si innalza come un edificio di 30 piani nella tundra della Penisola di Kola, 250 chilometri a nord del circolo polare artico. La copertura protegge la testa del pozzo dal gelo, permettendo il funzionamento dell'impianto per tutto l'anno.



I siti scelti per la perforazione, destinata a uno studio di vasta portata della crosta terrestre, punteggiano il territorio dell'Unione Sovietica. Grazie alla tecnologia messa a punto nella perforazione del pozzo di Kola, profondo 12 000 metri, e del pozzo di Saatly, profondo 8500 metri, sul Mar Caspio, verranno perforati tre nuovi pozzi profondi più di 7000 metri nelle località indicate nella cartina. Contemporaneamente verranno perforati pozzi meno profondi nei siti indicati dai pallini in colore privi di nome. Tutti i pozzi si trovano nei punti d'intersezione di profili sismici recenti e serviranno a comprendere la genesi dei depositi di minerali e di idrocarburi.

inizio le perforazioni a Kola e a Saatly, nel distretto petrolifero di Baku sul Mar Caspio, dove il pozzo ha raggiunto gli 8500 metri. Nel frattempo una prospezione sismica profonda del territorio sovietico ha contribuito alla scelta dei siti per altri pozzi profondi e superprofondi.

Una migliore conoscenza della struttura profonda della crosta servirà a trovare i metodi per individuare ed esplorare depositi di minerali e campi di idrocarburi a profondità molto maggiori di quelle raggiunte finora. Infatti, come ha dimostrato il pozzo di Kola, risorse minerarie possono trovarsi anche a grandi profondità. Un obiettivo fondamentale di questa impresa di ricerca è quindi quello di sviluppare la tecnologia che permetta di penetrare nell'interno della Terra fino a 10000-15000 metri.

Sulla scala globale la crosta terrestre è piuttosto sottile: solo 35 chilometri su un raggio di 6000 chilometri. Sembra che i dati sismici e altri dati di tipo indiretto confermino l'ipotesi, avanzata nel 1926 dal geofisico inglese Harold Jeffreys, secondo la quale la crosta continentale sarebbe divisa in tre strati: sedimentario, granitico e basaltico. La correlazione tra densità dei campioni di roccia misurata in laboratorio e velocità delle onde sismiche osservata nelle prospezioni, dà per le rocce sedimentarie, una densità di 1,8-2,5 grammi per centimetro cubo e una velocità di circa cinque chilometri al secondo. Densità e velocità aumentano rispettivamente a un valore tra 2,5 e 2,75 grammi per centimetro cubo e tra cinque e sei chilometri al secondo nelle rocce granitiche. In corrispondenza della discontinuità di Conrad la velocità delle onde sismiche raggiunge i sei - sette chilometri al secondo; questo valore è stato preso per indicare la transizione allo strato basaltico in cui la densità è di 2,75-3 grammi per centimetro cubo. Lo strato granitico, costituito da elementi più leggeri, come ossigeno, silicio e alluminio, fu messo in posto nell'Archeano ed è ampiamente sviluppato sulla superficie dei continenti. Mentre la crosta continentale può raggiungere uno spessore di 70-75 chilometri sotto le catene montuose, la crosta oceanica ha uno spessore compreso tra i cinque e i 10 chilometri e si pensa che sia costituita dallo strato basaltico ricoperto da depositi sedimentari.

Si suppone che sotto la crosta continentale e quella oceanica la discontinuità di Mohorovičić nella velocità delle onde sismiche segni la sommità del mantello. Questa velocità sale bruscamente a 7,8 chilometri al secondo e aumenta in modo irregolare fino a 13,6 chilometri al secondo procedendo verso il basso attraverso il mantello superiore (dai 35 ai 300 chilometri), medio (dai 300 ai 950 chilometri) e inferiore (dai 950 ai 2900 chilometri). Analogamente la densità delle rocce del mantello passa da 3,3 a 5,9 grammi per centimetro cubo. In base a prove dirette, fornite dalle rocce vulcaniche, o indirette, fornite dalle meteoriti e dai dati geofisici e astronomici, si pensa che il mantello sia costituito da silicati di ferro e magnesio fino a 1100 chilometri di profondità. A profondità maggiori preval-

gono i solfuri e gli ossidi di ferro, rame, zinco, piombo, mercurio, antimonio e bismuto, come pure selenio, tellurio, oro, argento e altri metalli più pesanti. Nel mantello superiore la temperatura va da 1000 a 1500 gradi centigradi e a quelle profondità la pressione raggiunge le 100 000 atmosfere.

Per verificare e ampliare la raffigurazione della crosta della Terra ottenuta con dati indiretti, i geologi aspirano a eseguire perforazioni che raggiungano la discontinuità di Conrad e, ancora più in basso, quella di Mohorovičić. La Penisola di Kola è stata scelta perché in questa regione lo scudo baltico è rappresentativo delle antiche zolle continentali granitiche di India, America settentrionale, Africa meridionale, Australia occidentale, Antartide e Groenlandia. Il sito si trova inoltre nella regione mineraria di Pechenga dove vi sono giacimenti di rame e di nichel: si sperava che un pozzo in quella zona avrebbe chiarito la genesi di quei giacimenti. La regione, soggetta per centinaia di milioni di anni a glaciazioni e ad alterazione dovuta agli agenti atmosferici, ha perso per erosione 5000-15000 metri della parte superiore, di strato granitico. Perciò la sezione geologica di 12 000 metri attraversata dal pozzo corrisponde a uno strato continentale «medio» che generalmente si trova tra 8000 e 20000 metri al di sotto della superficie.

La perforazione del pozzo di Kola ha apportato significative innovazioni alla tecnologia di trivellazione. Sotto i 10000 metri la trivellazione a rotazione convenzionale, che fa girare la punta della trivella ruotando l'intera batteria di perforazione, incontra difficoltà insormontabili. Il peso di 800-900 tonnellate dell'insieme di aste d'acciaio dà origine in superficie a sollecitazioni enormi e amplifica le forze che si oppongono alla rotazione della batteria. Nel pozzo di Kola una turbina nel fondo, azionata dal flusso del fango di perforazione, fa girare lo scalpello. La rotazione della batteria è totalmente eliminata o ridotta a pochi giri al minuto quando occorre potenziare la rotazione dello scalpello ottenuta con la turbina.

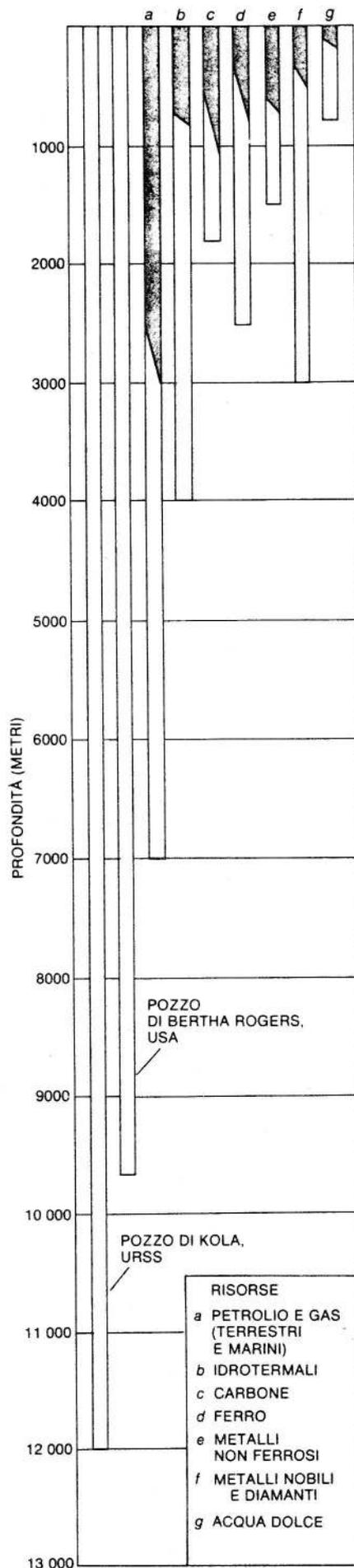
In un pozzo comune il fango di perforazione viene pompato dentro la batteria di perforazione per raffreddare lo scalpello e asportare i detriti; risale quindi in superficie attraverso l'intercapedine tra la batteria e la parete del pozzo, che contribuisce a mantenere integra. Nel pozzo di Kola il fango viene pompato verso la turbina con una pressione di 250 atmosfere. Un ingranaggio posto sotto la turbina riduce la velocità di rotazione dello scalpello di tre o quattro volte rispetto a quella delle trivelle dei normali pozzi, fino a ottenere il valore ottimale di 80-150 giri al minuto, e in corrispondenza aumenta il momento di rotazione. Nel sistema di pompaggio una linea idraulica a retroazione, trasmettendo gli sbalzi di pressione del fango di perforazione alla velocità di 1500 metri al secondo, controlla la rotazione della turbina e della batteria e quindi la velocità e il momento della punta della trivella. Filtri anti-rumore di un modello particolare garantiscono un controllo attendibile a una profondità di 12000 metri.

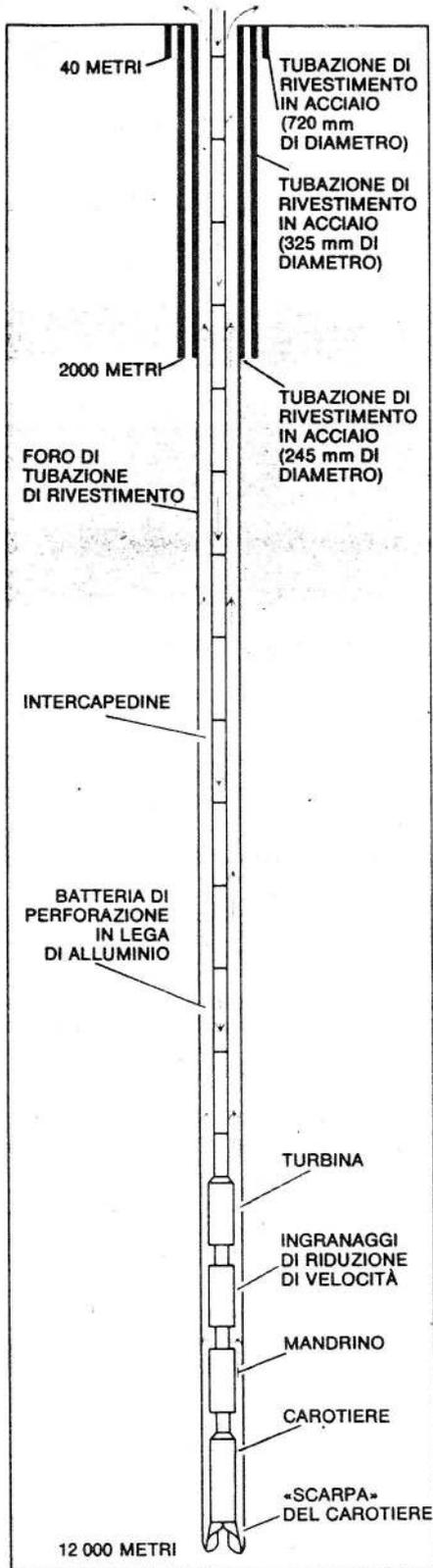
La batteria di perforazione, in lega di alluminio molto resistente, pesa solo 400-500 tonnellate e ciò è un grande vantaggio perché, per la sostituzione degli scalpelli consumati o per recuperare le carote, è necessario estrarre e far ridiscendere al fondo l'intera batteria centinaia di volte. Per raggiungere gli 11000 metri del pozzo di Kola, la somma delle lunghezze delle aste di trivellazione, moltiplicata per tutte le volte che esse sono passate dalla bocca del pozzo in questi viaggi di andata e ritorno, ha superato i 25 milioni di metri. A prescindere dalla riduzione del carico che deve sostenere la torre di trivellazione, il minor peso della batteria riduce l'usura della batteria stessa, della tubazione del rivestimento e della parete del pozzo, provocata dall'attrito. L'usura può essere notevole perché la perforazione non procede mai perfettamente verticale. Il percorso del pozzo di Kola ha deviato dalla verticale di un valore medio di 5 gradi fino a un massimo di 17 gradi tra 10000 e 10500 metri; a questa profondità lo scostamento laterale dello scalpello rispetto alla testa del pozzo era di 840 metri (si veda l'illustrazione a destra nella pagina successiva).

Il progetto stesso del pozzo di Kola doveva adeguarsi agli imprevedibili cambiamenti di condizioni incontrati a mano a mano che lo scalpello avanzava verso il basso. Mentre i primi due chilometri di pozzo vennero rivestiti (si veda l'illustrazione a sinistra nella pagina successiva) fu evidente che a maggiori profondità era necessaria una maggiore flessibilità operativa. Perciò, sotto i 2000 metri, l'intero pozzo fu perforato senza alcun rivestimento.

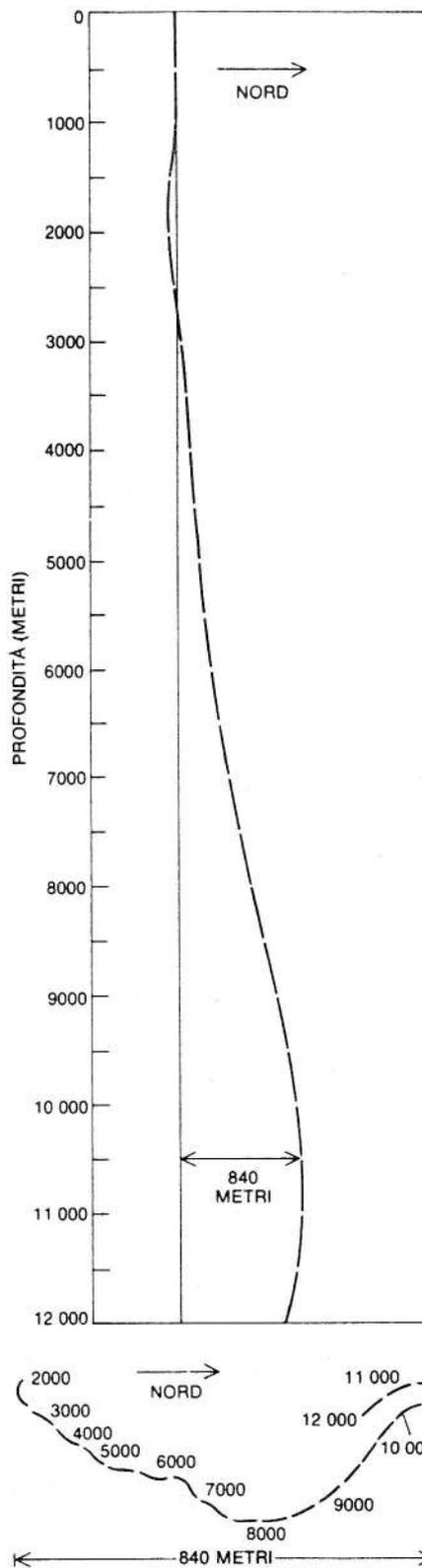
Ogni campione di roccia estratto dalle profondità della Terra ha il suo valore. A mano a mano che il pozzo di Kola si approfondiva, diventava sempre più difficile portare le carote in superficie. Normalmente una carota di forma cilindrica, con un diametro di 60-80 millimetri, entra nel carotiere a mano a mano che la punta della trivella erode l'anello di roccia del fondo; la carota rimane nel tubo portacarota fino a quando la batteria di perforazione non viene estratta. Tuttavia, a una certa profondità, la roccia «scoppia» per la liberazione di forze interne quando lo scalpello elimina la pressione esercitata dagli strati di roccia sovrastanti, che genera appunto tali forze. Se a questa profondità venisse usata per il carotaggio una normale attrezzatura, i frammenti di carota bloccherebbero l'entrata del tubo portacarota e il 90-95 per cento della carota verrebbe frantumato ed entrerebbe nel fango di perforazione. Un nuovo dispositivo per il prelevamento delle

I pozzi, compresi quelli minerari, variano in profondità a seconda dei giacimenti cercati. Nell'istogramma vengono confrontate le profondità medie (in grigio) e massime (in colore) raggiunte dai vari tipi di pozzo con quelle del pozzo di Kola e del pozzo di Bertha Rogers nell'Oklahoma. Quest'ultimo, che è il secondo pozzo del mondo in ordine di profondità, serviva a estrarre gas, ma la perforazione venne arrestata a 9674 metri di profondità quando la punta della trivella incontrò zolfo allo stato fuso.





Lo schema mostra il progressivo restringimento del pozzo. Fino a 40 metri fu impiegato uno scalpello con un diametro di quasi un metro e la parete fu rivestita con una tubazione di 720 millimetri di diametro. La perforazione proseguì con uno scalpello di 214 millimetri di diametro. I primi 2000 metri furono poi allargati e rivestiti con una tubazione di 325 millimetri di diametro. A maggior profondità il foro non è rivestito, ma sostenuto dalla pressione del fango di perforazione che scorre verso il basso nelle aste di perforazione e risale in superficie tra aste e parete.



La traiettoria del pozzo, vista di profilo (in alto) e come deviazione orizzontale rispetto alla testa del pozzo (in basso), si allontana dalla verticale per un massimo di 840 metri a una profondità di 10 500 metri. Una certa deviazione del foro di perforazione è inevitabile, ma aumenta l'attrito quando la batteria di perforazione viene calata nel foro o viene fatta risalire per recuperare le carote o per sostituire gli scalpelli consumati. Sono stati utilizzati sensori dotati di giroscopi e di fili a piombo per misurare l'inclinazione del foro e per manovrare lo scalpello allo scopo di cercare di ridurre la deviazione.

carote, che devia una parte del flusso di fango nel tubo portacarota, raccoglie i frammenti della carota «esplosa» e li trasporta in una speciale «camera», mantenendo così libera l'entrata per altri campioni.

La tecnologia dimostratasi valida nel pozzo di Kola apre la possibilità di effettuare perforazioni fino a 15 000-17 000 metri. Tuttavia vanno presi in considerazione altri problemi. Le normali leghe di alluminio perdono la loro resistenza a temperature comprese tra i 110 e i 150 gradi centigradi. Noi siamo riusciti a produrre leghe che resistono fino a temperature comprese tra 230 e 250 gradi centigradi. Si prevede che la metallurgia delle polveri consentirà di realizzare leghe di alluminio stabili fino a una temperatura compresa tra 270 e 300 gradi centigradi, le quali devono venire preparate mano a mano che aumenta la profondità dei pozzi. Per resistere a temperature di 400 gradi, riscontrabili a profondità ancora maggiori, si possono costruire aste di perforazione in lega di titanio.

Oltre a risolvere i problemi connessi alle temperature elevate, la ricerca tecnologica per la perforazione profonda deve anche prendere in considerazione pressioni che raggiungono le 3000 atmosfere, gli effetti chimici corrosivi di acque fortemente mineralizzate intrappolate nella roccia, la perdita di stabilità della massa rocciosa intorno al pozzo e la deviazione del pozzo dalla verticale. Il recupero delle carote diventa sempre più problematico. Per risolvere questo problema è necessario progettare un sistema di carotaggio e di trasporto in superficie dei campioni di roccia in contenitori a chiusura ermetica che mantengano le condizioni esistenti al fondo del pozzo, compresa la saturazione di acqua e di gas della roccia. Attualmente si sta preparando in laboratorio una camera pressurizzata per simulare le condizioni esistenti a 15 000-20 000 metri di profondità, cioè temperature comprese tra 300 e 400 gradi centigradi e pressioni comprese tra 2000 e 3000 atmosfere.

La «storia della Terra» rivelata dal pozzo di Kola va letta, naturalmente, dal basso verso l'alto. Nel complesso dell'Archeano, che va dai 12 000 ai 6842 metri, il primo stadio vede l'accumulo di spessi strati sedimentari dovuti all'alterazione da agenti atmosferici dei graniti originari, ripetutamente intercalati da intrusioni di graniti plutonici. Che questi graniti fossero ricchi di ferro e di titanio è provato dalla concentrazione di minerali di magnetite e di ilmenite, che raggiunge il 40-50 per cento della roccia a 8711 metri di profondità. Nel secondo stadio la roccia è stata sottoposta a ripiegamenti, metamorfismo e ultramorfismo a temperature comprese tra 750 e 900 gradi centigradi e a pressioni comprese tra 5000 e 11 000 atmosfere.

Poiché le rocce registrano con elevata sensibilità temperatura e pressione, i geologi possono ricostruire attraverso queste la loro storia. Dallo stesso materiale proveniente dal mantello, le rocce metamorfiche sviluppano una grande varietà di caratteristiche distintive, ossia «facies», che possono includere composizio-

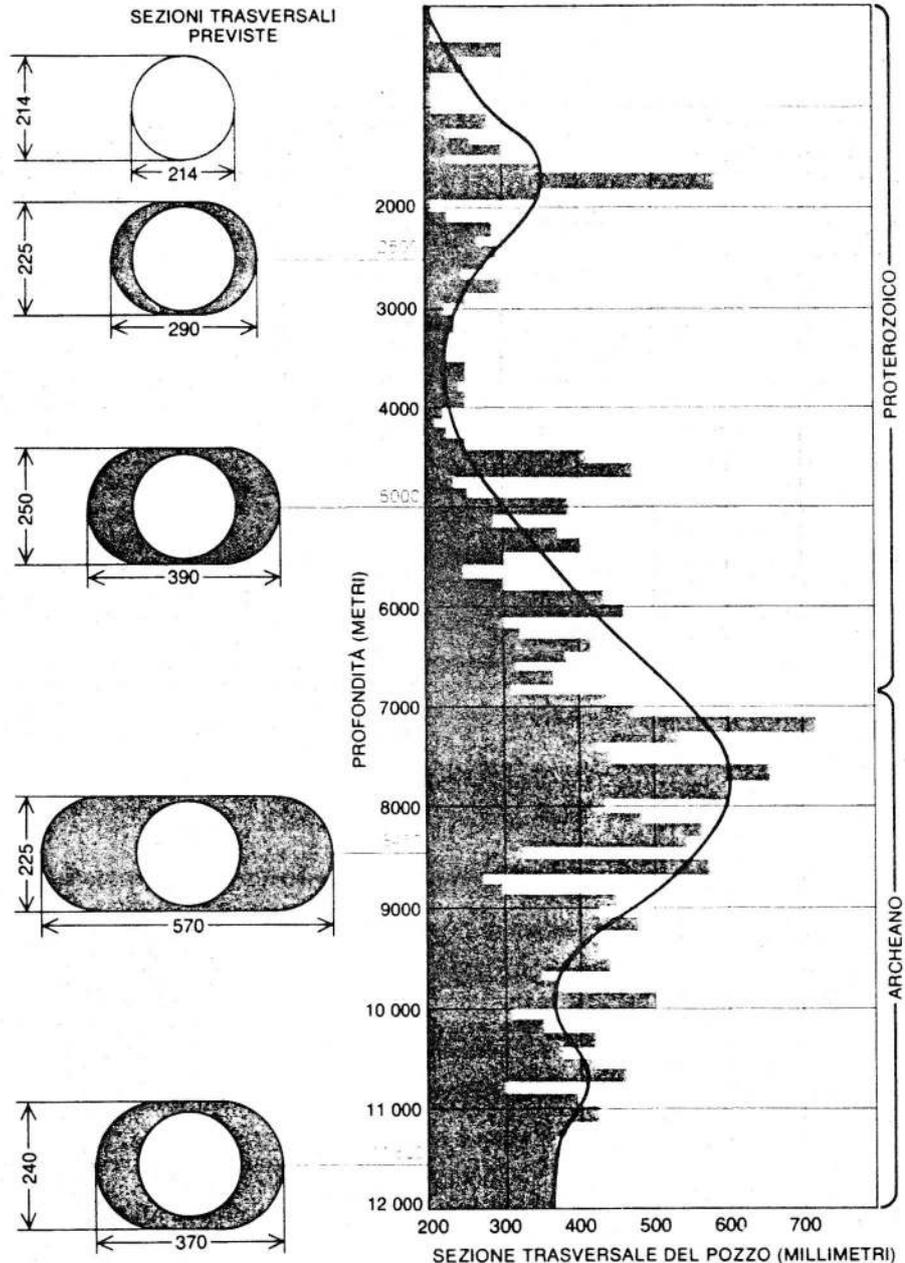
ni chimiche elementari diverse a seconda della pressione e della temperatura al momento della loro formazione.

In generale, il metamorfismo dà origine a rocce più dense, con un contenuto minore di acqua chimicamente legata, a partire da rocce più idrate. Gli elementi che non entrano a far parte delle nuove fasi cristalline si disciolgono nell'acqua che viene liberata.

Nella Penisola di Kola la datazione con il carbonio radioattivo fissa il culmine del metamorfismo dell'Archeano tra 2,7 e 2,8 miliardi di anni fa; seguirono una profonda erosione provocata dall'acqua e un accumulo di sedimenti derivati dall'alterazione della crosta, dovuta agli agenti atmosferici, in depressioni isolate. In alcune regioni, soprattutto in Sud Africa, immensi depositi di conglomerati metalliferi sono associati a tali sedimenti.

Il complesso del Proterozoico, che si estende da 6842 metri di profondità alla superficie, ha iniziato a formarsi sul basamento dell'Archeano 1,1 miliardi di anni fa. In questo arco di tempo le rocce registrano quattro fasi principali nella formazione della crosta continentale. Durante la prima fase, sul basamento dell'Archeano si depositò materiale vulcanico sedimentario. Gli strati ghiaiosi mostrano bruschi cambiamenti di spessore, indice di una deposizione fluviale in antiche valli. Seguirono due cicli di plutonismo, il primo dei quali provocò l'intrusione di corpi granitici, privi di elementi metallici, nelle rocce precedentemente formatesi, che subirono di conseguenza un metamorfismo a bassa temperatura. Nel secondo ciclo il mantello fornì rocce ricche di elementi metallici. Queste intrusioni metallifere diedero luogo ai giacimenti di solfuro di rame e di nichel che affiorano nella regione di Pechenga. Nel pozzo di Kola questi depositi sono stati trovati a intervalli, fino a una profondità di 1500-1800 metri. Nella quarta fase ebbe luogo l'anomalo episodio di metamorfismo «chiuso» che portò alla disgregazione idraulica delle rocce metamorfiche osservata per la prima volta nel pozzo di Kola, nella zona spessa 4500 metri che attraversa il basamento dell'Archeano.

Le carote mostrano che il contenuto di acqua chimicamente legata rimane costante, intorno al 4 per cento, fino a 4500 metri di profondità. Esso diminuisce quindi piuttosto bruscamente fino al 2,1 per cento. A questa profondità inizia la zona di disgregazione idraulica in cui la microfratturazione provoca un aumento della porosità della roccia di tre o quattro volte rispetto alla porosità osservata nelle rocce sovrastanti e, di conseguenza, una diminuzione della densità della massa rocciosa da 3,1 a 2,9 grammi per centimetro cubo. Si calcola che l'acqua liberata, intrappolata negli interstizi della roccia fratturata, abbia fatto aumentare dell'1,7 per cento il volume totale iniziale occupato dalla roccia e dall'acqua. L'enorme pressione idraulica esercitata ha causato così la microfratturazione della roccia che inizialmente deve aver determinato un aumento della porosità di 10 volte rispetto a quella degli strati sovrastanti.



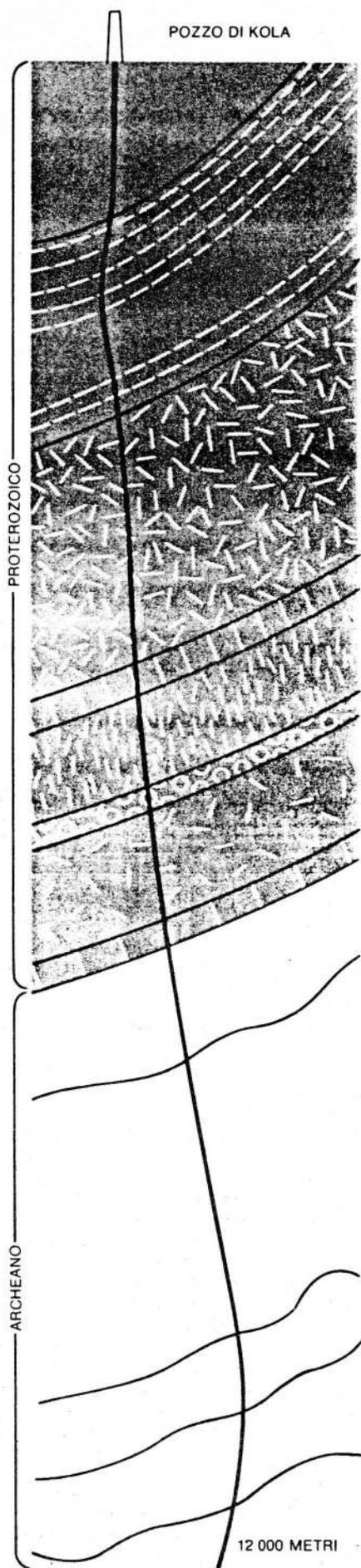
La sezione trasversale del pozzo cambia con la profondità, sebbene il diametro dello scalpello sia rimasto costante. L'istogramma (a destra) riporta il calibro del foro a diverse profondità riferito all'asse maggiore; la curva rappresenta l'andamento medio dei valori. La forma generalmente ellittica del foro è dovuta a forze compressive diseguali che agiscono nella roccia orizzontalmente; l'asse minore del foro corrisponde alla direzione in cui la forza è maggiore. La roccia si è frantumata ed è «scoppiata» lungo l'asse di minore forza, ampliando di conseguenza il foro e producendo frammenti che sono stati poi portati in superficie dal fango di perforazione. La dimensione dell'effetto prodotto è stata diversa a seconda della pressione esercitata e del tipo di roccia.

Il limite inferiore di questa zona, a 9000 metri, è segnato da un aumento di velocità delle onde sismiche, che non evidenzia, quindi, la prevista discontinuità di Conrad tra il granito e il basalto, ma segna semplicemente la fine della zona di disgregazione con il ritorno a rocce di densità normale e la cessazione dell'afflusso di acque termali nel pozzo.

Il valore di uno sguardo diretto all'interno della Terra è ampiamente dimostrato da questa scoperta. La disgregazione idraulica delle rocce metamorfiche può

spiegare la natura geologica delle discontinuità evidenziate dai cambiamenti di velocità e di riflessione delle onde elastiche osservati in tutto il mondo nella parte superiore della crosta (fino a 15-20 chilometri di profondità). Inoltre questo fenomeno porta un cambiamento sostanziale nelle teorie sulla circolazione dell'acqua nella crosta continentale e sulla natura dell'idrosfera sotterranea.

L'elevato contenuto di minerali delle acque interstiziali e la presenza di gas nel pozzo dimostrano che nelle rocce cristal-



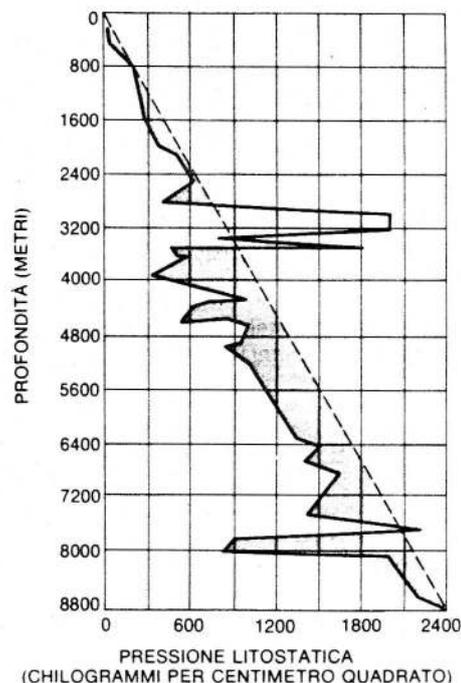
line a grandi profondità hanno luogo attivi processi tra gas e acqua. Di conseguenza aumentano le possibilità di scoprire nuovi depositi di minerali a quelle profondità. Nella zona di fratturazione che si incontra nel pozzo di Kola i frammenti di roccia sono cementati fra loro da solfuri di rame, nichel, ferro, zinco e cobalto. La temperatura di formazione relativamente bassa di questi solfuri e la composizione isotopica dello zolfo, che assomiglia a quella delle meteoriti, suggeriscono che questi solfuri abbiano avuto origine nel mantello. Quindi in uno spessore notevole di crosta continentale vi sono condizioni favorevoli alla formazione di giacimenti minerari idrotermali.

La misurazione diretta delle temperature nel pozzo obbliga a rivedere le teorie sulla distribuzione e sul flusso del calore all'interno della Terra. Si suppone che in una regione tettonicamente stabile, come lo scudo baltico, la temperatura aumenti con la profondità solo lentamente, raggiungendo i 50 gradi centigradi a 7000 metri e forse i 100 gradi a 10000 metri. In realtà il gradiente termico misurato coincide con l'aumento previsto di un grado ogni 100 metri solo fino a una profondità di 3000 metri; al di sotto, la temperatura inizia ad aumentare di 2,5 gradi ogni 100 metri e a 10000 metri raggiunge i 180 gradi. Centinaia di metri cubi di fango di perforazione freddo, pompato nel pozzo, sono tornati in superficie riscaldati a 45 gradi. Poiché la radioattività delle rocce attraversate dal pozzo contribuisce solo in modo insignificante a questo flusso termico, esso deve chiaramente provenire dal mantello sottostante.

Il successo ottenuto con il pozzo di Kola ha infuso nuovo ottimismo per quanto riguarda la perforazione sistematica profonda e semiprofonda della crosta terrestre entro i confini dell'Unione Sovietica (si veda l'illustrazione in basso a pagina 76). I siti in cui perforare i pozzi sono stati scelti nei punti di intersezione di una rete di profili sismici, utilizzando i risultati di un vasto programma di prospezione sismica profonda realizzato nel decennio scorso.

La perforazione dei pozzi servirà, a sua volta, a migliorare l'interpretazione dei dati sismici. L'osservazione diretta delle condizioni e lo studio delle carote prelevate dal pozzo serviranno a stabilire

Gli strati geologici attraversati dal pozzo abbracciano 1,4 miliardi di anni di storia della Terra. Le rocce sedimentarie e vulcaniche trovate fino a 6800 metri di profondità (in grigio) risalgono al Proterozoico, che iniziò 2,4 miliardi di anni fa. Gli strati granitici più profondi (in colore) si formarono 2,7 miliardi di anni fa nell'Archeano, il periodo più antico del tempo geologico. Si pensava che intorno ai 9000 metri di profondità, dove si registra una brusca variazione di velocità delle onde sismiche, il pozzo passasse da rocce granitiche a un basamento basaltico. Invece si è scoperto che il cambiamento di velocità segna il limite inferiore di una zona, spesso 4500 metri, di rocce disgregate dalla pressione dell'acqua liberata da minerali cristallini in processi metamorfici.



La pressione litostatica, come risulta dalle misurazioni della velocità delle onde acustiche che attraversano la roccia in vicinanza del foro, spesso non presenta un incremento lineare con la profondità (linea tratteggiata) come è prevedibile per un materiale omogeneo. La zona di pressione anormalmente alta a 3200 metri di profondità riflette l'elevata densità di strati rocciosi impermeabili. Le pressioni sproporzionalmente basse tra 4000 e 9000 metri corrispondono a una zona di roccia fratturata.

correlazioni esatte tra le discontinuità geodinamiche della crosta e del mantello superiore e le discontinuità e i contatti di struttura e di composizione osservati. Questo lavoro servirà anche a migliorare la risoluzione e la precisione delle registrazioni sismiche e quindi ad aumentare la quantità di informazioni che si possono ottenere da osservazioni geofisiche indirette. Le anomalie nella propagazione e nella velocità delle onde sismiche non correlate con dati strutturali raccolti nei pozzi possono rappresentare nuovi e importanti problemi da risolvere.

La perforazione continuerà nei pozzi di Kola e di Saatly, che saranno utilizzati come laboratori per studi intensivi sia sulla dinamica sia sulla struttura della crosta in quei siti. I prossimi tre pozzi superprofondi (più di 7000 metri) verranno perforati a Muruntan, Anastasievsko-Troitskaya e vicino al mar Caspio. Contemporaneamente si procederà alla perforazione di sei pozzi profondi (più di 4000 metri), tre dei quali in zone ricche di idrocarburi e gli altri tre in zone ricche di minerali. In tal modo, oltre a rispondere a fondamentali quesiti sulla struttura della crosta continentale, i profili sismici profondi, combinati con l'osservazione diretta in pozzi profondi e superprofondi, permetteranno di valutare i principali elementi geotettonici dell'Unione Sovietica, ritenuti sedi di importanti risorse.