
ATTI ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI
CLASSE SCIENZE FISICHE MATEMATICHE NATURALI
RENDICONTI

LUIGI FORNI

Su possibili stati termici della crosta granitica

Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali. Rendiconti, Serie 8, Vol. 74 (1983), n.6, p. 396–404.
Accademia Nazionale dei Lincei

<http://www.bdim.eu/item?id=RLINA_1983_8_74_6_396_0>

L'utilizzo e la stampa di questo documento digitale è consentito liberamente per motivi di ricerca e studio. Non è consentito l'utilizzo dello stesso per motivi commerciali. Tutte le copie di questo documento devono riportare questo avvertimento.

*Articolo digitalizzato nel quadro del programma
bdim (Biblioteca Digitale Italiana di Matematica)
SIMAI & UMI*

<http://www.bdim.eu/>

Geologia. — *Su possibili stati termici della crosta granitica.* Nota di LUIGI FORNI (*), presentata (**) dal Corrisp. R. MALARODA.

SUMMARY. — *Possible thermal states of the granite crust.* Apart from transient thermal regiments, the thermal state of the granite crust is solely determined by the flow from the upper mantle and the distribution of radiogenic sources (Birch *et alii*, 1968). In view of this premiss, a study was made of four actual thermal situations to determine both the development of radiogenic heat and that ascribable to the flow from the upper mantle. It was found that:

a) the temperature increases caused by radiogenic sources was never more than 350 °C, which means that melting phenomena, if any solely determined by this factor can be ruled out;

b) the sum of the two factors gives temperatures of more than 800 °C at depth of 15 ÷ 16 km. It may realistically be supposed, therefore, that a temperature of this nature, which is higher the melting of granite, must be attributable to pockets of molten material in the middle and upper layers of the crust.

INTRODUZIONE

Partendo dalla osservazione di Birch *et alii* (1968) che lo stato termico dello strato granitico della crosta (ad esclusione delle aree interessate da fenomeni intrusivi recenti, o più in generale da transitori termici di qualsiasi natura) è unicamente determinato dal flusso termico proveniente dal mantello superiore e dalla distribuzione degli isotopi radioattivi produttori di calore radiogenico, è possibile analizzare e valutare singolarmente e globalmente l'incidenza di questi due fattori nella formazione del gradiente geotermico.

Su questa base si ritiene possibile portare un contributo qualitativo e quantitativo alla questione tuttora aperta dell'incidenza che il calore radiogenico può avere nell'evoluzione della parte granitica della crosta.

In quest'ottica vengono analizzate quattro situazioni tipo, che vanno dalla « media » alla « massima », costruite con dei valori riscontrati in natura, cioè basandosi su condizioni reali sia delle concentrazioni di elementi radiogenici, che del flusso proveniente dal mantello superiore. Per questo si è fatto ricorso ad un modello matematico, che nell'ambito delle ipotesi necessariamente semplificative, fornisca un conveniente quadro del fenomeno geologico.

(*) Istituto di Geologia, Paleontologia e Geografia Fisica dell'Università di Torino. Ringrazio il prof. Roberto Malaroda per i suggerimenti e la lettura critica del manoscritto.

(**) Nella seduta del 23 giugno 1983.

FLUSSO TERMICO E SORGENTI DI CALORE

I lavori di Birch *et alii* (1968) su affioramenti plutonici del New England, di Roy *et alii* (1968) su circa quaranta batoliti granitici situati in diverse località degli Stati Uniti, hanno condotto questi Autori ad esprimere il bilancio termico tra flusso termico superficiale, generazione di calore radiogenico delle zone superficiali, e flusso termico proveniente dal mantello superiore attraverso alla seguente relazione lineare:

$$(1) \quad q = q_m + A_0 D$$

dove q (in HFU; $1 \text{ HFU} = 10^{-6} \text{ cal/cm}^2 \text{ s}$), è il flusso misurato in superficie, q_m (HFU) il flusso proveniente dal mantello superiore, A_0 (in HGU; $1 \text{ HGU} = 10^{-13} \text{ cal/cm}^3 \text{ s}$) il calore radiogenico prodotto dalle zone superficiali e D un parametro che ha le dimensioni di una lunghezza (cm) ed esprime lo spessore di un ipotetico strato roccioso in cui le sorgenti radiogeniche di intensità A_0 fossero uniformemente distribuite.

Questa importante relazione mostra quantitativamente che il flusso superficiale è formato dal contributo di due termini: il calore sviluppato dalle sorgenti radiogeniche, e il calore proveniente dal mantello superiore. Quest'ultimo è legato alla dinamicità termica e tettonica profonda e all'età geologica della regione.

La (1) presenta l'incongruenza geochimica (non certo matematica) di considerare la distribuzione delle sorgenti di calore radiogenico (A_0) costante fino alla profondità D , e poi bruscamente annullata. Lachenbruch (1968, p. 6981) ha proposto una più realistica distribuzione delle sorgenti che, pur mantenendo inalterato il valore del prodotto $A_0 \cdot D$, sia decrescente con il crescere della profondità. La distribuzione proposta è:

$$(2) \quad A(z) = A_0 e^{-z/D}$$

dove $A(z)$ è la quantità di calore emessa (HGU) alla profondità z (cm). Sempre secondo Lachenbruch (1968, p. 6981) la distribuzione proposta è soddisfacente dal punto di vista geochimico.

Questo tipo di distribuzione esponenziale, ormai ritenuto valido dalla maggioranza degli studiosi, viene utilizzato nel successivo sviluppo di questa nota.

MODELLO E METODOLOGIA

Si utilizza un modello unidimensionale che considera la superficie topografica orizzontale, e normale a questa l'asse z diretto verso il centro della Terra e quindi attraversante normalmente lo strato granitico della crosta.

Sulla base delle osservazioni esposte è possibile formulare (o riformulare) le ipotesi a cui si ritiene debba soddisfare il modello:

- a) la trasmissione del calore avvenga per conduzione;

b) sia rispettata per tutto lo spessore della crosta granitica la distribuzione delle sorgenti di calore radiogenico espressa dalla (2);

c) il flusso di calore (q_m) proveniente dal mantello superiore sia costante nel tempo;

d) la crosta sia in equilibrio termico in un ampio intorno dell'asse z ;

e) la temperatura della superficie sia costantemente a zero gradi centigradi;

f) la produzione di calore radiogenico sia costante nel tempo.

L'approssimazione del modello ampiamente giustificata dal fatto che le costanti di decadimento degli isotopi considerati (U^{238} , U^{235} , Th^{232} , K^{40}) sono nell'ordine del miliardo di anni, e quindi la produzione di calore radiogenico può considerarsi praticamente costante per periodi di milioni di anni.

Sotto queste ipotesi il fenomeno è descritto dall'equazione:

$$(3) \quad \frac{d^2 T}{dz^2} = - \frac{A_0}{k} e^{z/D}$$

dove T ($^{\circ}C$) è la temperatura alla generica profondità z (cm), A_0 e D hanno lo stesso significato della (2) e k (cal/cm s $^{\circ}C$) è la conducibilità termica. La cui soluzione è data (Lachenbruch 1968 p. 6983) da:

$$(4) \quad T = \frac{q_m}{k} z + \frac{D^2}{k} A_0 (1 - e^{-z/D})$$

dove la simbologia ha lo stesso significato della (1), (2) e (3).

L'esame della (4) conferma l'osservazione di Birch *et alii* (1968) che il valore numerico della temperatura proviene dalla somma di due termini: il primo rappresenta l'effetto del flusso proveniente dal mantello superiore, il secondo il contributo delle sorgenti radioattive.

I parametri q_m , D , A_0 , k che compaiono nella (4) hanno un campo di variabilità ben individuato ed è quindi possibile determinare delle realistiche distribuzioni di temperatura. In quest'ottica la scelta dei valori numerici dei parametri in discorso viene basata sulle seguenti considerazioni e osservazioni:

I) per la conducibilità termica k si è assunto il valore di $6 \cdot 10^{-3}$ cal/cm s $^{\circ}C$ (Kappelmeyer & Haemel, 1974) che può essere considerato un valore mediamente rappresentativo delle rocce granitiche.

II) Il valore di D è secondo Willie (1971, pp. 157-158), sulla base di elaborazioni svolte da autori diversi, variabile da 7 a 11 km. Ad esempio il valore di 10,1 km è stato attribuito da Lachenbruch (1968) ad una specifica zona della Sierra Nevada. Si ritiene quindi di assumere 11 km come valore massimo e 9 km come valore medio.

III) Il flusso proveniente dal mantello superiore assume valori variabili in relazione all'attività tettonica della regione e alla sua età geologica. Sempre secondo Willie (1971, pp. 157-158), sulla base di elaborazioni svolte da autori diversi, questo valore varia da 0,4 a 1,4 HGU. Si ritiene adottare 0,9 HGU come valore medio, e 1,4 HGU come valore massimo.

IV) Le rocce granitiche presentano (come qualsiasi altro tipo petrografico) una certa variabilità nel tenore di isotopi radioattivi (U^{238} , U^{235} , Th^{232} , K^{40}) che si riflette sull'entità del gradiente geotermico. Occorre quindi, anche in questo caso, individuare i valori estremi di questo campo di variabilità e su questi sviluppare i successivi ragionamenti.

Da Wedepohl (1978, vol. II/5, pag. 92 E-4, fig. 92 E-1) si rileva che la maggior parte delle rocce granitiche presenta un contenuto in uranio variabile da 4 a 10 p.p.m.; considerando un rapporto medio Th/U pari a 5 risulta un corrispondente contenuto in torio di 20 e 50 p.p.m. Con riferimento allo stesso testo (tab. 19-E-3, pag. 19 E-5 vol. II/2) si rileva che il contenuto in potassio varia mediamente dal 3% al 4,5%.

Considerando una densità media di $2,67 \text{ g/cm}^3$ e tenendo conto dei valori estremi prima indicati si deduce che A_0 varia da 9 a 19 HGU con un valore medio di 14 HGU.

In coerenza con gli altri parametri vengono quindi assunti i valori di 14 HGU e 19 HGU rispettivamente come medio ed estremo superiore del campo di variabilità di A_0 ⁽¹⁾.

Sulla base di questi criteri è stata compilata la Tabella I che riporta quattro casi che offrono una significativa panoramica degli stati termici in cui potrebbe trovarsi la crosta granitica nell'ambito delle ipotesi formulate.

TABELLA I

	$k \text{ (cal/cm s } ^\circ\text{C)}$	$A_0 \text{ (HGU)}$	$D \text{ (km)}$	$q_m \text{ (HFU)}$	$q_0 \text{ (HFU)}$
caso a: fig. 1 . . .	$6 \cdot 10^{-3}$	14	9	0,9	2,16
caso b: fig. 2 . . .	$6 \cdot 10^{-3}$	19	9	0,9	2,61
caso c: fig. 3 . . .	$6 \cdot 10^{-3}$	19	19	0,9	2,99
caso d: fig. 4 . . .	$6 \cdot 10^{-3}$	19	11	1,4	3,49

Nell'ultima colonna è stato riportato il flusso superficiale q_0 calcolato con la (1).

(1) Questi valori corrispondono quasi esattamente alla produzione di calore radio-genico di due tipi granitici esistenti in natura: il granito del New England S.U., e il granito alcalino di Conway New Hampshire S.U. (da "*handbook of Geochemistry*", 1978).

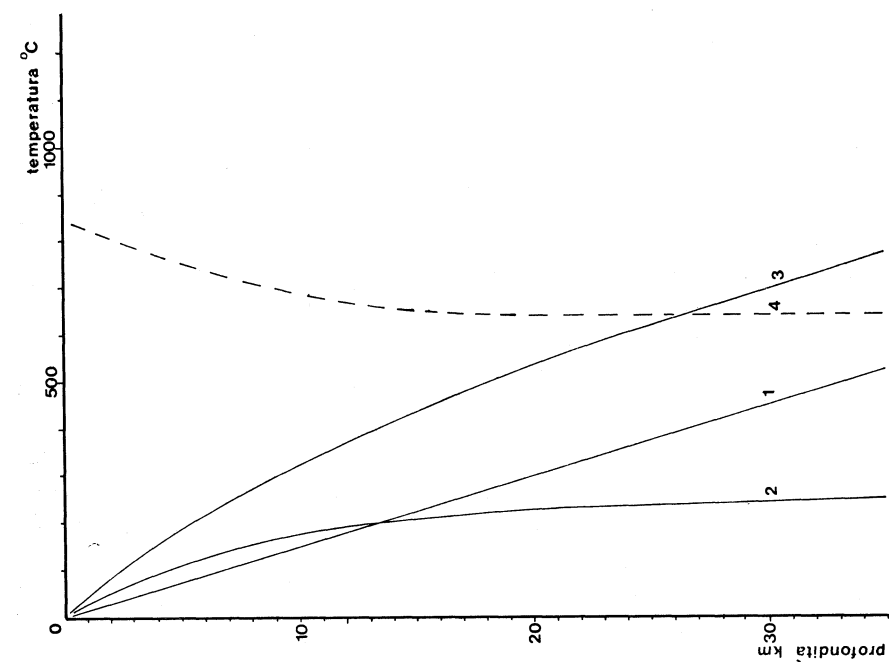


Fig. 2. - Caso b: $q_m = 0,9$ HFU, $q_0 = 2,61$ HFU.

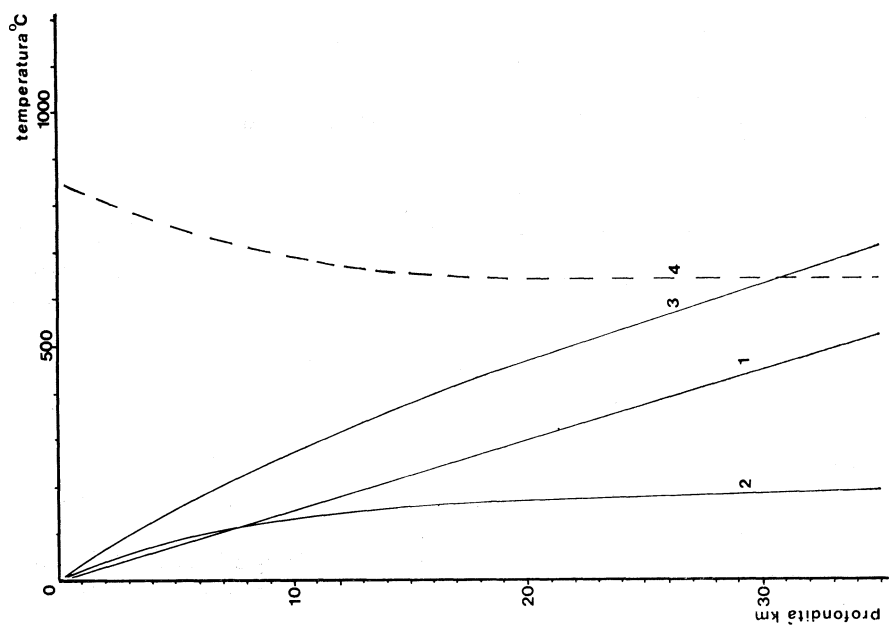


Fig. 1. - Caso a (valori medi): $q_m = 0,9$ HFU, $q_0 = 2,16$ HFU.

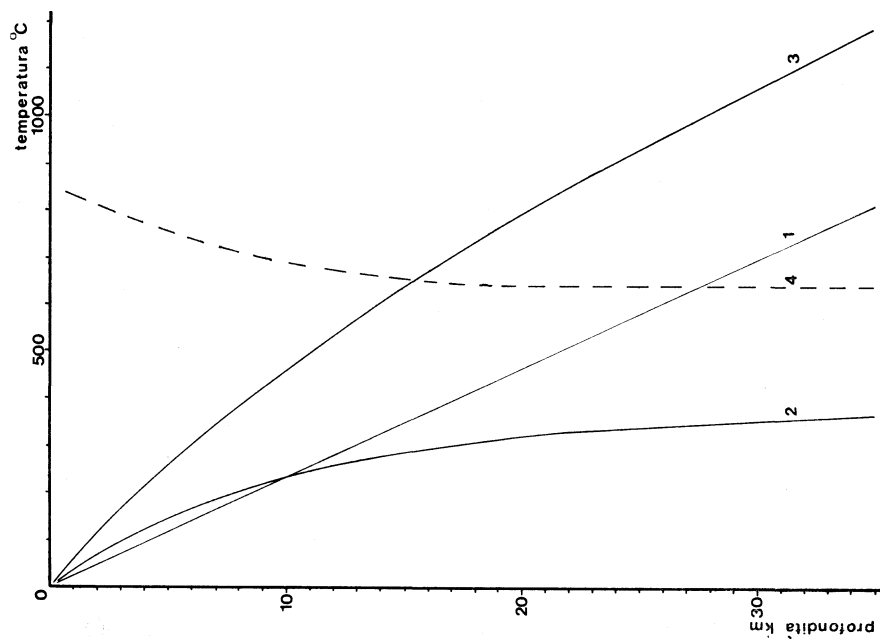


Fig. 4. - Caso d (valori massimi): $q_m = 1,4$ HFU, $q_0 = 3,49$ HFU.

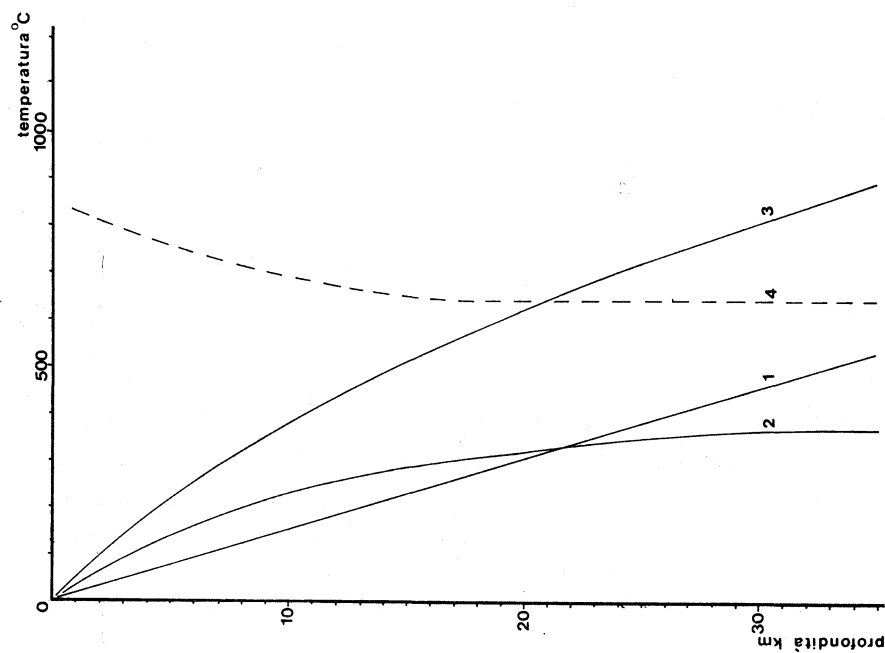


Fig. 3. - Caso c: $q_m = 0,9$ HFU, $q_0 = 2,99$ HFU.

In tutte le figure la curva 1 rappresenta il contributo del calore radiogenico, la curva 2 quello del flusso proveniente dal mantello superiore, la curva 3 la temperatura risultante e la 4 (tratteggiata) la curva di fusione del granito. Vedi Tabella I.

Essi vanno da una situazione « media » ad una « massima ». Si nota infatti che il caso *a* è costituito dai valori medi dei parametri A_0 , D , e q_m , mentre il caso *b* considera i valori medi di D e q_m ed il valore massimo di A_0 . Nel caso *c* viene considerato il valore massimo di A_0 e di D , e medio di q_m , infine nel caso *d* i valori massimi di tutti i parametri.

I casi al di sotto della media sono stati volutamente trascurati perché le corrispondenti distribuzioni di temperatura non rappresentano particolare interesse conformemente ai motivi esposti nella introduzione.

I risultati dei calcoli sono stati espressi in forma grafica nelle figg. 1, 2, 3 e 4 che riportano le curve di temperatura dei casi esaminati.

Per ogni caso sono state tracciate le curve corrispondenti all'apporto del mantello superiore (curva 1), delle sorgenti radiogeniche (curva 2), della temperatura risultante (curva 3) e la curva di fusione del granito (curva 4 tratteggiata).

ANALISI DEI RISULTATI

Un attento esame della Tabella I e delle figure consente di osservare che:

1) Il contributo in temperatura fornito dagli elementi radiogenici (curva 2), per il fatto che la loro distribuzione è esponenzialmente decrescente, tende, dopo i $10 \div 15$ km, a stabilizzarsi su valori pressoché costanti anche se in lievissimo aumento. Quindi il gradiente di temperatura prodotto dalle sorgenti radiogeniche tende a ridursi progressivamente fino a giungere dopo circa 15 km a valori trascurabili. Nei casi esaminati tale contributo (valutato a profondità maggiori di 10 km) varia da circa 200°C ad oltre 350°C . È cioè un contributo abbastanza consistente che, sommato a quello prodotto dal flusso del mantello superiore, può portare alla temperatura di fusione del granito;

2) Il flusso proveniente dal mantello superiore (curva 1) dà luogo, in accordo con la (5), ad una distribuzione lineare di temperature che, nei casi esaminati, va da $15^\circ\text{C}/\text{km}$ (caso *a*, fig. 1) a $24^\circ\text{C}/\text{km}$ (caso *d*, fig. 4).

Le curve 1 e 2 (figg. 1, 2, 3 e 4) mostrano come il flusso proveniente dal mantello superiore produca una temperatura che, da una certa profondità, è sempre superiore a quello delle sorgenti radiogeniche. In particolare, dalla fig. 4, si deduce che per flussi provenienti dal mantello superiore pari a 1,4 HFU (valore massimo considerato in questa nota), la curva 1 interseca quella di fusione del granito alla profondità di 28 km. Quindi secondo il modello, e qualora a quella profondità fossero presenti delle rocce granitiche, il flusso proveniente dal mantello superiore provocherebbe da solo la fusione di questi tipi rocciosi;

3) L'andamento della temperatura risultante (curva 3) nei primi $10 \div 15$ km presenta una rapida variazione di tipo esponenziale (effetto preponderante degli elementi radiogenici) per poi diventare quasi lineare (effetto preponderante

del flusso proveniente dal mantello superiore) con gradiente quasi costante. Alla profondità di 35 km la temperatura varia da 700 °C del caso a a circa 1200 °C del caso d. Questo salto di 500 °C esprime meglio di qualsiasi commento la notevole diversità termica e quindi geologica e petrografica esistente tra il caso « medio » e quello « estremo » (gradienti da 2 °C/100 m per il caso a e 3,5 °C/100 m nel caso d). Nel caso a (fig. 1) la curva 3 interseca la curva di fusione del granito alla profondità di 32 km, mentre nel caso d (fig. 4) l'intersezione avviene a 15÷16 km.

CONCLUSIONI

Questa analisi appare interessante soprattutto perché evidenzia che:

1) Alle condizioni ipotizzate dal modello, lo stato termico della crosta granitica presenta un campo molto ampio data la variabilità dei parametri che concorrono a formare la distribuzione di temperatura. Infatti si passa da valori di temperatura che possono ritenersi « normali » a valori che alla profondità di 15÷16 km raggiungono il punto di fusione del granito.

2) Il contributo in temperatura attribuito agli elementi radiogenici non supera i 350 °C, quindi sono da escludere eventuali fenomeni di fusione legati unicamente a questo fattore (perlomeno alle concentrazioni considerate in questa nota); mentre quello dovuto al flusso proveniente dal mantello superiore può, alla profondità di 35 km, superare gli 800 °C.

3) La temperatura di fusione del granito alla profondità di 15÷16 km può essere raggiunta solo con il concorso di entrambi i fattori.

4) La formazione di sacche di materiale fuso possono verificarsi anche più in alto di 15÷16 km. Sono infatti sempre possibili anomalie di flusso del mantello, anomalie della conduttività termica ed anomalie nella distribuzione degli elementi radioattivi.

5) La fusione del granito determina fatalmente contrasti di densità e quindi spinte ascensionali che tendono a sollevare la massa calda e le rocce di copertura (astenoliti di Belousov (1966)).

BIBLIOGRAFIA

- BELOUSSOV V. V. (1966) - *Modern concepts of the structure and development of the Earth's crust and the upper mantle of continents*, « Quart. Journ. Geol. Soc. », 122, 293-314.
BELOUSSOV V. V., REISNER G. I., RUDICH E. M. e SHOLPO V. M. (1974) - *Vertical movements of the Earth's crust on the continents*, « Geophys. Surv. », 1, 245-273.
BIRCH F., ROY R. F. e DECKER E. R. (1968) - *Heat flow and thermal history in New England and New York*, chapter 33, in: « Studies in Appalachian Geology », eds. W. S. White e E-an Zen, Interscience, New York.

- CARSLAW H. S. e JAEGER J. C. (1959) – *Conduction of heat in solids*. 2a ed. Oxford Univ. Press. New York, 386 pp.
- FORNI L. (in corso di stampa) – *Evoluzione di anomalie geotermiche prodotte da masse rocciose calde*, «Atti Acc. Sc. Torino».
- FORNI L. e MALARODA R. (1978) – *A plume induced geothermic cycle and its gravimetric and isostatic effects; a mathematical model*, «Boll. Soc. Geol. It.», 97, 739–748.
- GOGUEL J. (1975) – *La Géothermie*. Doin, Paris, 171 pp.
- KAPPELMEYER O. e HAEMEL R. (1974) – *Geothermics with special reference to applications*, «Geoexploratione Mon.», ser. 1, 4.
- LACHENBRUCH A. H. (1968) – *Preliminary geothermal model of the Sierra Nevada*, «Journ. Geophys. Res.», 73, 6977–6989.
- LACHENBRUCH A. H., SASS J. H., MUNROE R. J. e MUSES T. H. (1976) – *Geothermal setting and simple heat conduction model for the Long Valley Caldera*, «Journ. Geoph. Res.», 81, 769–784.
- LOVERING T. S. (1935) – *Theory of heat conduction applied to geological problems*, «Geol. Soc. Amer. Bull.», 46, 69–94.
- MALARODA R. (1970) – *Il granito: una roccia e molti problemi*, «Boll. Ass. Min. Subalp.», Torino, 4, 621–674.
- MONGELLI F. (1981) – *Elementi di prospezione per l'energia geotermica*. Adriatica Editrice, Bari, 150 pp.
- RAMBERG H. (1967) – *Gravity, deformation and the Earth's crust*. Academic Press, London e New York, 214 pp.
- ROY R. F., BLACKWELL D. D., DECKER E. R. e BIRCH F. (1968) – *Heat generation of surface rocks and heat flow provinces*, «Trans. Am. Geoph. Union.», 49, 319.
- SORGENFREI TH. (1971) – *On the granite problem and the similarity of salt and granite structure*, «Geol. Foerem. Stockh. Foerh.», 93, 371–435.
- WEDEPOHL K. H. ed. (1978) – *Handbook of Geochemistry*. Springer Berlin.
- WINKLER H. G. F. (1976) – *Petrogenesis of metamorphic rocks*. Springer Berlin, 4a ed., 334 pp.
- WILLIE P. J. (1971) – *The dynamic Earth*. Wiley e Sons, New York, 416 pp.