

Ulteriori esperienze geofisiche sul lago di Caldonazzo.

Morfologia ed origine delle sesse.

Dati microtermologici. Progressivo insabbiamento dei piccoli laghi*.

(Further geophysical experiences about the Lake of Caldonazzo. Morphology and origin of seiches. Microthermological data. Progressive filling up of small lakes with sand)

P. CALOI **

Ricevuto il 5 Febbraio, 1972

SUMMARY. — The limnographic, barographic and thermological recordings, taken in a week of October of the years 1966, 1967 and 1971 on the Lake of Caldonazzo, are reviewed. The properties of free uninodal, binodal etc. oscillations of the Lake have been examined, once again with the result that they coincide with the values previously elaborated theoretically: the amplitudes of uninodals in the North (Lido di San Cristoforo) are about twice as large as those measured in the extreme South (Lido di Caldonazzo); the behaviour of uninodals in the Northern part of the Lake (besides the uninode) in conformity with the theory, etc.

The simultaneous function of a microbarograph, mounted near the Lido of San Cristoforo, proved that the main, if not exclusive, reason of the seiches lies in the interaction between the atmosphere and the hydrosphere. The passage of even the slightest pressure variations above the Lake, with rhythms of 10^m, 5^m, ... cause an immediate response of the Lake by free uninodal, binodal... oscillations, and the amplitude of water oscillations is all the larger the more the period of perturbing causes approaches the period of the corresponding free oscillation, in other words, the more it approaches resonance.

Observations on microvariations of temperature have been made as well which may occur on very short periods (in the order of 1-2 sec) and give evidence of a swift brownian motion of liquid molecules. This must have a considerable influence on the Lake's microbiology. The increase of the period of uninodals, against the period of bathymetric mea-

* Questo lavoro è stato condotto con contributi del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

** Direttore d'Osservatorio, Istituto Nazionale di Geofisica, Roma.

surements of the Lake, on which the considerations were based, allows to infer that the Lake bottom has risen of about 4 m in the last seven decades as a consequence of muddy stream and coarse materials by the affluents, chiefly during the alluvions. This causes small lakes to fill up progressively with sand and other material. The Lake of Levico bottom, for instance, has arisen of about 4 m during sixty years (1900-1960), as was proved by the increase of the unimodal period during the said time interval.

RIASSUNTO. — Si esaminano le registrazioni limnografiche, barografiche e termologiche, ottenute in una settimana di Ottobre degli anni 1966, 1967 e 1971, sul lago di Caldonazzo. Sono state verificate le caratteristiche delle oscillazioni libere unimodali, binodali, ... del lago, constatando, ancora una volta, la loro rispondenza con i valori in precedenza ottenuti per via teorica: ampiezze delle unimodali a Nord (Lido di San Cristoforo) circa doppie di quelle ottenute all'estremo Sud (Lido di Caldonazzo); andamento delle unimodali nella parte Nord del lago (oltre l'unimodo) conforme alla teoria, ecc.

Il contemporaneo funzionamento di un microbarografo, sistemato presso il Lido di San Cristoforo, ha provato che la causa principale (se non unica) delle sesse è dovuta all'interazione fra atmosfera e idrosfera. Il passaggio sul lago di sia pur lievissime variazioni di pressione, sul ritmo di 10^m, 5^m, ... provocano l'immediata risposta del lago sotto forma di oscillazioni libere unimodali, binodali, ...; e l'ampiezza delle oscillazioni dell'acqua è tanto maggiore quanto più il periodo delle cause perturbanti si avvicina a quello dell'oscillazione libera corrispondente; in altri termini, quanto più ci si avvicina alla risonanza.

Sono state anche eseguite delle osservazioni di microvariazioni di temperatura, che possono verificarsi su periodi molto piccoli (dell'ordine di 1 o 2 sec), testimonianza di un vivace moto browniano delle molecole liquide, che deve influire sensibilmente sulla microbiologia lacustre.

Infine, sulla base dell'aumento del periodo delle unimodali, dall'epoca cui si riferisce la batimetria del lago, sulla quale sono state condotte le valutazioni teoriche, si deduce che il fondo del lago ha subito un sollevamento di circa 4 metri; come conseguenza degli apporti di torbida e di materiali più grossolani, da parte degli affluenti, specie durante le alluvioni. Ciò comporta un progressivo insabbiamento dei piccoli laghi (anche il lago di Levico ha subito, nel sessantennio 1900-1960, un sollevamento del fondo di circa 4 metri, come è provato dall'aumento del periodo dell'unimodale, verificatosi nel predetto periodo).

1. — NUOVE OSSERVAZIONI LIMNOGRAFICHE

1966: 19-24 Ottobre.

Fu eseguita una serie di registrazioni presso il Lido di S. Cristoforo, estremo Nord del lago (fig. 1).

Mi limito a riportare alcuni tratti delle registrazioni più significative.

Verso le 21^h del 22 Ottobre, il lago appare quasi immobile (fig. 2). D'improvviso, alle 22^h10^m inizia una serie di oscillazioni, uninodali e binodali sovrapposte, provocate dalla causa, di cui sarà detto più oltre. Per circa tre ore, uninodali e binodali si sovrappongono disor-

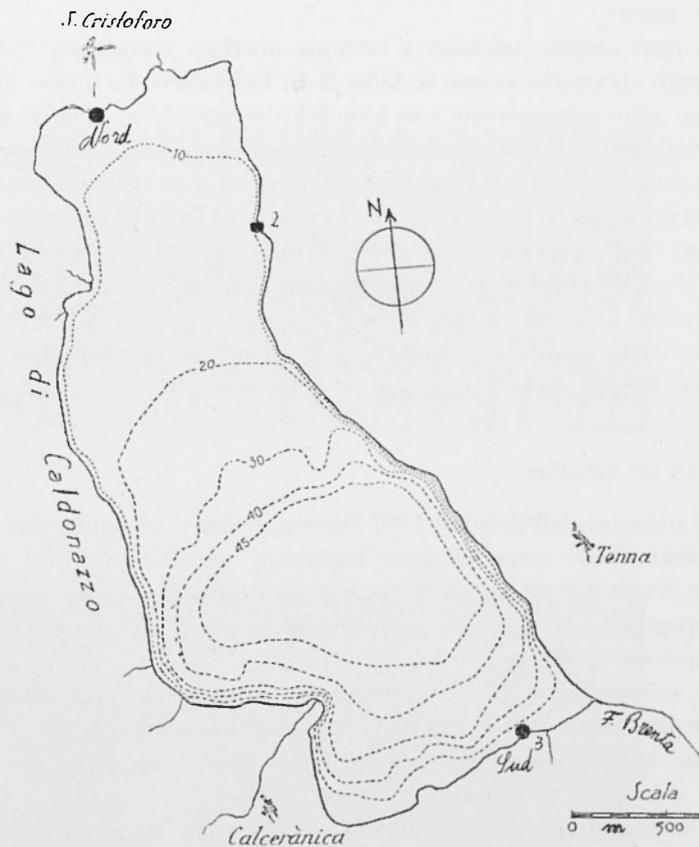


Fig. 1 - Il lago di Caldonazzo, con le postazioni d'osservazione limno-, termo-, microbarografiche. (Le curve batimetriche al completo, le sezioni trasversali e le posizioni dei nodi delle sesse, nelle precedenti pubblicazioni (1,3). Nella postazione 1) - limnografo nell'Ottobre 1966, 1967 e 1971; limnografo filtrato nel 1966; termocoppia - « Micrograph » nel 1966; microbarografo « Askania » nel 1971. Nella postazione 2) - limnografo nel 1966; nella postazione 3) - limnografo nel 1967.

dinatamente, quindi si compongono in dicote; alla fine (verso l'una del 23) le uninodali prendono il sopravvento e continuano, quasi pure, per alcune decine di ore. Un tratto di queste registrazioni, appare nella fig. 2, un altro tratto è riportato nella fig. 3.

La discussione di questi tratti di registrazione sarà fatta nel paragrafo sulla morfologia.

Le parecchie diecine di uninodali registrate hanno consentito di calcolare il loro periodo, con ottima approssimazione: esso è risultato di 10^m esatti.

In quei giorni, condussi a termine un'altra esperienza. Oltre al limnografo sistemato presso il Lido di S. Cristoforo, fu messo in funzione un altro apparecchio, con identiche caratteristiche, circa 900 m più a Sud, sul lato orientale del lago. Scopo di queste contemporanee registrazioni, era quello di controllare l'andamento dell'ampiezza dell'uninodale, lungo la parte settentrionale del lago e di confrontare quindi i dati dell'esperienza con quelli forniti dalla teoria ⁽¹⁾. La fig. 5 mette a confronto tratti di registrazioni contemporanee, ottenute a S. Cristoforo e 900 m ca. più a Sud, in sponda sinistra. La media del rapporto delle ampiezze registrate è 2, in ottimo accordo con le indicazioni fornite dalla teoria [fig. 4 della nota ⁽¹⁾].

1967: 13-18 Ottobre

Le indagini dell'Ottobre 1967 furono dedicate al confronto fra le oscillazioni libere, come vengono registrate agli estremi Nord e Sud del lago. Parecchio si era già fatto, a questo riguardo, in una precedente campagna ⁽²⁾; mancavano però alcune precisazioni, che era opportuno mettere in rilievo.

Va subito detto che la settimana di osservazioni non poteva essere più fruttuosa: il lago non fu avaro di chiare risposte, sotto forma di ampie, nitide oscillazioni, ben registrate dagli strumenti, che accusarono solo lievi temporanee mende.

I limnografi furono sistemati presso il Lido di S. Cristoforo al Nord e presso un pontile del Lido di Caldonazzo all'estremo Sud (fig. 1).

Naturalmente, mi limito a riportare qualche tratto di registrazione contemporanea, ottenuta ai due estremi opposti del lago.

La fig. 6 si riferisce ai limnogrammi, ottenuti fra le 10^h ca. e le 18^h ca. del 14 Ottobre. Come quasi generalmente avviene, è sempre l'uninodale l'oscillazione libera predominante nel lago; e, come era stato previsto dalla teoria ⁽¹⁾, essa appare nettamente più ampia all'estremo settentrionale.

La presenza della binodale è resa manifesta dalla forma delle oscillazioni, in cui l'appiattimento, visibile verso le 5^h nei minimi, si trasferisce gradualmente nei massimi (intorno alle 8^h). Ma di questo

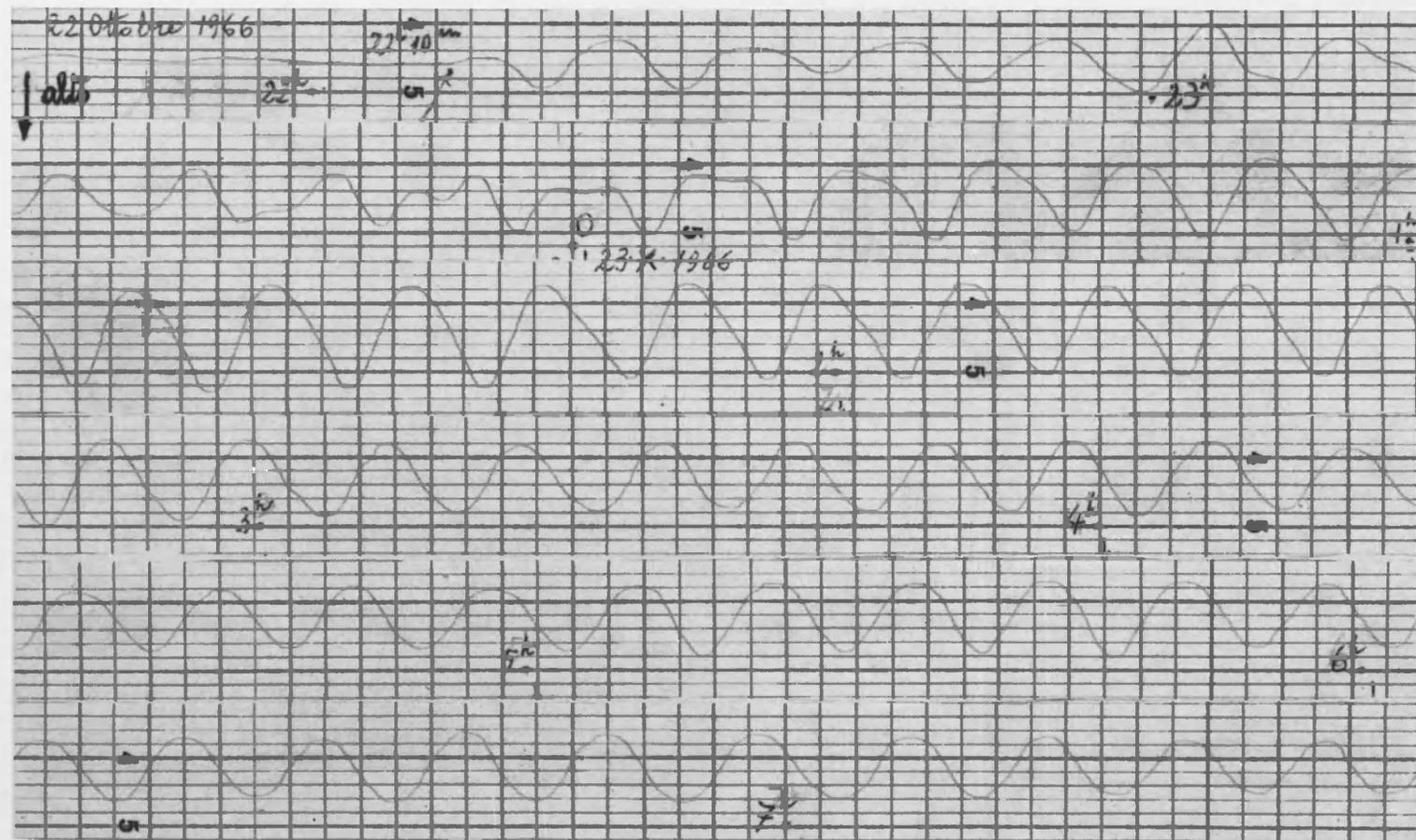


Fig. 2 - RegISTRAZIONI di uninodali a San Cristoforo (Lido), con alterazioni per binodali.



Fig. 3 - La sovrapposizione di binodali (di periodo poco inferiore alla metà di quello delle uninodali) alle uninodali, altera progressivamente la forma della curva limnografica, trasferendo periodicamente dal basso all'alto (e viceversa) i massimi aguzzi.

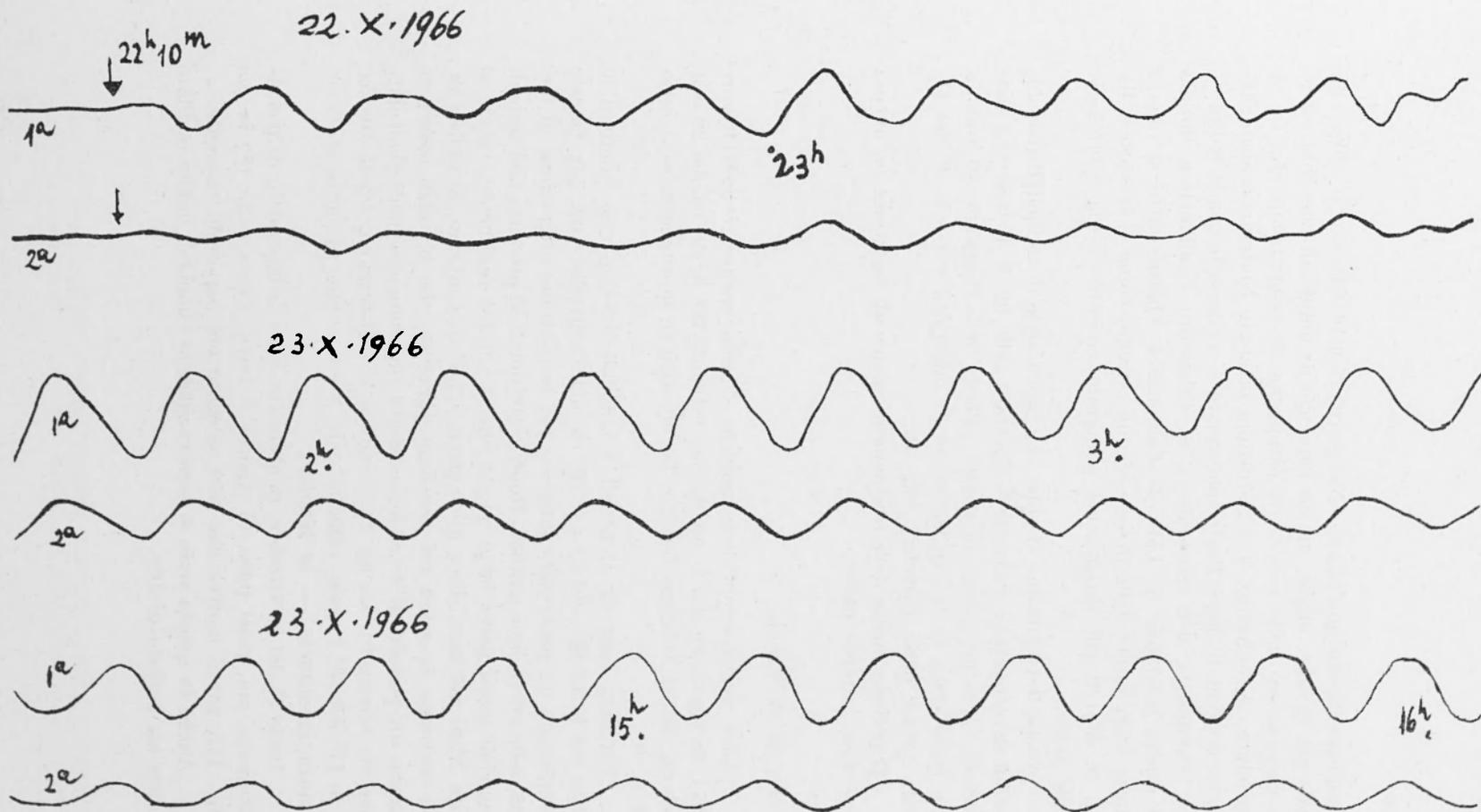


Fig. 5. - Confronto di uninodali registrate contemporaneamente al Lido di San Cristoforo (1^a) e 900 m ca. più a Sud, in riva sinistra (2^a), dalla stessa parte dell'uninodo. A San Cristoforo, le uninodali — naturalmente in fase — hanno ampiezza circa doppia che nella postazione 2^a, conformemente alla teoria.

fenomeno diremo più avanti. Nei giorni 15 e 16 Ottobre si ebbe una delle più lunghe, nitide, ampie sequenze di uninodali che ebbero modo di sorprendere nelle mie brevi campagne di osservazione. La fig. 7 riproduce, a confronto, le registrazioni ottenute contemporaneamente ai due estremi del lago. Resta confermato — in accordo con la teoria — che l'ampiezza dell'uninodale a S. Cristoforo è all'incirca doppia di quella osservata al Lido di Caldonazzo. Questo fatto si riflette anche sulla forma delle dicrote ai due estremi, come è provato dalla fig. 8. Ma di ciò diremo nel paragrafo concernente la morfologia delle sesse.

Anche il 17 Ottobre si ebbe una lunga serie di uninodali (con binodali sovrapposte): un tratto è riportato nella fig. 9. E la serie è continuata anche nel giorno successivo (ultimo della campagna in esame); con rammarico, la sua registrazione fu interrotta verso le 9^h del 18, poco prima della partenza (fig. 10).

Il periodo medio delle centinaia di uninodali registrate fu, ancora una volta, di 10^m esatti.

1971: 20-25 Ottobre

Altre registrazioni limnografiche furono realizzate nell'Ottobre 1971. Si riportano qui le oscillazioni ottenute fra le 19^h ca. del 20 e le 14^h ca. del 21 Ottobre (fig. 12). La discussione morfologica sarà fatta al n. 3.

Un'altra serie di uninodali e binodali interferentisi (dicrote) si ebbe fra le 17^h15^m del 22 e le 10^h ca. del 23 Ottobre (fig. 14). Queste presentano un particolare interesse per la continua alterazione di forma della curva limnografica. Dopo le 10^h del 23 si presenta una serie di binodali quasi pure: fatto questo che si verifica raramente, specie al lato Nord del lago, dove prevalgono, quasi di continuo, le uninodali. Ne vedremo la causa nel prossimo paragrafo. Le binodali osservate hanno un periodo di 4^m,8, leggermente superiore alla media calcolata per via teorica (1). La fig. 14 riproduce le registrazioni, fra le 10^h ca. e le 17^h del 23; in esse, come si vede, predominano appunto — circostanza inconsueta — le binodali.

Dalle 5^h del 24 Ottobre, ininterrotta serie di uninodali, di piccola ampiezza ma quasi pure. Si riporta il tratto finale dalle 18^h in poi (fig. 17), per il motivo che sarà spiegato nel paragrafo seguente.

Anche in questa serie di osservazioni, le uninodali hanno oscillato sopra un periodo di 10^m.

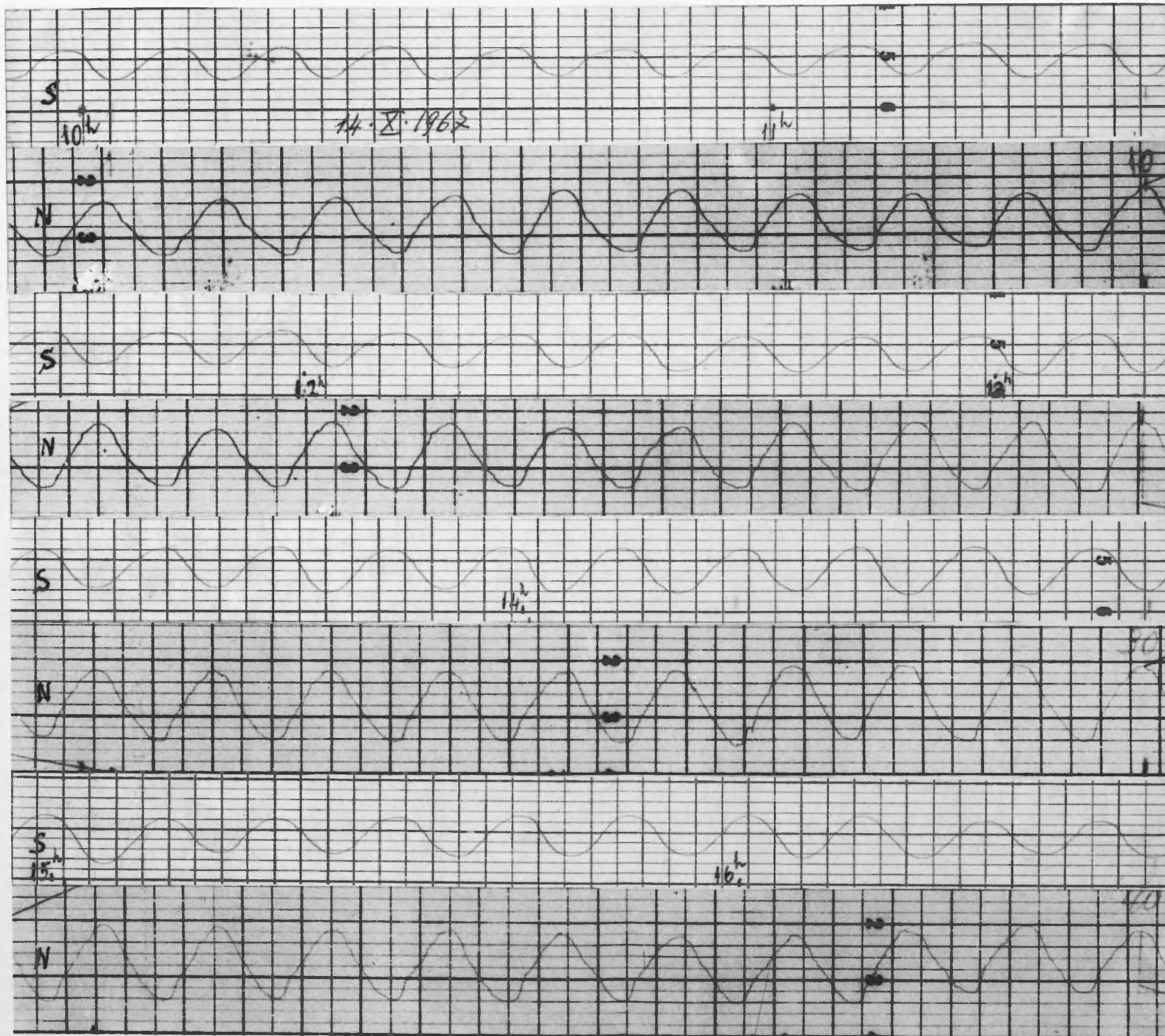


Fig. 6 - Contemporanea registrazione di unimodali a Sud (Lido di Caldonazzo) e a Nord (Lido di San Cristoforo): le oscillazioni, in opposizione di fase, presentano a Nord ampiezze ca. doppie che a Sud, come previsto dalla teoria.

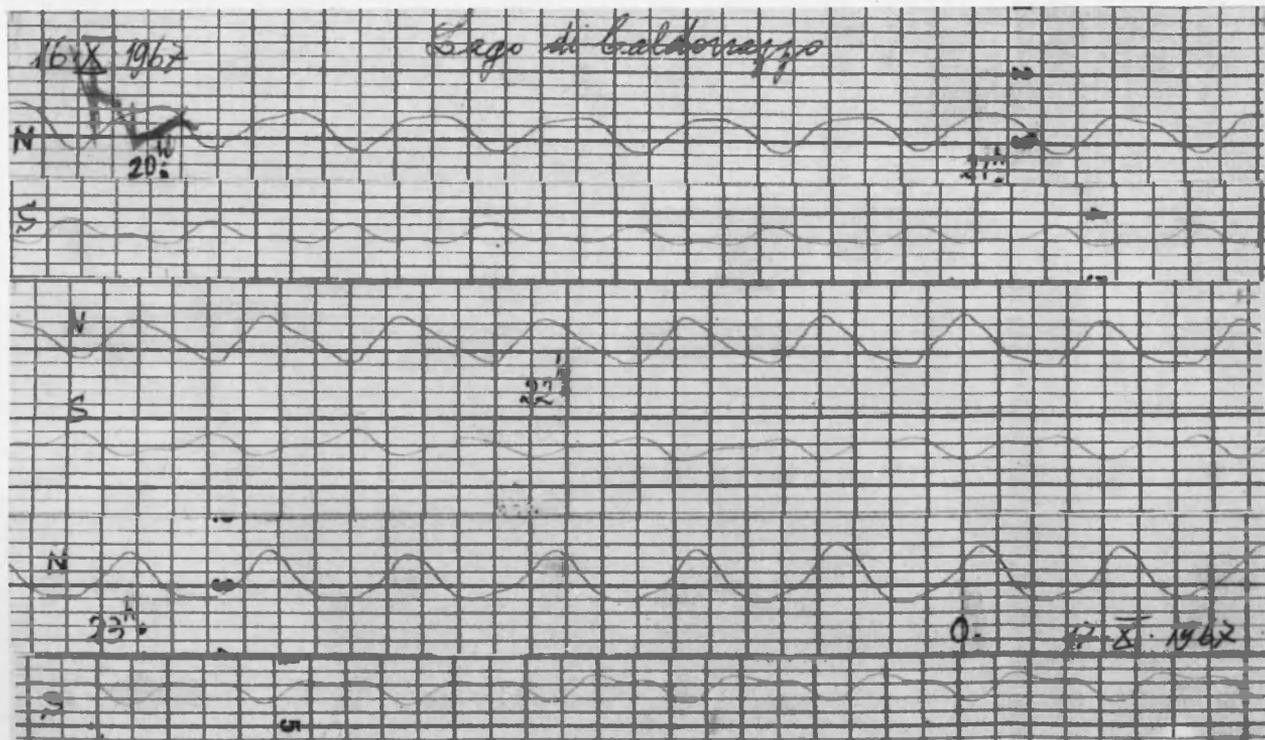


Fig. 8 - Quando le uninodali sono di piccola ampiezza, la sovrapposizione delle binodali provoca il graduale trasferimento dei massimi allargati della curva, da una posizione a quella a 180°.

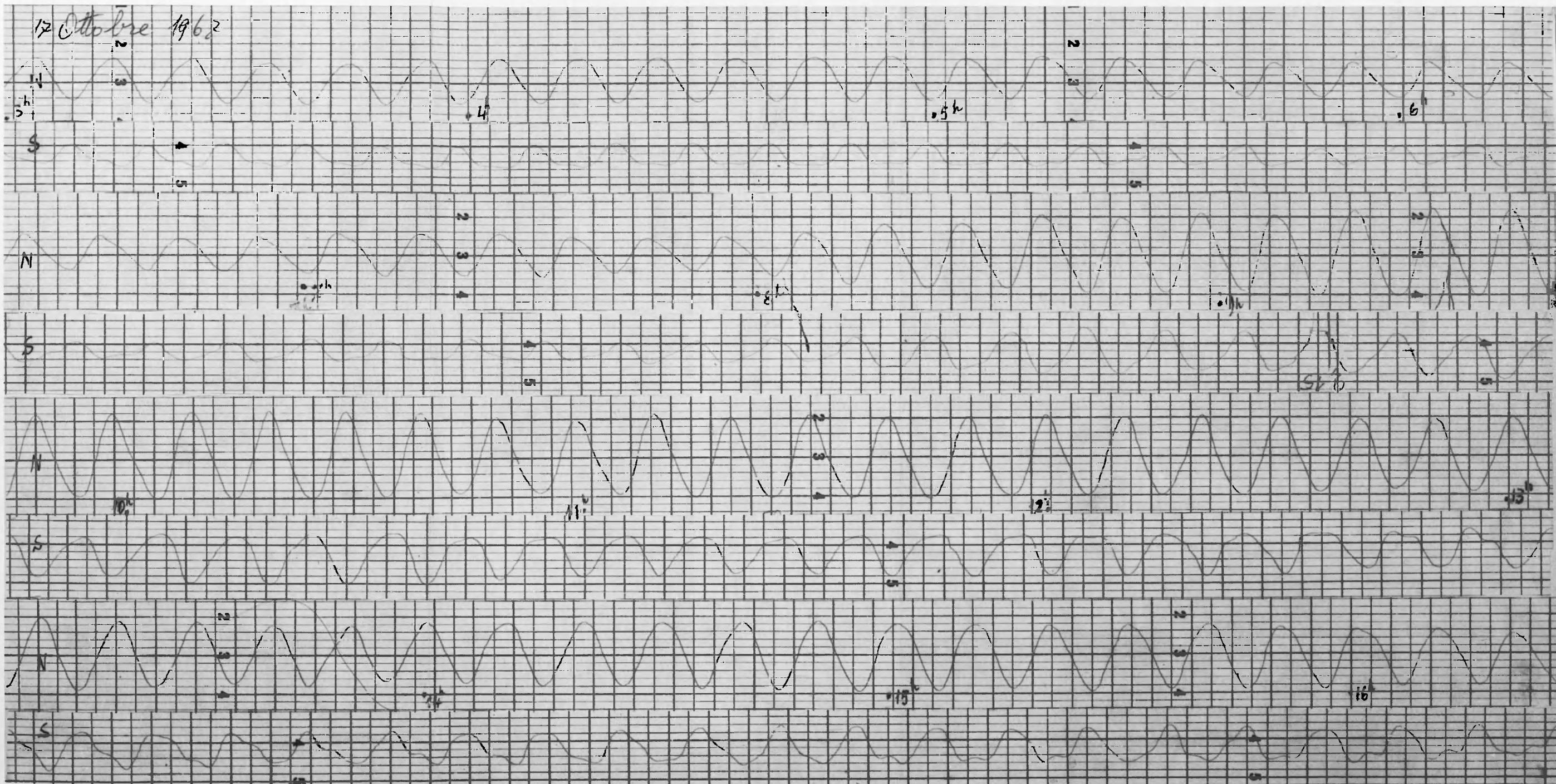


Fig. 9 - Altra notevole serie di uninodali ai due estremi del lago, con alterazioni per sovrapposizione di binodali, particolarmente evidenti a Sud (Lido di Caldonazzo).

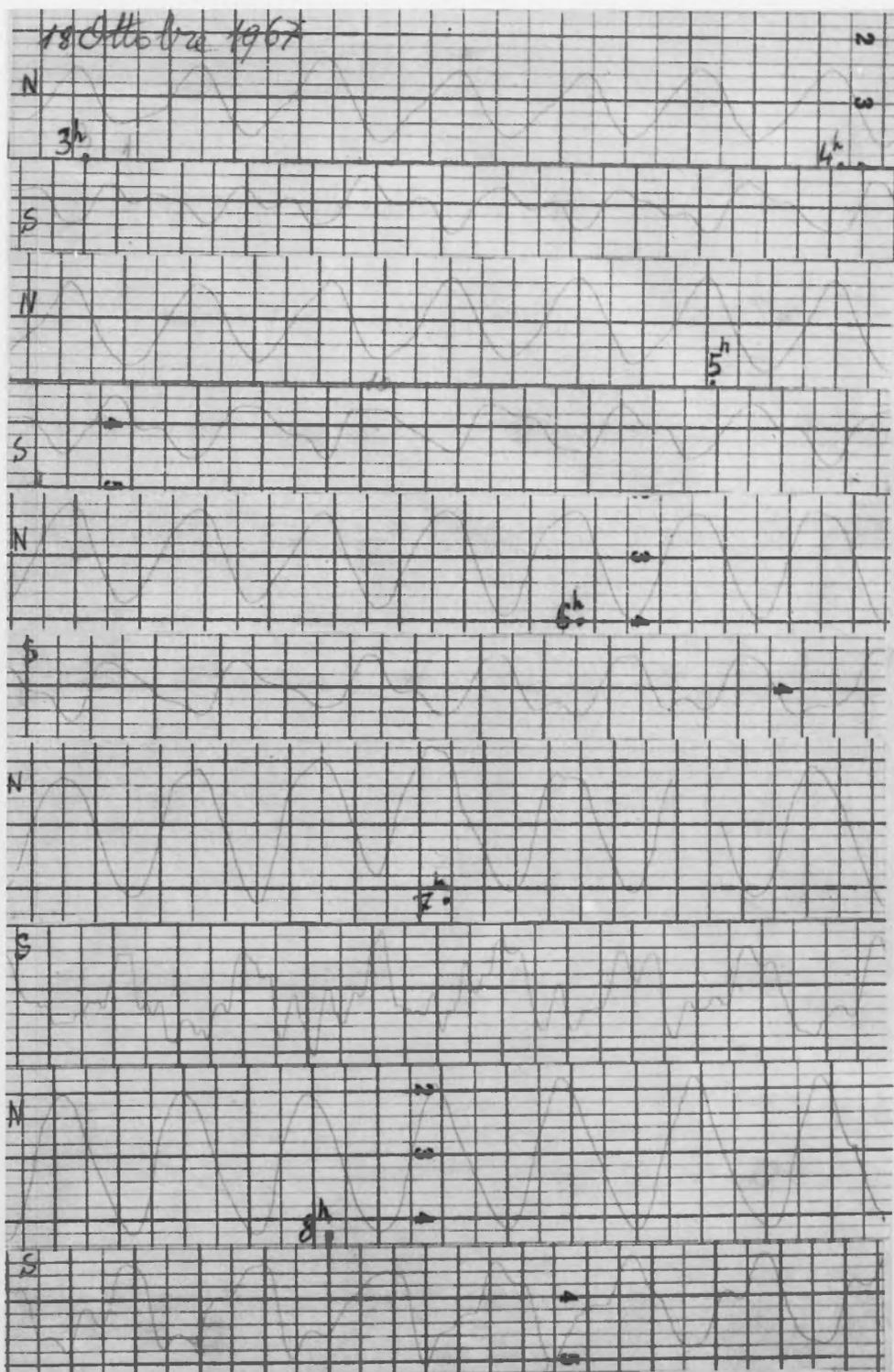


Fig. 10. - Sovente a Sud, oltre alle binodali (presenti anche a Nord), si ha la sovrapposizione di oscillazioni, interessanti la sola parte meridionale del lago, come sesse da zoccolo («shelf-seiches») destinate dal vento e probabili sesse trasversali (v. dalle 6^h e 30^m in poi).

2. CAUSA DELLE OSCILLAZIONI LIBERE.

Le indagini condotte nella 3^a decade di Ottobre 1971 non si limitarono alla semplice registrazione delle sesse; esse furono estese anche alla contemporanea osservazione delle microvariazioni della pressione atmosferica, ottenuta mediante un microbarografo « Askania ».

Ho già affermato, altrove, a più riprese, che la causa principale — se non unica — delle oscillazioni libere di un bacino, va ricercata in fenomeni di interazione fra atmosfera ed idrosfera (4...9). Ciò è già sta-

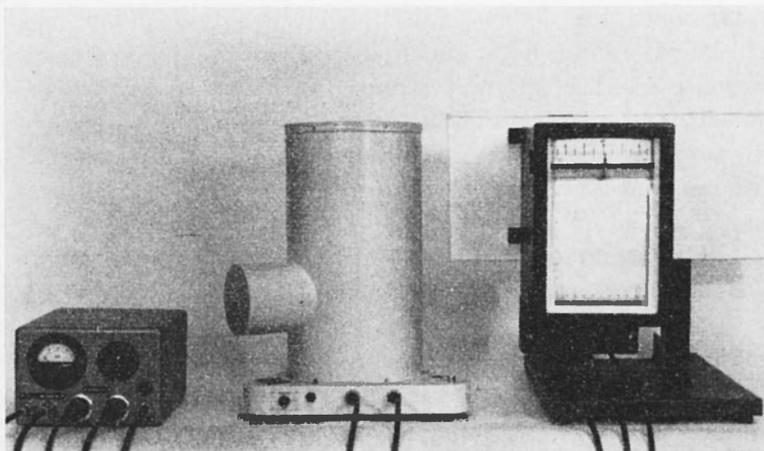


Fig. 11 - Microbarografo « Askania », messo in funzione al Lido di San Cristoforo, durante la settimana d'osservazioni dell'Ottobre 1971.

to provato, p. es. per le onde interne del lago di Bracciano (8) (uninodali destinate in relazione con oscillazioni quarto diurne della pressione), del lago di Garda (9,10) (dove le binodali insorgono in coincidenza delle coperiodali oscillazioni diurne dell'atmosfera), ecc. Se ciò riusciva agevole per oscillazioni a lungo periodo, associate a coperiodali oscillazioni dell'atmosfera, generalmente animate da grande energia e quindi facilmente registrabili dai normali barografi funzionanti presso gli osservatori meteorologici, non altrettanto poteva dirsi delle oscillazioni proprie di piccoli laghi, come quelli di Levico, Caldonazzo, ... L'energia animante le rapide variazioni di pressione è di norma estremamente piccola; irrilevante, in ogni modo, ai fini della registrazione su barografi normali. Di qui la necessità dell'uso di un microbarografo.

Il microbarografo Askania (fig. 11), oltre ad essere di estrema sensibilità, ha il grande vantaggio dello spostamento automatico della pennina nel campo di misura del registratore. Un tale apparecchio ha funzionato contemporaneamente al limnografo presso il Lido di S. Cristoforo, dal 20 al 25 Ottobre 1971.

Le sue registrazioni hanno dimostrato che la causa delle oscillazioni libere uninodali, binodali, ... va ricercata esclusivamente nell'interazione con variazioni della pressione atmosferica, di pari periodo. P. es. verso le 20^h del 20 Ottobre (fig. 12) il limnografo sta registrando uninodali di piccola ampiezza, associate a lievissime variazioni di pressione di pari periodo (fig. 13). La rispondenza del lago alle sollecitazioni della pressione atmosferica, su ritmi dell'ordine di quelli delle sue oscillazioni libere, è immediata, anche se le energie in giuoco sono minime. Così, verso le 20^h30^m del 20 Ottobre, il passaggio di un gruppo di lievissime perturbazioni bariche sul ritmo di 10^m (fig. 13), provoca un improvviso rinforzo delle uninodali del lago (fig. 12). Le perturbazioni bariche possono avere anche effetto smorzante, se agiscono in opposizione di fase: ad es. verso le 22^h30^m del 20 Ottobre, un impulso microbarico sui 7-8 minuti di periodo (fig. 13) attenua il movimento delle uninodali lacustri (fig. 12), che riprende subito dopo con l'arrivo di altre serie di impulsi barici sui 10^m di periodo, persistenti, con alterna vicenda fino oltre le 5^h del 21 Ottobre, provocando un sensibile rinforzo delle uninodali. Queste ultime appaiono alterate (fig. 12) da sovrapposizione di binodali di minore ampiezza, destinate da coperiodali disturbi barici, sovrapposti a quelli di 10^m ca.; tanto che, verso le 6^h del 21 Ottobre, al diminuire dell'ampiezza delle uninodali, il sopraggiungere di nuclei barici sul ritmo di 5^m ca., amplifica le binodali del lago, con formazione di dicrote (fig. 12), in cui le binodali appaiono nettamente delineate.

Anche nei giorni successivi, la dipendenza delle oscillazioni libere uninodali e binodali dal transito di coperiodali perturbazioni della pressione atmosferica, appare stretta. Così nuclei barici sul ritmo di 10^m ca., provocano lunghe serie di uninodali quasi pure fra le 16^h e le 22^h ca. del 22 Ottobre. Dalle 23^h dello stesso giorno, il sopraggiungere di lievissime perturbazioni bariche sul ritmo di 5^m, provoca la formazione di binodali, che si sovrappongono alle uninodali, con formazione di chiare dicrote. Fatto insolito, le binodali — sollecitate dall'alto — continuano ad intensificarsi; si arriva così ad un impulso improvviso verso le 11^h45^m, del 23 Ottobre (fig. 14), associato al contemporaneo transito di una più marcata oscillazione di pressione, con periodo di

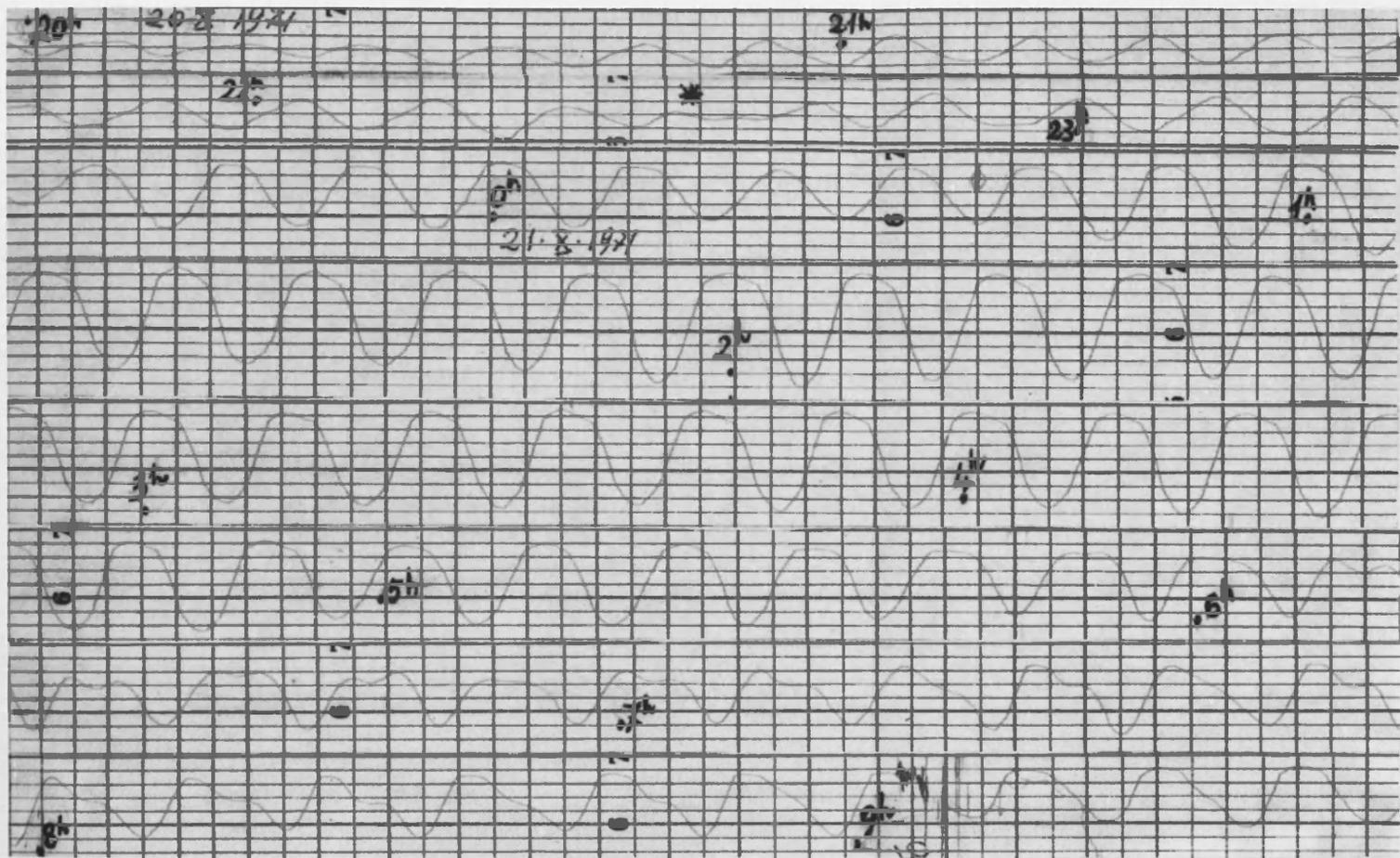


Fig. 12 - Le oscillazioni libere del Lago di Caldrazzo (uni-, bi-, ..., nodali) sono provocate dal transito di *coperiodali* perturbazioni della pressione atmosferica, come è testimoniato dal microbarogramma della fig. 13.

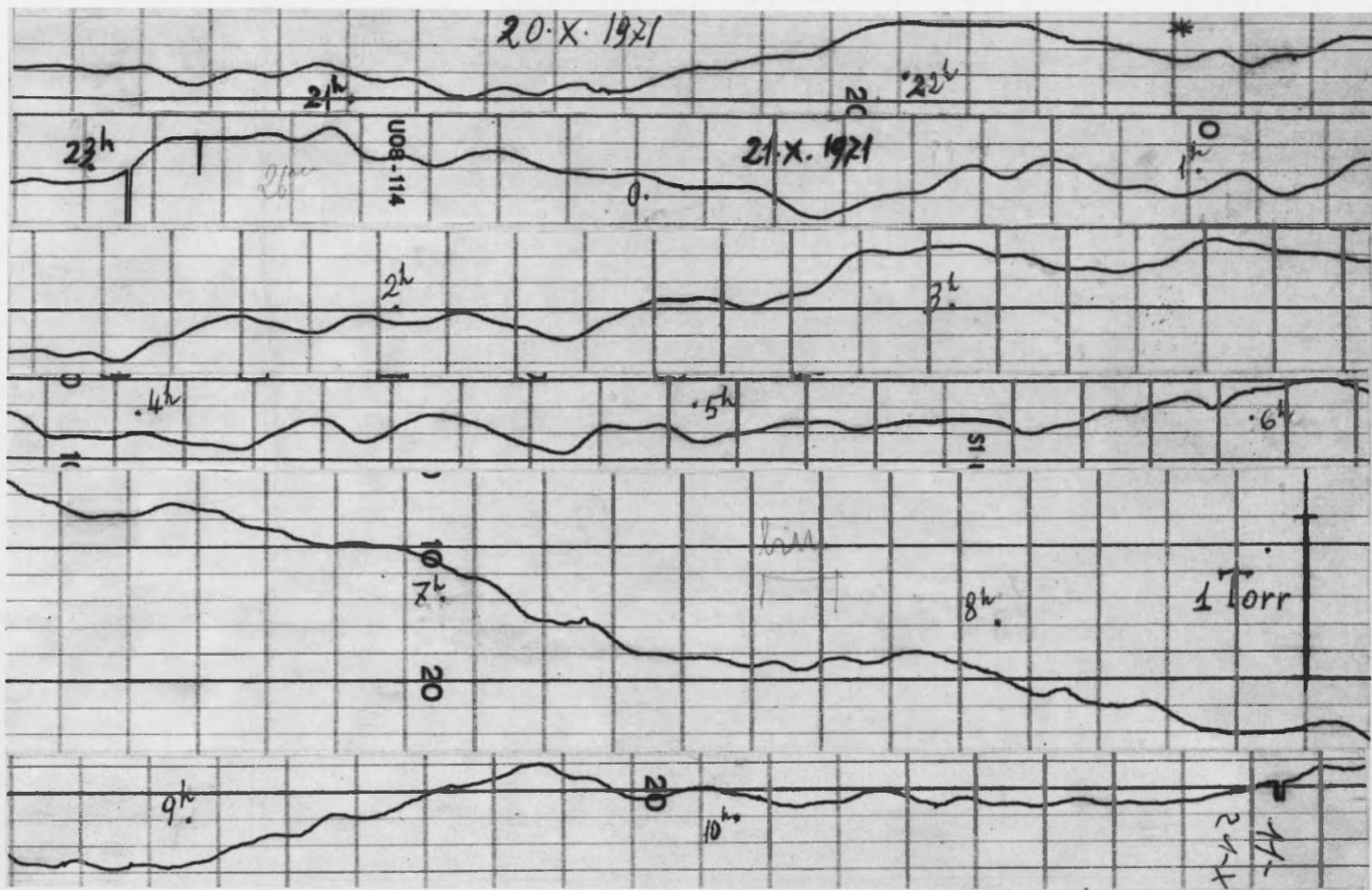


Fig. 13. - Microbarogramma relativo alle oscillazioni libere della fig. 12.

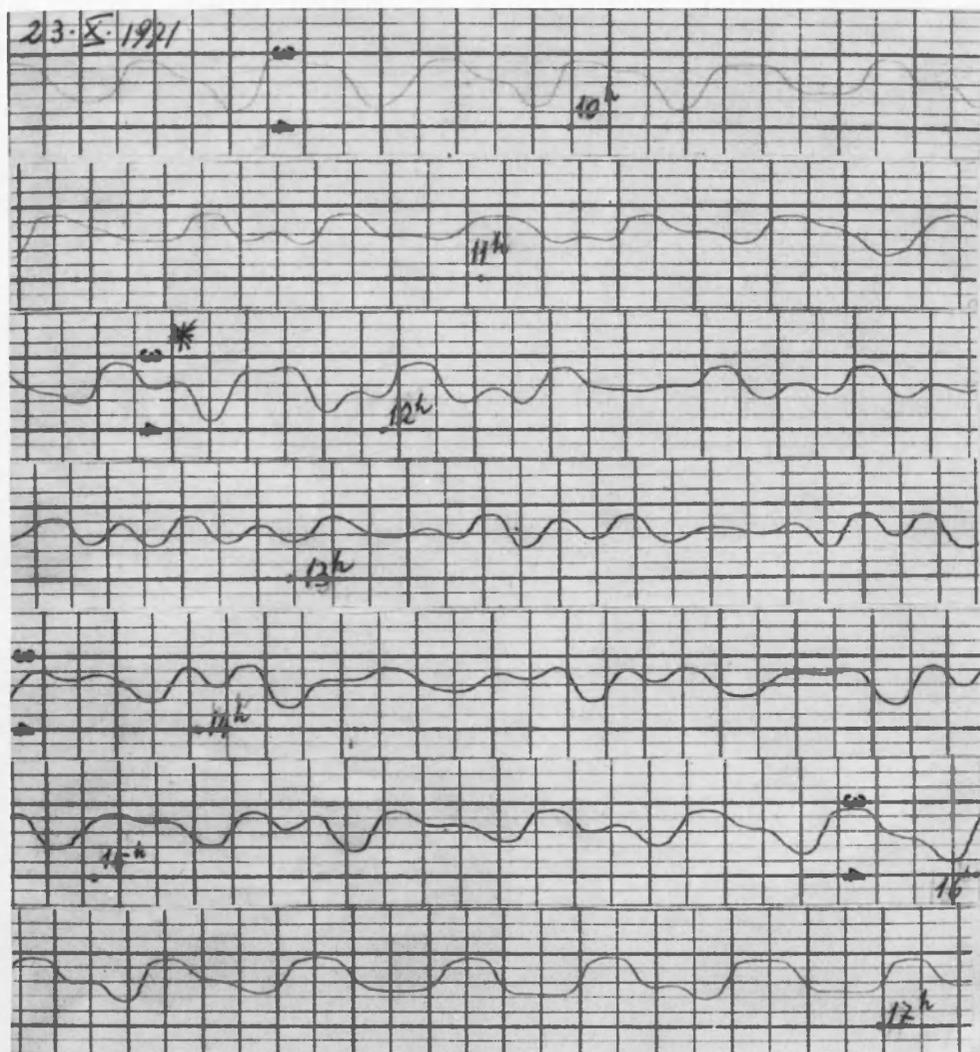


Fig. 14. - Quando nel barogramma prevalgono le perturbazioni atmosferiche, con periodi dell'ordine di 5^m (fig. 15), sono le binodali a prevalere.

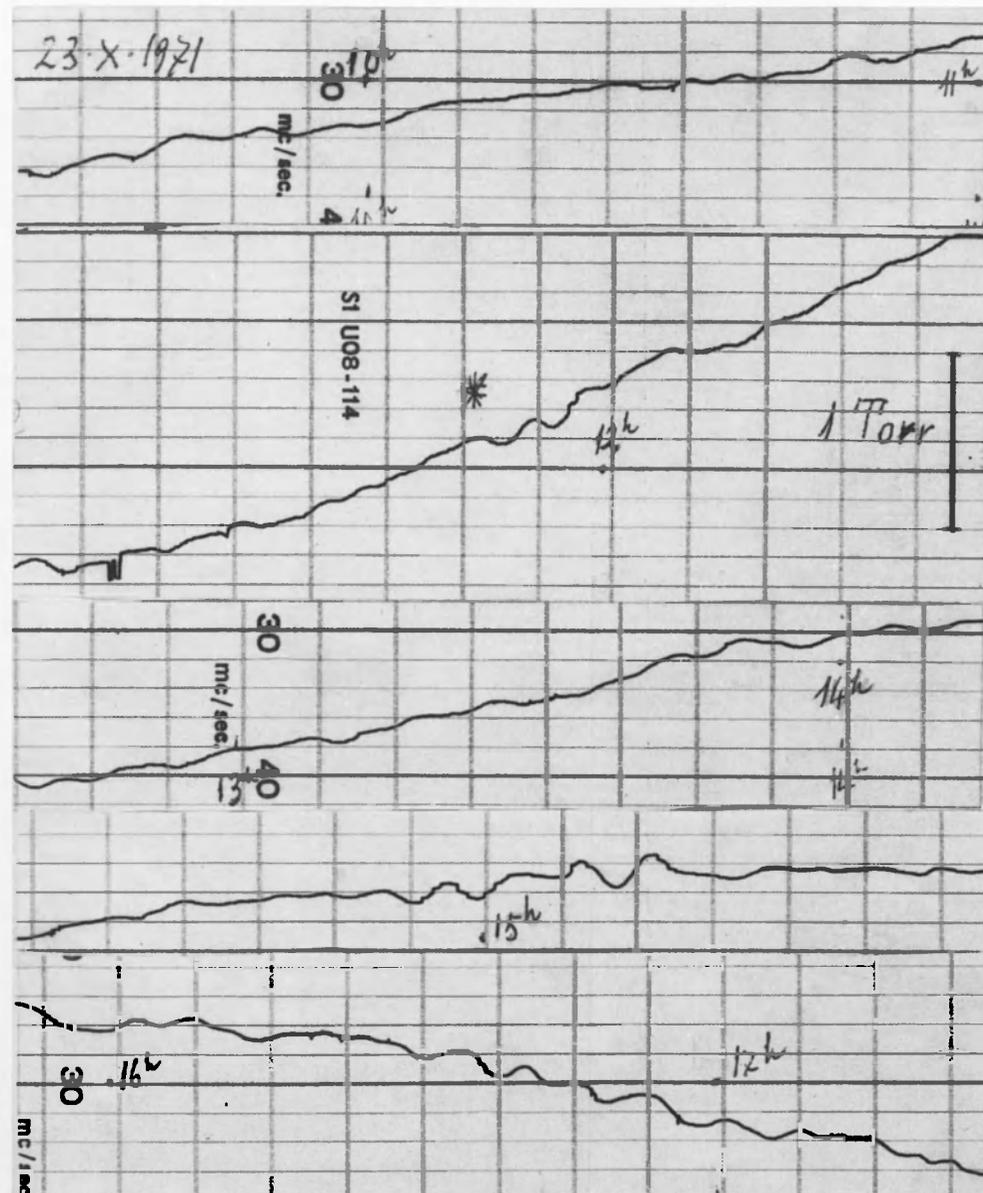


Fig. 15. - Microbarogramma relativo alle oscillazioni libere, di cui alla fig. 14.

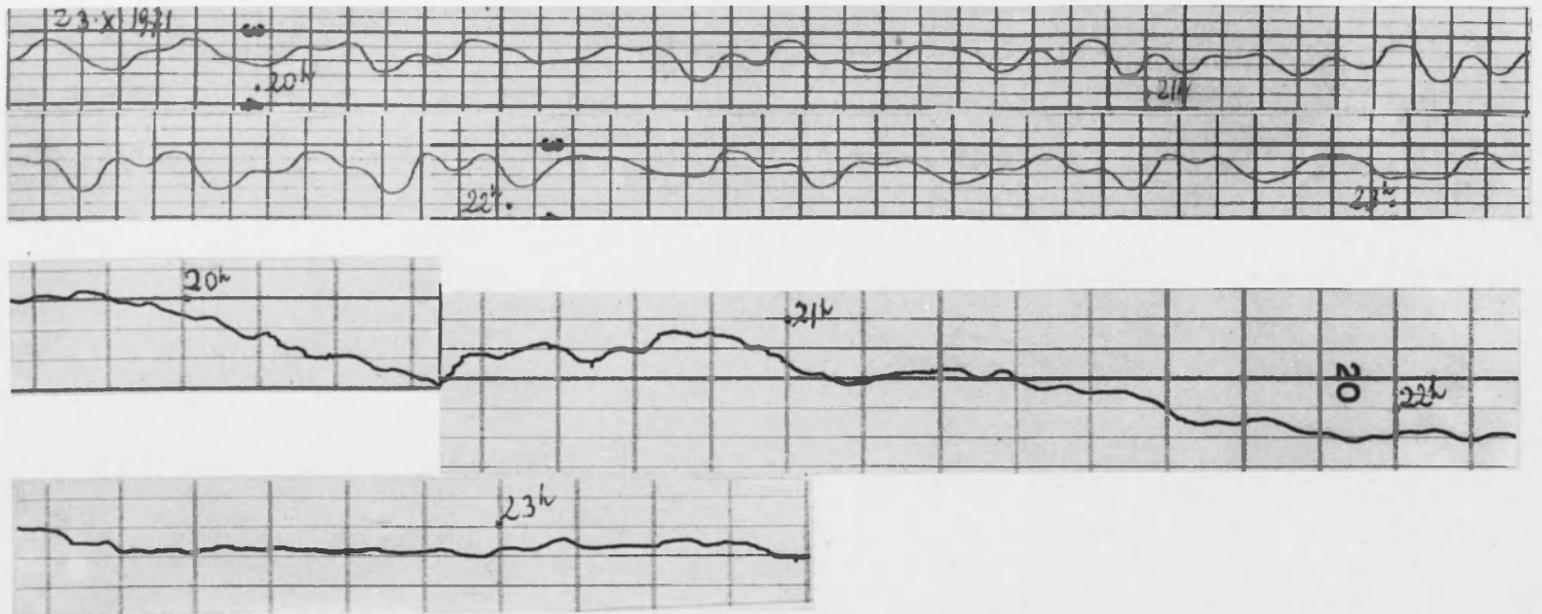


Fig. 16. - Come per figg. 14 e 15 (microbarogramma nella parte inferiore della figura).

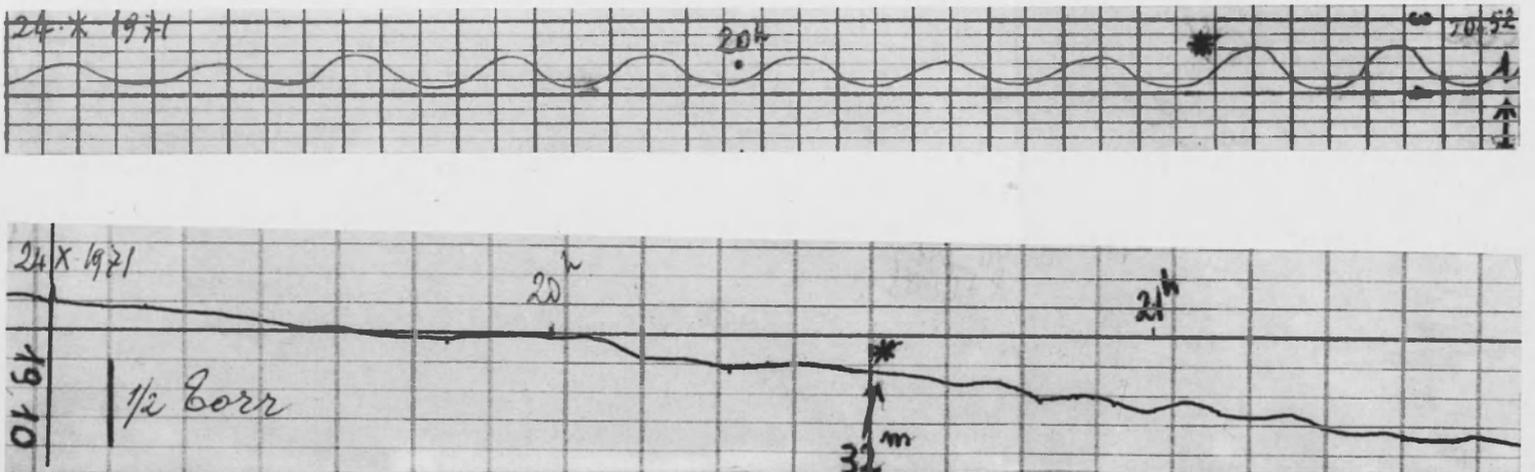


Fig. 17. - Le uninodali, che stavano gradatamente smorzandosi, sono improvvisamente rinvigite dal passaggio di lievissime perturbazioni di pressione atmosferica sul ritmo di 10^m ca. (v. barogramma nella parte inferiore della fig.).

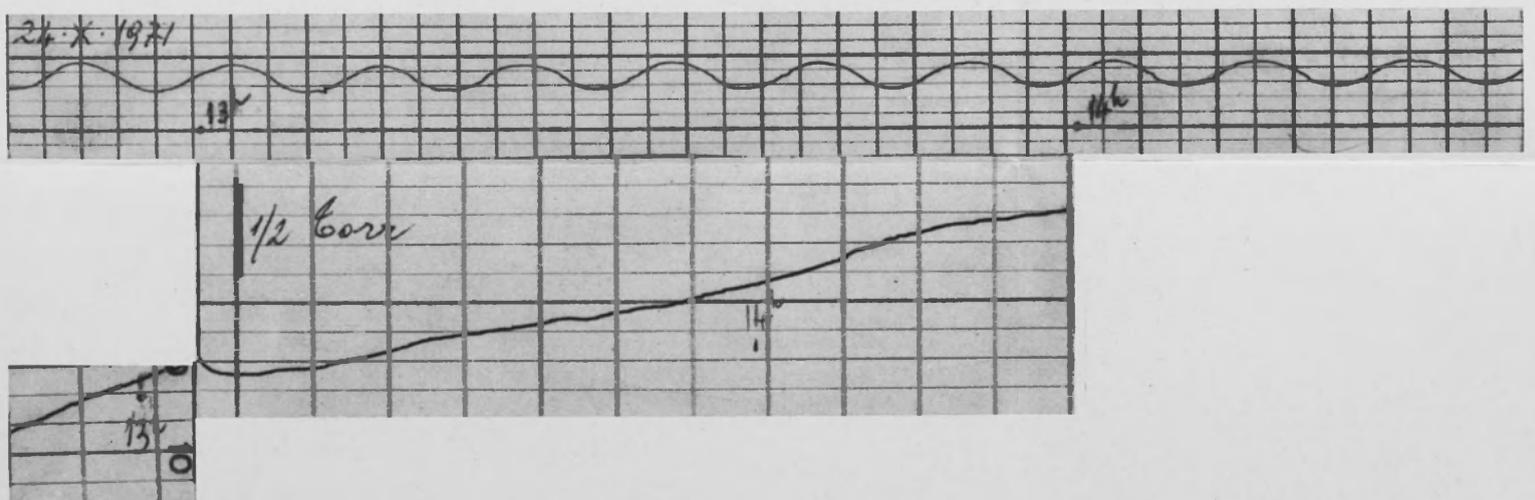


Fig. 18 - Uninodali pure, sorte da precedenti eccitazioni microbariche e seguitanti su ritmo indisturbato, per mancanza di perturbazioni della pressione, come da relativo microbarogramma (parte inferiore della fig.).

5^m ca (fig. 15). Le binodali si succedono quindi pressoché pure, sostenute da coperiodali perturbazioni bariche, e presentano rinforzi verso le 14^h47^m; successivamente si formano dicrote, per l'alternarsi di perturbazioni bariche di 10 e 5 minuti ca.

Ritengo superfluo insistere sul carattere *esclusivo* della dipendenza delle oscillazioni libere del lago dal passaggio di coperiodali, anche lievissime, perturbazioni della pressione atmosferica. Concludo con un ultimo esempio: il rinforzo delle uninodali in atto, poco prima dell'arresto del limnografo (fig. 17), contemporaneo al passaggio di un gruppo di piccolissime perturbazioni bariche sul ritmo di 10^m ca, a partire dalle 20^h32^m del 24 Ottobre (fig. 17).

A questo punto, dobbiamo osservare che, *senza interazione*, ad uno spostamento di 1mm sul registratore del microbarografo (pari ad 1/24 di Torr), corrisponde uno spostamento di mm 0,56 d'acqua, cioè uno spostamento (arrotondando) di 0,5 mm sul registratore limnografico (e quindi a 0,5 mm sul microbarografo, 0,3 mm sul limnografo). In realtà, gli spostamenti limnografici sono 10, 20, 30 e più volte quelli previsti dalla statica.

Ci troviamo qui in presenza di interazione fra aria ed acqua, per fenomeni di risonanza.

Ho già trattato altrove questo problema, nel caso delle onde interne (*). Le conclusioni tratte, valgono anche per il caso in esame. La soluzione si sintetizza nelle seguenti formule:

$$\xi = - \frac{M}{k \rho c^2 (m^2 - 1)} \left[\sin k (x - vt) - \frac{1}{\sin 2klm} \left\{ \sin k (l + vt) \cdot \right. \right. \\ \left. \left. \sin km (x - l) + \sin k (l - vt) \sin km (x + l) \right\} \right],$$

$$\eta = \frac{h M}{\rho c^2 (m^2 - 1)} \left[\cos k (x - vt) - \frac{m}{\sin 2klm} \left\{ \sin k (l + vt) \cdot \right. \right. \\ \left. \left. \cos km (x - l) + \sin k (l - vt) \cos km (x + l) \right\} \right],$$

dove ξ esprime lo spostamento orizzontale delle particelle d'acqua, c la velocità di propagazione di un'onda lunga, ρ la densità media, v la velocità dell'azione perturbante, rappresentata da

$$M_o = M \cos k (x - vt)$$

in cui M è un numero generalmente molto piccolo. Le condizioni ai limiti sono

$$\xi = 0 \quad \text{per} \quad x = \pm l$$

essendo $2l$ la lunghezza del lago, l'origine delle coordinate coincidendo con il centro del lago stesso. η rappresenta lo spostamento verticale, h la profondità media del lago e $m = v/c$.

In prima approssimazione, possiamo ritenere

$$c = \sqrt{gh} \quad T_i = \frac{4l}{i\sqrt{gh}} \quad (i = 1, 2, 3\dots)$$

Per $v = c$, e quindi $m = 1$, η tende verso un valore finito, mentre per $\sin 2klm \rightarrow 0$, η tende all' ∞ . È questo il caso della risonanza. Dato un intero s , possiamo scrivere

$$2klm = s\pi \quad s = 1, 2, 3\dots$$

essendo $k = \frac{2\pi}{vT_s}$ (T_s periodo della forza perturbante), $m = \frac{v}{c}$.

Avremo quindi

$$\frac{4l}{T_s c} = s,$$

da cui ricordando l'espressione di T_i

$$T_s = \frac{i}{s} T_i \quad [2]$$

Per $i = 1$ si ha l'uminodale del lago; ad $s = 1$ corrisponderà il periodo della forza perturbante prossimo a quello dell'uminodale. Quando ciò si verifica, l'uminodale del lago può essere amplificata oltre ogni limite. Questo naturalmente, è un caso ideale; sufficiente, in ogni modo, a spiegare come perturbazioni inapprezzabili della pressione atmosferica, quando agiscano su ritmi prossimi a quelli delle oscillazioni libere del lago, siano capaci di provocare oscillazioni del lago, anche di notevole ampiezza.

In generale, dovrà essere quindi

$$T_s \cong T_i$$

Va sottolineato che la registrazione delle oscillazioni libere del lago, ottenuta durante le tre campagne prima ricordate, si è verificata con atmosfera generalmente calmissima, salvo qualche raro periodo di leggera brezza. Intendo dire che il vento fu assente nei giorni in cui le registrazioni furono eseguite.

Un tempo, diversi autori solevano indicare nel vento una delle cause principali delle sesse. Le esperienze da me compiute, ad intervalli, nell'ultimo quarto di secolo, mi portano a concludere che il vento entra solo in minima parte nella formazione delle sesse, quando addirittura, non esercita un'azione smorzante su movimenti liberi in atto (3).

La causa principale, se non unica, dell'insorgere delle oscillazioni libere in un bacino, va ricercata nelle variazioni della pressione atmosferica in transito. I ritmi associati alla pressione atmosferica (in fase ciclonica o in condizioni di tempo sereno) propongono i più svariati movimenti ai bacini sottostanti: questi scelgono secondo i moti congeniali, come per una sorta di naturale « simpatia ». È la risonanza: naturale traduzione dell'umana corrispondenza di affetti.

Così avviene che due laghi vicini, di diverse dimensioni (come i laghi di Levico e Caldonazzo, per es.) rispondano in modo diverso alle sollecitazioni dal cielo; e l'uno resti fermo, indifferente a quei ritmi che mettono in sensibile movimento l'altro. Se questi ritmi avessero un suono, la Terra diverrebbe sede di un'immensa orchestra, con gli strumenti disseminati dovunque nei continenti e fra i continenti; e i suoni si succederebbero e sovrapporrebbero sui toni più disparati, da quelli sul ritmo di frazioni di secondo o di secondi (associati ai microsismi. . .) a quelli provocati nei golfi, nei porti, nei mari, negli Oceani.

Sovente, purtroppo, la « simpatia » si trasforma in furore.

È ancora a questi fenomeni di interazione fra atmosfera ed idrosfera che vanno infatti attribuiti allarmanti movimenti d'acque, talvolta catastrofici: come le « acque alte » nelle lagune, le mareggiate nel Mare del Nord o le spaventose inondazioni nel Golfo del Bengala.

3. - MORFOLOGIA

Come si è detto, l'oscillazione libera più frequente e più ampia del lago di Caldonazzo è l'uninodale, avente attualmente il periodo di 10^m. Non è infrequente però anche la binodale (4^m,8) e, più raramente, la trinodale.

Di norma, l'inizio di movimenti nel lago si presenta su diversi ritmi. Quando insorgono l'uninodale e la binodale, la forma della curva clinografica appare irregolare (v. fig. 2: 1966, dalle 22^h10^m...); se una delle due (quasi sempre l'uninodale) prevale nettamente in ampiezza, finisce con l'imporre la sua periodicità. Nel caso di uninodale molto più ampia della binodale, la presenza di quest'ultima è rivelata da

arrotondamento dei massimi ed assottigliamento dei minimi (dalle 0^h alle 2^h del 23.x.'66, fig. 2), accompagnato da inclinazione del ramo calante e raddrizzamento del ramo crescente delle singole oscillazioni; a cui segue il fenomeno contrario (dalle 3^h del 23.x.'66), con assottigliamento massimi e arrotondamento minimi. Un chiaro esempio del transito dall'appiattimento dei massimi a quello dei minimi si è verificato fra le 23^h del 23 e le 2^h del 24 Ottobre (fig. 3) intervallato da dicrote (fra le ore 0 ed 1 del 24 Ottobre: fig. 3).

Quando le uninodali hanno ampiezze comparabili con le binodali, poiché le seconde hanno un periodo che è quasi la metà di quello delle prime, si possono presentare i *massimi coincidenti* (fig. 8: prima e dopo le 21^h del 16.x.'67), a cui gradualmente seguono, dopo alcune oscillazioni di forma mista (21^h30^m ~ 22^h30^m), oscillazioni con *coincidenza di minimi* (21^h30^m ~ 23^h30^m del 16.x.'67: fig. 8). Ciò si verifica con molta più frequenza a Lido di Caldonazzo, in quanto ivi l'uninodale — pur essendo l'oscillazione più ampia — presenta più spesso ampiezze comparabili con quelle delle binodali. A Nord (S. Cristoforo), dove l'uninodale ha ampiezza più che doppia che a Sud, la sovrapposizione delle due sesse si traduce, più frequentemente, secondo il modello sopra detto: con appiattimento alternato di un certo numero di massimi e di minimi.

Generalmente, quando sono presenti entrambe, le uninodali e le binodali, sovrapponendosi, si alterano a vicenda; talora si svincolano e quasi si separano (specie a Sud) nell'alternarsi e nel succedersi dei movimenti.

Anche negli altri tratti riportati (dalle 3^h alle 7^h del 17.x.'67, fig. 9), ricorrono spesso le alterazioni della linea limnografica, secondo i modelli sopra riferiti. Si noti, all'attenuarsi dell'ampiezza delle uninodali, a partire dalle 6^h del 21.x.'71, come le binodali trasformino gradualmente la risultante, secondo le modalità accennate, e — alla ripresa delle uninodali (9^h del 21.x.'71: fig. 12) — prima le oscillazioni appaiono piegate a sinistra (di chi guarda) e, dopo 4 oscillazioni complete raddrizzate, piegano progressivamente verso destra. Tale fenomeno si ripete fra le 18^h ca. e le 23^h ca. del 22.x.'71, mentre fra le 4^h ca. e le 8^h ca. del 24 si verifica il passaggio della coincidenza dei massimi delle uninodali e binodali, dall'alto al basso della curva clinografica (che è il contrario di quanto avviene nel lago).

Naturalmente, esistono metodi analitici che consentono la separazione delle uninodali dalle binodali. Si è ritenuto però superfluo applicare qui tali metodi, in quanto — come si è visto — le uninodali appaiono spesso in lunghe serie pressochè pure, e quindi il loro periodo

può essere delotto con sufficiente precisione; e anche le binodali, non di rado, si presentano pressoché indisturbate.

In ogni modo, una registrazione scevra da perturbazioni da binodali, può essere data da registrazioni effettuate presso un binodo; mentre registrazioni praticate nell'uninodo possono fornire binodali non perturbate.

Se poi si desidera isolare le sole uninodali ad un estremo del lago, basta filtrare il limnografo per periodi inferiori ai 6^m: cosa che è stata fatta a S. Cristoforo, nelle esperienze dell'Ottobre 1966 e 1967. Le uninodali risultarono naturalmente ridotte in ampiezza, ma indisturbate, e il loro periodo confermato in 10^m (fig. 4).

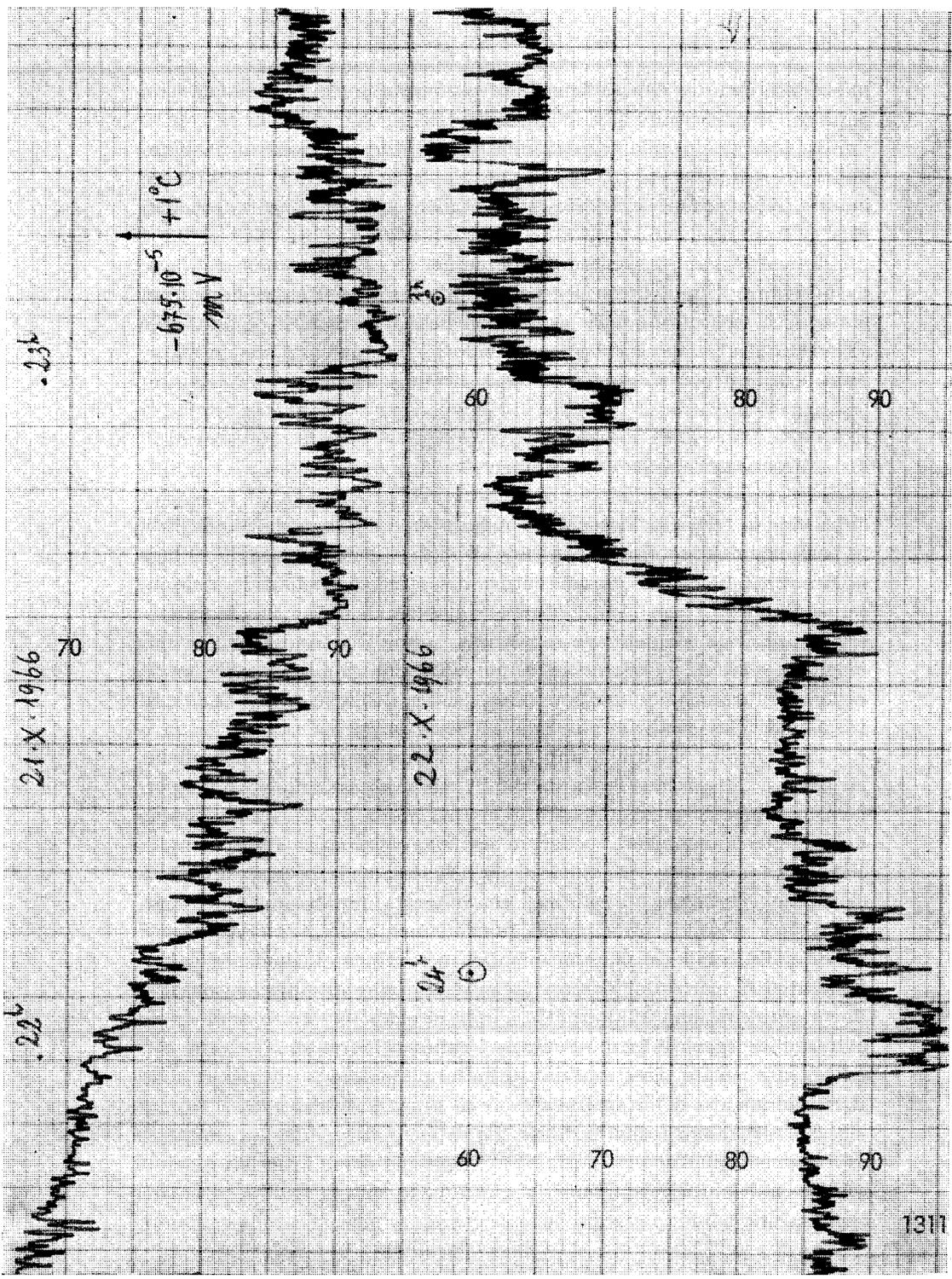
4. - MICROVARIAZIONI DI TEMPERATURA.

Dopo la scoperta di cospicue onde interne nel lago di Garda (10.^a), in passato ho compiuto lunghe serie di misure di temperatura sul lago di Bracciano, il che mi ha consentito di scoprire e studiare le onde interne di questo lago (4.^a). I batitermografi di cui feci uso in queste esperienze erano di notevole sensibilità: specie il secondo, un batitermografo « Askania » di spiccata potenza. Ciò nonostante, l'energia dell'elemento sensibile non poteva consentire il rilievo di rapide micro-variazioni, che venivano di regola mediate.

Nell'Ottobre del 1966, unitamente alle osservazioni limnografiche, mi proposi di registrare le variazioni di temperatura dello strato superficiale del lago, prossimo al Lido di S. Cristoforo, mediante una coppia termoelettrica sommersa, collegata con un registratore « Micrograph » Kipp & Zonen, con sensibilità di 50 μ V, capace di misurare quantità elettriche estremamente piccole, con risposta rapidissima.

Com'è noto, il principio di funzionamento del « Micrograph » è quello della compensazione automatica e continua. L'elemento galvanometrico fa parte del sistema fotoelettrico che amplifica e converte la corrente continua in alternata. L'apparecchio è costruito in modo da evitare l'insorgere di f.e.m. d'origine termica nel circuito d'entrata, termicamente isolato. Inoltre, l'uso di un amplificatore a transistor, evita il riscaldamento dello strumento.

La coppia era formata da un filo di ferro, di m 1,20 ca., immerso verticalmente nell'acqua, portante saldati agli estremi due fili di rame (che formavano direttamente la giunzione), collegati all'ingresso del registratore.



L'estremo superiore della coppia era a circa 5cm dal pelo d'acqua.

La fig. 19 riporta tratti di registrazione.

Per la loro interpretazione, va ricordato che, collaterali esperienze, condotte ad una temperatura ambiente di 17°C ca (dell'ordine di quella dello strato esterno del lago, notoriamente caldo nelle prime settimane d'Ottobre) avevano provato che l'effetto termoelettrico Cu - Fe, per variazioni della temperatura dell'acqua da 7°C a 20°C presenta un andamento lineare, che si traduce nella diminuzione di 0,00675 mV per l'aumento di 1°C di temperatura.

L'aspetto della registrazione che balza subito all'occhio è il suo carattere pulsante, sopra una gamma svariaticissima, che va da frazioni di minuto primo ad oltre mezz'ora, senza parlare delle oscillazioni lente sul ritmo di un paio d'ore circa, probabilmente dovute ad onde interne, provocate dall'oscillazione della superficie del salto termico. Queste ultime, in ogni caso, sono solo ipotizzate. Ulteriori indagini potranno verificarne la reale esistenza.

Scopo di questa prima, sommaria esperienza era soltanto quello di sottolineare la microstruttura delle variazioni termiche lacustri. E ciò non desta sorpresa. Come dice Planck, le leggi dei processi irreversibili (conduzione di calore, diffusione, ecc.) studiate microscopicamente debbono tutte rivelarsi approssimative e ammettere, in singoli casi, eccezioni tanto più palesi quanto più fine è l'indagine. Il progressivo perfezionamento dei metodi di misura conduce appunto a questa conclusione. Dalle leggi macroscopiche della conduzione del calore consegue, p. es., che in un liquido di temperatura uniforme (e tale si può considerare lo strato esterno di un lago di primo Autunno) non ha luogo alcun flusso di calore. A rigore, ciò non è vero. Il calore è infatti dovuto ai fini e rapidi movimenti delle molecole del liquido e *la conduzione di calore è conseguentemente realizzata dagli scambi di velocità che avvengono quando le molecole si urtano*. Uniformità di temperatura non comporta l'uguaglianza di tutte le velocità, ma soltanto uguaglianza del *valore medio* delle velocità, per ogni quantità di liquido che contenga un gran numero di molecole. Questo è d'altronde provato dai movimenti molecolari browniani, rivelati dal microscopio in un liquido in cui siano sospese delle particelle, che urtate dalle invisibili molecole del liquido, vengono disordinatamente spinte con vivacità tanto maggiore quanto più alta è la temperatura. Possiamo quindi concludere che ogni singolo urto può ritenersi un processo *reversibile* per il quale valgono rigorosamente le leggi dinamiche elementari.

Le misure di microvariazioni termiche, ivi accennate, confermano queste conclusioni. Si nota così che l'ampiezza delle variazioni in netta diminuzione quando il sole sparisce dietro i monti occidui, riprende decisa con l'insolazione associata alle ore diurne, che precedono e seguono il mezzogiorno.

Va ancora osservato che i bruschi salti del microtermogramma, che si verificano di quando in quando, sono probabilmente da ascrivere all'avvento di correnti calde o fredde verso la superficie.

A prescindere dall'azione delle onde interne, quando la temperatura esterna comincia a diminuire (fig. 19) avvicinandosi a quella corrispondente all'estremo inferiore della termocoppia, l'attività del « Micrograph » si attenua, per accentuarsi in prossimità del punto di uniformizzazione, collegato al ricambio d'acqua.

Ad uniformità raggiunta, l'attività si riduce al minimo (verso le 23^h e 30^m, fig. 19). Le correnti giuocano evidentemente un ruolo importante.

Prima della mezzanotte, l'avvento di una corrente calda dal basso, causa un brusco salto della temperatura, che provoca successivamente il riscaldamento dello strato esterno.

È mio parere che la vita dei microorganismi lacustri sia fortemente condizionata dalle cennate microvariazioni termiche che possono verificarsi anche sul ritmo di 2 o 3 secondi. Non so se i biologi abbiano condotto ricerche in questo senso; in caso negativo, esse appaiono altamente auspicabili.

5. — PROGRESSIVO INSABBIAMENTO DEI PICCOLI LAGHI.

L'apporto continuo di torbide e di materiali d'erosione, trasportati dagli immissari, provocano un lento accumulo di limo, sabbie, miste a trasporto più grossolano, sul fondo dei bacini lacustri. A parità di altre condizioni, è naturale che l'insabbiamento di un lago sia tanto più rapido quanto più ridotte sono le sue dimensioni.

Campagne batimetriche condotte nel tempo (oggi, tecnicamente nell'esecuzione, molto più rapide ed efficaci che in passato), consentirebbero di valutare le alterazioni e il progressivo sollevamento del fondo. Tali misurazioni, però, vengono eseguite molto di rado e, in ogni modo, risultano piuttosto costose.

A questo proposito, ritengo utile sottolineare uno degli aspetti pratici della determinazione, opportunamente scaglionata nel tempo,

dei periodi delle oscillazioni libere di un lago: quello che permette di valutare, sia pure approssimativamente, l'entità dell'insabbiamento, subito da un lago in un determinato periodo. La teoria infatti prova che i periodi delle sesse sono direttamente proporzionali alla lunghezza ed inversamente proporzionali alla radice quadrata della profondità ⁽¹⁾.

Consideriamo, per es., il lago di Caldonazzo. L'applicazione dei metodi di Hidaka e di Defant hanno condotto concordemente al valore di 9^m,65 per l'uninodale (che è di gran lunga l'oscillazione più vistosa e più frequente del lago).

Le registrazioni sistematiche, condotte nel mese di Ottobre degli anni 1966, 1967 e 1971, hanno condotto ad un valore, per il periodo dell'uninodale, di 10^m esatti * (per essere precisi, nel 1971 la media del periodo superava i 10^m di 6^s ca.).

Considerati 49 m e 9^m,65 rispettivamente i valori della profondità massima e del periodo dell'uninodale per il lago di Caldonazzo, relativi all'epoca del rilevamento batimetrico, al periodo di 10^m — proprio dell'uninodale del lago per il 1971 — corrisponde la profondità di

metri 45,6.

In altri termini, sulla base dei dati sopra riportati, dall'epoca a cui si riferisce la batimetria, *il fondo del lago di Caldonazzo si sarebbe sollevato di circa 3,5 metri.*

Una conclusione analoga si può trarre per il lago di Levico.

Il periodo medio dell'uninodale del lago di Levico, osservato nella Primavera del 1961 ⁽²⁾, fu di 6^m,28.

AmMESSO che il metodo di Hidaka abbia fornito il valore più accettabile (5^m,91) per l'uninodale teorica ⁽²⁾, poiché all'epoca delle determinazioni batimetriche la profondità massima del lago di Levico risultò di 37 metri, sulla base del valore osservato nel 1961, se ne conclude che *il fondo del lago di Levico* (nell'intervallo di tempo intercorso dall'anno della batimetria al 1961), *si sarebbe sollevato di circa 4 metri.*

Si tratta naturalmente di valori approssimativi; ma l'ordine di grandezza è senz'altro accettabile.

* A questo riguardo, osservo che negli anni 1966, 1967, durante le osservazioni, il lago — a causa delle continue piogge — era circa 1m sopra il livello normale. L'aumento di livello comporta pure un lieve aumento dell'effettiva lunghezza del lago, per cui entro i limiti di approssimazione consentiti, si può ritenere che il fatto non conduca ad una apprezzabile variazione del periodo.

Ora, la sola batimetria, citata nei lavori riguardanti i laghi di Caldonazzo e di Levico, è quella di Damian⁽¹²⁾, pubblicata nel 1892. Io ho avuto a disposizione dal Museo di Storia Naturale di Trento, una batimetria che risale al 1920 ca.; non è detto se frutto di nuovi rilievi o rifacimento di quella di Damian. Nella validità della seconda ipotesi, la risalita di 3,5 metri per il fondo del lago di Caldonazzo, si sarebbe verificata nel periodo di 80 anni ca., mentre, per il lago di Levico, l'insabbiamento per complessivi 4 metri ca., si sarebbe realizzata durante circa settant'anni.

Potremo dire, con linguaggio più appropriato, che la giustificazione teorica dei valori osservati per le uninodali dei due laghi, richiede un sollevamento del fondo, della misura sopra riportata.

Al termine di questo lavoro, non posso non ringraziare quanti vi hanno contribuito; in modo particolare il Dott. Giovanni Maggiolini di Este e mio figlio Benedetto, ai quali si deve l'accurata sistemazione degli strumenti, l'accorta continua sorveglianza, la consapevole assistenza. Più che preziosa, la loro collaborazione fu essenziale.

Fusione di amicizia e d'affetti familiari, unita a gentilezza di ospitanti, a suggestiva bellezza di luoghi, trasformarono i periodi d'indagine, distribuiti nell'Ottobre di tre diversi anni, in una gioiosa serena vacanza, il cui ricordo brilla fra le vicende umane come, fra le umili case di un villaggio alpestre, sul far della sera, improvvisa una finestra risplende, accesa dall'ultimo sole.

Roma, Febbraio 1972.

BIBLIOGRAFIA

(1) CALOI P., SPADEA M. C., 1952. - *Sulle oscillazioni libere del lago di Caldonazzo*. « Annali di Geofisica », V, 1.

(2) CALOI P., 1951. - *Oscillazioni libere del lago di Levico*. « Annali di Geofisica », IV, 2.

(3) CALOI P., 1961. - *Validità delle teorie idrodinamiche sulle sesse: conferme dei laghi di Levico e Caldonazzo*. « Annali di Geofisica », XIV, 3.

(4) CALOI P., 1959. - *Termologia del Lago di Bracciano: onde interne*. « Annali di Geofisica », XII, 1.

(5) CALOI P., MIGANI M., PANNOCCHIA G., 1961. - *Ancora sulle onde interne del lago di Bracciano e sui fenomeni ad esse collegati*. « Annali di Geofisica », XIV, 3.

(⁶) CALOI P., 1961. — *Sulle onde interne del lago di Bracciano e sulle loro probabili cause.* « Rend. Acc. Naz. dei Lincei », Classe Sc. fis. mat. e nat., serie VIII, XXX, 5.

(⁷) CALOI P., 1963. — *Interazioni tra atmosfera ed idrosfera.* « Annali di Geofisica », XVI, 1.

(⁸) CALOI P., MIGANI M., 1964. — *Sulla natura fisica delle onde interne del lago di Bracciano.* « Annali di Geofisica », XVII, 2.

(⁹) CALOI P., 1963. — *Le onde interne del lago di Garda, come effetto di interazione fra atmosfera ed idrosfera.* « Rend. Acc. Naz. dei Lincei », Classe Sc. fis. mat. e nat. serie VIII, XXXIV, 2.

(¹⁰) CALOI P., 1947. — *Notevoli onde interne (sesse termiche) nel lago di Garda.* « Ricerca Scientifica », XVII, 1.

(¹¹) CALOI P., ROMUALDI G., SPADEA M. C., 1967. — *Caratteristiche idrodinamiche del lago di Sauris.* « Annali di Geofisica », XX, 3.

(¹²) DAMIAN G., 1892. — *Die Caldonazzo und Levico Seen.* « Petermanns Mitteilungen » — Gotha.