



Гідроакустичні характеристики Чорного моря



Hydroacoustic properties of the Black Sea

Діапазон значень швидкості звуку в Чорному морі коливається у межах від 1405 м/с (під час процесів кригоутворення у гирлових ділянках) до 1525 м/с (при максимальному прогріванні солоних поверхневих вод). Середня швидкість звуку по всьому об'єму моря становить 1487,0 м/с, у шарі 0-300 м – 1469,8 м/с, у шарі 400-2000 м – 1490,2 м/с.

Характерним елементом вертикальної структури швидкості звуку є наявність підповерхневого мінімуму, що формує підводний звуковий канал (ПЗК) із середньою глибиною осі 55 м і швидкістю звуку на ній 1461,5 м/с. Нижче осі ПЗК швидкість звуку в Чорному морі поступово зростає із глибиною як за рахунок посилення гідростатичного тиску, так і внаслідок підвищення температури і солоності води. Вертикальний градієнт швидкості звуку зменшується від локального максимуму $0,15 \text{ s}^{-1}$ на 60-70 м у верхній частині основного галокліну до значень $0,018-0,019 \text{ s}^{-1}$ у шарі 300-500 м. Нижче за 500 м, при практичній гомотермії і гомохалінності, вертикальний градієнт швидкості звуку наближається до гідростатичного ($0,017 \text{ s}^{-1}$). Придонна швидкість звуку на глибині 2000 м становить 1504,0 м/с. Швидкість звуку у придонному шарі у протоці Босфор у потоці мармуровоморських вод може досягати 1514 м/с.

Сезонна мінливість швидкості звуку обмежується верхнім шаром 0-75 м і якісно відповідає мінливості температури води. Процеси зимової конвекції у січні-березні призводять до поступового зростання швидкості звуку з глибиною, що забезпечує позитивну рефракцію і сприятливі умови для поширення звуку. У квітні ПЗК поширюється на всю глибоководну частину моря і відбувається послідовне опускання осі ПЗК від середньої глибини 45 м у квітні до 75 м у грудні. Розвиток сезонного велокліну (стрибка швидкості звуку) триває з квітня по серпень, послаблення стратифікації і постійне заглиблення шару стрибка – з вересня по грудень, остаточне руйнування велокліну відбувається у грудні-січні. Максимум вертикального градієнта швидкості звуку, який влітку знаходиться в шарі стрибка температури, залягає на глибині 15-20 м, досягаючи $2-3 \text{ s}^{-1}$, що значно перевищує значення вертикального градієнта в інших регіонах Світового океану. Із серпня по грудень розвивається приповерхневий звуковий канал (ППЗК), який відповідає верхньому квазіоднорідному шару завтовшки 10-50 м.

Річний хід умов поширення звуку можна умовно уявити як послідовність трьох акустичних сезонів, аналогів гідрологічної зими, літа та осені:

- лютий-березень: переважання позитивної рефракції;
- травень-серпень: переважання негативної рефракції і ПЗК;
- вересень-грудень: поєднання ППЗК і ПЗК.

Просторовий розподіл кліматичних значень швидкості звуку на поверхні характеризується постійним мінімумом у північно-західній частині і максимумом у південно-східній частині моря. Різниця значень швидкості звуку між цими частинами моря максимальна у лютому (34 м/с) і мінімальна у травні (8 м/с).

Найбільша сезонна мінливість швидкості звуку відзначається у північно-західній частині моря, де амплітуда сезонних коливань на поверхні досягає 70 м/с. Уздовж кавказького і кримського узбережжя річний хід мінімальний, амплітуда сезонних коливань на поверхні не перевищує 53 м/с. На глибині 100 м сезонний хід порівняно з поверхнею значно знижується: у центральній частині моря у 50 разів, на периферії моря, в середньому, у 20 разів.

Ширина звукового каналу зазнає значних сезонних змін. Максимальною вона є у червні і вересні і обмежується глибиною моря 2000-2200 м, а взимку не перевищує 40-50 м; у районах інтенсивного перемішування канал зникає. Середньомісячна глибина залягання осі ПЗК тісно пов'язана з розвитком геострофічної циркуляції і може змінюватися від 35-40 м в центрі циклонічних кругообігів до 80-90 м на периферії моря в антициклонічних вихорах.

ПЗК у Чорному морі існує протягом всього року і займає всю глибоководну частину моря протягом 9 місяців. У зимовий період його руйнування пов'язане з районами інтенсивної конвекції та утворенням вод ХПШ (холодного проміжного шару).

Sound speed in the Black Sea ranges from 1405 m/s upon ice formation in brackish estuarine areas to 1525 m/s upon maximal heating of salt surface waters. The mean total sea volume sound speed of the Black Sea is equal 1487,0 m/s, in the layer 0-300 m - 1469,8 m/s, in the layer 400-2000 m – 1490,2 m/s.

Vertical structure of sound speed of sound is characterized by the subsurface minimum forming an underwater SOFAR channel with the mean axis depth of 55 m and mean sound speed of 1461,5 m/s. Sound speed below the SOFAR axis rises both due to hydrostatical pressure growth and because of increase of temperature and salinity. The vertical gradient of sound speed drops from a local maximum $0,15 \text{ s}^{-1}$ at 60-70 m in the upper part of the main halocline to the value $0,018-0,019 \text{ s}^{-1}$ in the layer 300-500 m. Below the depth 500 m upon almost homogeneous temperature and salinity the vertical gradient of speed of sound approaches the hydrostatical value ($0,017 \text{ s}^{-1}$). Sound speed near the bottom at the depth 2000 m is equal 1504,0 m/s. Sound speed in the benthic layer near the Bosphorus Strait within the Mediterranean water flow reaches 1514 m/s.

Seasonal variability of sound speed is limited by the layer 0-75 m and corresponds qualitatively to seasonal variability of sea temperature. Processes of winter convection in January-March lead to steady increasing of sound speed with depth providing positive refraction and favorable conditions of sound propagation. In April SOFAR channel spreads on the whole deep-water part of the sea, then the SOFAR axis gradually lowers from the mean depth of 45 m in April to 75 m in December. Development of seasonal veloclone (sharp change of sound speed) proceeds from April to August, weakening of stratification and gradual deepening of veloclone – from September to December, final veloclone decay takes place in December-January. The maximum of vertical gradient of sound speed found in summer in the seasonal thermocline is located at the depth 15-20 m and is equal $2-3 \text{ s}^{-1}$ that considerably exceeds a sound speed vertical gradient in other regions of the World Ocean. From August to December a pronounced surface duct is observed. It is resulted of formation of upper mixed layer which width is about 10-50 m.

Annual march of sound propagation conditions can be represented as a sequence of three acoustic seasons, analogues of hydrological winter, summer and autumn:

- February-March: predominance of positive refraction;
- May-August: predominance of negative refraction and SOFAR propagation;
- September-December: a surface duct and SOFAR propagation.

The spatial distribution of climatic sound speed at the sea surface is characterized by a permanent minimum in the north-western part and a maximum in south-east of the sea. The difference of sound speed between these parts of the sea is maximal in February (34 m/s) and minimal in May (8 m/s).

High seasonal variability of sound speed is inherent for the north-western part of the sea, where magnitude of seasonal changes at the sea surface reaches 70 m/s. In the area near Caucasian and Crimean coasts annual cycle is minimal; magnitude of seasonal fluctuations at the surface does not exceed 53 m/s. At the depth 100 m seasonal variability considerably diminishes by comparison to the sea surface: in the central part – in 50 times, at periphery, on the average, in 20 times.

The width of SOFAR channel undergoes considerable seasonal changes. Channel width is maximal in June and September and is limited by the sea depth (2000-2200 m). In winter it does not exceed 40-50 m, in the zone of intensive mixing the channel disappears. The monthly averaged SOFAR axis depth is closely linked with general circulation. It changes from 35-40 m in the centers of cyclonic gyres to 80-90 m within anticyclonic eddies at margins of the sea.

SOFAR channel in the Black Sea exists in the course of year, it occupies all deep-water part of the sea during 9 months in a year. In winter period its destruction is related to intensive convection and formation of CIL waters.

