Rend. Soc. Geol. It., 4 (2007), Nuova Serie, 296-299, 4 ff.

Terremoti, trasformazioni di fase, catene a pieghe: è possibile una nuova prospettiva globale?

GIANCARLO SCALERA (*)

ABSTRACT

Earthquakes, phase changes, fold belts: it is possible a new global perspective?

Starting from considerations about the unexpected inhomogeneous 'filamentous' distribution of the deep hypocentres on the Italian, Mediterranean and global Wadati-Benioff zones, a new global tectonics framework involving non-collisional orogenic processes – and deriving from global expansion, rifting, isostasy, surfaceward flow of deep material, gravitational spreading, and mantle phase changes – is proposed. The associated model of evolution of an orogen can be linked to the volume increase of an isostatically uprising mantle column which segments slowly overcome a *solidus-solidus* boundary of the temperature-pressure phase diagram.

KEY WORDS: *deep earthquakes, vertical displacements, orogenic processes, mantle phase changes, expanding Earth.*

TERMINI CHIAVE: *terremoti profondi, spostamenti verticali, processi orogenici, cambiamenti di fase nel mantello, Terra in espansione.*

I terremoti non sono distribuiti uniformemente né lungo le catene montuose e gli archi né in profondità. Particolarmente disomogenea è la loro distribuzione lungo il margine tra Africa ed Eurasia. Se ci si prefigge di capire le zone in cui i terremoti profondi si originano, e di esaminare il loro contesto regionale e globale, è meglio abbandonare le tradizionali sezioni verticali in 2-D, perpendicolari alla fossa-arco-retroarco e alla catena, ed aiutarsi invece con mappe 3-D a scala più larga che visualizzino l'intera estensione delle zone di Wadati-Benioff. Si riesce così a rendere evidente le caratteristiche comuni nelle inomogeneità delle distribuzioni ipocentrali lungo le cosiddette zone di subduzione sia italiane e della regione mediterranea (fig. 1) che dei margini attivi circum-pacifici (fig. 2).

Usando a questo scopo i recenti cataloghi globali di terremoti accuratamente rilocati (ENGDAHL *et alii*, 1998), al posto delle attese zone Wadati-Benioff planari, con pendenza media 45°, o a cucchiaio, si evidenziano invece tipiche distribuzioni a filamenti o colonnari di ipocentri, che con il loro essere più larghe sotto la crosta e rastremate in profondità, assomigliano a pennacchi di fumo emessi da ciminiere o ad alberi, suggerendo che l'origine della zona di disturbo Wadati-Benioff risieda in un volume ristretto e profondo. Considerando che molto difficilmente un processo subduttivo potrebbe dar luogo a simili distribuzioni ipocentrali profonde, occorre formulare nuove proposte interpretative per le zone dei margini attivi e per gli orogeni che le sovrastano.

Il conseguente nuovo schema di tettonica e geodinamica globale fa ricorso a meccanismi orogenetici non-collisionali, il cui motore primo è una lenta espansione globale nel tempo geologico, ed in cui sono coinvolti in una catena causale *rifting*, risalita isostatica di materiali profondi, cambiamenti di fase con aumento di volume (GREEN & RINGWOOD, 1970; RINGWOOD, 1991), sollevamento topografico, *spreading* gravitazionale (fig. 3). La estrusione del volume eccedente, prodotto in profondità dalle trasformazioni di fase *solidus-solidus*, produce in superficie la formazione di nappe gravitative che sovrascorrono i sedimenti del precedente bacino di *rift*, forzandoli in un percorso di seppellimento che imita la subduzione, ma che non raggiunge profondità maggiori di 50-70 km. Al confine tra materiali in risalita e crosta e litosfera sovrascorsa, spinta e piegata verso il basso, sono possibili fenomeni come metamorfismo, *mixing*, migmizzazione, e sollevamento e trasporto in superficie di frammenti più o meno metamorfosati della crosta e litosfera in seppellimento.

I terremoti costituiscono la più importante evidenza fattuale di immagazzinamento e rilascio locale di *stress* deviatorico, il quale può essere causa di sovrapressioni locali. Bisognerebbe quindi considerare la possibilità che i frammenti lenticolari esumati di facies metamorfiche di alta o ultra-alta pressione (HP-UHP) siano il prodotto di grandi terremoti accaduti a profondità non maggiori di poche decine di chilometri (Scalera, 2005b).

Questa proposta di modello d'evoluzione di una catena a pieghe è in accordo con le anomalie positive delle velocità di propagazione delle onde sismiche rivelate dalla tomografia sismica al di sotto – con varie pendenze – di gran parte degli orogeni ed archi (VAN DER VOO *et alii*, 1999; PIROMALLO & MORELLI, 2003; SPAKMAN & WORTEL, 2004; SCALERA, 2005a; CIMINI & MARCHETTI, 2006). Le altezze topografiche ottenibili dal meccanismo di estrusione a crescita di volume di questo schema sono consistenti con i valori di aumento di volume associati alla transizione delle principali fasi mineralogiche del mantello verso fasi con reticolo cristallino meno compatto. Esiste la possibilità, in questo modello, che un trasporto discontinuo verso la superficie di materiali profondi del mantello possa essere messo in relazione con le discontinuità osservate nella evoluzione reale degli orogeni (BASILI, 1999; CALAMITA *et alii*, 2004; SCALERA, 2005a) e con la diffusa presenza di terrazzi marini sollevati (non relazionabili a cicli eustatici) nell'attuale periodo neotettonico (CUCCI, 2004; CUCCI &

(*) INGV - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Via di Vigna Murata, 605 - 00143 Roma, Italy.
Giancarlo Scalera: e-mail giancarlo.scalera@ingv.it

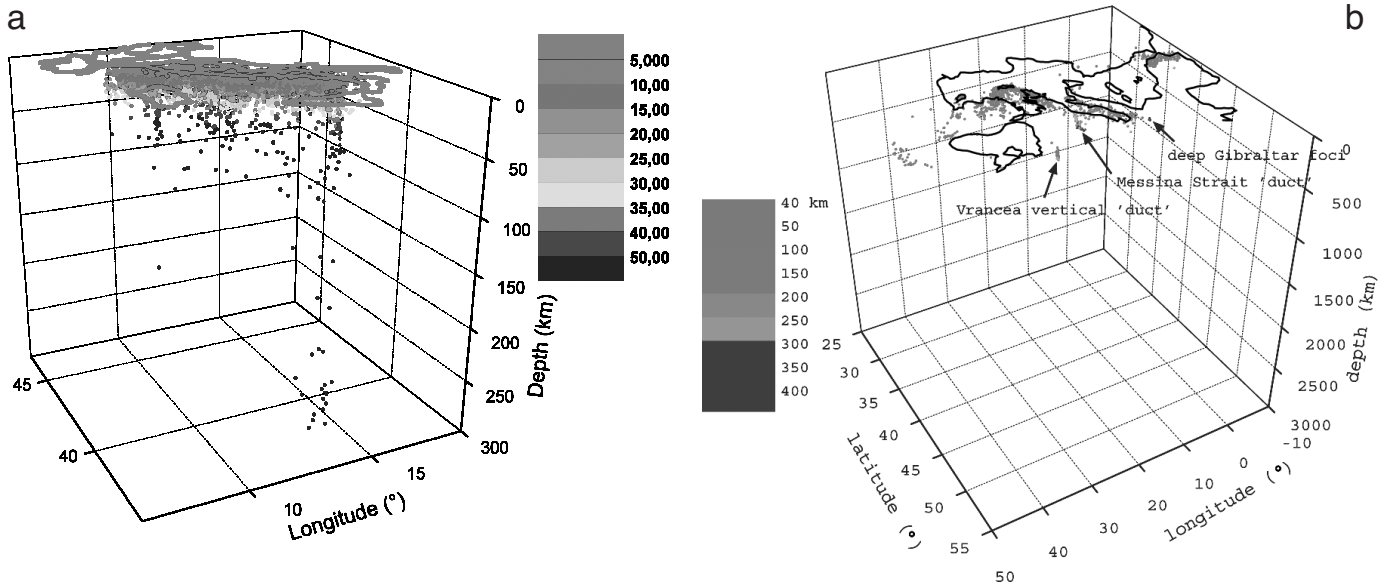

Fig. 1 - Distribuzione non uniforme della sismicità italiana e mediterranea. I dati italiani provengono dal Catalogo della Sismicità Italiana (CASTELLO *et alii*, 2006), quelli mediterranei da ENGDAHL *et alii* (1998), quelli di Gibilterra dall'USGS (2006). In *a*) sono mostrate le zone di maggior densità ipocentrale per profondità intorno a 50 km sotto l'Appennino settentrionale (Garfagnana), L'Appennino centrale (Umbria), e l'Appennino meridionale (Irpinia). In *b*) è mostrata la zona o filare di terremoti profondi sotto lo stretto di Messina che raggiunge la profondità di 500 km. Un raggruppamento colonnare simile ma più corto (profondità fino a 180 km) è presente sotto la regione Vrancea, in Romania (RAYKOVA & PANZA, 2006). Questi raggruppamenti a singolo filamento o colonna sono casi particolari di molte altre zone a filamenti multipli osservabili nella maggioranza delle zone di Wadati-Benioff.

– Non uniform distribution of Italian and Mediterranean seismicity. Italian data from the Italian Seismicity Catalogue (CASTELLO et alii, *2006); Mediterranean data from ENGDAHL* et alii, *1998; Gibraltar zone data from USGS (2006). In* a) *The hypocenters show zones of higher density at depth of 50 km below North Apennines (Garfagnana), Central Apennines (Umbria), Southern Apennines (Irpinia). In* b) *the deep earthquake zone under the Messina Strait reaches the depth of 500 km. A similar but shorter near-vertical clustering of hypocenters is recognizable in Romania, Vrancea region, depth up to 180 km (RAYKOVA & PANZA, 2006) This 'single-filament' typical pattern is similar to many other 'multi-filamentous' observable patterns in most Wadati-Benioff zones around the world.*

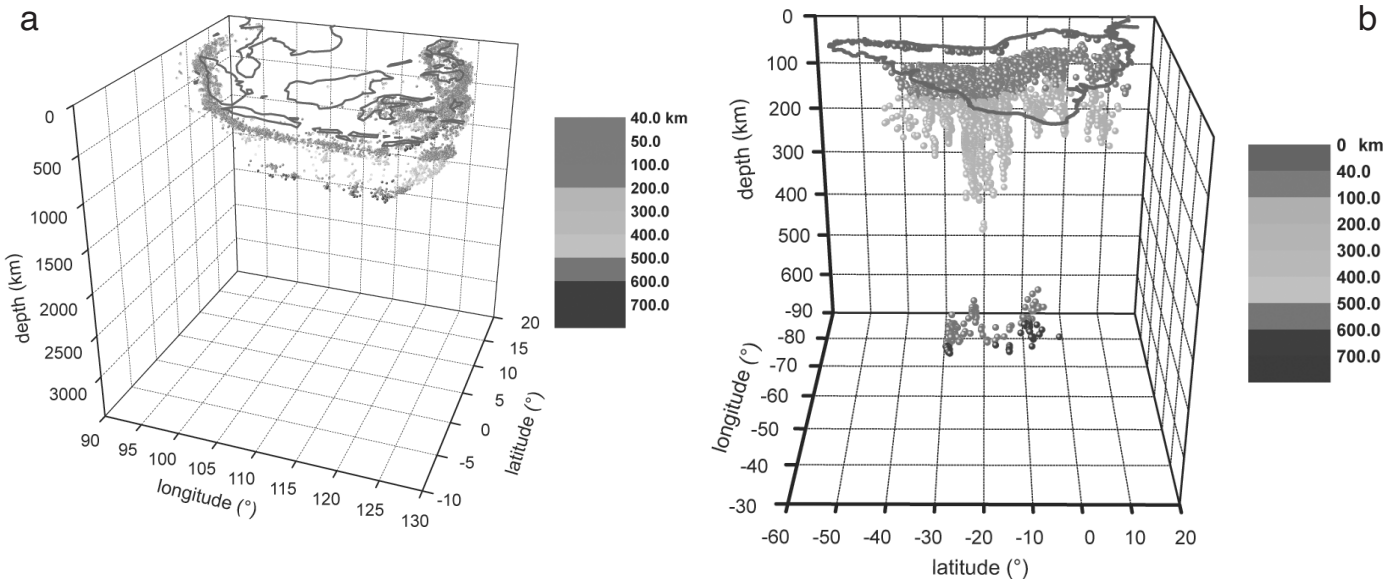

Fig. 2 - Due esempi di struttura a 'filamenti' della disposizione degli ipocentri nelle cosiddette zone di subduzione (dati da ENGDAHL *et alii*, 1998). In *a*) l'arco di Sunda (da Sumatra alle isole Andamane) mostra ipocentri non più profondi di 250-300 km. Una sismicità più profonda esiste da Java alla Nuova Guinea, con fuochi fino a 700 km di profondità. In quest'ultima zona gli ipocentri tendono a raggrupparsi in larghe zone colonnari delle quali le isole costituiscono i capitelli. In *b*) è mostrata la zona Wadati-Benioff del Sud America. I cerchi scuri che seguono le coste occidentali rappresentano i settantadue vulcani della Cordigliera delle Ande che sono stati attivi in tempi storici (dati dallo SMITHSONIAN INSTITUTION, 2006).

– Two examples of the filamentous structure of the hypocentral pattern in the so called subduction zones (data from ENGDAHL et alii, *1998). In* a) *the Sunda arc (from Sumatra to Andaman islands) shows hypocenters not deeper than 250-300 km. Deepest seismicity is present under Java up to New Guinea, with focal sources down to 700 km. Here the hypocenters have the tendency to group in large columnar zones of which the islands are like architectural capitals. In* b) *the South American Wadati-Benioff zone. The circles along the west coast represent the seventy-two volcanoes along the Andes Cordillera, which have been active in historical time (data from SMITHSONIAN INSTITUTION, 2006).*

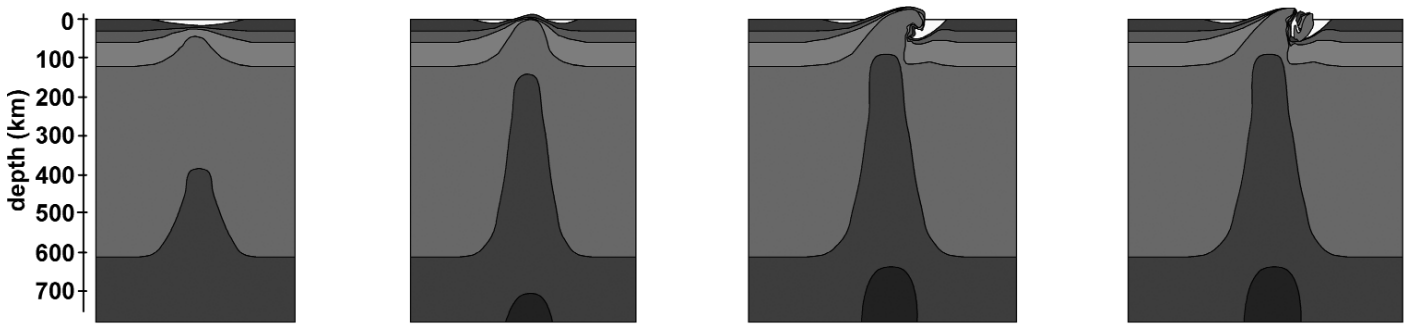

Fig. 3 - Il nuovo modello proposto per la formazione di montagne a pieghe. Partendo da sinistra, una situazione tensionale produce un assottigliamento della crosta della litosfera e del mantello superiore. Si crea così in superficie una depressione. La necessità della compensazione isostatica produce come effetto una grande risalita delle discontinuità del mantello. In questa colonna in risalita, il materiale subisce cambiamenti di fase verso reticoli cristallini meno compatti, con aumento di volume e necessità di spazio di accomodamento. Se il tasso di rifting è sufficientemente basso, l'eccesso di volume può essere accomodato in superficie con rigonfiamento topografico della crosta e successiva creazione di pieghe gravitative. La catena a pieghe così formatasi può subire collasso gravitazionale, erosione, e denudamento del materiale che si è metamorfosato a causa del seppellimento in profondità dovuto alla spinta delle nappe gravitative. La colonna di mantello in sollevamento può collaborare, agendo come un 'ascensore', al trasporto in superficie del metamorfismo avvenuto in prossimità delle radici dell'orogene (50-70 km).
– The proposed new model of fold belts formation. Starting from left, a tensional situation produces a stretching of crust, lithosphere and upper mantle. A surface furrow appears. Due to the necessity of isostatic compensation the greater effect of the stretching appears as a strong uplift of the lithospheric and mantle strata. On this uplifting column an excess of room become necessary because the mantle material undergoes phase changes with increase of volume. If the spreading rate is low, the volume excess is sufficient not only to fill the space between the vertically splitted lithosphere and mantle, but it can also produce updoming and folding of the crust. The new fold belt can undergo erosion, summital collapse and gravitational spreading, with final denudation of metamorphosed crustal material previously buried by gravity nappes, together with several kinds of mantle facies. The uprising mantle column can act as «elevator» for deep metamorphism facies.

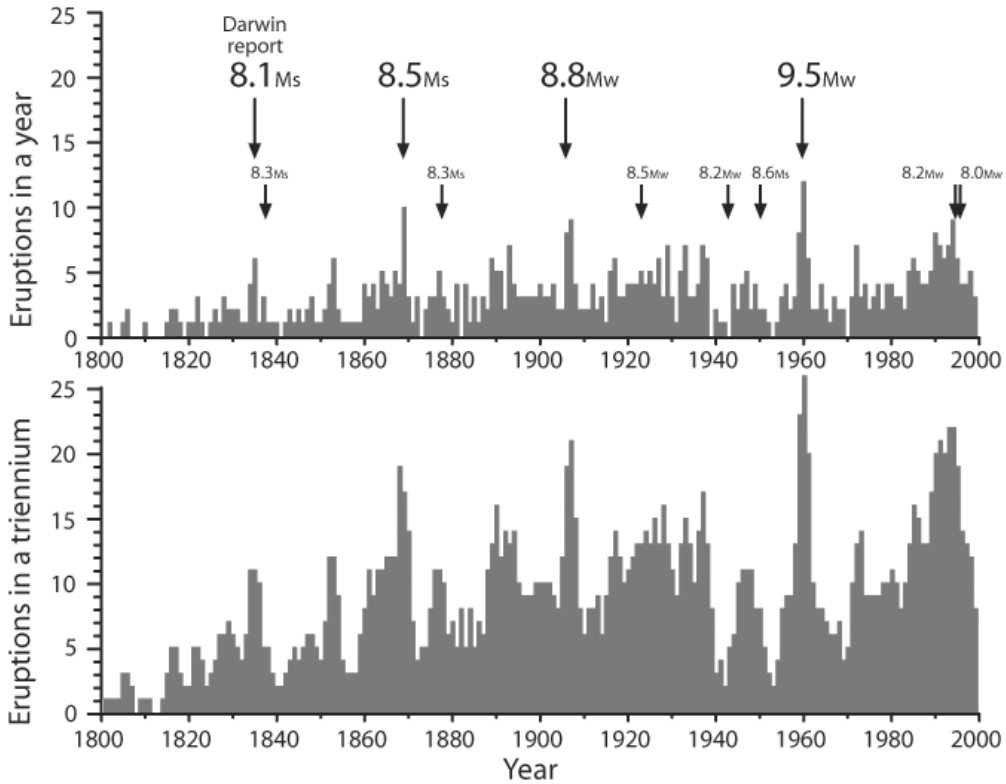

Fig. 4 - I dati dal Catalogo delle Eruzioni Vulcaniche dello Smithsonian Institution (2006) per i vulcani andini del Sud America dal 1800 al 1999. È stato riportato il numero di eruzioni avvenute ogni anno e per triennio. I dati dei forti terremoti provengono dai cataloghi di Engdahl *et alii* (1998) e dello USGS (2006). I picchi nel numero di eruzioni per anno e per triennio si innalzano molto nettamente rispetto alla normale attività eruttiva di fondo in corrispondenza di forti terremoti con maglitudo M>8.4. Specialmente alto è il picco di eruzioni che corrisponde al più grande terremoto mai avvenuto, l'evento del Cile del 1960 (M=9.5). Non può invece essere riconosciuta una analoga correlazione tra grandi sismi ed eruzioni per l'arco dell'Indonesia.
– The data from 1800 to 1999 of the global Smithsonian Institution (2006) Catalogue of Volcanic Eruptions for the South American Andean volcanoes. The number of volcanic eruptions in a year and the number of volcanic eruptions in a triennium are plotted. The earthquakes data are from Engdahl et alii *(1998) and from USGS (2006). The peaks of the number of eruptions seem neat and well evident with respect to the normal background-noise when some M>8.4 earthquakes occur. Especially neat is the cluster of eruptions which matches the great Chilean earthquake of 1960 (M=9.5, the greatest magnitude ever recorded). An analogous correlation is not recognizable in the data of the global Smithsonian Catalogue of Volcanic Eruptionss for the Indonesian zone.*

TERTULLIANI, 2006; OLLIER, 2006), tipici di fasi orogeniche giovani (MORETTI & GUERRA, 1997).

Infine, il tasso di rifting tra due blocchi litosferici dovrebbe essere considerato un fattore decisivo nel causare l'evoluzione dell'orogene in direzione di una vera catena a pieghe (in caso di un bassissimo tasso di *rifting*) o in direzione di una depressione in continuo allargamento (tasso di *rifting* sufficientemente alto) fino a sfociare in un bacino marino ed in un vero fondale oceanico. Invero, alcune zone come Tonga- Kermadec-Nuova Zelanda-Macquarie suggeriscono, con il loro prolungarsi una nell'altra (fossa parallela ad una dorsale in espansione, catena a pieghe matura, dorsale oceanica, rispettivamente), che possano spiegarsi unitariamente come differenti momenti di un unico processo orogenetico che dovrebbe essere descritto in dettaglio lungo un appropriato asse del tempo.

Ulteriore supporto allo schema descritto proviene da una analisi dei dati sismici (USGS, 2006) e delle eruzioni (SMITHSONIAN INSTITUTION, 2006) lungo gli archi dell'Indonesia e del Sud America andino. I grandi terremoti e le eruzioni sembrano essere correlati lungo la cordigliera delle Ande, mentre una analoga correlazione non è riscontrabile in Indonesia. Questo può essere interpretato in uno schema globale di Terra in espansione asimmetrica (SCALERA & JACOB, 2003; SCALERA, 2006). Stessa indicazione a supporto di prevalenti movimenti verso la superficie, e non subduttivi, proviene dalla anomalia cosismica prodottasi nel percorso della polodia (moto del polo istantaneo di rotazione) durante il grande terremoto di Sumatra (SCALERA, 2005b).

BIBLIOGRAFIA

BASILI R. (1999) - *La componente verticale della tettonica Plio-Quaternaria nell'Appennino Centrale*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra, XI ciclo. Università degli Studi di Roma «La Sapienza» - Dipartimento di Scienze della Terra & CNR - Istituto di Ricerca sulla Tettonica Recente, x-108 pp.

CALAMITA F., VIANDANTE M.G. & HEGARTY K. (2004) - *Pliocene-Quaternary burial/exhumation paths of the Central Apennines (Italy): implications for the definition of the deep structure of the belt*. Boll. Soc. Geol. It., **123**, 503-512.

CASTELLO B., SELVAGGI G., CHIARABBA C. & AMATO A. (2006) - *CSI - Catalogo della sismicità italiana 1981-2002, version 1.1*. INGV, Roma, http://www.ingv.it/CSI/

CIMINI G.B. & MARCHETTI A. (2006) - *Deep structure of peninsular Italy from seismic tomography and subcrustal seismicity*. In: Lavecchia G. & Scalera G. (eds.), 2006: Frontiers in Earth Sciences: New Ideas and Interpretations. Annals of Geophysics, Supplement to Vol., **49** (1), 331-345.

CUCCI L. (2004) - *Raised marine terraces in the Northern Calabrian Arc (Southern Italy): a ~600 kyr-long geological record of regional uplift*. Annals of Geophysics, **47** (4), 1391-1406.

CUCCI L. & TERTULLIANI A. (2006) - *I terrazzi marini nell'area di Capo Vaticano (Arco Calabro): solo un record di sollevamento regionale o anche di deformazione cosismica?* Il Quaternario - Italian Journal of Quaternary Sciences, **19** (1), 89-101.

ENGDAHL E.R., VAN DER HILST R.D. & BULAND R.P. (1998) - *Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination*. Bull. Seism. Soc. Amer., **88**, 722-743.

GREEN D. & RINGWOOD A. (eds.) (1970) - *Phase Transformation & the Earth's Interior.* Proceedings of the symposium held in Canberra, 6-10 January 1969, by the International Upper Mantle Committee and the Australian Academy of Sciences, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 519 pp.

MORETTI A. & GUERRA I. (1997) - *Tettonica dal Messiniano ad oggi in Calabria: Implicazioni sulla geodinamica del sistema Tirreno-Arco Calabro*. Boll. Soc. Geol. It., **116**, 125-142.

OLLIER C.D. (2006) - *Mountain uplift and the Neotectonic Period*. In: Lavecchia G. & Scalera G. (eds.), 2006: Frontiers in Earth Sciences: New Ideas and Interpretations. Annals of Geophysics, Supplement to Vol., **49** (1), 437-450.

PIROMALLO C. & MORELLI A. (2003) - *P-wave tomography of the mantle under the Alpine-Mediterranean area*. J. Geophys. Res., **108** (B2), 2065, doi: 10.1029/2002JB 001757.

RAYKOVA R.B. & PANZA G.F. (2006) - *Surface waves tomography and non-linear inversion in the southeast Carpathians*. Physics of the Earth and Planetary Interiors, **157**, 164-180.

RINGWOOD A.E. (1991) - *Phase transformations and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle*. Inaugural Ingerson Lecture delivered on May 12 1988 at the Goldschmidt Conference held in Baltimore, Geochim. Cosmochim. Acta, **55**, 2083-2110.

SCALERA G. & JACOB K.-H. (eds.) (2003) - *Why Expanding Earth? A book in Honour of Ott Christoph Hilgenberg*. Proceedings of the 3rd Lautenthaler Montanistisches Colloquium, Mining Industry Museum, Lautenthal (Germany) May 26, 2001, INGV, Rome, 465 pp.

SCALERA G. (2005a) - *A new interpretation of the Mediterranean arcs: Mantle wedge intrusion instead of subduction*. Boll. Soc. Geol. It., Volume Speciale, **5**, 129-147.

SCALERA G. (2005b) - *The geodynamic meaning of the great Sumatran earthquake: inferences from short time windows*. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, **35** (June), 8-23.

SCALERA G. (2006) - *TPW and Polar Motion as due to an asymmetrical Earth expansion*. In: Lavecchia G. & Scalera G. (eds.), 2006: Frontiers in Earth Sciences: New Ideas and Interpretations. Annals of Geophysics, Supplement to Vol. **49** (1), 483-500.

SMITHSONIAN INSTITUTION (2006) - *Global Volcanism Program website*: http://www.volcano.si.edu.

SPAKMAN W. & WORTEL R. (2004) - *A tomographic view on Western Mediterranean Geodynamics*. In: W. Cavazza, F.M. Roure, W. Spakman, G.M. Stampfli & P.A. Ziegler (eds.): The Transmed Atlas. The Mediterranan region from crust to mantle, Springer, Berlin, 32-52.

USGS (2006) - *Earthquake Hazards Program - Online Earthquakes Global and regional Catalogues Search*. http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic.html

VAN DER VOO R., SPAKMAN W. & BIJWAARD H. (1999) - *Tethyan subducted slabs under India*. Earth and Planetary Science Letters, **171**, 7–20.