
ATTI ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI
CLASSE SCIENZE FISICHE MATEMATICHE NATURALI
RENDICONTI

PIETRO CALOI

**L'agitazione microsismica destata dalle perturbazioni
meteorologiche: II. Origine dei microsismi associati
al transito dei cicloni**

*Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Classe di Scienze Fisiche,
Matematiche e Naturali. Rendiconti, Serie 8, Vol. 50 (1971), n.6, p. 709–719.*
Accademia Nazionale dei Lincei

<http://www.bdim.eu/item?id=RLINA_1971_8_50_6_709_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/>

Geofisica. — *L'agitazione microsismica destata dalle perturbazioni meteorologiche: II. Origine dei microsismi associati al transito dei cicloni.* Nota (*) del Socio PIETRO CALOI (**).

SUMMARY. — Microseisms of very great amplitude rise from the sea bottom, near the coast, and are always associated with rapid barographic perturbations, generally accompanied by cyclonic winds.

The creation of the "fetch" is sufficient condition for the rising of microseisms; particularly persistent are those excited by coperialdal "significant waves". Only the microseisms excited by significant waves are propagated to very great distances.

In the origin-zone of the microseismic perturbations, where the wavy systems attain their greatest development, rise microseisms of every periods, from the smallest ones to those coperialdal with the significant waves. A seismic station, near the origin-zone, for strong atmospheric perturbations, is then able to record simultaneously a whole scale of microseisms, which gives the seismogram a chaotic aspect.

Only seismic stations, distant from origin-zone, record regular microseisms: those associated with significant sea waves. In other conditions, propagation distance of microseisms increases with increasing of coperialdal significant waves period.

Microseisms are generally excited by waves which "feel the bottom": viz. are originated as interaction from water and bottom, on the rhythm of the primary frequency. The double frequency, which require a second order effect—in conformity with Longuet-Higgins theory—, can occur out to sea, in deep waters.

Microseisms present no appreciable dispersion in their propagation, even at very great distances.

I. — È noto che con il termine « fetch » si indica un tratto di mare (o di lago) sul quale il vento abbia velocità e direzione costanti: la sua lunghezza, nella direzione del vento, è quindi uguale al cammino che le onde possono percorrere rimanendo sempre sotto la sua azione. Il limite sopravvento del fetch, o inizio del fetch, potrà essere costituito da una costa o da una linea (per esempio un fronte); il limite sottovento costituirà *la fine* del fetch e potrà essere costituito, a sua volta, o da una costa o da una linea.

È pure noto che

$$C^2 = \frac{gL}{2\pi} \operatorname{tanh} \left(\frac{2\pi d}{L} \right),$$

dove C è la velocità dell'onda, L la lunghezza d'onda, d la profondità dell'acqua e g l'accelerazione di gravità.

Per onde *di acqua profonda* ($d > \frac{1}{2}L$), C dipende solo da L e non da d ($C = \sqrt{gL/2\pi}$);

per onde in *trasformazione* ($\frac{1}{2}L > d > \frac{1}{25}L$), C dipende da L e da d ;

per onde *d'acqua bassa* ($d < \frac{1}{25}L$), C dipende solo da d e non da L ($C = \sqrt{gd}$).

(*) Presentata nella seduta del 18 giugno 1971.

(**) Istituto Nazionale di Geofisica.

Le due ultime specie d'onde sono spesso indicate con l'apposizione di *onde che sentono il fondo*.

In una zona a fetch coesistono onde di diverso tipo. Fra queste Swerdrup e Munk definiscono come *onde significative* quelle la cui altezza, lunghezza e periodo sono da ritenersi uguali al valor medio delle altezze, delle lunghezze e dei periodi delle onde più alte che costituiscono la terza parte delle onde esistenti: caratteristiche possedute da quelle fra le onde, che, nell'istante dell'osservazione, hanno raggiunto nella località il *massimo sviluppo*, in relazione alla durata dell'azione del vento, all'estensione della superficie marina e alla velocità del vento.

Se un vento di velocità costante U domina, per un tempo sufficientemente lungo, su un'area (fetch) di dimensioni limitate (come necessariamente avviene, per esempio, su un lago o su un tratto di mare chiuso) viene a determinarsi, nei singoli punti, posti a distanze fisse dall'inizio del fetch (riva sottovento del lago o del mare chiuso), uno stato *stazionario*, e cioè tale che *in ogni punto*, o in ogni striscia fissa, le dimensioni, e in particolare la lunghezza L_0 delle onde, non variano più con il tempo t , e cioè con la durata del vento che può suppersi illimitata.

Su questi problemi furono compiute numerose ricerche [1, 2].

Dal punto di vista pratico, ritengo interessante quella compiuta dal compianto prof. Tenani [1].

2. - Vediamo il caso della tempesta microsismica, legata al transito del ciclone del 15.VII.1970 sul Golfo di Trieste [3]. La velocità media del vento dalle 18^h alle 24 (T.M.E.C.) fu di circa 10 m/sec. Nota la velocità del vento U sul fetch - quella riportata, naturalmente, ha un valore molto approssimativo - si possono dedurre i valori della lunghezza d'onda, del periodo e della velocità delle onde nella zona di tempesta, delle onde significative. Dalle figg. 11 e 12 del citato lavoro di Tenani, nel caso di $U = 10$ m/sec, si ottiene per un punto alla distanza di 10 km dall'inizio del fetch (linea di costa) - distanza raggiungibile dal fetch con una minima durata di vento di 2 ore circa - un periodo per le onde significative (quello che a noi solo interessa) di 2^s,7. Come risulta dagli esempi riportati, tale è l'ordine di grandezza dei periodi dei microsismi, registrati a Trieste, Padova, Pieve di Cadore, Zagabria, Vienna: i microsismi nascono quindi sul fondo del Golfo di Trieste, sotto l'azione di *coperiodali* onde gravitazionali, provocate nel mare dal vento ciclonico.

Questo naturalmente vale per il tratto di mare chiuso considerato e in presenza di perturbazioni limitate - groppi e temporali -; condizioni che impediscono alle onde significative di raggiungere le dimensioni estreme, che richiedono un fetch tanto più lungo - ed una tanto più lunga durata - quanto più grande è la velocità del vento.

Nei mari chiusi quindi - e, a maggior motivo, nei laghi - in cui il fetch disponibile è limitato dalle coste, e presenta una lunghezza inferiore a quella del tratto a regime stazionario richiesta dalla velocità U del vento e dalla

sua durata, le dimensioni delle onde non possono oltrepassare, qualunque sia la durata del vento e la sua velocità, una piccola frazione delle dimensioni massime del periodo, della lunghezza, ..., associate al completo sviluppo. Ciò spiega i brevi periodi riscontrati per i microsismi, provocati dal passaggio di cicloni sul lago di Pieve di Cadore.

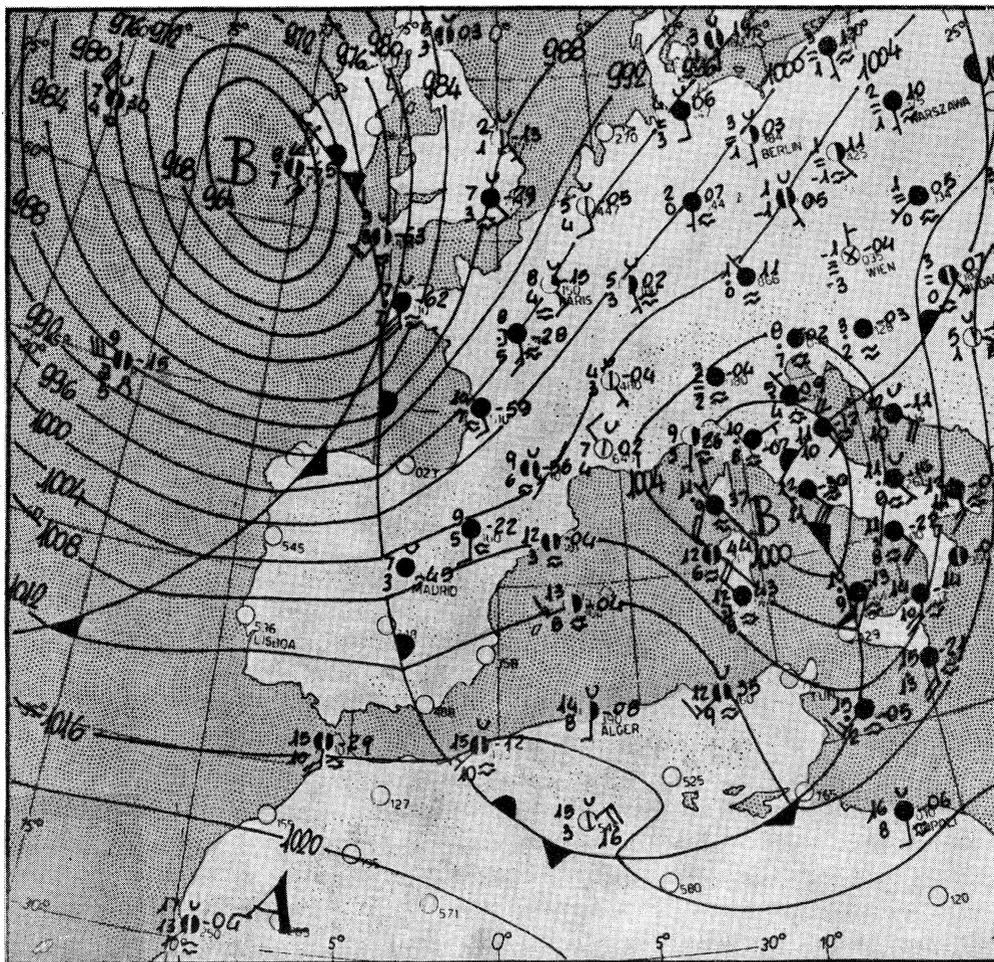


Fig. 1. - Situazione meteorologica alle 18^h del 20 gennaio 1971 (G.M.T.) sull'Oceano Atlantico nord-orientale e sull'Europa (Serv. Meteor. Aer. Mil.). La depressione atlantica era già presente alle 00 del 20, fra le Isole Britanniche e la Scandinavia; la depressione sul Tirreno si era formata verso le 12 del 20 gennaio.

3. - Non così naturalmente, nelle regioni oceaniche con venti costanti (di lunga durata) e con fetch praticamente illimitati (zona degli Alisei, ecc.). Ivi le dimensioni delle onde significative possono assumere valori prossimi a quelli massimi, legati al valore medio della velocità del vento.]

Consideriamo, per esempio, la zona dell'Atlantico al largo delle Isole britanniche e del Golfo di Biscaglia. Come è noto, tale zona è spesso attraversata, da ovest a est, da enormi zone cicloniche.

Determiniamo quale sarà il periodo delle onde significative di Sverdrup e Munk a 600 km dall'inizio del fetch, dopo 24^h di durata del vento di velocità di 20 m/sec.

A pag. 37 del lavoro di Tenani, per $U = 18,4$ m/sec, $T^* = 16^s$, dalla Tavola 12 si ottiene $\beta'_t = 0,5$ e quindi $T_0 = 8^s,0$.

Va osservato che, da quella zona, provengono frequentissime tempeste microsismiche, associate a grossi cicloni in transito. I microsismi, generalmente molto ampi, presentano d'abitudine un periodo di 8 sec. circa; non mancano casi di tempeste caratterizzate da microsismi di 7 sec. circa o 9 sec. circa. Tali tempeste durano intere giornate. È significativo che la formazione del fetch, quale può localmente presentarsi, possa spiegare il loro periodo.

4. - La formazione del fetch crea quindi condizioni favorevoli allo sviluppo di microsismi nelle zone da esso interessate.

Per quanto concerne il golfo di Trieste, ho dimostrato però che, per lo sviluppo di cospicui microsismi non è *necessaria* la formazione del fetch: microsismi, improvvisi e ampi, insorgono anche in mancanza del vento o per venti deboli varianti di direzione [3]. Unica causa perturbante, in parecchi dei casi studiati, risulta il transito sul golfo di rapidissime perturbazioni microbariche, in fase positiva, associate al passaggio di una depressione. Come ho dimostrato fin dal 1938 (ved. [8] in [3]), la depressione *deve però procedere da Ovest ad Est, in senso contrario cioè a quello secondo cui crescono le distanze dalla base del golfo, con velocità paragonabili a quella delle onde libere del mare sottostante*. Si dimostra infatti che lungo un canale chiuso all'estremo $x = 0$, indefinitamente esteso nella direzione delle x positive, per lo spostamento verticale vale la relazione

$$(1) \quad \zeta = \frac{1}{1 - V^2/C^2} \{ F(t - x/V) - (V/C) F(t - x/C) \},$$

dove V è la velocità della perturbazione, C quella delle onde libere del mare ed F una funzione qualunque dei suoi argomenti.

La (1) testimonia di una grandissima perturbazione dell'acqua, quando la perturbazione atmosferica viaggia con velocità uguale a quella propria delle libere perturbazioni dell'acqua sottostante.

Per $x = 0$, al fondo del canale (golfo), è

$$(2) \quad \zeta = \frac{1}{1 + V/C} F(t).$$

Fig. 2. - Componente verticale «Wilip» di Roma, Città Universitaria (tempo solare medio). I microsismi con 8^s circa di periodo, di provenienza nord-atlantica (fig. 1), verso le 10^h circa del 20 gennaio sono ancora poco perturbati (in basso, nella figura). A mano a mano che la depressione mediterranea dal golfo di Genova procede verso il basso Tirreno, comincia la registrazione di microsismi di 4^s circa, che si sovrappongono a quelli di origine atlantica e finiscono per mascherarli completamente durante il transito della perturbazione sul medio Tirreno. Esempio di contemporanea registrazione di microsismi, provenienti da diversa origine: quelli di sorgente più prossima alla stazione d'osservazione, anche se originariamente di ampiezza nettamente inferiore, prevalgono fino ad occultare gli altri, di origine ben più lontana.

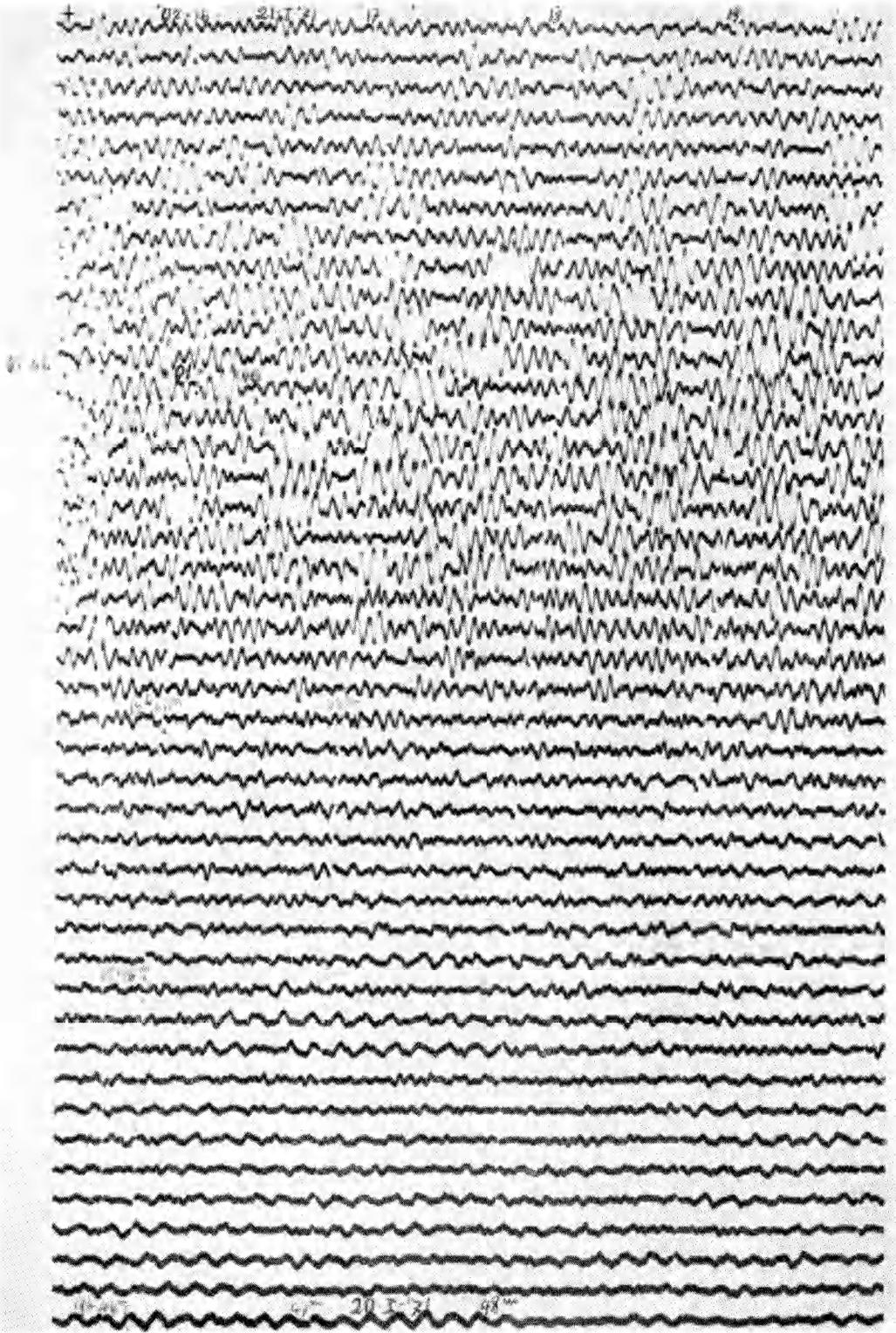


Fig. 2.

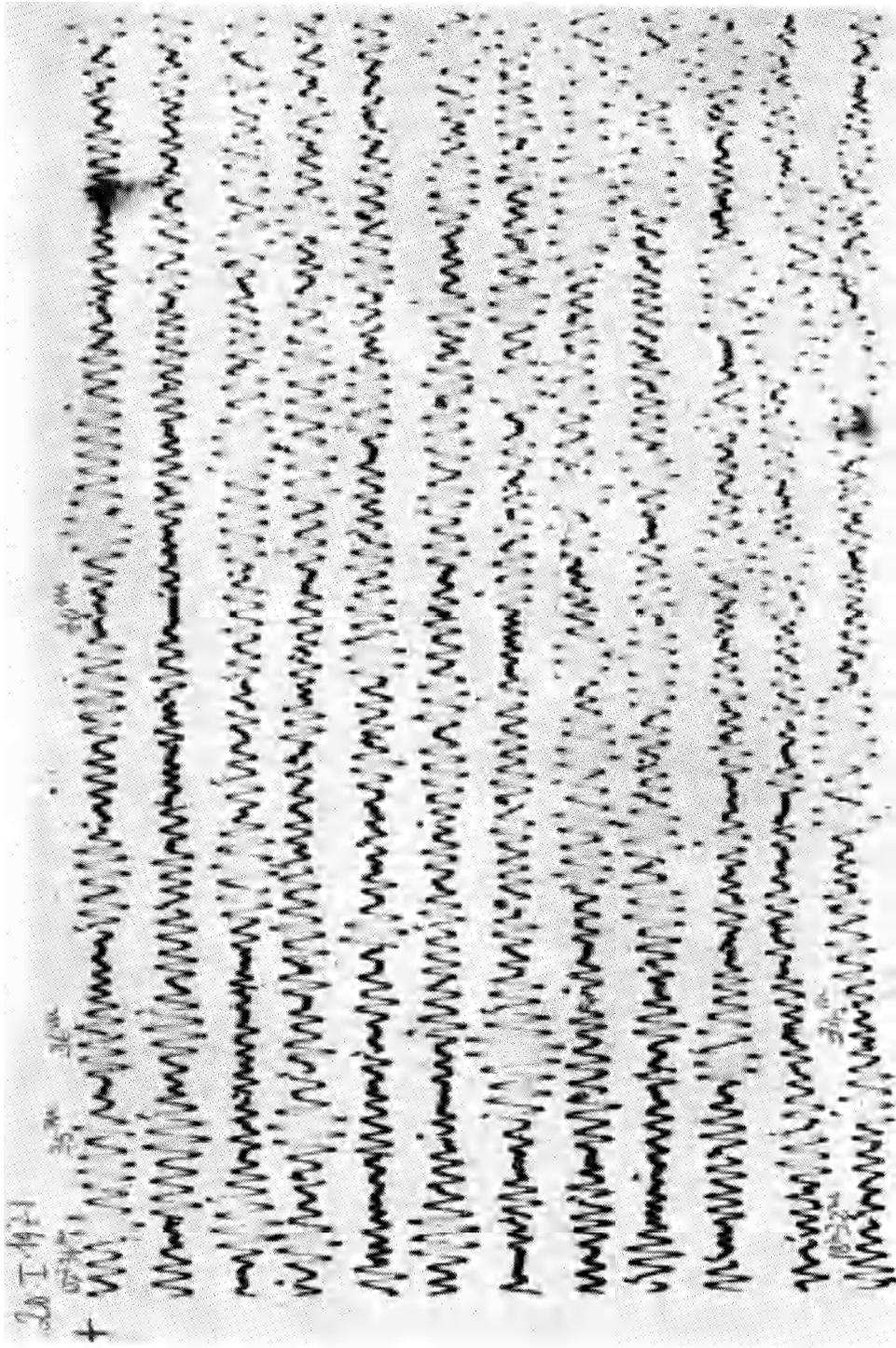


Fig. 3. - Componente verticale « Press-Ewing », a lungo periodo, di Toledo (T.M.G.). I sismografi a lungo periodo di Toledo, durante i giorni 20 e 21 gennaio 1971, registrano quasi esclusivamente, e con grande ampiezza, i microsismi con periodo di 8^s circa, provenienti dalla grande perturbazione ciclonica atlantica, di cui alla fig. 1. Mentre a Roma, il transito della perturbazione tirrenica provoca microsismi di 4^s circa (fig. 2), che coprono, data la vicinanza della zona-origine, i microsismi di provenienza atlantica (che originano a quasi 2000 km da Roma), a Toledo (che si trova a distanza pressoché uguale dai due centri di perturbazione) non v'è traccia dei microsismi di origine tirrenica. Ciò è soprattutto dovuto all'energia dell'interazione aria-acqua della perturbazione ciclonica atlantica, enormemente maggiore di quella tirrenica, e, in parte, al fatto che la prima agisce su una cadenza fondamentale di periodo pressoché doppio di quella caratteristica della seconda.

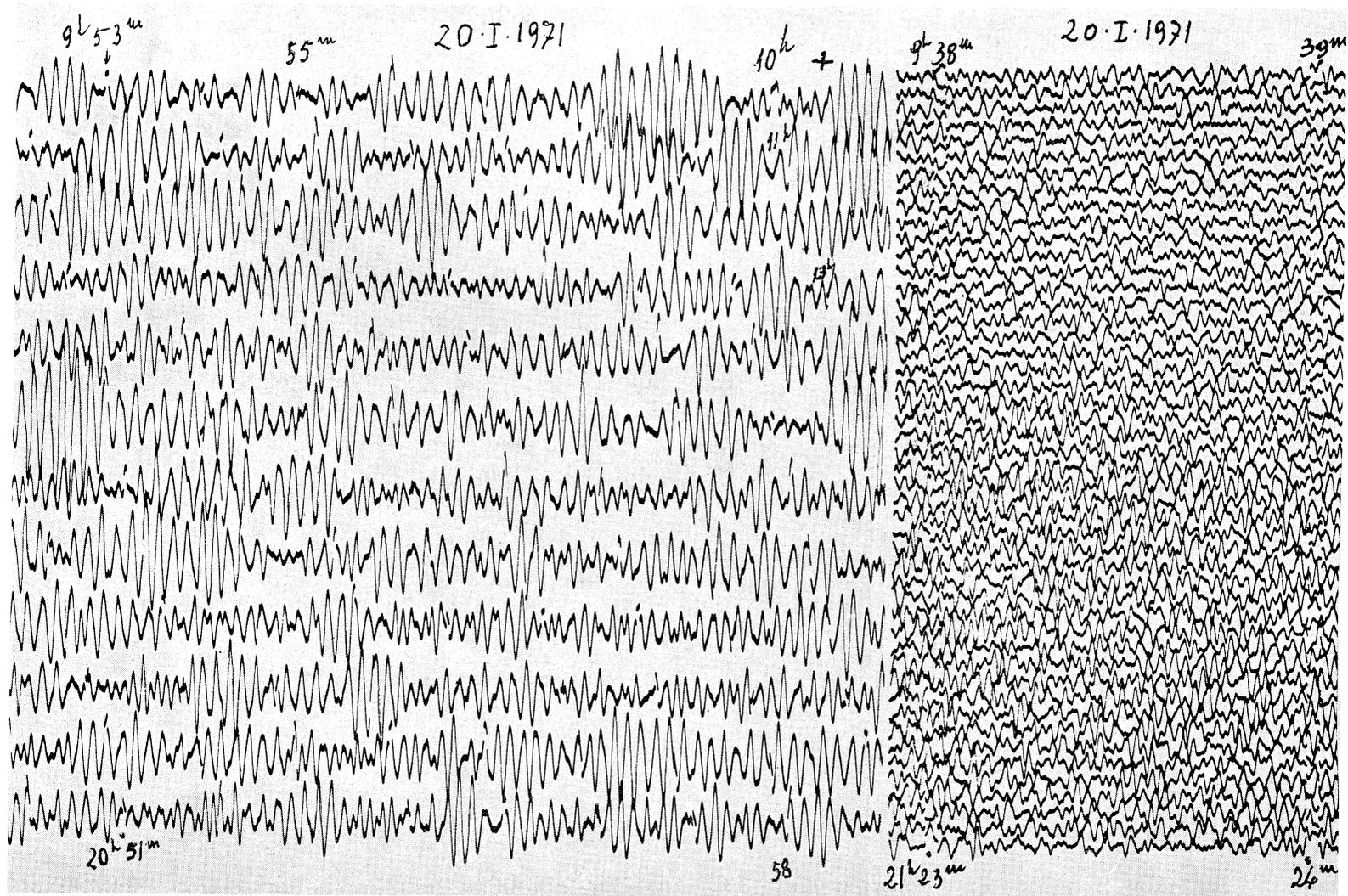


Fig. 4. - Microsismi registrati a Porto (Oporto), in occasione della perturbazione ciclonica, di cui alla fig. 1. *a)* Registrazione (a sinistra, nella figura) della componente verticale «Press Ewing» a lungo periodo (l'ingrandimento dinamico varia da 100 a 600 per periodi varianti da 1 a 8 sec.): anche a Porto, sull'Oceano Atlantico, i microsismi con 8 sec. di periodo circa, sono nettamente predominanti, di ampiezza ancora maggiore di quella osservata a Toledo, distante dalla zona-origine circa 200 km in più. *b)* (a destra) Registrazione della componente verticale a breve periodo ($T_0 = 1^s,0$; $T_g = 0,77$ sec.). Tale strumento ha un ingrandimento dinamico di oltre 40.000 per periodi di 0,6 sec. e circa 1000 per periodi di 4 sec.; periodi maggiori non hanno amplificazione apprezzabile. La registrazione costituisce una nuova prova dell'esistenza, lungo le coste del mare, in località prossime alla zona-origine, di tutta una gamma di perturbazioni, legate al mare agitato da moti ondosi temporanei, sporadici, su cadenze svariatissime: perturbazioni di piccola ampiezza, di carattere esclusivamente locale, rapidamente assorbite dal mezzo. I microsismi persistenti, di massima ampiezza, sono quelli associati ai sistemi d'onde «significant»: nel caso specifico, quelli propagantisi, sul ritmo di 8 sec. circa, dalla zona-origine a Oporto, a Toledo, a Roma ed oltre, su tragitti di migliaia di km.

Pertanto, quando V è negativo, cioè quando la perturbazione atmosferica si muove verso l'estremità chiusa del golfo, lo spostamento può assumere valori grandi oltre ogni limite al tendere, in valore assoluto, di V a C .

Nel realizzarsi di questa condizione, si deve scorgere la causa fondamentale per l'insorgere dei microsismi nella zona interessata dal fenomeno.

Come provano le registrazioni barografiche, i nuclei a tendenza positiva, collegati a cicloni in transito, consistono in una ricca gamma di oscillazioni. Fra tali rapide variazioni, quelle il cui periodo più si avvicina al periodo proprio delle *onde significative* del mare (lago) sottostante, sono le più efficaci ai fini della formazione di microsismi sul fondo del bacino: l'avverarsi di questa risonanza dinamica eccita l'energia capace dei microsismi più sviluppati.

Ciò vale senz'altro per il golfo di Trieste, come ho provato in studi precedenti, e come il caso in esame conferma. Non esito a ritenere che ciò abbia valore generale. Soffermiamoci, per esempio, sulla vasta zona oceanica ad occidente e a sud delle Isole Britanniche, da cui provengono le tempeste microsismiche più violente e persistenti. Ebbene, le coste atlantiche dell'Irlanda, dell'Inghilterra, della Francia e della Spagna settentrionale, limitano una sorta di immenso golfo, con fondali che lungo una fascia di larghezza variabile fra i 50 e i 600 km, presentano profondità che non superano i 200 m. È significativo il fatto che, proprio in corrispondenza del transito delle vaste zone depressionarie alla base di questo golfo, si generano microsismi di grande ampiezza e di periodo dell'ordine di 8^s circa (figg. 2-4). È da presumere che ciò sia in conseguenza del verificarsi della risonanza dinamica, sopra riferita; risonanza che raggiunge la massima efficacia nei pressi delle coste (1).

5. - Si è detto che, nella zona origine dei microsismi, possono agire (e, in effetti, agiscono) sistemi diversi di onde, di diversa frequenza: sicché, localmente, possono generarsi microsismi di diverso periodo, sebbene i più persistenti, *quelli che si propagano alle maggiori distanze, sono microsismi associati alle onde significative*. Però, il fatto che, localmente, possano originare contemporaneamente microsismi di diverso periodo, persistenti oppure no, può condurre l'osservatore a conclusioni errate.

Si veda, per esempio, la tempesta microsismica del 15.VII.1970, principale oggetto della precedente comunicazione [3]. A Trieste - che può considerarsi ai margini immediati della zona origine dei microsismi - gli strumenti a breve periodo hanno registrato oscillazioni, con periodo variante fra 1^s,0 e 1^s,5 (fig. 7 lavoro precedente), mentre i sismografi a lungo periodo hanno

(1) A questo proposito, va osservato che Ivigtut (Groenlandia) registra prevalentemente microsismi provenienti dal settore nord orientale dell'Atlantico settentrionale; e ciò malgrado Ivigtut - nello Stretto di Davis - sia prossimo all'America e alla parte occidentale dell'Atlantico. Ciò può essere appunto spiegato col fatto che, nell'Atlantico Settentrionale, i cicloni procedono da Ovest ad Est: condizione essenziale, come si è visto, per la realizzazione del meccanismo contemplato nella (1) e nella (2), a cui si deve l'esaltazione dei microsismi, nei pressi delle coste europee.

registrato solamente microsismi con periodo dell'ordine di $2^s,6$ circa (fig. 6 di [3]). La spiegazione è legata alle diverse caratteristiche strumentali: gli apparecchi a breve periodo, infatti, registrano le oscillazioni con periodi intorno al secondo con un ingrandimento dinamico parecchie decine di migliaia di volte maggiore di quello associato a periodi dell'ordine di 3^s . Gli strumenti a lungo periodo, invece, registrano perturbazioni con periodi varianti fra 1 e 3 secondi con ingrandimento dinamico dello stesso ordine di grandezza. Contrariamente all'apparenza pertanto, i microsismi di maggiore ampiezza registrati a Trieste, in quell'occasione, sono quelli dei $2^s,7$ circa, che sono appunto gli stessi registrati a distanze origine crescenti; a Padova, a La Maina, a Pieve di Cadore, Bologna, Zagabria, Pavia, Vienna. Quelli

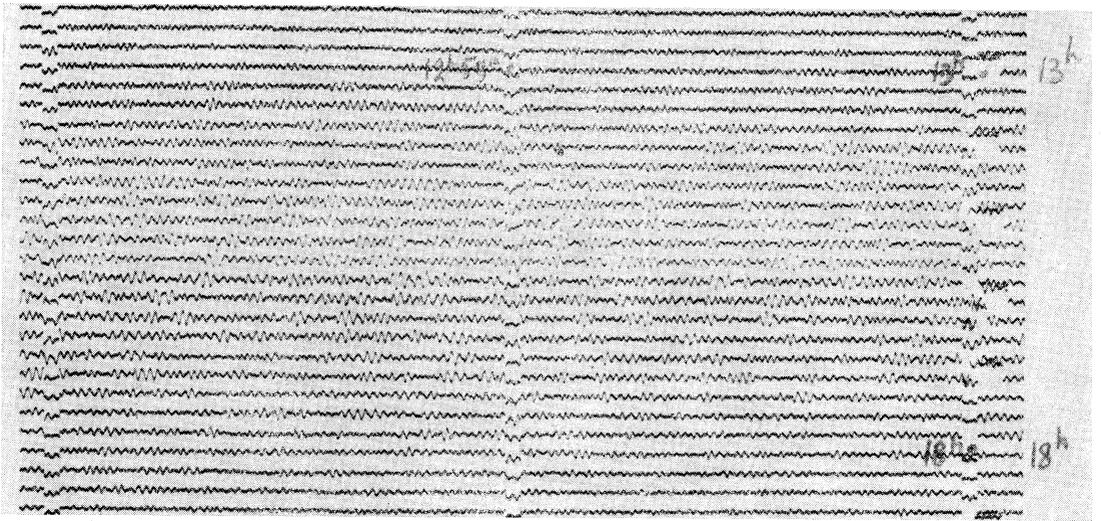


Fig. 5. - Sovente, perturbazioni di lieve entità, transitando dal mare al retroterra, provocano presso la costa moti ondosi che - per difetto di energia e, talvolta, di durata - non raggiungono lo stato di « onde significative »: ad esse sono associati microsismi sporadici, necessariamente di breve periodo, come nell'esempio sopra riportato, registrato a Trieste il 13 luglio 1970 (componente verticale a breve periodo - $T_0 = 1^s,0$; $T_g = 0,76$ sec.; ingr. dinamico max. 50.000) e come in quello della fig. 6.

selezionati ed esaltati dagli apparecchi a breve periodo erano, in realtà, di piccolissima ampiezza (tanto da non essere registrati dai sismografi a lungo periodo), di carattere del tutto locale, associati a sistemi d'onda sporadici, di breve durata; e, comunque, rapidamente estinti dal mezzo, nella loro breve propagazione. Un osservatore che avesse avuto a disposizione i soli sismogrammi degli apparecchi a breve periodo, avrebbe potuto essere tratto in inganno. Ciò vale, a maggior motivo, per più estese tempeste (figg. 2 e 4).

Non sempre la perturbazione atmosferica - e quindi quella marina - è tale da condurre al complesso moto ondoso, sfociante in onde significative persistenti, dalle quali traggono origine i microsismi più sviluppati. Talvolta la perturbazione, di piccola energia, è limitata nel tempo e nello spazio: è in questi casi che, a ridosso delle rive, si formano microsismi di breve periodo

(intorno al secondo) e di piccola ampiezza, registrati quasi esclusivamente da eventuali stazioni sismiche molto prossime alla zona origine (figg. 5 e 6).

Si dà poi il caso di microsismi provenienti da diversi minimi di pressione: in caso di contemporanea molteplicità di sorgenti, le sovrapposizioni sono inevitabili e la prevalenza è riservata ai microsismi maggiormente amplificati, il che può essere causa di errori d'interpretazione (fig. 2).

In questi casi, solo stazioni lontane dalle zone-origini, dotate di apparecchi a medio periodo, possono rivelare, con le loro registrazioni, quali sono i microsismi persistenti, di maggiore ampiezza, associati ai sistemi ondosi significativi (figg. 3, 4 e 8).

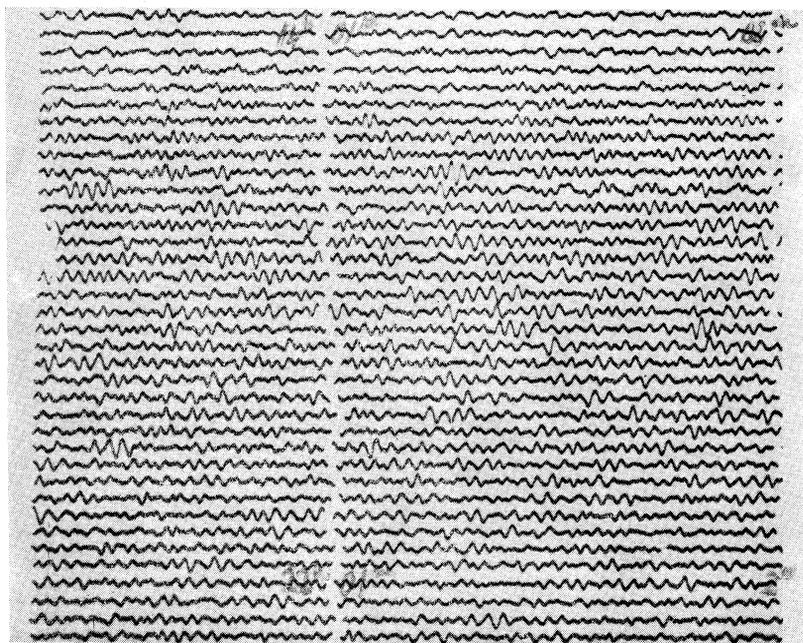


Fig. 6. – Altro esempio di microsismi sporadici, registrati a Genova il 16 luglio 1970 (v. fig. 5).

6. – Non v'è dubbio che i microsismi di maggiore ampiezza e persistenza sono comunque legati al moto dell'acqua. Le ondate che battono contro le coste, specie se queste sono costituite da rocce a picco sull'acqua, possono trasmettere la loro energia al suolo, sotto forma di microsismi regolari, propagantisi a grandi distanze? È una domanda che si son posti, a più riprese, numerosi ricercatori e, alla quale, alcuni hanno risposto positivamente. Fra questi, Wiechert e – in parte – Gutenberg. Anche di recente sono stati portati argomenti a favore di questa ipotesi [5]. Sorgenti di microsismi di questo tipo, sarebbero sopra tutto le coste atlantiche della Norvegia, flagellate da burrasche provenienti da Ovest. Sta di fatto però che, tali burrasche, sono sempre associate al transito di cicloni, ai quali, come si è visto, sono attribuiti i microsismi più sviluppati, creati da ben altro meccanismo.

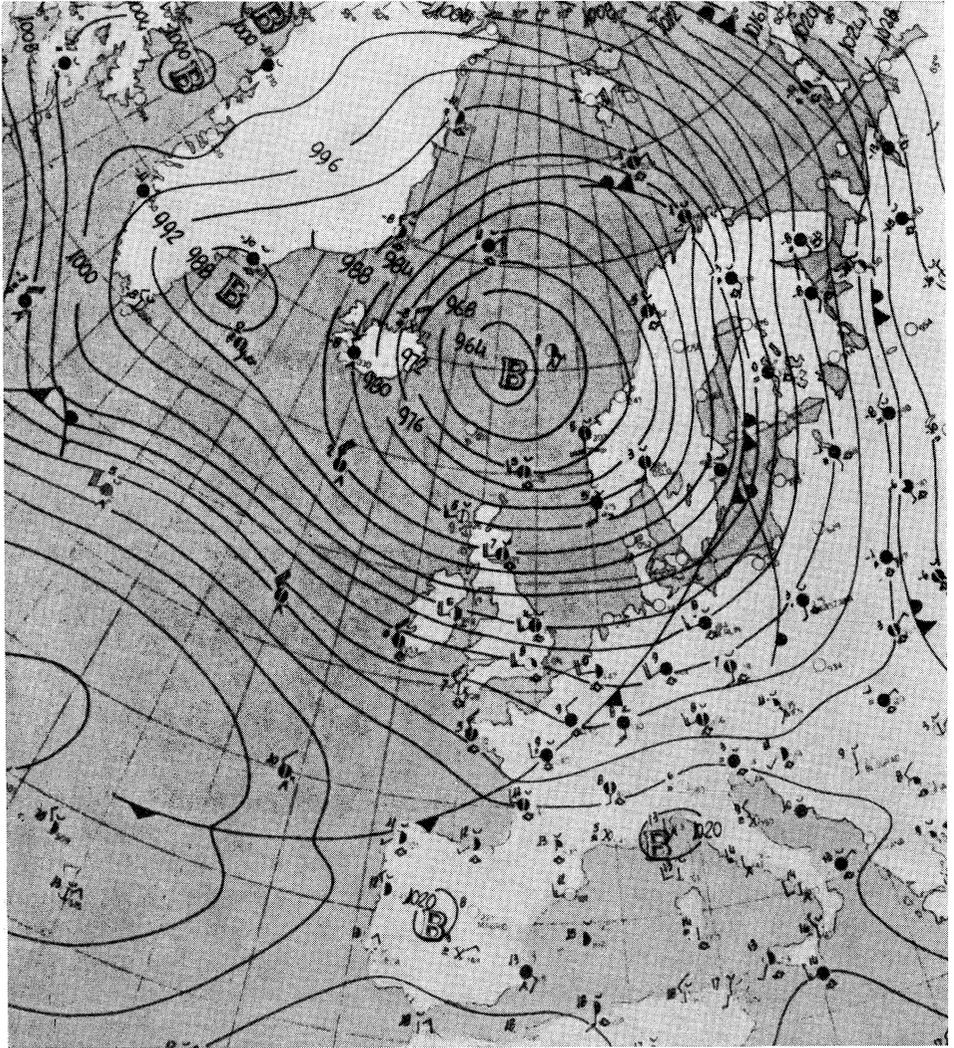


Fig. 7. – Situazione meteorologica sull'Atlantico nord-orientale e sull'Europa, alle ore 12 del 13 febbraio 1971 (« Boll. Meteor. Quot. » – Servizio Meteor. Aeron. Mil.).

Fig. 8. – Quando la perturbazione ciclonica è vasta e profonda, come quella cui si riferisce la fig. 7, sviluppa enorme energia, che consente – come nel caso specifico – la formazione di microsismi persistenti, di notevole ampiezza, associati a coperiali « onde significative » (8° circa). Sono essi che si propagano alle massime distanze. L'esempio sopra riportato riproduce un tratto della registrazione ottenuta a Roma (Città Universitaria) dalla componente EW di un apparecchio « Galitzin-Wilip » (tempo solare medio), alla distanza di oltre 2000 km. La mancanza di perturbazioni secondarie, di qualche importanza, nel Tirreno, permette una registrazione pressoché indisturbata. Localmente, perturbazioni del genere, provocano (come si è visto; fig. 4) microsismi sporadici di tutte le frequenze, dovuti al mare in stato caotico. Generalmente, quando le perturbazioni atlantiche si portano nel mare del Nord, provocano microsismi coperiali dell'ordine di 5-6 sec., che possono essere registrati in tutta Europa.

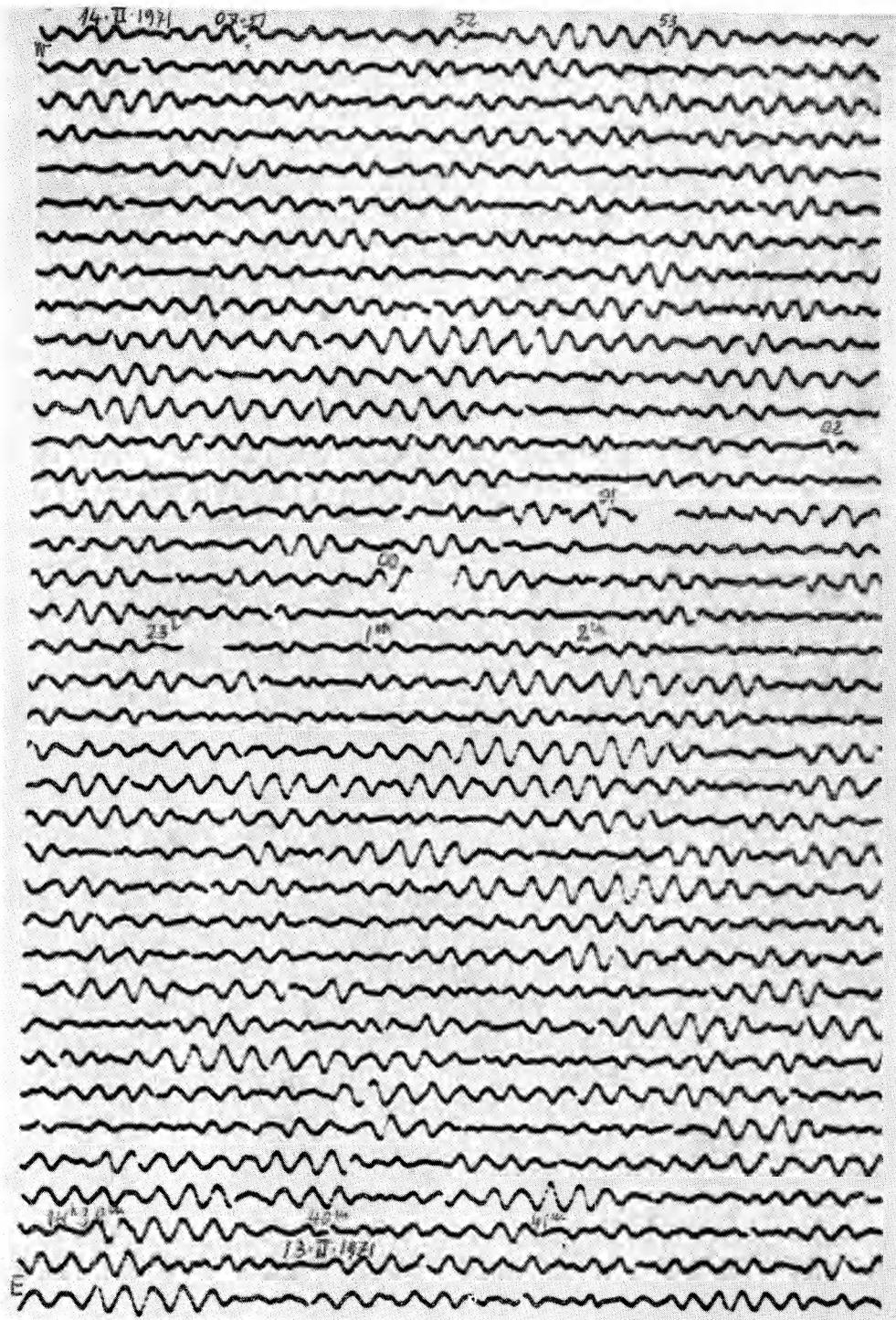


Fig. 8.

D'altronde non appare chiaro come l'urto violento di marosi, spinti disordinatamente contro le rive, possa originare movimenti regolari, di apprezzabile periodo, come quelli sopra riportati. In genere l'azione meccanica dei marosi contro le coste — contro le rive e i moli o le dighe foranee —, si traduce in vibrazioni di altissima frequenza, sul tipo di quelle della fig. 9, ottenute a Trieste in occasione di mare mosso.

Su questo argomento furono fatte ricerche accurate da parte di Balensiefer, Büttner *et al.* [6], i quali trovarono che i microsismi provocati dall'urto dei marosi contro le coste, presentano frequenze varianti fra 20 Hz e 50 Hz.

Si tratta, in ogni modo, di vibrazioni rapidissime. Come tali, non possono propagarsi a distanza e subire l'effetto della dispersione normale: infatti, come hanno osservato i citati Autori, esse si estinguono nel raggio di pochi chilometri; e ciò per effetto di fermo-viscosità, come ho dimostrato nel 1948 [7, 8].

Gli stessi Autori (p. 363 di [6]), sulla base delle loro esperienze, mettono in dubbio che l'agitazione microsismica osservata in Europa sia da attribuire all'urto dei marosi contro le coste rocciose.

7. — Il periodo dei microsismi appare così intimamente legato all'estensione della zona d'acqua, interessata dal ciclone in transito: quanto più estesa è la zona di mare (o di lago) che interagisce con il centro del ciclone, tanto maggiore risulta il periodo dei microsismi, che originano sul fondo del bacino: di 8^s in media è il periodo dei microsismi associati alle vaste zone cicloniche, transitanti sull'Atlantico fra la penisola Iberica e l'Irlanda, 5^s in media il periodo dei microsismi per cicloni transitanti sul Mediterraneo occidentale, 3^s,5 per aree cicloniche sul Tirreno (fig. 2), 2^s,5 per perturbazioni cicloniche nel Mar Ligure e nell'Adriatico settentrionale (golfo di Trieste), periodi dell'ordine di 1^s,5–2^s per perturbazioni cicloniche presso le coste, interagenti su brevi estensioni liquide, microsismi inferiori al secondo per il transito di cicloni su piccoli laghi, come quello di Pieve di Cadore.

Si è visto che, per quanto concerne l'alto Adriatico, i microsismi, di piccola ampiezza per transito di cicloni da Venezia fino a Grado [3], subiscono un brusco rinforzo quando il ciclone, raggiunto il golfo di Trieste si avvicina alla costa orientale. Come è stato provato [(6) in [3]] e qui ribadito (n. 4) ciò si deve al fatto che, generalmente, le aree cicloniche si propagano da Ovest ad Est con velocità dell'ordine di quella delle onde libere del mare sottostante, il che provoca un'interazione aria-acqua tanto più efficace, quanto più l'area perturbata si avvicina alla costa. Per esempio, originarono, in questa zona e in queste circostanze i microsismi che vennero registrati a Padova, Somplago, La Maina, Pieve di Cadore, Bologna, Zagabria, Pavia, Vienna, in occasione del transito sul golfo di Trieste del ciclone del 15 Luglio 1970 [3].

Pertanto, nella propagazione dei microsismi la dispersione è trascurabile (praticamente nulla, per le distanze esaminate): il periodo registrato nelle stazioni d'osservazione, anche delle più lontane, è quello con cui i microsismi insorgono all'origine. È l'estensione del « fetch » che interviene nell'imposizione

del periodo, e la profondità dell'acqua ove esso si forma: l'interazione fra atmosfera e idrosfera determina quindi l'ampiezza, che appare legata ad una sorta di risonanza dinamica, cinetica fra aria ed acqua. Contrariamente a quanto si riteneva finora, la dispersione non interviene nella propagazione dei microsismi.

La constatazione dell'insorgere di microsismi anche in laghi di piccole dimensioni (come quello di Pieve di Cadore), toglie ogni attendibilità a precedenti teorie sull'origine di microsismi in mare (in un lavoro di Haubrich *et al.* [4] si è costretti a far iniziare nel Mare di Ross la tempesta che – sulla base della propagazione delle onde di mare ad essa associate – alla distanza di 6150 miglia nautiche, fa assumere ai marosi la frequenza atta a originare microsismi, al largo delle coste della California!); i microsismi sono conseguenza dell'interazione aria-acqua, quale insorge nel tempo e nel luogo, dove si verificano le condizioni da essa richieste.

Di recente, è stata presentata una ricerca teorica [5] secondo la quale la principale sorgente di microsismi sarebbe – conformemente all'ipotesi di

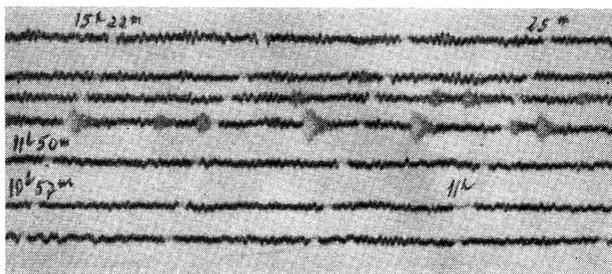


Fig. 9. – L'urto dei marosi contro coste rocciose, moli e dighe foranee, provoca vibrazioni di elevatissima frequenza. Nella figura, colpi di mare contro la diga foranea del golfo di Muggia per vento da Est, registrati a Trieste (18.VI. 1933 – NS «Alfani»); la perturbazione di fondo è costituita da lievi microsismi caratteristici del golfo di Trieste ($2^{8,6} \pm$).

Wiechert – quella dovuta all'urto dei marosi contro le coste. Anche questa teoria si presenta di ben poca attendibilità. L'urto dei marosi sulle coste determina vibrazioni di elevatissima frequenza (fig. 9). La mancanza di dispersione nella propagazione dei microsismi, quale si è rilevata nel presente studio, toglie ogni significato alla teoria stessa, anche perché – attesa l'elevatissima frequenza delle vibrazioni provocate dai marosi – per effetto di fimo-viscosità, tali vibrazioni vengono rapidamente assorbite dal mezzo [7, 8] e si estinguono a breve distanza dal luogo d'origine.

8. – Conclusioni:

a) I microsismi di maggiore ampiezza nascono sul fondo del mare, presso le coste, e sono sempre associati a rapide perturbazioni atmosferiche, generalmente accompagnate da venti ciclonici.

b) La formazione del « fetch » è condizione sufficiente per la formazione di microsismi; particolarmente persistenti, sono quelli provocati da coperiodali

« onde significative ». Anzi, solo i microsismi provocati da onde significative si propagano alle massime distanze.

c) Nella zona-origine delle perturbazioni microsismiche, dove i sistemi ondosi pervengono ai massimi sviluppi, insorgono microsismi di tutti i periodi, dai minimi a quelli coperiodali con le onde significative: una stazione sismica prossima alla zona-origine, in occasione di forti perturbazioni atmosferiche, può quindi contemporaneamente registrare tutta una gamma di microsismi, che dà al sismogramma un'apparenza caotica.

d) Solo stazioni d'osservazione lontane dalle zone-origine, registrano microsismi regolari: quelli associati alle onde marine significative. A parità di altre condizioni, le distanze di registrazione dei microsismi crescono col crescere del periodo delle onde persistenti coperiodali. Quindi, in ragione inversa della firma-viscosità del mezzo, che cresce con la frequenza.

e) I microsismi sono generalmente dovuti alle onde che « sentono il fondo »: nascono cioè da interazione fra acqua e fondo sul ritmo della frequenza primaria; la doppia frequenza, che involve un effetto di second'ordine – conformemente alla teoria di Longuet-Higgins – può verificarsi al largo, in acque profonde.

f) I microsismi non subiscono dispersione apprezzabile, nella loro propagazione, anche alle massime distanze osservate.

g) Per quanto è stato detto ai punti c) e d), le caratteristiche fondamentali dei microsismi, ben difficilmente possono essere rivelate – nei loro precisi significati – dai metodi statistici.

BIBLIOGRAFIA

- [1] TENANI M., *Nozioni teoriche fondamentali sulla formazione e trasformazione delle onde. Nuovi metodi grafici di calcolo e di previsione*, « Ist. Idrogr. della Marina », pagg. 126, Genova 1952.
- [2] BRETSCHNEIDER C. L., *The generation and decay of wind waves in deep water*. « Trans., Am. Geophys. Un. », 33, 381-389 (1952).
- [3] CALOI P., *L'agitazione microsismica destata dalle perturbazioni meteorologiche: I. Microsismi da piccoli bacini chiusi*, « Atti Acc. Naz. Lincei, Rendiconti Classe Scienze fis. mat. nat. » (1971, in corso di stampa).
- [4] HAUBRICH R. A., MUNK W. H. and SNODGRASS F. E., *Comparative spectra of microseisms and swell*, « Bull. of Seism. Soc. of America », 53, 27-37 (1963).
- [5] HASSELMANN K., *A Statistical Analysis of the Generation of Microseisms*, « Reviews of Geophysics », 1, (2) (1963).
- [6] BALENSIEFER E., BÜTTNER K., PFLEIDERE H. u. WETZEL W., *Untersuchungen über die Bodenunruhe auf Sylt*, « Zeitschrift für Geophysik », XV. Jahrgang, 337-364 (1939).
- [7] CALOI P., *Comportamento delle onde di Rayleigh in un mezzo fermo-elastico indefinito*. « Ann. Geofis. », 1, 4 (1948).
- [8] CALOI P., *Teoria delle Onde di Rayleigh in Mezzi elastici e fermo-elastici, esposta con le Omografie vettoriali*, « Archiv. f. Meteorol., Geophys. u. Bioklimat. S.A.: Meteor. u. Geophys. », B. IV, 414-435 (1951).