

INTERNAL WAVES

Internal waves are one of the main features of the Black Sea water dynamics (Blatov et al., 1984), which influence the thermohaline structure and the vertical mixing (Efremov, 1998).

The stable vertical stratification and the existence of steep vertical density gradient zones are necessary conditions for internal waves generation and horizontal spreading. The maximal frequency, phase speed and energy of internal waves are proportional to the Brunt-Väisälä (buoyancy) frequency N , calculated as $N = -(g/\rho(d\rho/dz))^{0.5}$, where g – gravitational acceleration, ρ – water density, z – vertical coordinate. In summer-autumn this parameter has two maxima (Fig. 1): one in the seasonal pycnocline (at 10-30-m depth range) - 0.02 - 0.08 c^{-1} , and the second in the main (permanent) pycnocline (at 30-150-m depth range) - 0.01 - 0.03 c^{-1} . Below 200 m N is $<10^{-3}$ c^{-1} . In winter only main pycnocline maximum remains.

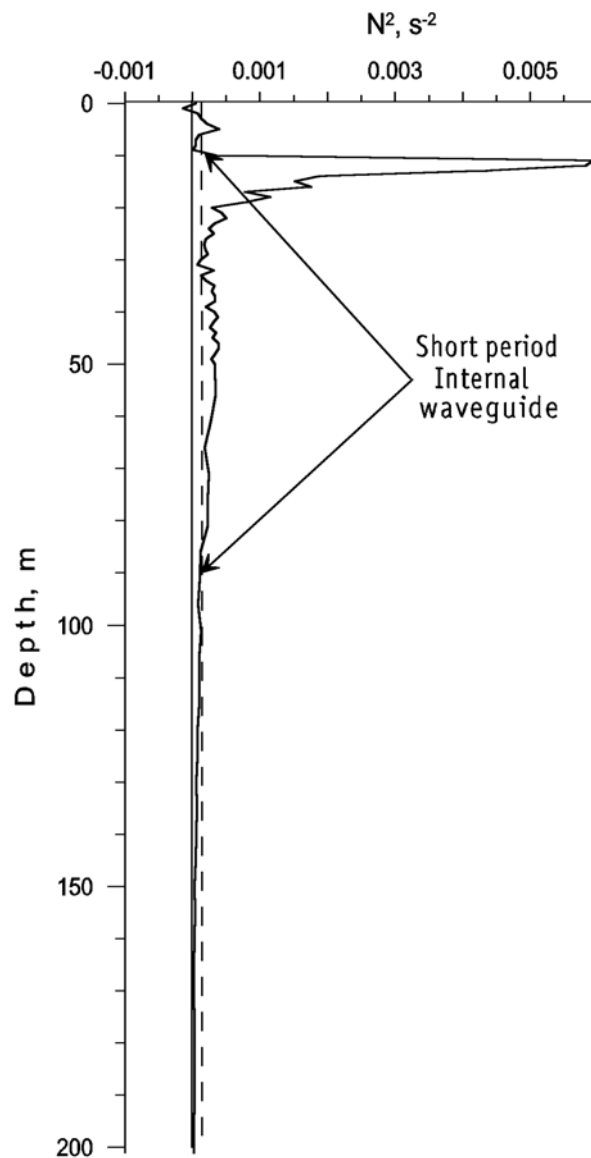


Fig. 1 - Typical summer vertical profile of the square of Brunt-Väisälä frequency (N^2 , c^{-2}) in the Black Sea. The short-period internal waveguide is shown by arrows.

In the Black Sea the internal waves are caused by interactions of more large-scale water motions (meandering currents, mesoscale eddies, upwellings etc.) with bottom relief, thermohaline fronts and current speed shear. So internal waves are the important section in the process of cascade dissipation of total mechanical energy in sea. Studies revealed that they are generated in groups, mostly near the thermohaline fronts where the pycnocline shifts up or down, and in continental shelf/slope zone under the influence of offshore/onshore, upward/downward current oscillations (Blatov and Ivanov, 1992). In winter internal waves are induced also by strong storm currents and atmospheric pressure forcing.

Internal waves are recorded in the Black Sea by measuring a temporal fluctuations of temperature, salinity, current velocity at fixed points (moored buoys, stationary platforms, see Blatov et al., 1984) and spatial fluctuations of temperature by shipboard towed thermister chains or gradient-distributed temperature sensors (Ivanov and Lisitchenok, 2002). Studies of their main parameters, such as frequency (period), wave number (wave length), amplitude (energy) and phase speed were done by spectral analysis of these records (Blatov et al., 1984), and theoretically by calculations of dispersion curves for given profiles of the Brunt-Väisälä frequency $N(z)$ (Belyakov et al., 1989, Dotsenko, 1990).

The results of observations and modelling shows that internal waves in the Black Sea have a wide ranges of periods, length and amplitudes. The most low-frequency quasi-inertial internal wave with period near 17h have the largest lengths (~ 150 km) and amplitudes (up to 10-15 m). The short-period internal waves have the spectrum of energy (fig. 2), which fall with rise of frequency - ω (or wave number - k) as ω^{-2} (k^{-2}), corresponding to the wide-known model spectrum (Garrett, Munk, 1975). The mean energy (amplitude) of this internal waves continuity in the Black Sea shelf zones is higher (by factor of 2-3) than in its central areas (Efremov, 1998, Ivanov and Lisitchenok, 2002).

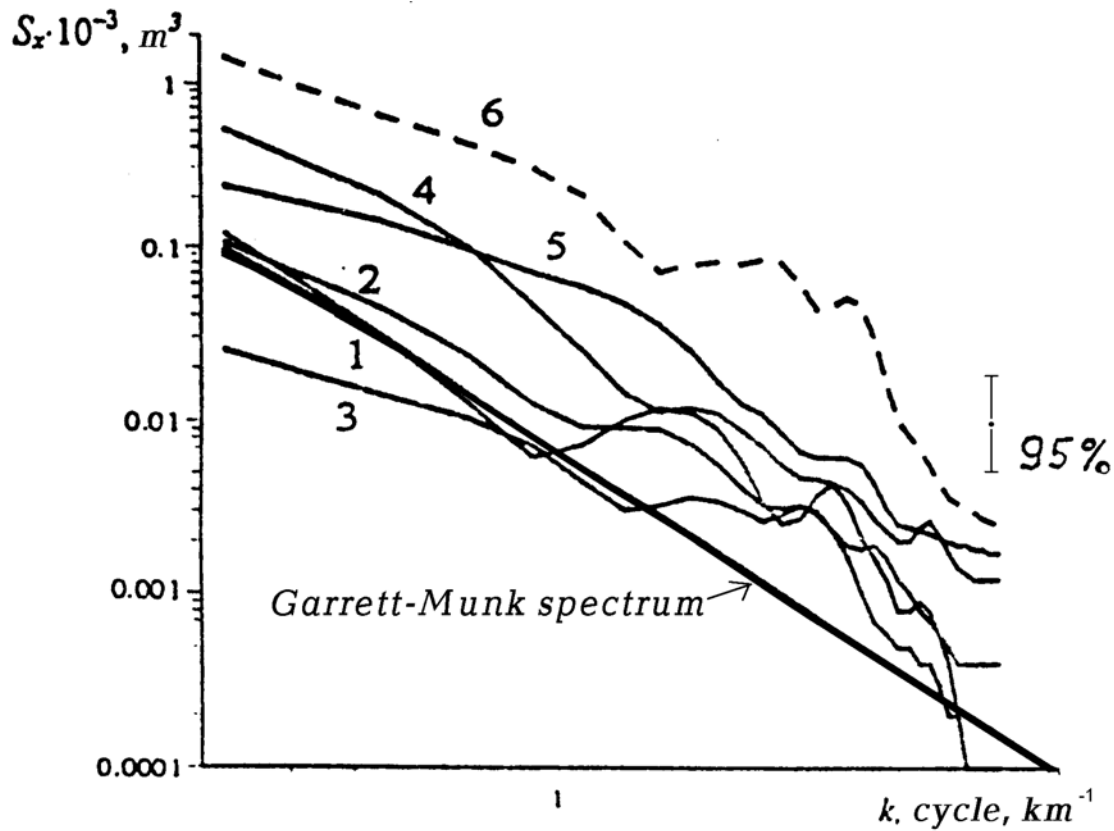


Fig. 2 – Wave number spectra of short-period internal wave observed by shipboard towed gradient-distributed temperature sensor in the Black Sea shelf/slope zone near southern coast of the Crimea. After (Ivanov and Lisitchenok, 2002).

Besides this there are intermittent groups of internal waves in the Black Sea internal waveguide which amplitudes up to 10 times as much as above mentioned wave background (Ivanov and Lisitchenok, 2002). They are manifested as local spectral maxima on fig. 2. Detailed descriptions of these phenomena one can find in (Blatov et al., 1984).

The several such groups of short-period internal waves, generated at stage of the coastal upwelling development are shown on fig. 3, as intermittent consecutive bursts of fast vertical displacements of seasonal pycnocline in July, 1993 near southern coast of the Crimea at a Yalta in area of shelf-break zone above 100 m bottom depth. After slowness of a wind, at stage of relaxation of upwelling there were fluctuations with the prevailing period close by the local inertial period ($\sim 17h$). The short-period internal waves are almost negligible at this stage (fig. 3).

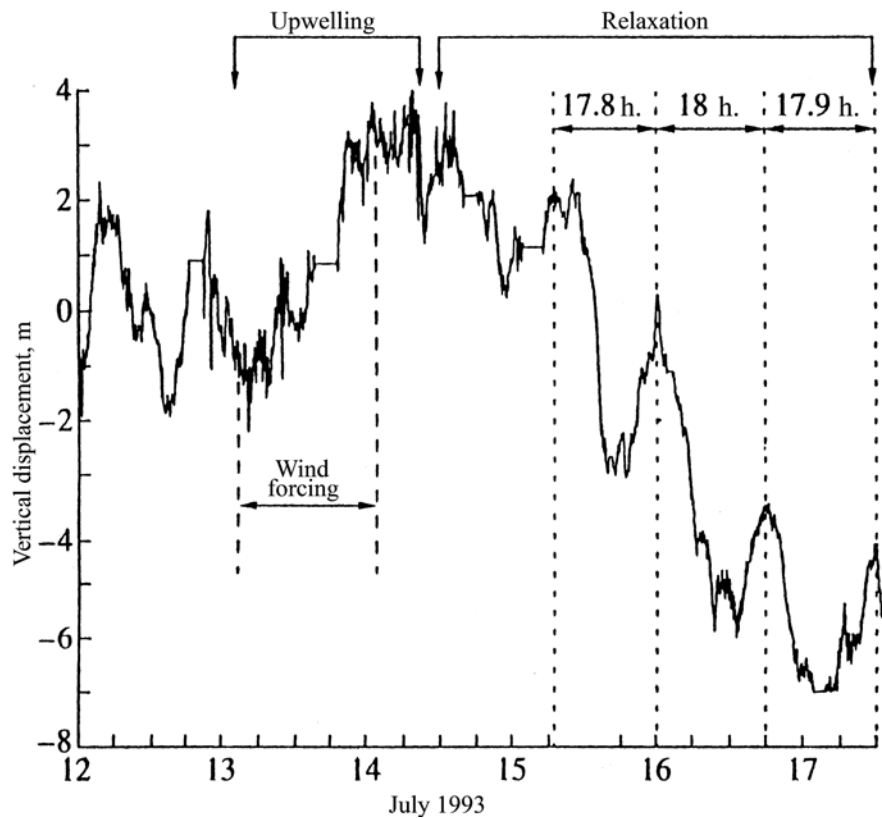


Fig. 3 - Vertical displacement of seasonal pycnocline in July, 1993 in shelf-break zone near southern coast of the Crimea at a Yalta. After Stashchuk and Vlasenko (1998)

So the periods of high-frequency internal waves in the seasonal pycnocline near the shore is usually varies from 5 to 30 min up to 1-2 hours. Their amplitude varies between 0.2 to 2-3 m, phase speed between 0.2 to 0.6 m s^{-1} and length from several hundreds meters to 3-10 km.

In the open sea the spectrum of internal waves is more variable. Those which are spreading within the seasonal pycnocline have a predominant periodicity of 5-40 min. More low frequency internal waves proceed at 50-150 m depths. They have length is 10-150 km amplitudes between 1 to 10 m, depending upon depth (maximal amplitudes usually locates at the base of main pycnocline at 150-200 m depths). Their periodicity varies between 3 to 17 hours and phase speed is $0.5\text{-}2 \text{ m s}^{-1}$.

The fig. 3 demonstrates an important role of internal waves in vertical mixing. By a shallow position of main pycnocline in winter in the the Black Sea central areas, the internal waves in the main pycnocline waveguide with amplitude over 10 m push up to the surface layer of cold heavy water. It extends the depth of winter convection and accelerates the loss of heat by surface water, stimulating the formation of cold intermediate water layer (Yakubenko and Esaulov, 1992).

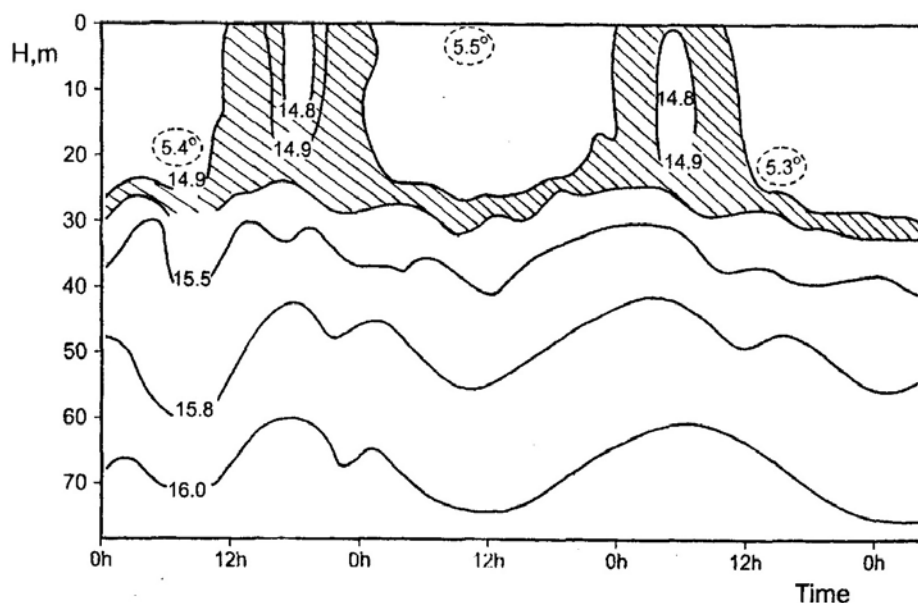


Fig. 4 - Time oscillations of isopycnal surfaces, recorded at the Black Sea central area in February 1991. After (Yakubenko and Esaulov, 1992).

Very steep internal waves with a large amplitude might sometimes overturn their crest. This is evidenced by the appearance of lenses of oxygen containing waters in the H_2S -zone under the main pycnocline and lenses of H_2S -containing waters in the oxic zone. Theoretical calculations show that the internal waves, when passing via the main pycnocline wave guide channel, definitely influence the depth position and extension of the redox zone of O_2 - H_2S coexistence as well as position of the H_2S boundary (Fomin, 1992),

References

- Belyakov et al. - Бе́ляков Ю.М., Бука́тов А.Е., Пу́хтяр Л.Д. Оценка характеристик внутренних волн на близком к инерционному периоде / В сб.: Компл. океаногр. иссл. Черного моря - Севастополь: МГИ АН УССР, 1989. - С. 66-74.
- Blatov et al. - Блатов А.С. Булгаков Н.П., Иванов В.А., Косарев А.Н., Тужилкин В.С. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. - Л.: Гидрометеиздат, 1984, 240 с.
- Blatov and Ivanov - Блатов А.С., Иванов В.А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря (на примере Южного берега Крыма). – Киев: Наукова думка, 1992. - 242 с.
- Dotsenko - Доценко С.Ф. Аномальная дисперсия внутренних волн в Черном море / В сб.: Компл. океаногр. иссл. Черного моря (гидрология, гидрофизика, гидрохимия) - Севастополь: МГИ АН УССР, 1990. - С. 52-57.

- Efremov - Ефремов О.И. Характеристики перемешивающего воздействия мелкомасштабных внутренних волн в верхнем слое Черного моря по данным тонкоструктурных зондирований // Морской гидрофизический журнал, 1998, № 3. - С. 3-12.
- Fomin - Фомин В.В. О численном моделировании влияния внутренних волн на зону сосуществования кислорода и сероводорода в Черном море / В сб.: Проблемы Черного моря (тезисы докладов конференции). – Севастополь: МГИ АН Украины, 1992. – С. 128-129.
- Garrett C.J.R., Munk W.H., Space-time scales of internal waves: a progress report // J. Geophysical Research, 1975. Vol. 80, N 3. – P. 291-297.
- Ivanov and Lisitchenok - Иванов В.А., Лисиченок А.Д. Внутренние волны в шельфовой зоне и у кромки шельфа в Черном море // Мор. гидрофиз. журн., 2002, № 6. - С. 67-73.
- Stashchuk and Vlasenko - Стащук Н.М., Власенко В.И. Влияние прибрежного апвеллинга на динамику верхней границы сероводородной зоны у южного берега Крыма // Океанология, 1998. Т. 38. № 6 - С. 848-856.
- Yakubenko and Esaulov - Якубенко В.Г., Эсаулов С.Е. Пространственно-временная изменчивость гидрофизических полей в центрах циклонических круговоротов Черного моря. / В сб.: Зимнее состояние экосистемы открытой части Черного моря: Материалы 21-го рейса НИС «Витязь» 9 февраля - 8 апреля 1991 г. - М.: ИО РАН, 1992. - С. 13-21.
- Баклановская В.Ф., Блатов А.С., Кондрин А.Т., Чечель И.И. Результаты численного моделирования поверхностных и внутренних сейшевых колебаний в Черном море // Метеорология и гидрология, 1986. № 6. - С. 74-81.
- Беляков Ю.М., Букатов А.Е., Перов М.Г., Пухтяр Л.Д., Соловей Н.М. Оценка характеристик внутренних волн в глубоководной зоне Черного моря / В сб.: Проблемы Черного моря (тезисы докладов конференции). – Севастополь: МГИ АН Украины, 1992. – С. 146.
- Блатов А.С., Иванов В.А., Кисенкова Н.А., Саванов В.Л. Параметрические оценки среднепериодных волн Черного моря // Метеорология и гидрология, 1991. № 1. - С. 79-85.
- Блатов А.С., Иванов В.А., Россов В.В. Физико-географические особенности волновых процессов в Черном море / В сб.: Процессы формирования и внутригодовой

- изменчивости гидрофизических и гидрохимических полей Черного моря. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1988. - С. 51-59.
- Блинков В.А., Кукушкин А.С. Характеристики внутренних волн в Черном море и их проявление в электрическом поле приповерхностного слоя / В сб.: Процессы формирования и внутригодовой изменчивости гидрофизических и гидрохимических полей Черного моря. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1988. - С. 66-74.
- Букатов А.Е., Перов Л.М., Соловей Н.М. Свободные внутренние волны в глубоководной зоне Черного моря / В сб.: Комплексные океанографические исследования Черного моря (гидрология, гидрофизика, гидрохимия) - Севастополь: МГИ АН УССР, 1990. - С. 44-51.
- Власенко В.И., Иванов В.А., Стащук Н.М. Исследование влияния сейшевых колебаний на положение зоны сосуществования кислорода и сероводорода в шельфовой зоне Черного моря // Океанология, 1993. Т. 33. № 6 - С. 851-855.
- Власенко В.И., Иванов В.А., Красин И.Г., Лисиченок А.Д. Интенсивные внутренние волны в шельфовой зоне Крыма // Морской гидрофизический журнал, 1996, № 5. - С. 37-50.
- Иванов В.А., Лисиченок А.Д. К механизму генерации короткопериодных внутренних волн пульсациями ветра / В кн.: Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. науч. тр. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. - С. 191-196.
- Иванов В.А., Чекменева Н.И. Распределение частоты Вьяйсяля-Брента и структура внутренних волн в Черном море. - Севастополь, МГИ АН УССР, 1986. – 15 с. - Деп. ВИНТИ № 4748-B86.
- Кузнецов С.Ю., Сапрыкина Я.В. Исследование групповой структуры волн в прибрежной зоне Черного моря в районе г. Геленджик / Тезисы докладов международной конференции “Современные проблемы океанологии шельфовых морей России, г. Ростов-на-Дону, 13-15 июня 2002 г.” - Мурманск, ММБИ РАН, 2002. - С. 123-126.
- Чиграков К.И. Фазовые скорости внутренних волн в Черном и Средиземном морях / В сб.: Проблемы Черного моря (тезисы докладов конференции). – Севастополь: МГИ АН Украины, 1992. – С. 24.