



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Κύματα II: Γένεση, προώθηση,
μετασχηματισμός

Αντώνης Βελεγράκης
Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης





**ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΘΑΛΑΣΣΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑ 5
Κύματα II: Γένεση, προώθηση, μετασχηματισμός**

Α.Φ. Βελεγράκης

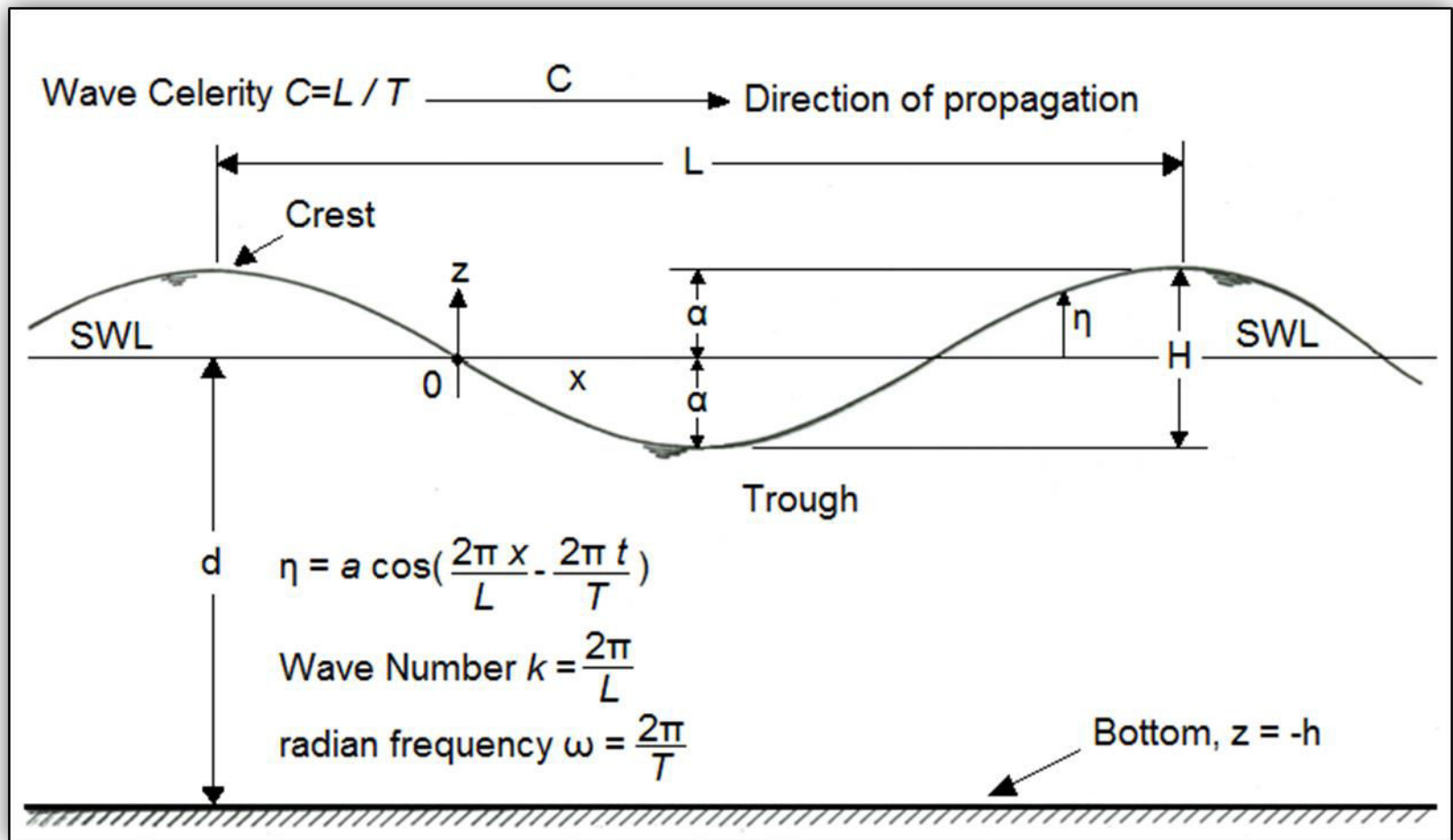
5 Κύματα II: Γένεση, προώθηση, μετασχηματισμός

5.1 Γένεση κυμάτων

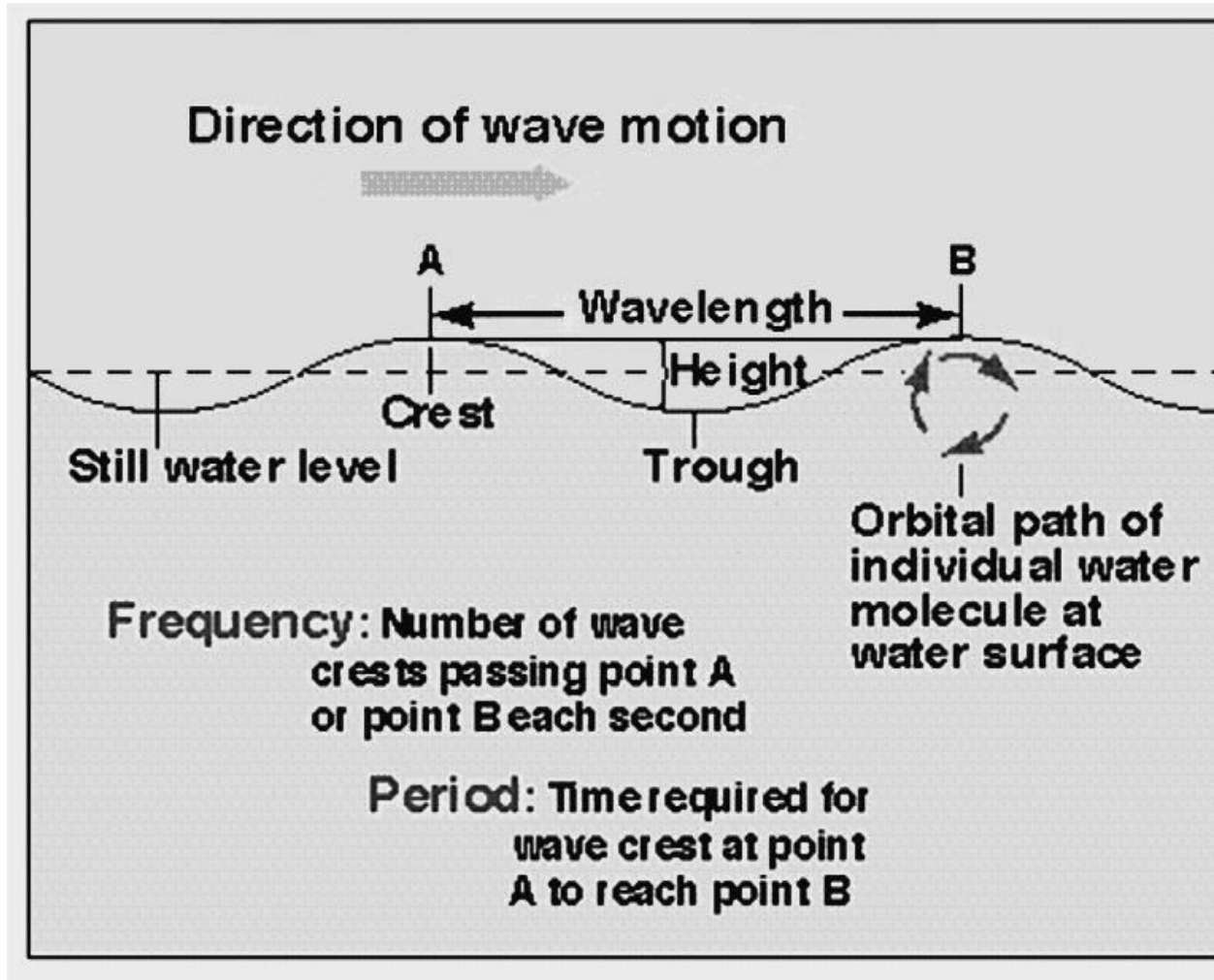
5.2 Μετρήσεις κυμάτων

5.3 Μετασχηματισμός κυμάτων

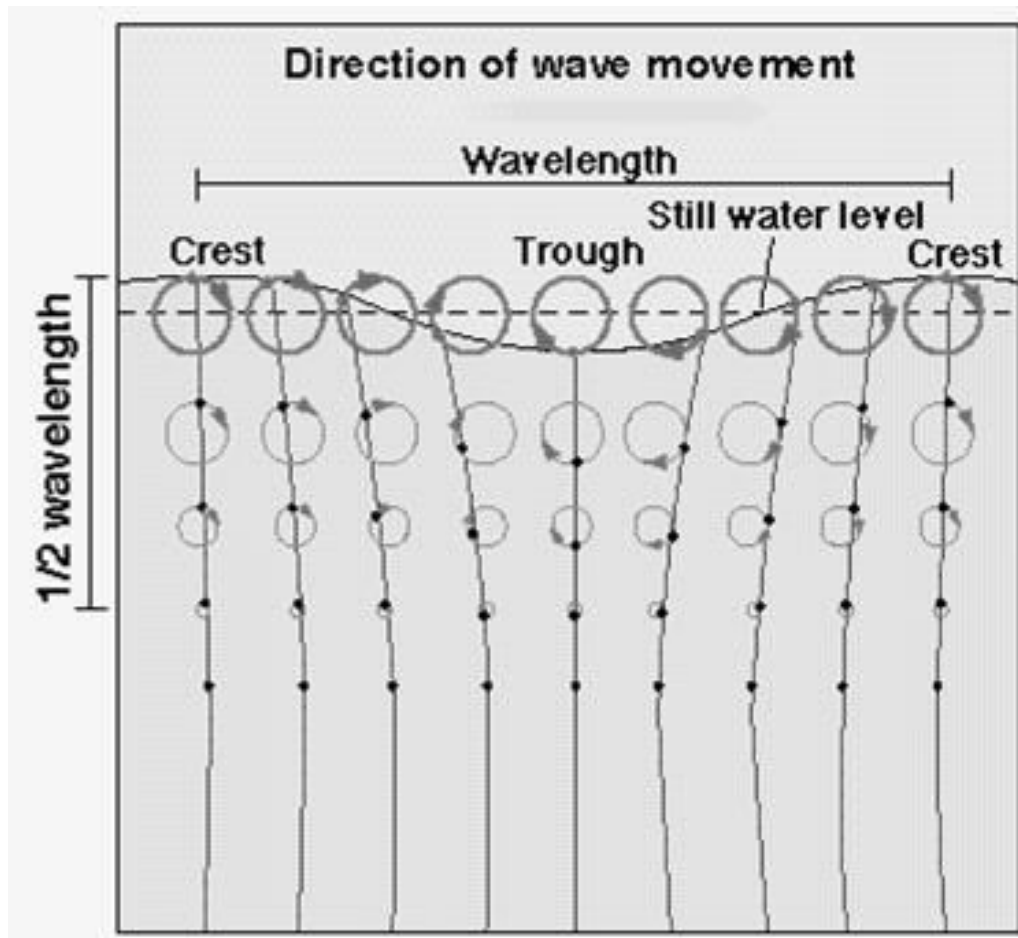
5.4 Εσωτερικά κύματα



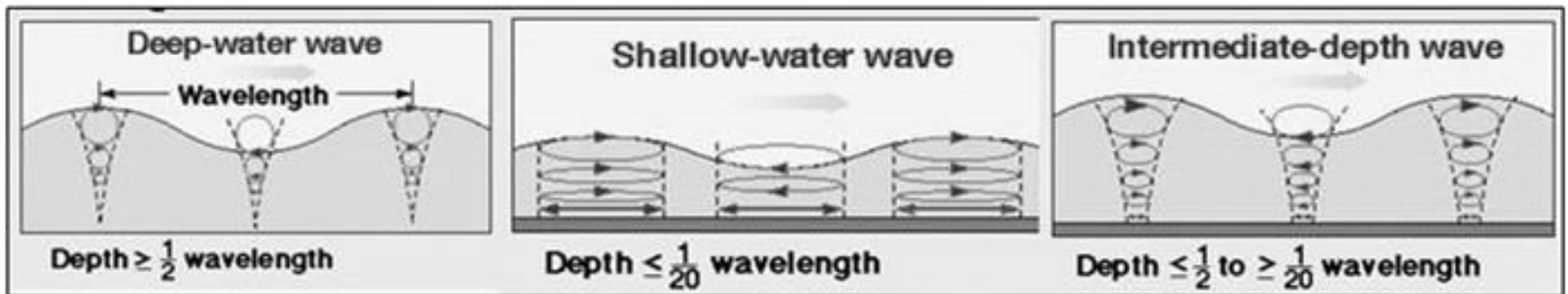
Σχήμα 5.1. Παράμετροι προοδευτικών κυμάτων.



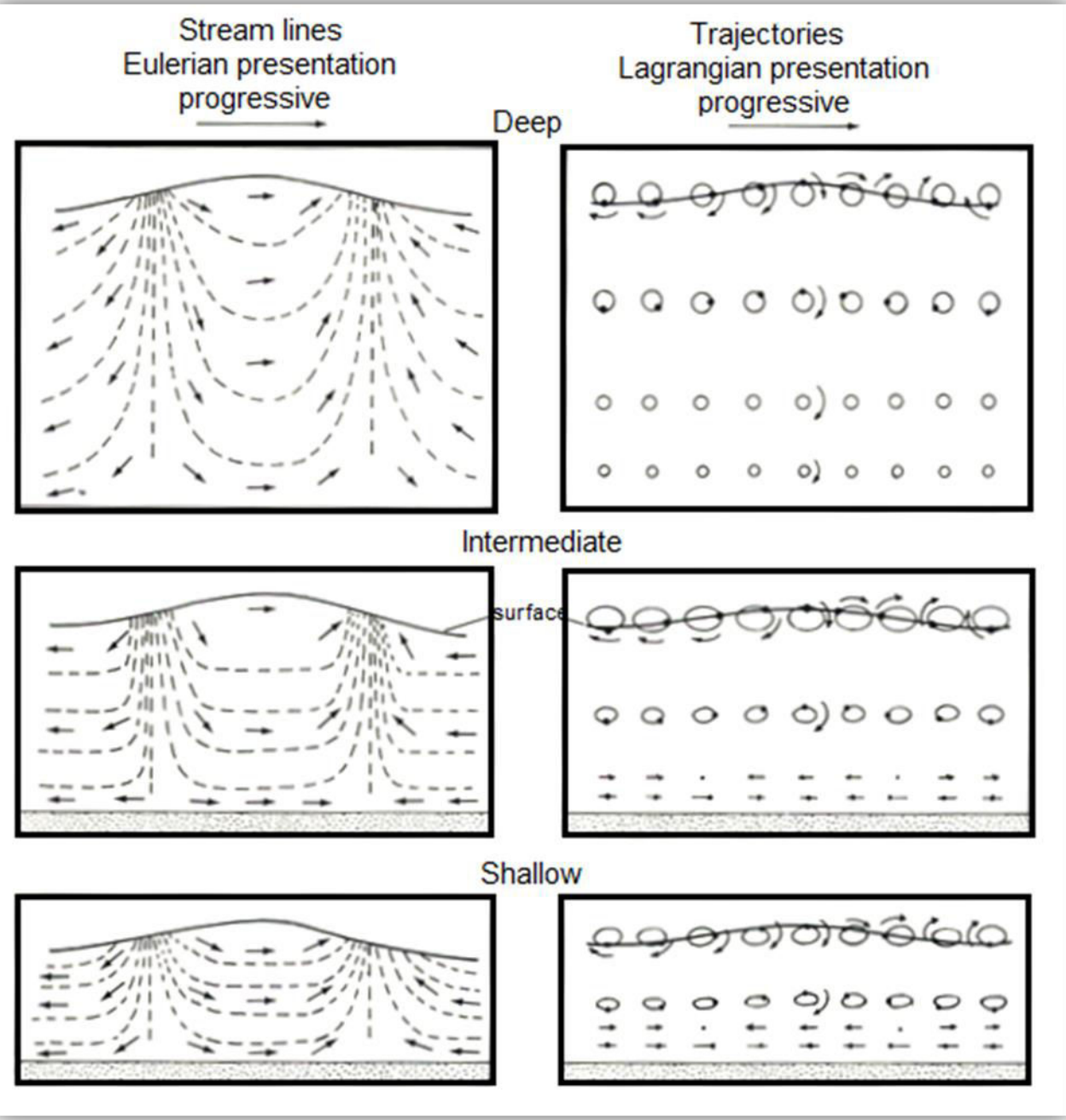
Σχήμα 5.2. Η ανατομία ενός προοδευτικού κύματος. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 5.3. Η τροχιακή κίνηση των σωματιδίων νερού σε ένα κύμα φθάνει μέχρι σε βάθος $\frac{1}{2}$ μήκους κύματος. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 5.4. Προοδευτικά κύματα σε (a) Βαθιά νερά (b) αβαθή νερά (c) ενδιάμεσα νερά. Προσέξτε ότι η τροχιακή κίνηση αλλάζει σημαντικά ανάλογα με το βάθος και την σχέση βάθους μήκους κύματος ((Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 5.5. Γραμμές ροής και τροχιακή κίνηση των σωματιδίων νερού σε ένα προοδευτικό κύμα. Βασισμένο στον Knauss, 1997.

5.1 Γένεση κυμάτων

Η γένεση των ανεμογενών κυμάτων είναι πολύπλοκο πρόβλημα από πλευράς φυσικής.

Μια γενικευμένη θεώρηση είναι:

(α) όταν ο άνεμος αρχίζει να φυσάει σχηματίζονται μικρές ρυτίδες (περίοδος $T < 1$ s, $H \sim 1-2$ cm)

(β) με την πάροδο του χρόνου (και περισσότερη ενέργεια από τον άνεμο), κύματα με μεγαλύτερη περίοδο (T), μήκος κύματος (L) και ύψος (H) σχηματίζονται, αλλά οι ρυτίδες παραμένουν έτσι ώστε να υπάρχουν ταυτόχρονα κύματα με διαφορετικές περιόδους.



Σχήμα 5.6 Σχηματισμός ανεμογενών κυμάτων. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 5.7 «Θάλασσα» (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

5.1 Γένεση κυμάτων (συν.)

Η γένεση των κυμάτων οφείλονται στην διαφορική πίεση που αναπτύσσεται πάνω στην επιφάνεια της θάλασσας λόγω της τυρβώδους ροής του αέρα στο οριακό επίπεδο αέρα / θάλασσας.

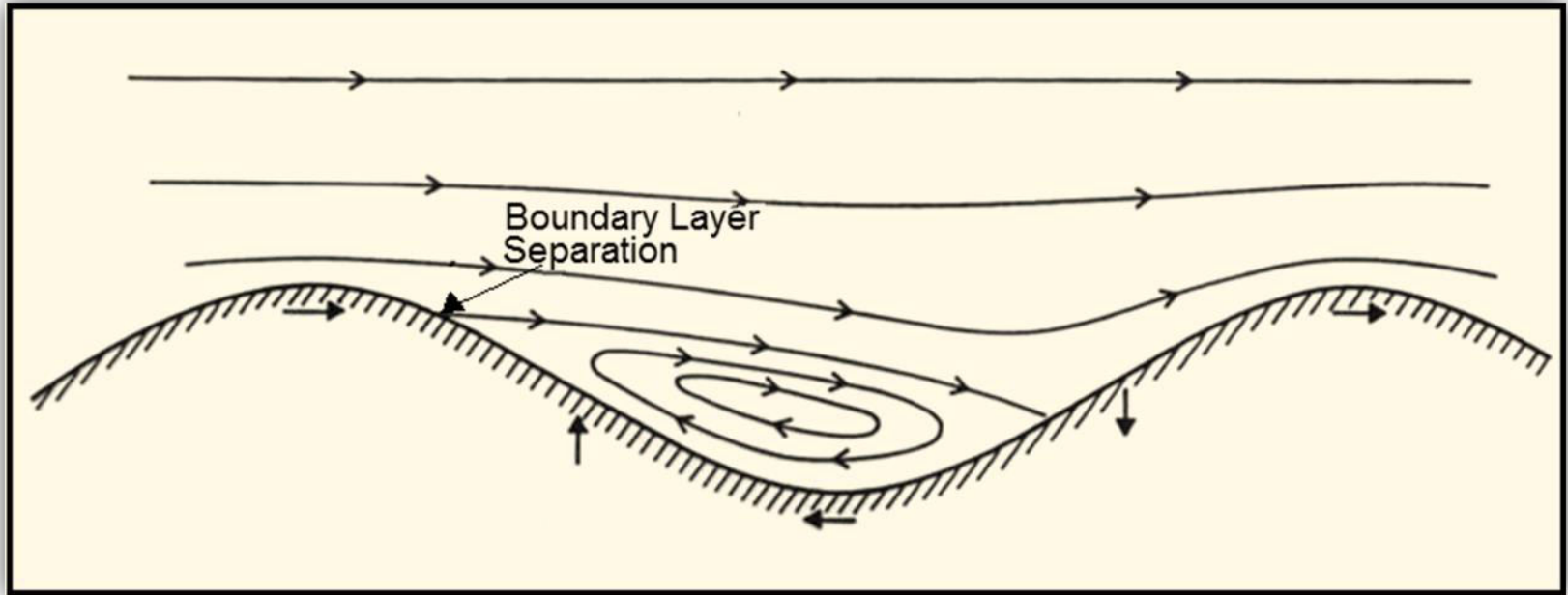
Η διαφορική πίεση έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία διαταράξεων οι οποίες ενισχύουν τις διαφορικές πιέσεις και δημιουργούν κατανομές πίεσης οι οποίες είναι μεγαλύτερες στις κοιλάδες του πρώτο-κύματος και μικρότερες στις κορυφές. Στην συνεχεία, η ροή του ανέμου δημιουργεί διαχωρισμό ροής (separation of flow), και περαιτέρω ενίσχυση των κυμάτων (Komar, 1998)

Η μεταφορά ενέργειας από τον άνεμο στην θάλασσα συνεχίζεται με την θραύση των μικρότερων κυμάτων πάνω στα μεγαλύτερα και έτσι ενέργεια μεταφέρεται από τα κύματα μικρότερης στα κύματα μεγαλύτερης Περιόδου (T)

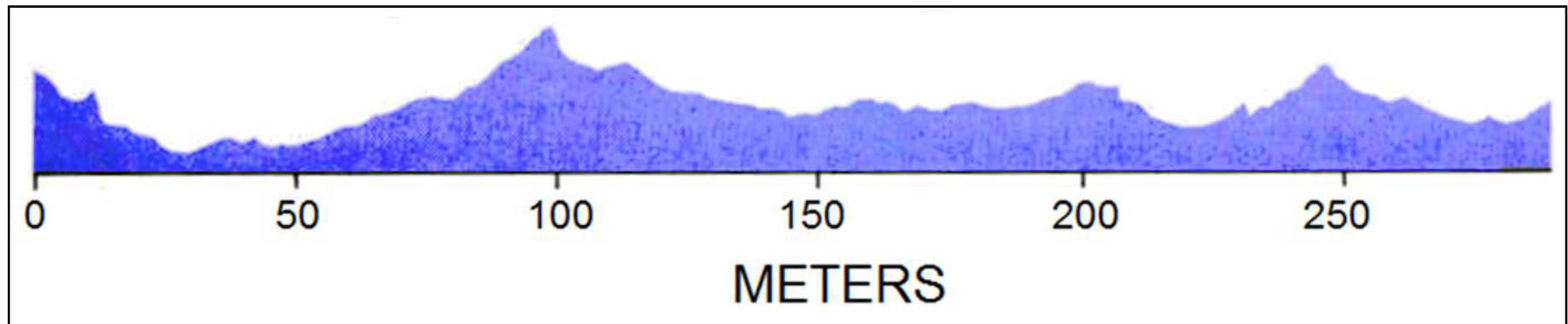
Έτσι αν ο άνεμος διατηρηθεί, κύματα μεγαλύτερης T δημιουργούνται (μέχρι που η θραύση περιορίζει την αύξηση της Περιόδου, Ύψους, Μήκους κύματος).

Γενικά, τα κύματα παίρνουν την ενέργεια τους από τον άνεμο, την κατανέμουν στην θάλασσα και την μεταφέρουν στις ακτές.

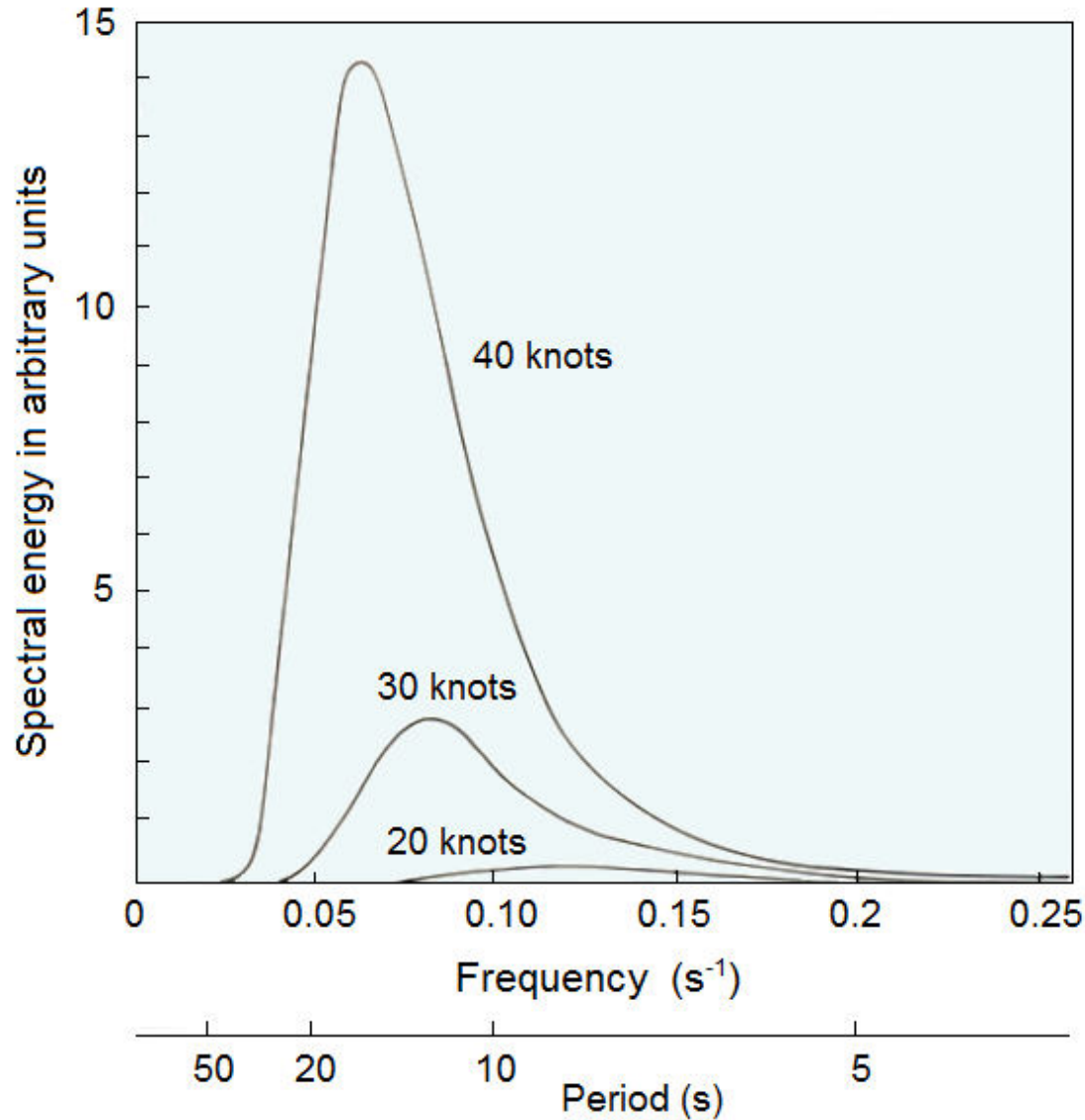
Τέλος η ανάπτυξη των κυμάτων επηρεάζεται από την διάρκεια του ανέμου (duration) και την απόσταση από το σημείο γένεσης (fetch).



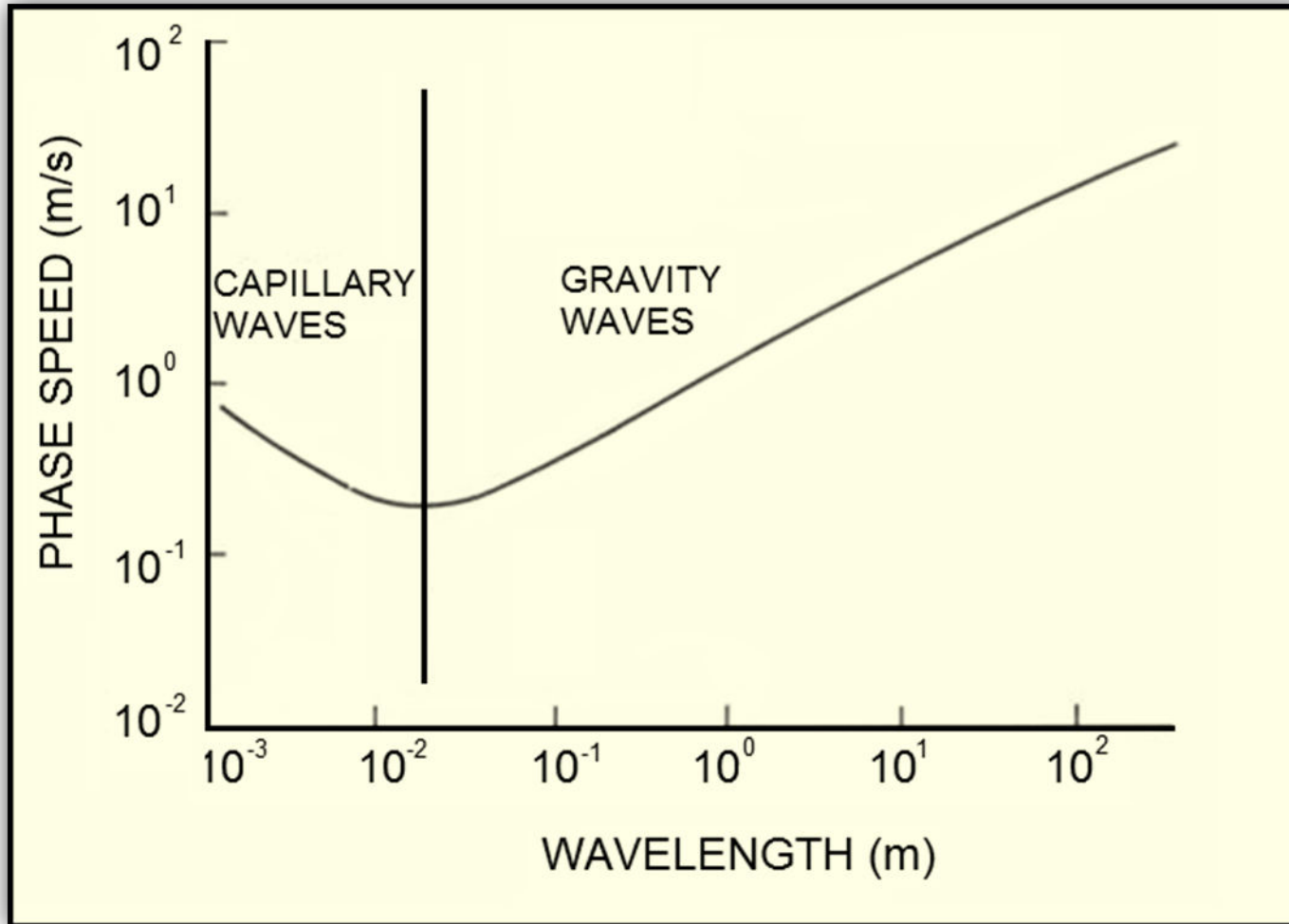
Σχήμα 5.8 Γένεση κύματος (βασισμένο στον Komar, 1998)



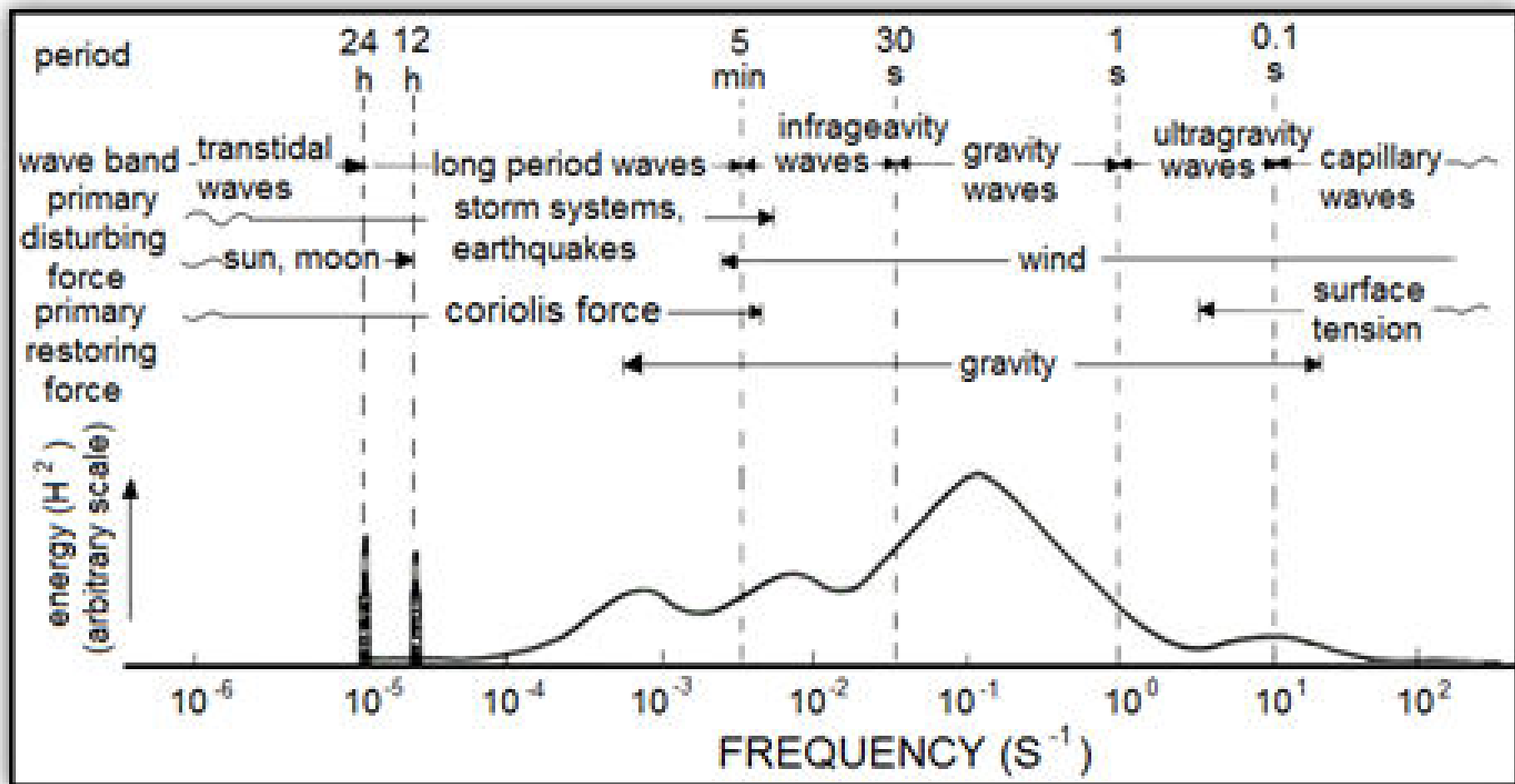
Σχήμα 5.9 Τομογραφία κυμάτων ανοικτών (βασισμένο στον Komar, 1998)



Σχήμα 5.10. Ιδανικά κυματικά φάσματα για πλήρως αναπτυγμένη θάλασσα (βασισμένο στον Knauss, 1997)



Σχήμα 5.11 Σχέση κυματορυτίδων και κυμάτων βαρύτητας (βασισμένο στον Knauss, 1997)



Σχήμα 5.12 Φάσμα κυμάτων (βασισμένο στον Knauss, 1997)



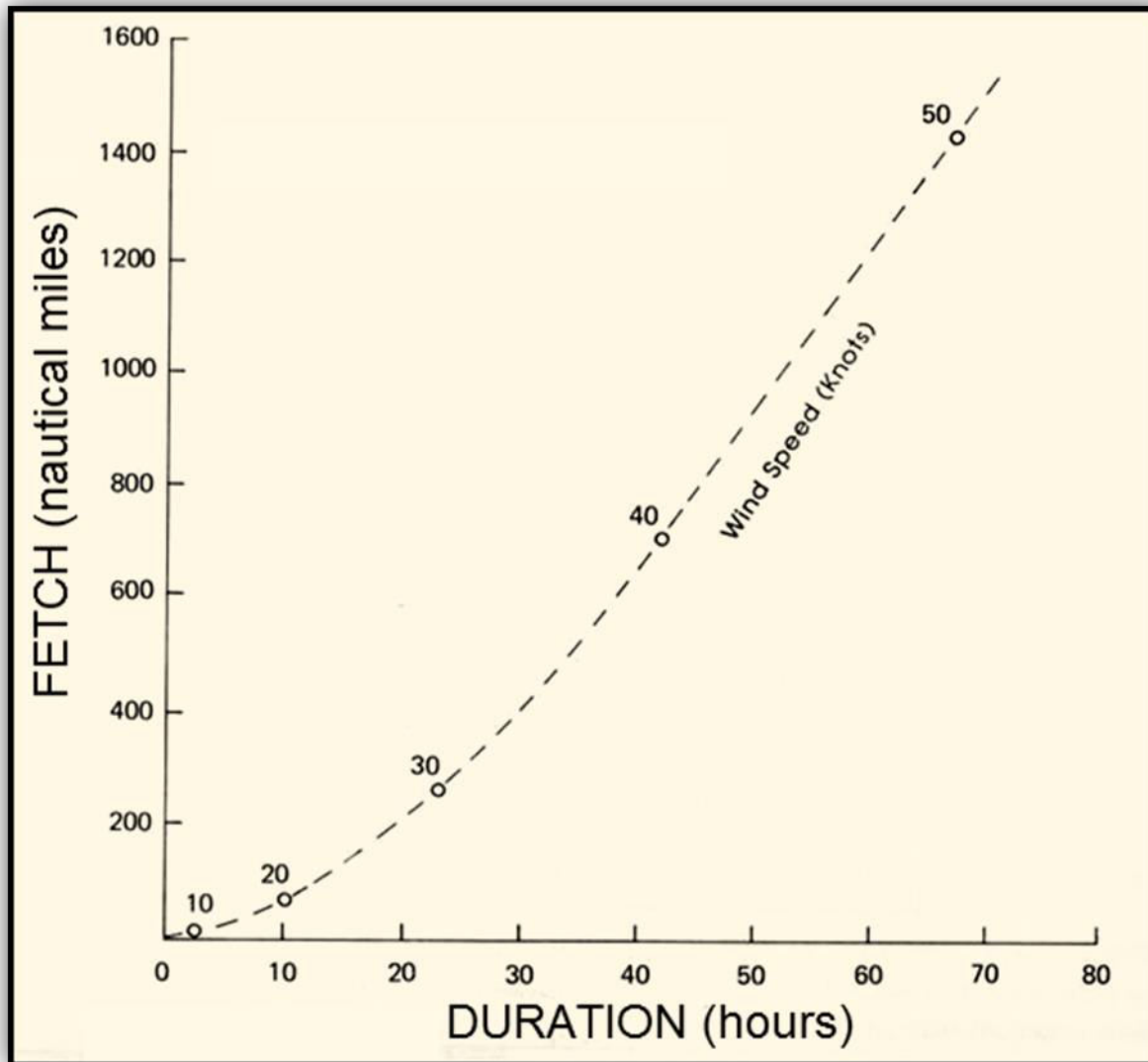
Σχήμα 5.13. Swell πλησιάζει την παραλία. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

Wave Relationships with Constant Wind Speed

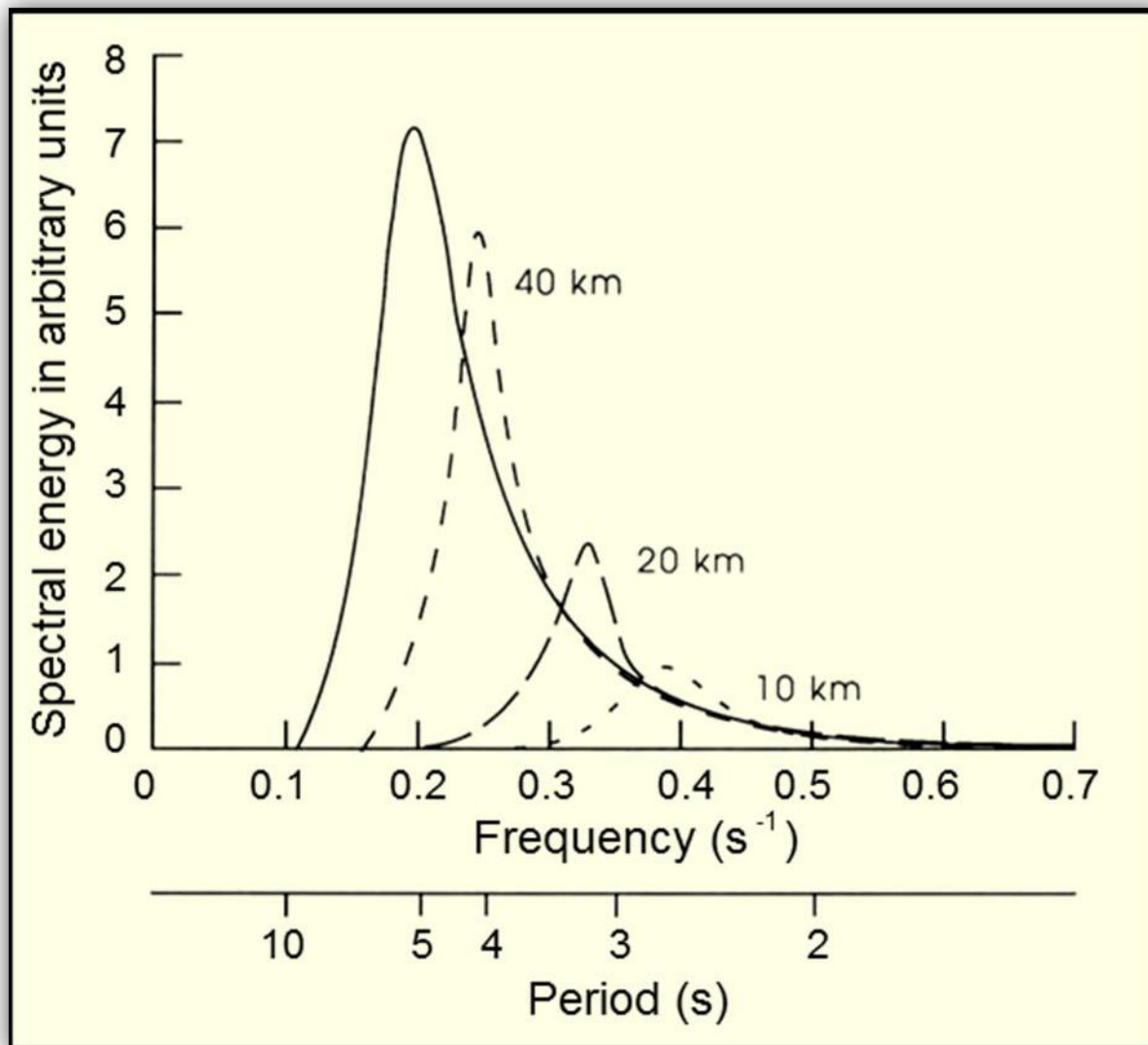
Fetch	Wave Height	Wavelength	Period	Speed
19 km (12mi)	2 m (6 ft)	35 m (115 ft)	4 sec	21 kph (13 mph)
93 km (58 mi)	3 m (10 ft)	70 m (230 ft)	6 sec	32 kph (20 mph)
370 km (230 mi)	5 m (16 ft)	100 m (330 ft)	8 sec	43 kph (27 mph)
740 km (460 mi)	7 m (23 ft)	150 m (500 ft)	10 sec	53 kph (33 mph)
1,850 km (1,150 mi)	12 m (39 ft)	200 m (660 ft)	11 sec	64 kph (40 mph)

Data for wind speed = 93 kph (58 mph)

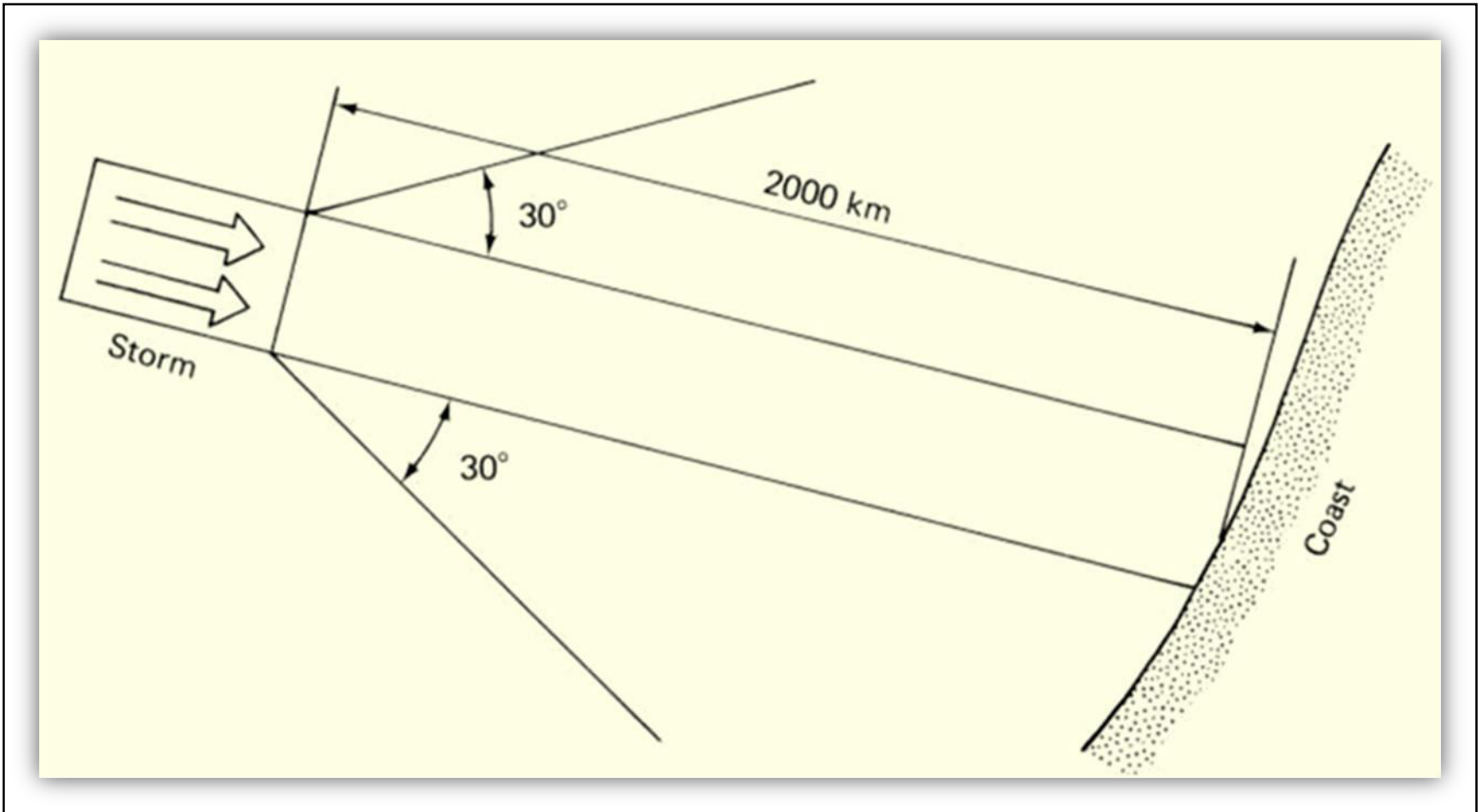
Σχήμα 5.14 Χαρακτηριστικές σχέσεις άνεμου-κυμάτων
(Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



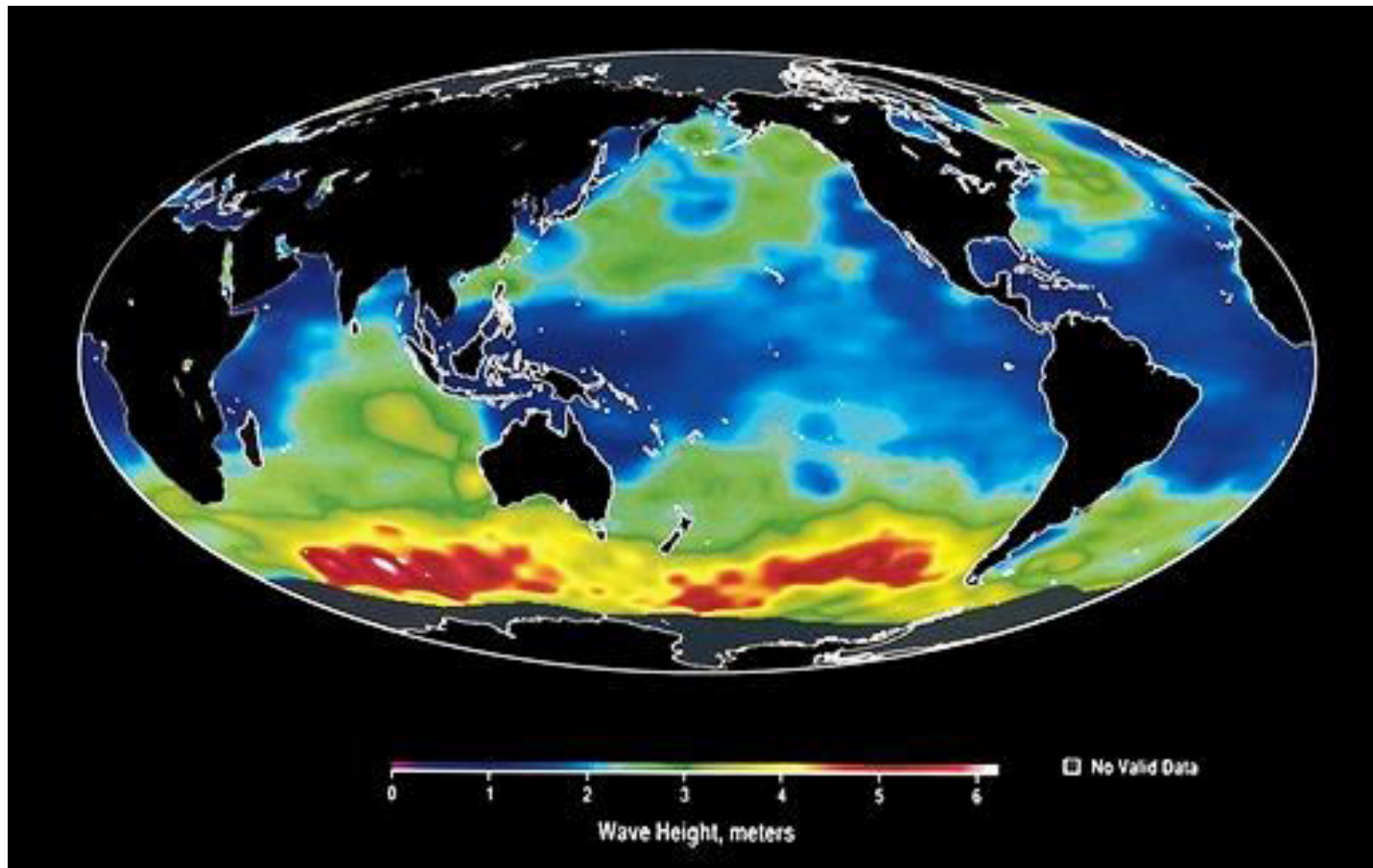
Σχήμα 5.15 Η ελάχιστη διάρκεια και απόσταση για πλήρως αναπτυγμένη θάλασσα (βασισμένο στον Knauss, 1997)



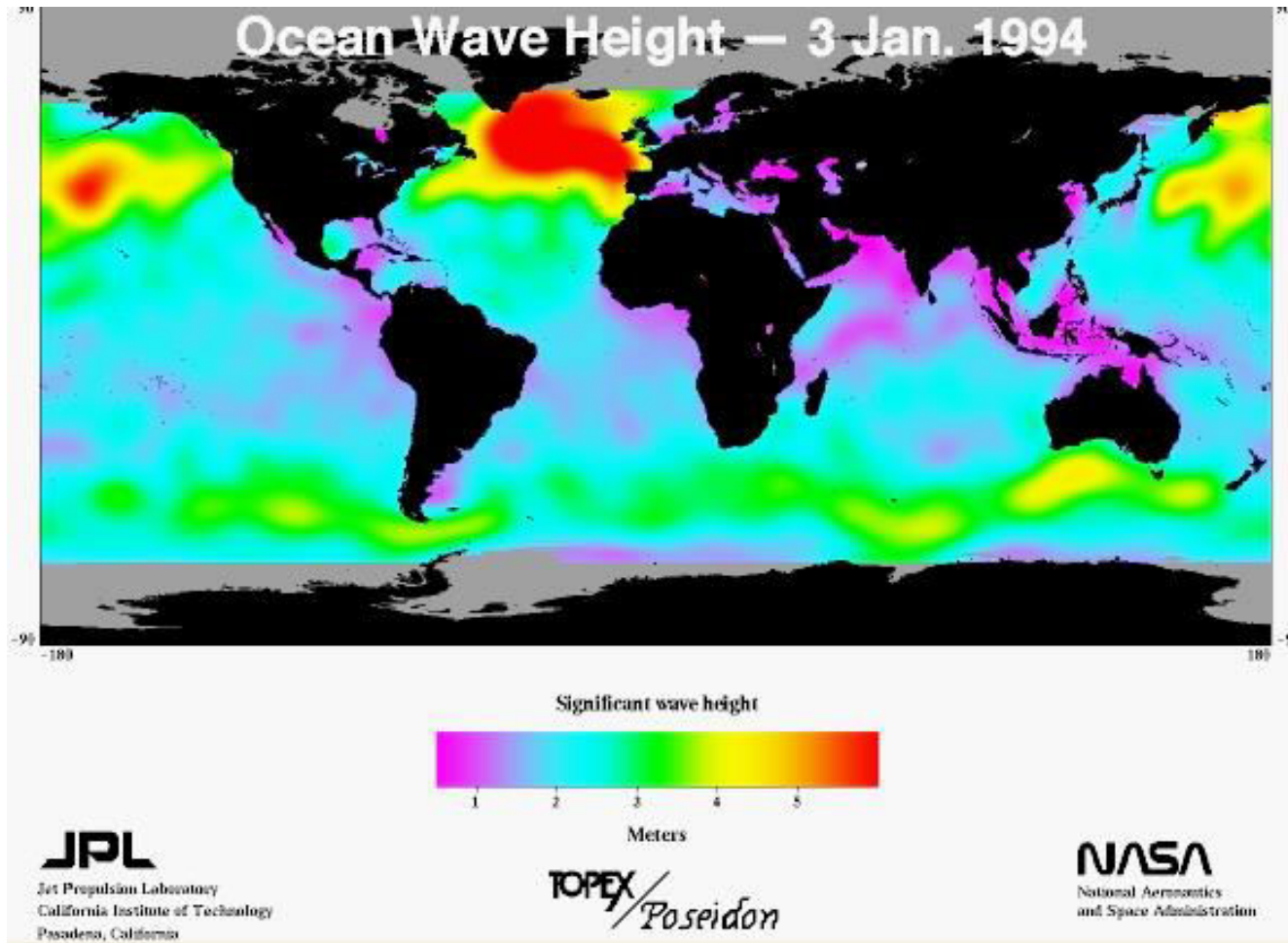
Σχήμα 5.16 Ενεργειακή σχέση μεταξύ κυμάτων με πλήρες και περιορισμένο fetch (βασισμένο στον Knauss, 1997)



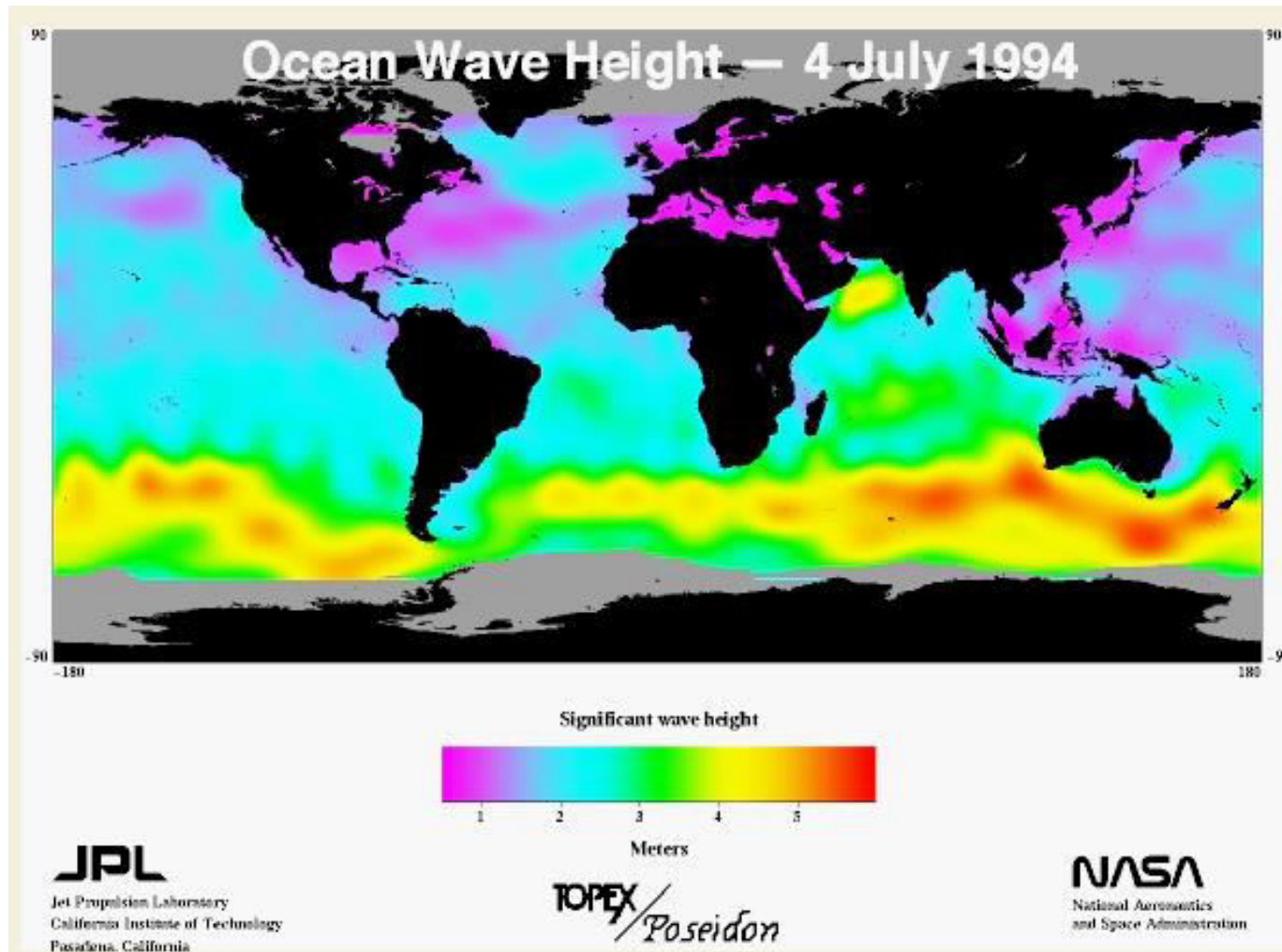
Σχήμα 5.17 Διάθλαση των κυμάτων με την απόσταση από το σημείο γένεσης (βασισμένο στον Knauss, 1997)



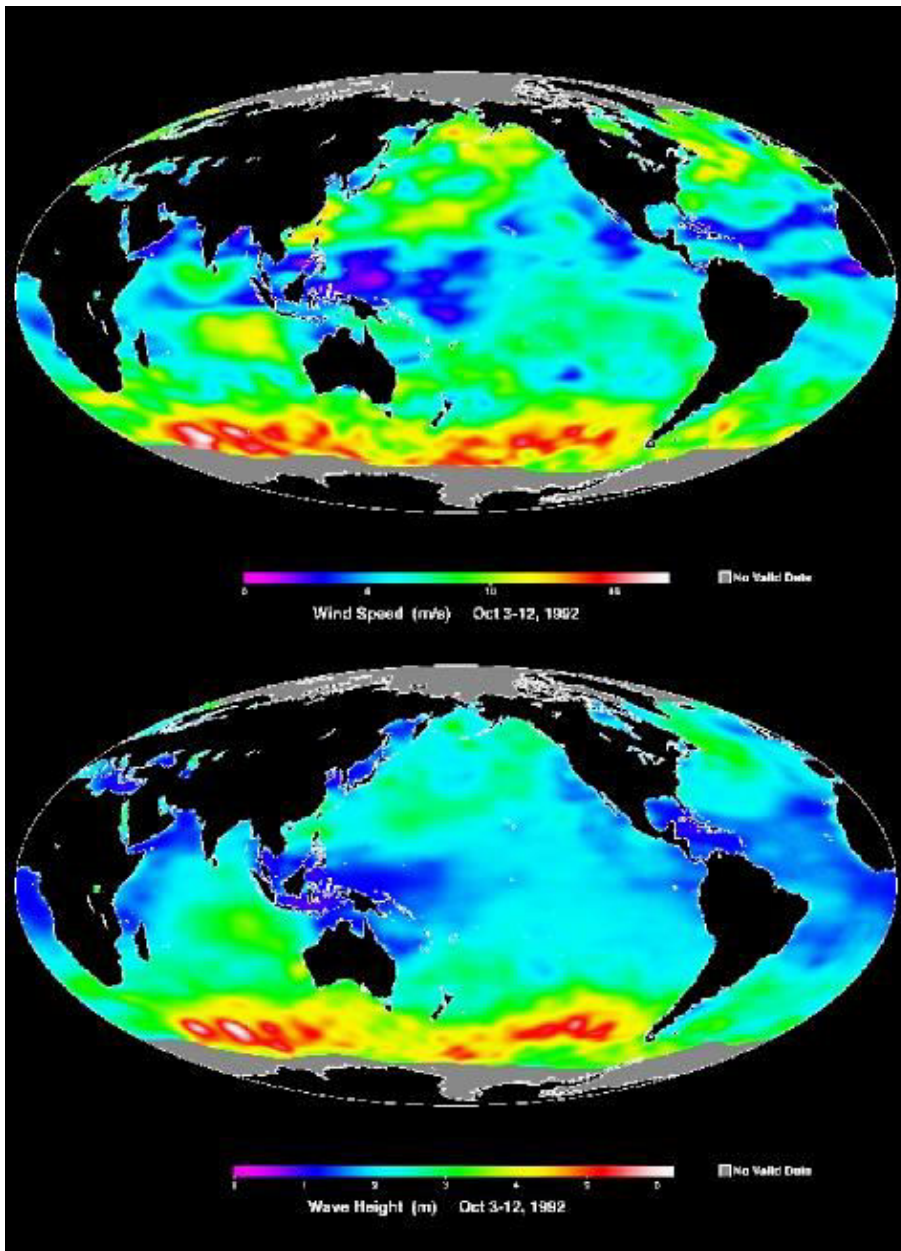
Σχήμα 5.18. Παγκόσμιο ύψος κύματος από τον TOPEX/Poseidon satellite (Οκτώβριος 1992). Τα μεγαλύτερα κύματα βρίσκονται στον Νότιο Ωκεανό (6 m σε λευκό) και τα μικρότερα στους τροπικούς. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 5.19 Ύψος κύματος τον Ιανουάριο. Τα μεγαλύτερα κύματα βρίσκονται στον Βορρά. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 5.20 Ύψος κύματος τον Ιούλιο. Τα μεγαλύτερα κύματα βρίσκονται στον Νότο. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

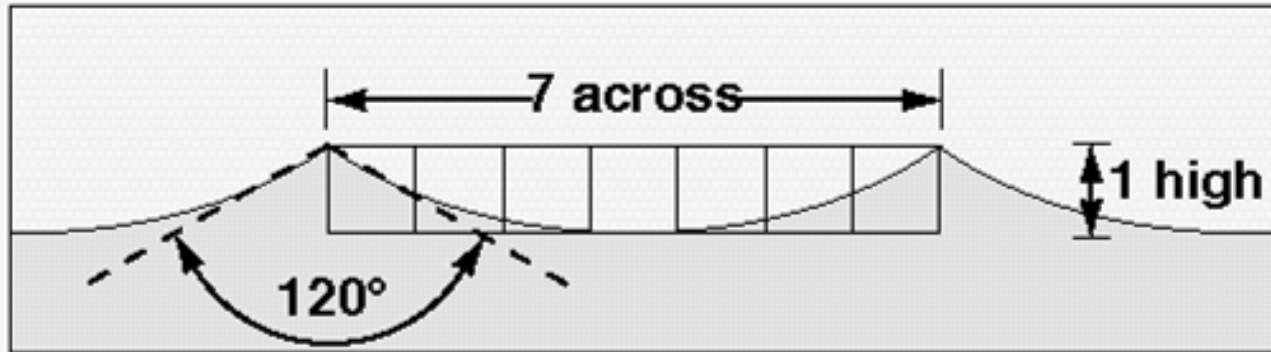


Σχήμα 5.21. Χάρτης από δορυφορικά δεδομένα που συγκρίνει τον άνεμο και το σημαντικό ύψος κύματος τον Οκτώβριο. NASA Topex/Poseidon data from Jet Propulsion Lab. (Cal. Tech. Univ.) (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 5.22 Μεγάλα κύματα στον νότιο Ωκεανό από το "Atlantis".
(Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

Steepness of a Newly-Formed Wind Wave



Σχήμα 5.23 Η κλίση (steepness) των κυμάτων έχει αναλογία ύψους / μήκος 1:7 και γωνία κορυφής (crest angle) μικρότερη από 120° . (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 5.24 Platform Mars and Houston, Texas, U.S.A. Συγκριση της Platform Mars, έτοιμης για καθέλκυση στον Κόλπο του Μεξικού το 1996. Τα ατσάλινα καλώδια είναι σχεδιασμένα να αντέξουν 22 m κύματα και άνεμους 225 km την ώρα. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

5.2 Μετρήσεις κυμάτων

Η μέτρηση των παραμέτρων των κυμάτων γίνεται με διαφορετικούς τρόπους, χρησιμοποιώντας ειδικές πλατφόρμες (buoys), που μετρούν μεταβολές κλίσης, πίεσης, τροχιακής ταχύτητας ή τηλεπισκόπηση (radar, TOPEX/POSEIDON) που μετρούν διαφορικό ύψος θαλάσσιας επιφάνειας

Από όλες τις παραμέτρους, η πλέον δύσκολη είναι η μέτρηση της διεύθυνσης, η οποία μετράται είτε με συνδυασμό οργάνων, κυρίως με αυτά που μετρούν ταυτόχρονα τις κύριες παραμέτρους των κυμάτων και το κυματογενές παλινδρομικό ρεύμα (υψίσυχνες μετρήσεις με π.χ. Ηλεκτρομαγνητικούς ρευματογράφους)

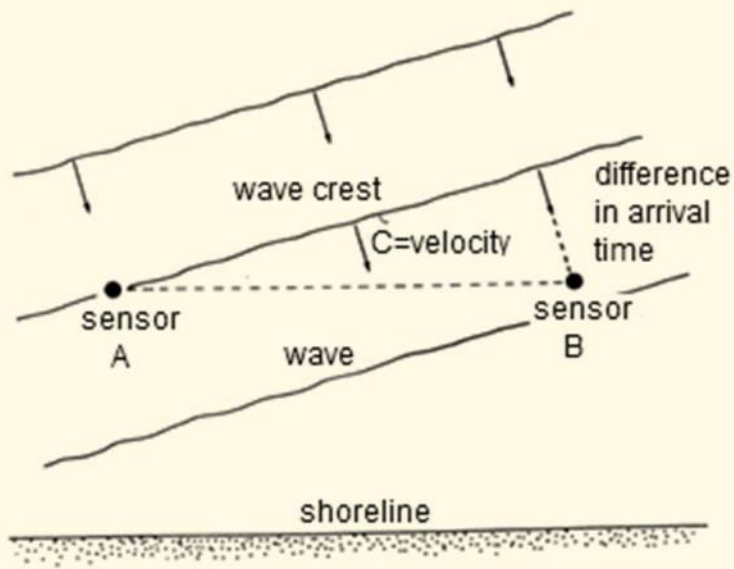
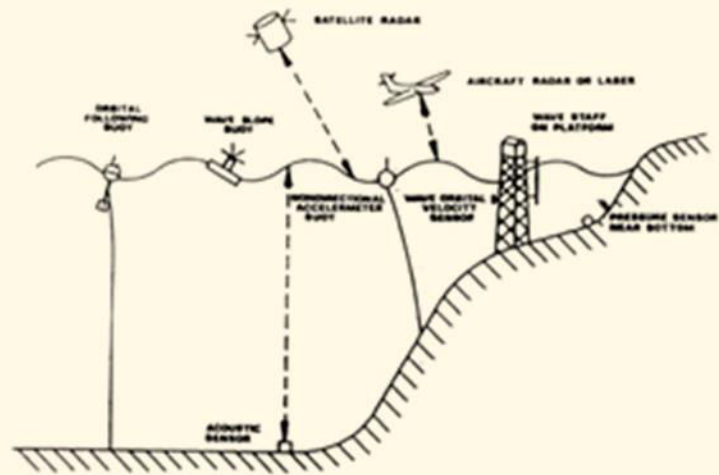
Η ανάλυση των χρονοσειρών κυμάτων γίνεται στα πεδία χρόνου και συχνότητας (time and frequency domains). Στο πρώτο πεδίο καθορίζεται (κυρίως) το σημαντικό μήκος κύματος (H_s) (το ύψος των 1/3 υψηλότερων κυμάτων), ενώ στο δεύτερο (που δημιουργείται από τις χρονοσειρές με Fast Fourier Transform) η συχνότητα (περίοδος)

Έτσι κατασκευάζονται τα φάσματα κυμάτων (είτε απλά είτε φάσματα συχνότητας / διεύθυνσης) τα οποία μας δίνουν πληροφορίες για την κατανομή της ενέργειας προς τις διάφορες διευθύνσεις

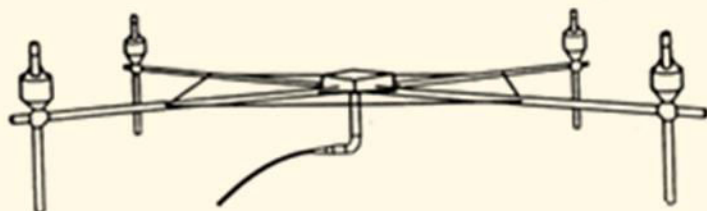
Μακρόχρονη συλλογή δεδομένων επιτρέπει (α) την στατιστική πρόβλεψη των κυμάτων στο πεδίο του χρόνου ή (β) την κατασκευή συνολικών φασμάτων κυμάτων (στο πεδίο συχνότητας) που επιτρέπουν τον υπολογισμό του Φάσματος Ισορροπίας (Equilibrium Spectrum) όπως το JONWAP που επιτρέπει προβλέψεις κυματικών παραμέτρων



Σχήμα 5.25 U. S. Army Corps of Engineers Field Research Station, Duck, North Carolina, U.S.A. Μοντέρνες μέθοδοι μέτρησης ρευμάτων κυμάτων και βαθυμετρίας (Coast Research Amphibious Buggy (CRAB))ετοιμάζεται για να τραβήξει μια σχέδια με ρευματογράφους / κυματογράφους. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



A

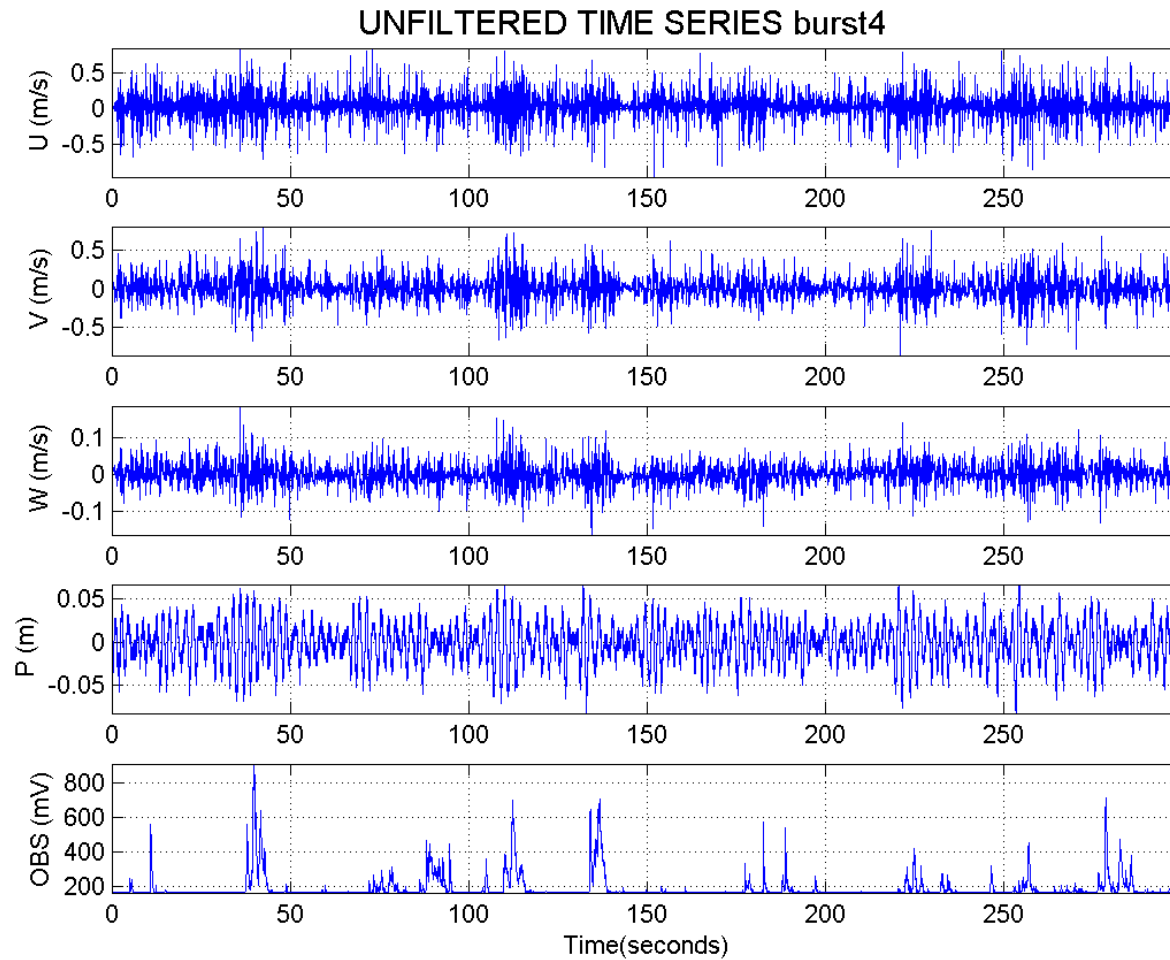


B

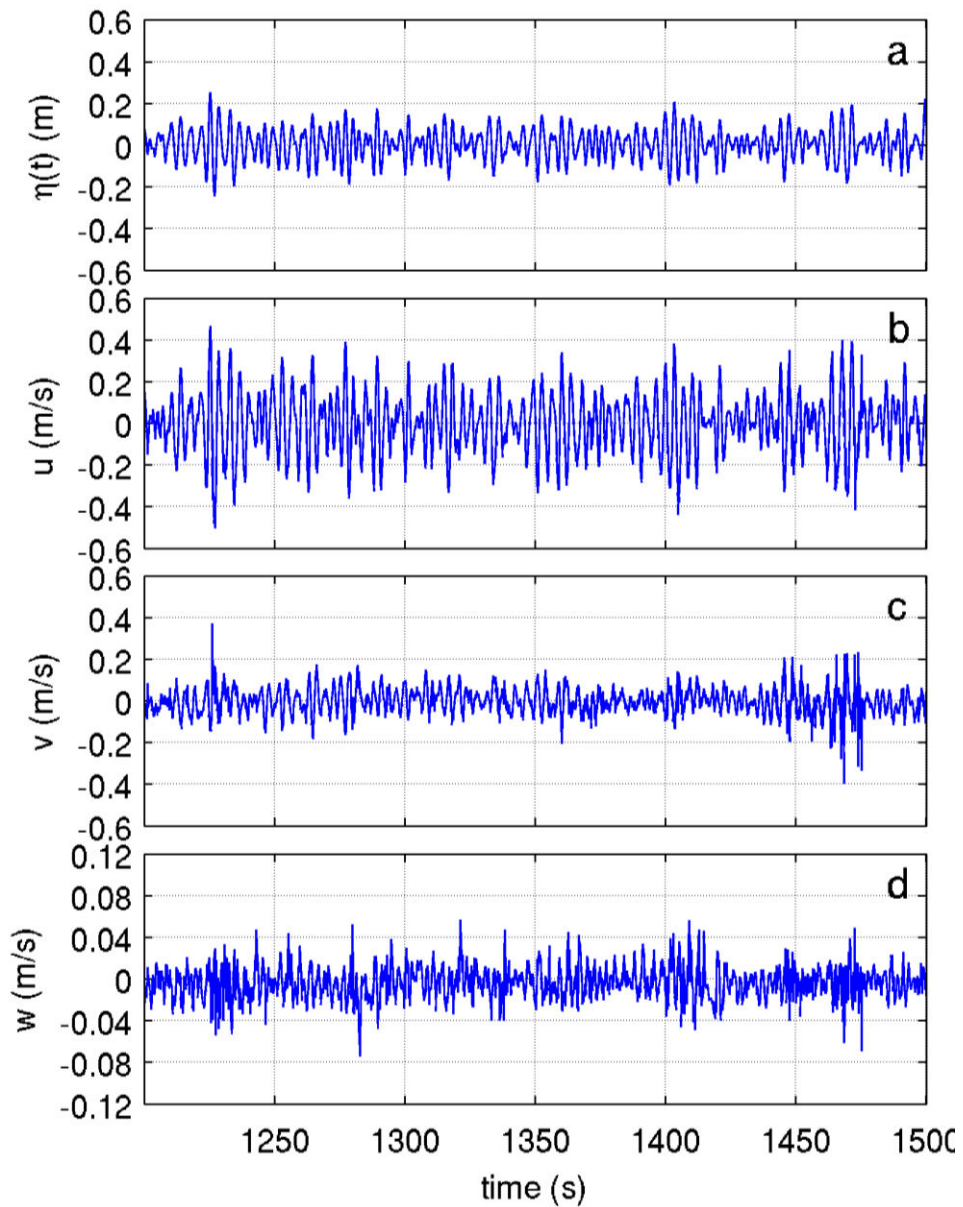
Σχήμα 5.26 Τρόποι μέτρησης κυμάτων (βασισμένο στον Komar, 1998)



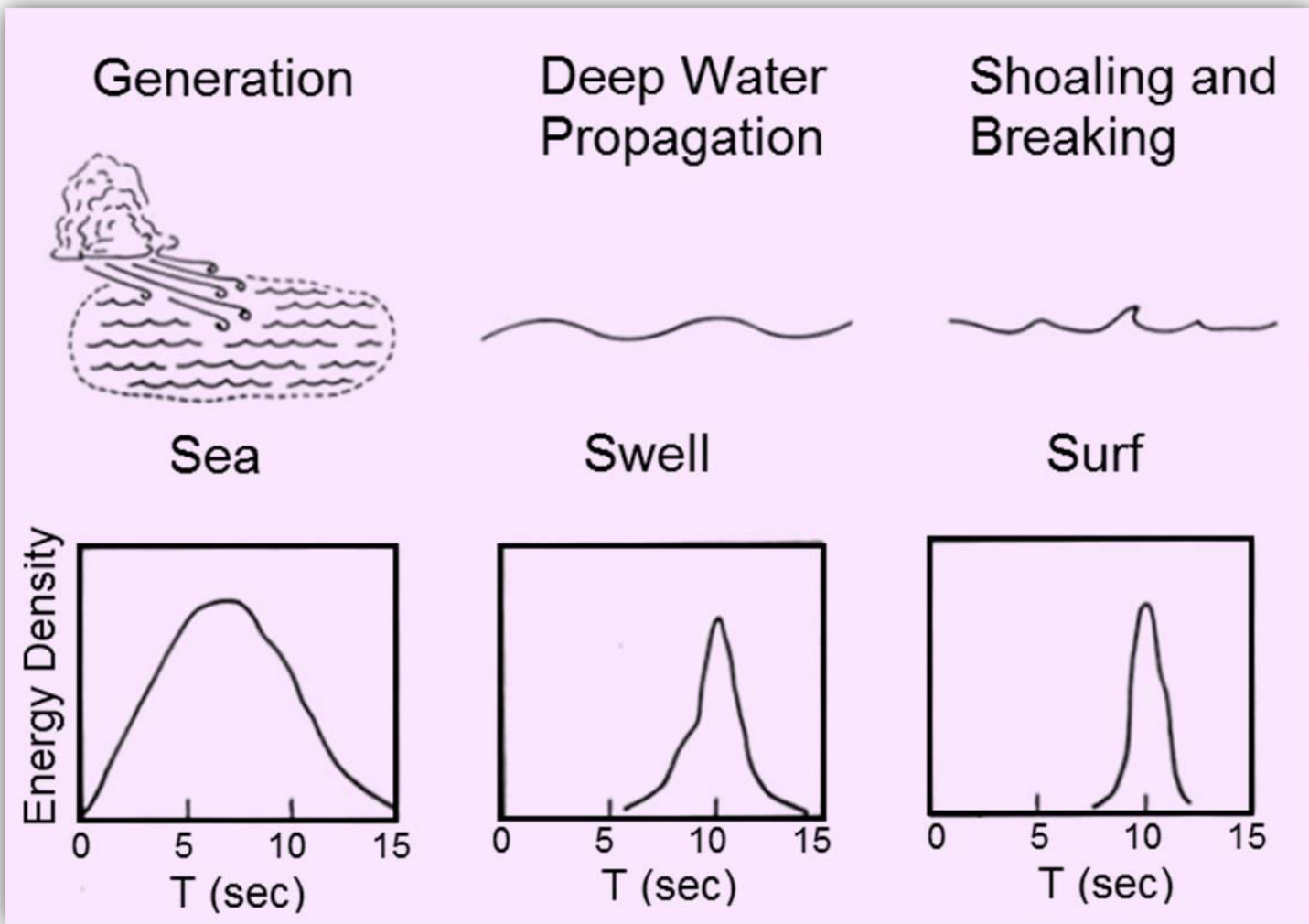
Σχήμα 5.27 Όργανα μέτρησης κυματικών δεδομένων



Σχήμα 5.28 Χρονοσειρές κυματο-ρευατομετρήσεων που δείχνουν την παρουσία τυρβώδους ροής.



Σχήμα 5.29 Χρονοσειρές κυμάτων και ρευμάτων



Σχήμα 5.30 Τρόποι παρουσίασης κυματικών δεδομένων (βασισμένο στον Komar, 1998)

FREQUENCY - DIRECTION SPECTRUM

DATE: 16 FEB 87

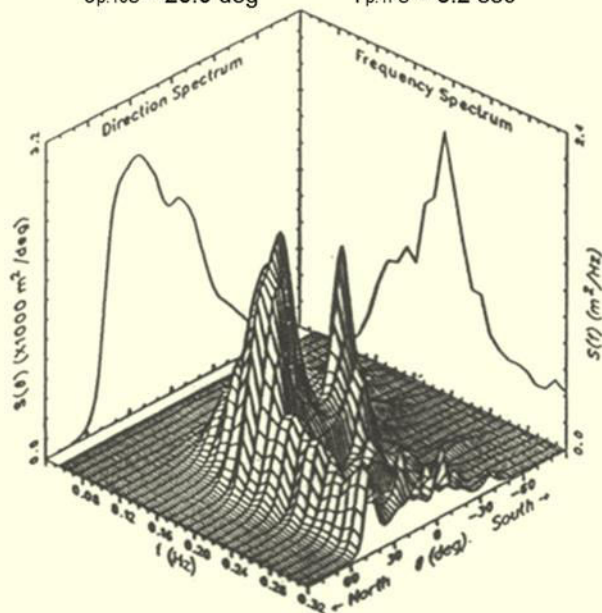
TIME: 0100

$H_{m0} = 1.70$ m

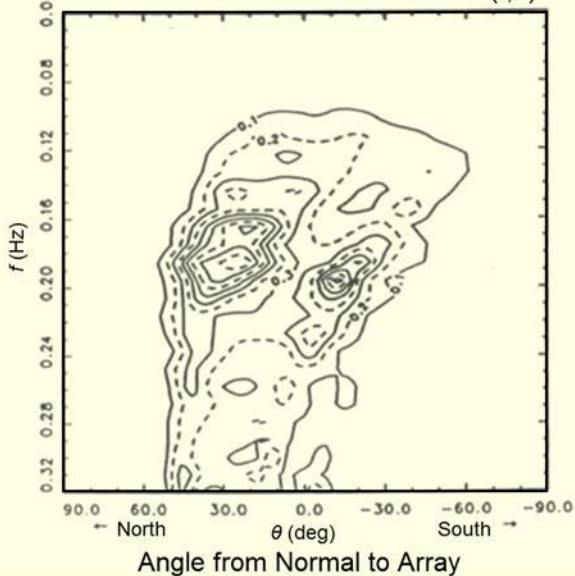
$f_{p.1FS} = 0.191$ Hz

$\theta_{p.10S} = 26.0$ deg

$T_{p.1FS} = 5.2$ sec



Contours in Tenths of Maximum $S(f, \theta)$



Σχήμα 5.31 Φάσματα διεύθυνσης (βασισμένο στον Komar, 1998)

5.3 Μετασχηματισμός κυμάτων

Κατά την διάρκεια της προώθησης των κυμάτων στην ανοικτή θάλασσα, υπάρχει διαβάθμιση (sorting) λόγω διάχυσης (wave dispersion) και έτσι γίνονται πιο κανονικά (από άποψη περιόδου, μήκους κύματος ύψους και ταχύτητας).

Τα κύματα με την μεγαλύτερη περίοδο ταξιδεύουν γρηγορότερα, και έτσι αφήνουν πίσω τα μικρότερα κύματα (wave dispersion). Έτσι δημιουργείται η φουσκοθαλασσιά (swell).

Τα κύματα μπορούν να χάσουν ενέργεια κατά το «ταξίδι» λόγω (α) εσωτερικών διεργασιών (ιξώδες), (β) αντίθετους ανέμους, (γ) παρεμβολές από αλλιά κύματα η και ρεύματα.

Όταν τα κύματα πλησιάζουν προς την ακτή και αρχίζουν να νοιώθουν τον πυθμένα η να συναντούν εμπόδια αρχίζουν τα σημαντικά φαινόμενα της διάθλασης (wave refraction) και περίθλασης (wave diffraction).

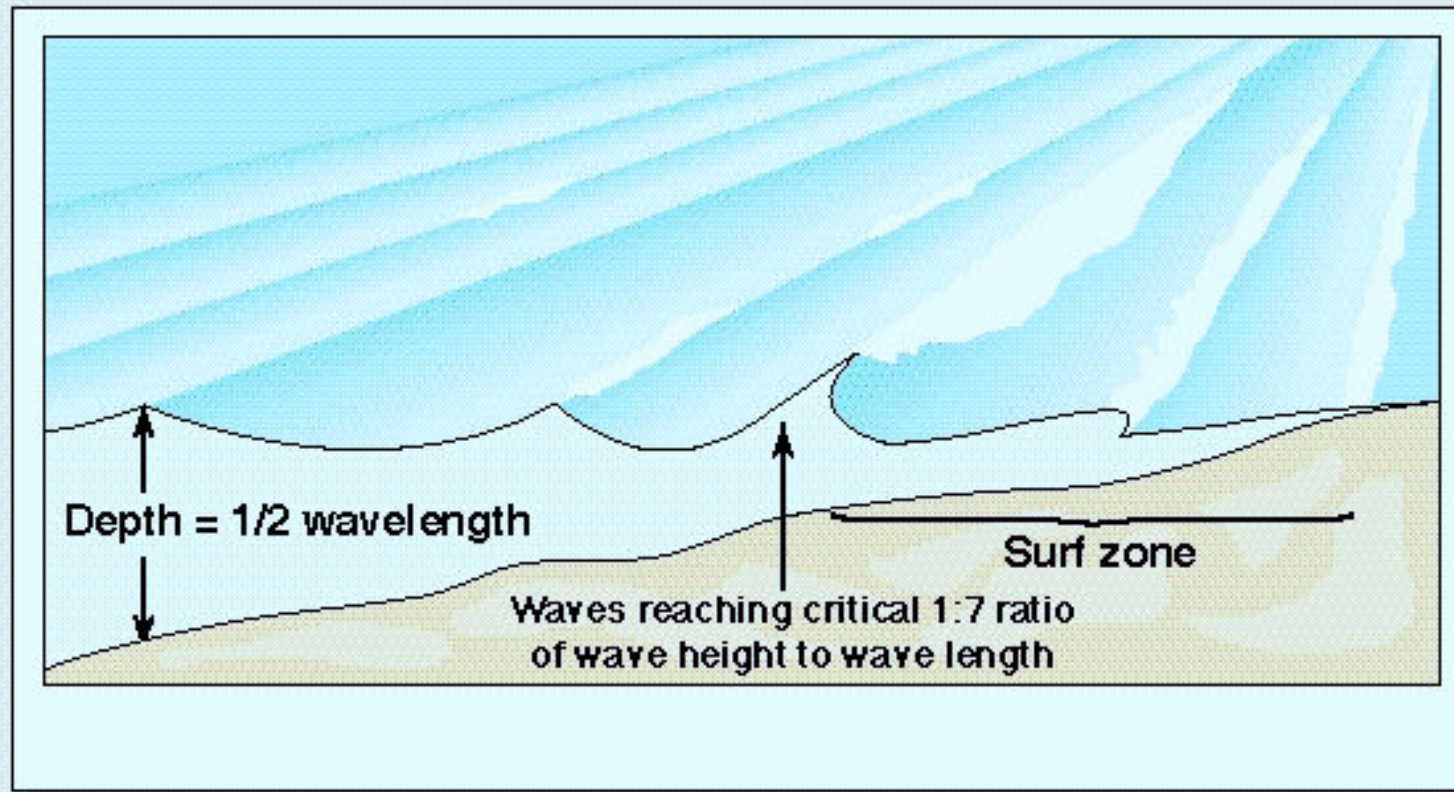
Η διάθλαση είναι το αποτέλεσμα του ότι τα κύματα έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα στα βαθύτερα νερά από ότι στα ρηχότερα (νόμος του Snell).

$$\sin a_1/C_1 = \sin a_2/C_2$$

όπου a_1 , a_2 είναι οι γωνίες μεταξύ διαδοχικών κορυφών και των ισοβαθών και C_1 , C_2 οι ταχύτητες στα βάθη αυτά

Η περίθλαση οφείλεται στην μεταφορά της ενέργειας κατά μήκος της κορυφής του κύματος λόγω παρουσίας εμποδίων.

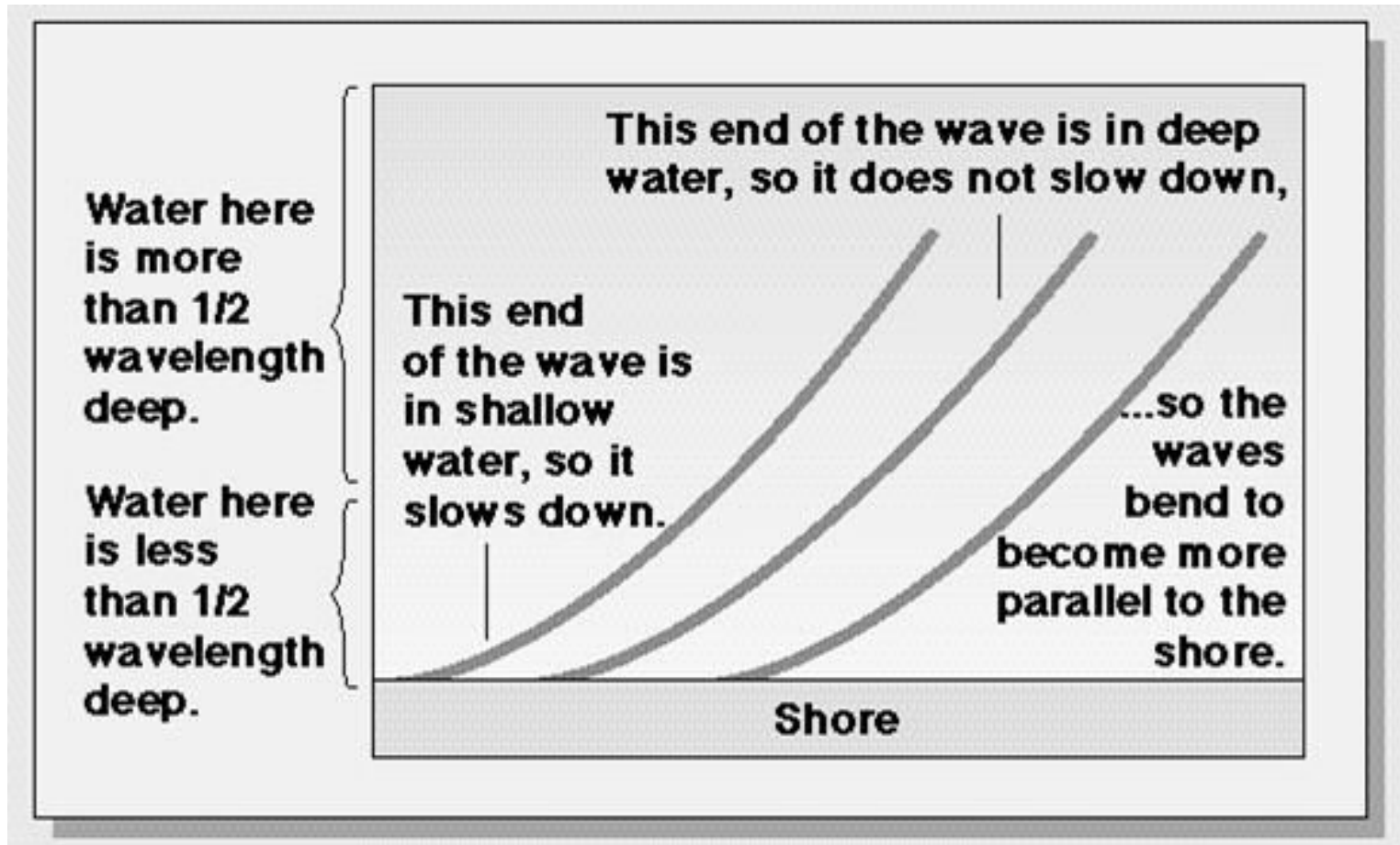
A Wave Train Breaking on the Shore



Σχήμα 5.32 Κύματα κοντά στην ακτή νοιώθουν τον πυθμένα στο $\frac{1}{2}$ του μήκους κύματος L . (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 5.33 Plunging κύματα (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



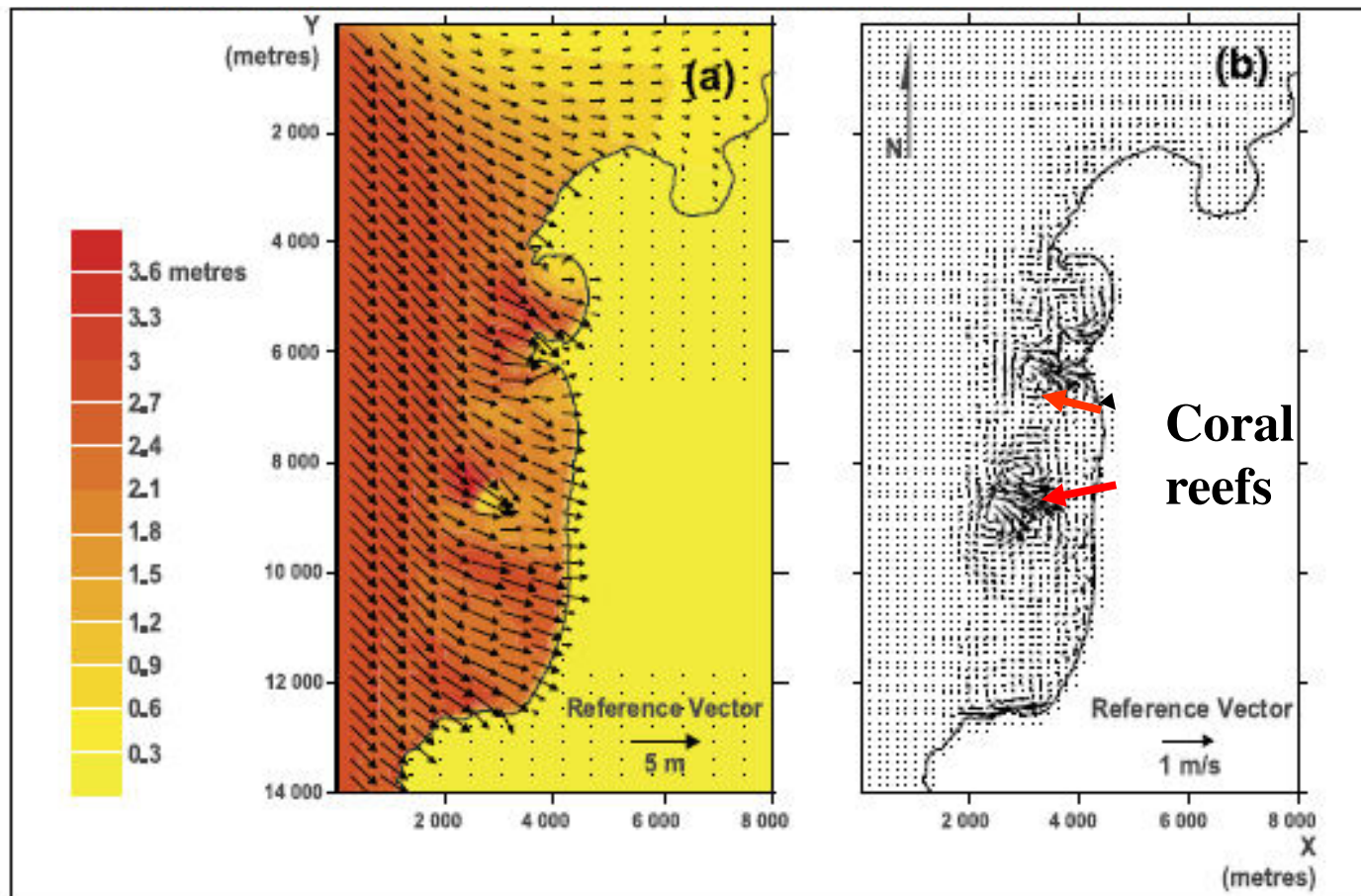
Σχήμα 5.34 Διάθλαση κυμάτων (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



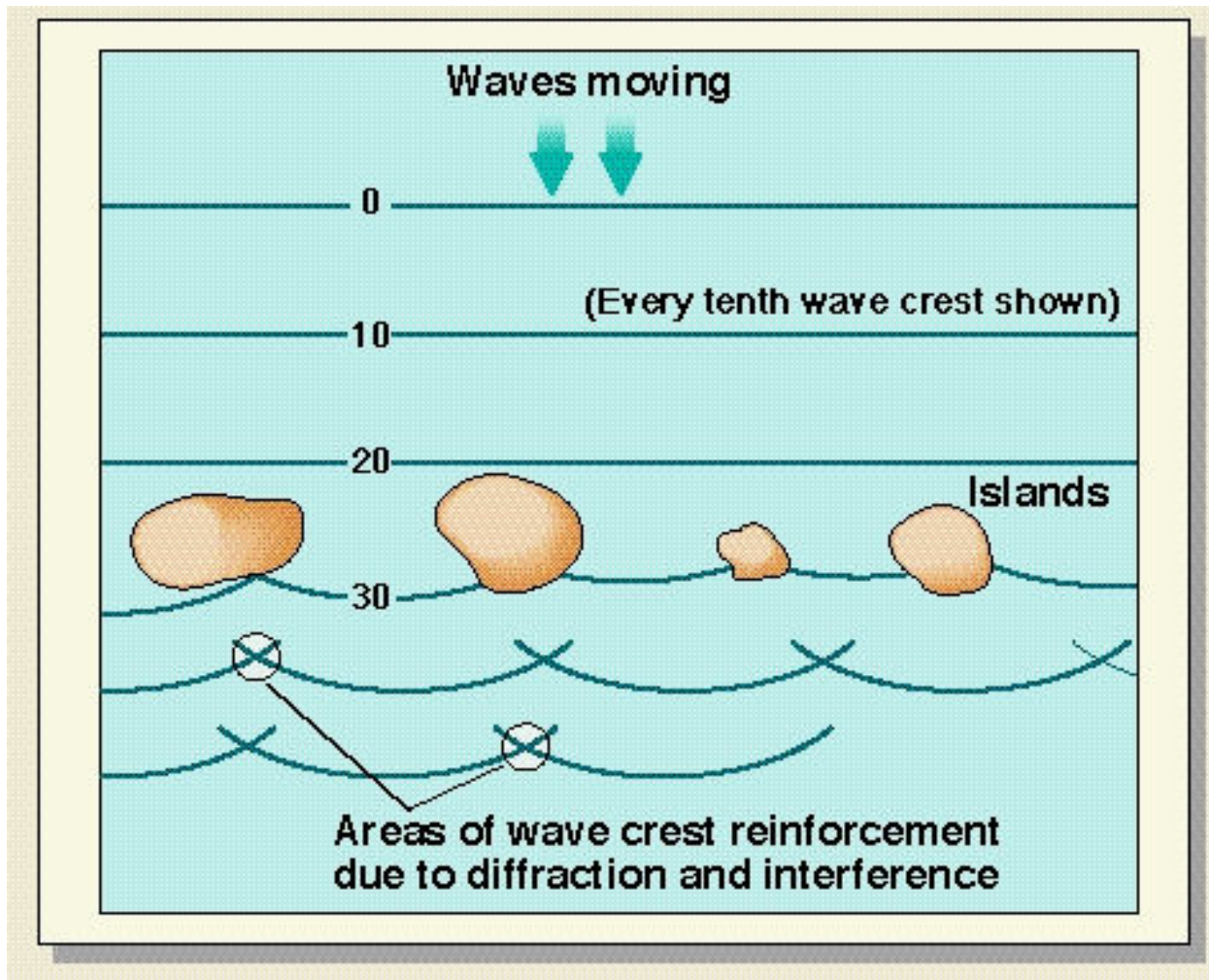
Σχήμα 5.35 Green Island, New South Wales, Australia. Διάθλαση κυμάτων γύρω από το νησί. Προσέξτε την δημιουργία tombolo. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).



Σχήμα 5.36 (a) Maili Point, Oahu, Hawaii, U.S.A. (b) Cape Foulwind, New Zealand Διάθλαση κυμάτων (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

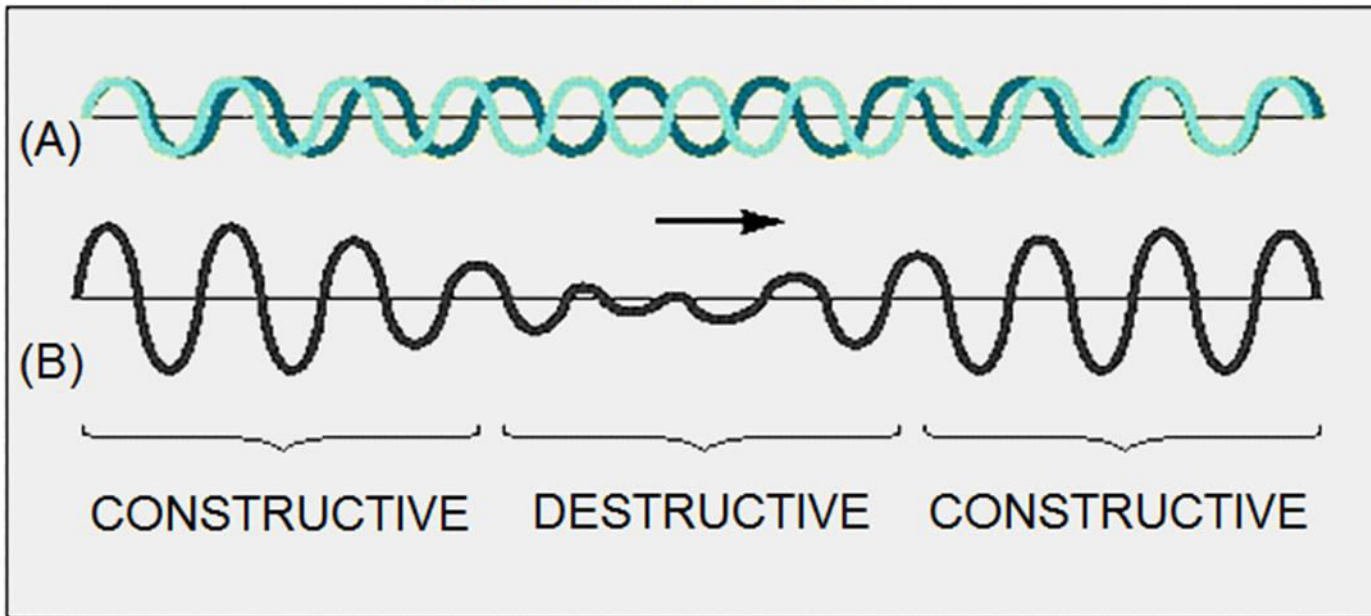


Σχήμα 5.37 Negril, Jamaica. Προσομοίωση (α) κυματισμών από NW με κυματικό ύψος στα ανοικτά (offshore wave height- H_{rms}) = 2.8 m, και περίοδο $T_p = 8.7$ s και (β) κυματογενών ρευμάκων). Προσέξτε την μείωση κυματικού ύψους, τη διάθλαση και την παράκτια κυκλοφορία κοντά στους υφάλους (RiVAMP, 2010)



Σχήμα 5.38. Σχήμα που δείχνει την περίθλαση (diffraction) κυμάτων.
(Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

CONSTRUCTIVE AND DESTRUCTIVE INTERFERENCE



Σχήμα 5.39 Κυματική παρεμβολή. Δημιουργική (α) and καταστροφική (b) παρεμβολή. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).

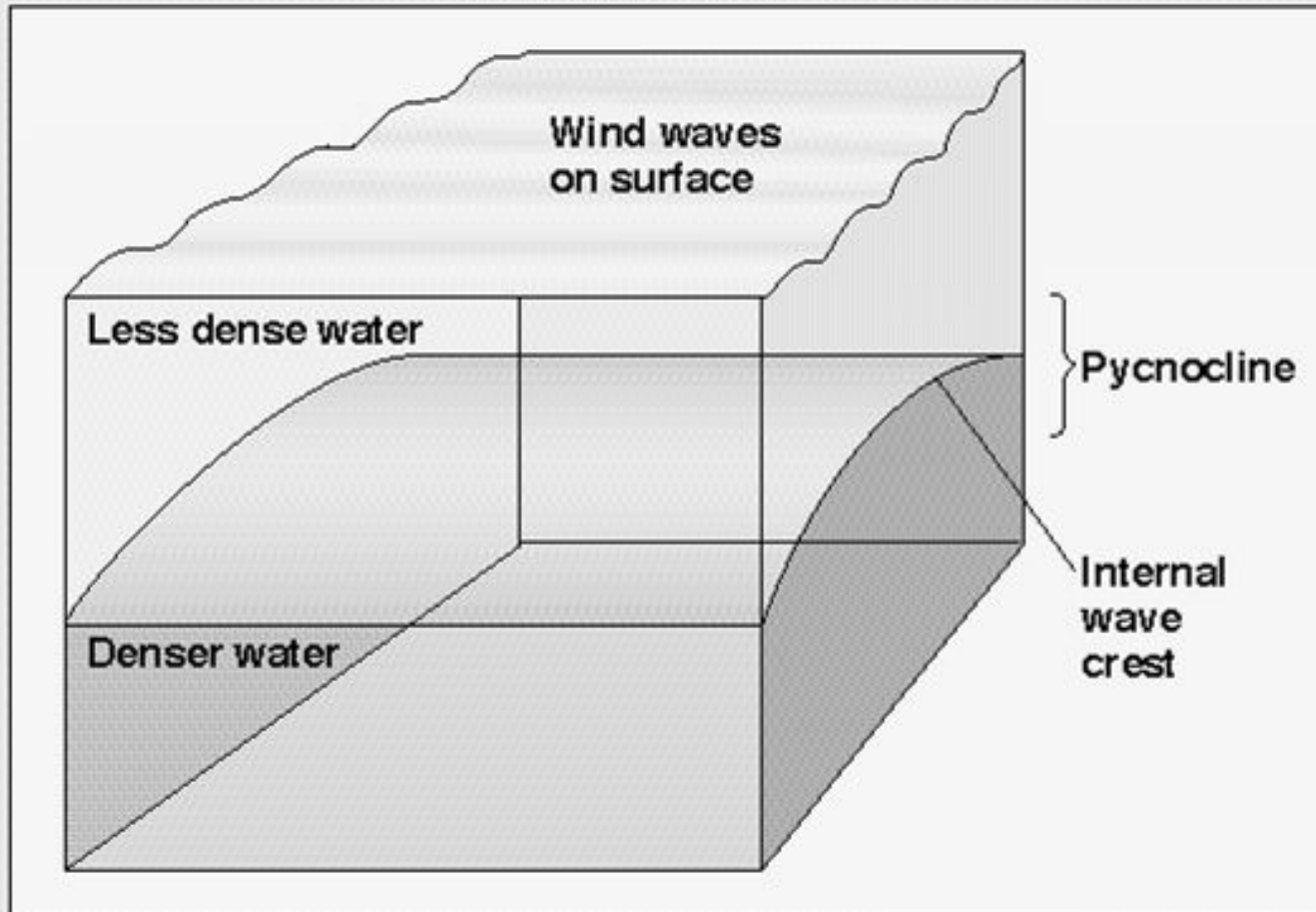
5.4 Εσωτερικά Κύματα

Πολύ σημαντικά είναι και τα εσωτερικά κύματα, που σχηματίζονται εσωτερικά σε διαχωριστικές επιφάνειες μεταξύ στρωμάτων με διαφορετική πυκνότητα

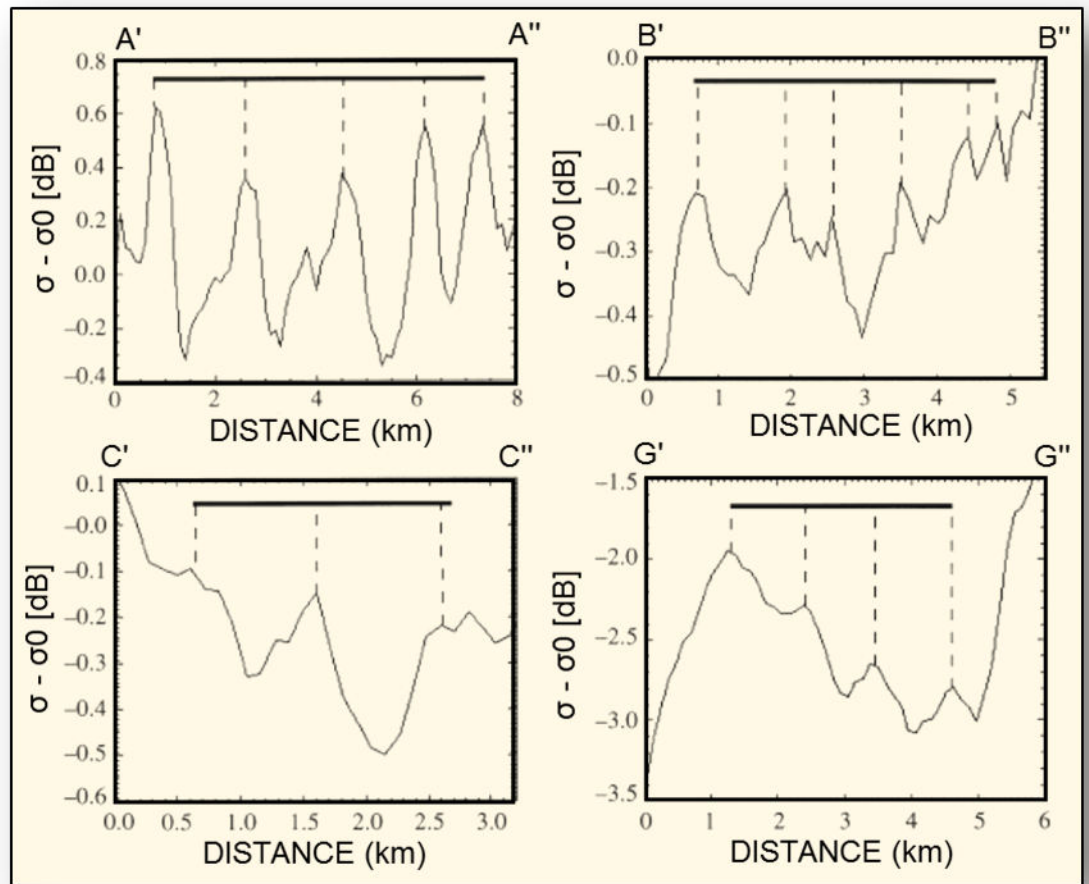
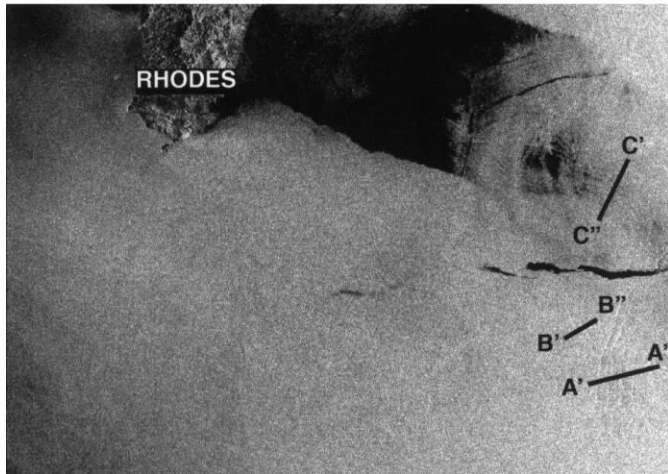
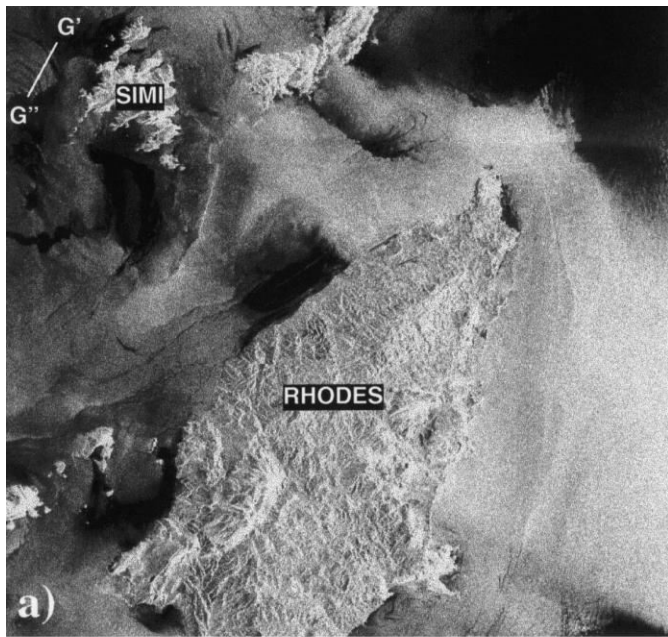
Τα κύματα αυτά επίσης προωθούνται, έχουν συνήθως μεγάλα ύψη, μήκη κύματος και περιόδους

Οι ταχύτητες των σωματιδίων στην περίπτωση των κυμάτων αυτών μπορεί να είναι πολύ μεγάλες και να προξενήσουν καταστροφές

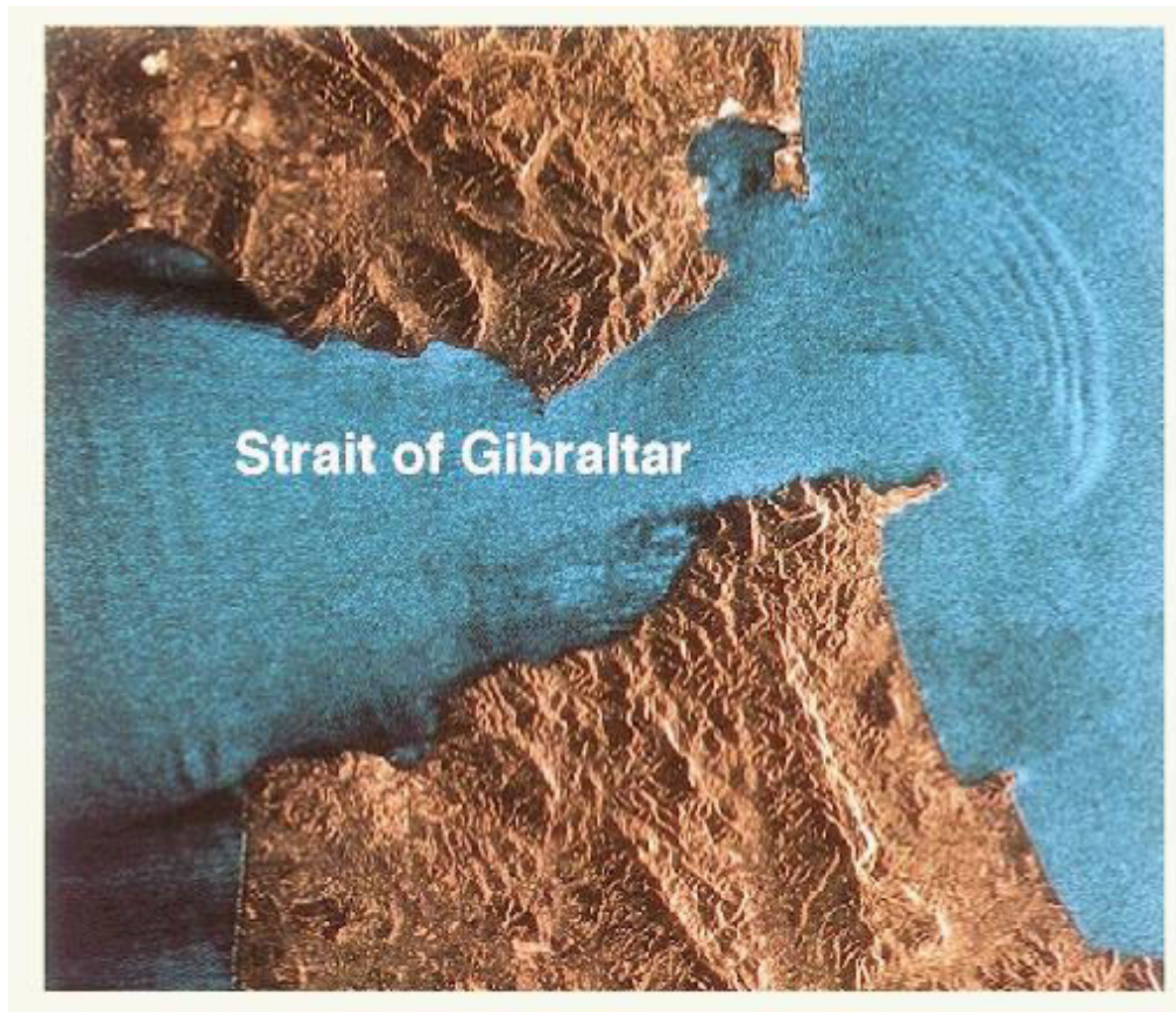
Internal Waves



Σχήμα 5.40 Εσωτερικό κύμα (Τροποποιημένο από SEPМ, 1996).



Σχήμα 5.41 Εσωτερικά κύματα στη Ρόδο και υφέσεις επανασκέδασης (Backscatter depression profiles) δια μέσου των ομάδων A, B, C and G (βασισμένο στον Velegrakis et al., 1999)



Σχήμα 5.42 Εσωτερικά κύματα στο Gibraltar. (Τροποποιημένο από SEPM, 1996).