

УДК 551.465

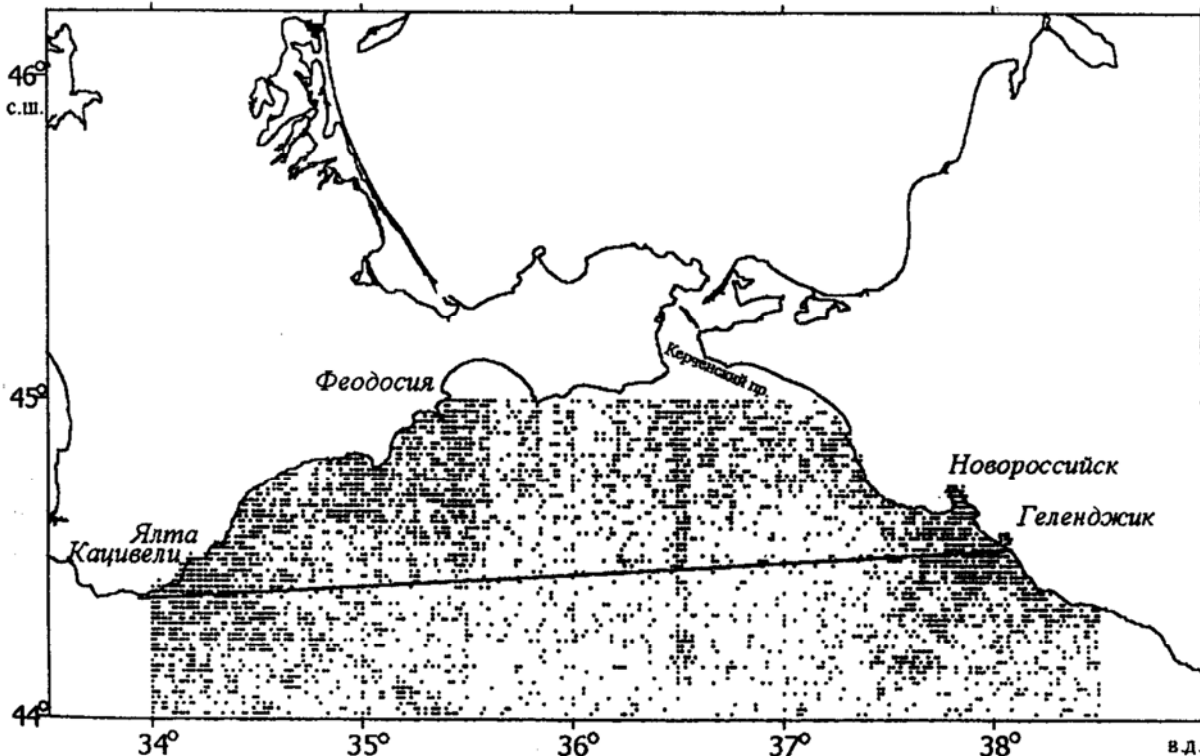
В.Н. Белокопытов

Климатические характеристики скорости звука в северо-восточной части Черного моря

Представлены расчеты климатических значений скорости звука для предполагаемой акустической трассы Кацивели – Геленджик. Использована схема объективного анализа данных океанографических съемок для построения климатических полей. Анализируются общая, сезонная и внутримесячная изменчивость скорости звука и положение оси подводного звукового канала. Климатические характеристики распределения скорости звука на трассе могут быть использованы в задачах акустической томографии северо-восточной части Черного моря.

Одним из перспективных методов дистанционного зондирования морской среды является акустическая томография. Основным преимуществом этого метода в сравнении, например, со спутниковыми средствами зондирования является возможность определения характеристик гидрологической структуры во всей толще вод. В ближайшее время предполагаются работы по организации акустического мониторинга в северо-восточной части Черного моря на стационарных трассах Кацивели – Геленджик и Феодосия – Геленджик. Для корректного восстановления параметров конкретной гидрологической структуры по результатам акустического зондирования необходима информация о среднем, климатическом распределении скорости звука на трассе.

Для расчета климатических характеристик скорости звука на трассе Кацивели – Геленджик была произведена выборка данных из гидрологических банков Морского гидрофизического института НАН Украины и Морского отделения Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института для района, ограниченного 34° – 38° в.д. и 44° – 45° с.ш. Общее число гидрологических станций составило 20545. Основная часть станций выполнена в прибрежных районах Ялты, Феодосии, Новороссийска – Геленджика, а также на стандартных разрезах от Ялты, Керченского пролива и Геленджика к центру восточного циклонического круговорота (рис. 1).



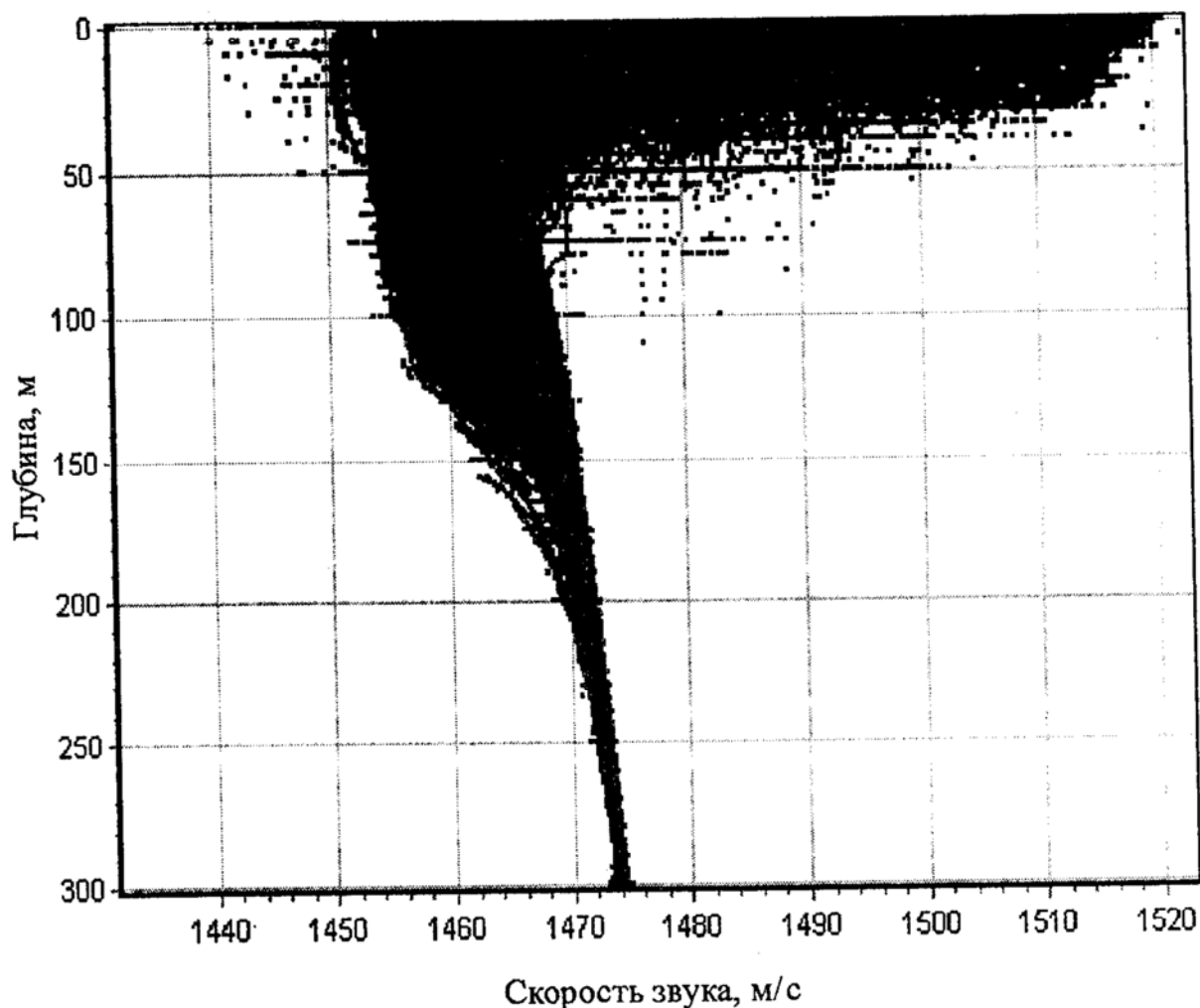
Р и с. 1. Распределение гидрологических станций, выполненных в северо-восточной части Черного моря за 1924 – 2000 гг.

© В.Н. Белокопытов, 2004

Для проверки качества данных океанографические станции группировались по условным квадратам размером 40' по широте и 60' по долготе, затем в каждом квадрате исключались из последующих расчетов значения, не попадающие в интервал 3σ (σ рассчитана за весь период наблюдений ежемесячно до глубины 100 м и в целом ниже 100 м). Исключение данных проводилось в два этапа:

- для плотности воды на стандартных горизонтах (3 итерации);
- для температуры и солёности воды на изопикнических поверхностях: 5 — 11 через 1σ ; 12 — 17 через $0,1\sigma$; 17 — 17,3 через $0,01\sigma$ (2 итерации).

Совокупность вертикальных профилей скорости звука, показанная на рис. 2, отражает значительную изменчивость в слое 0 — 75 м (от 1440 до 1520 м/с), обусловленную изменчивостью температуры воды, и менее интенсивную изменчивость в слое 75 — 150 м под влиянием изменчивости солёности (от 1455 до 1472 м/с). Ниже 200 м профиль скорости звука практически постоянен. Рис. 3 служит иллюстрацией океанографических условий формирования поля скорости звука: наличие холодного промежуточного слоя (ХПС), формирующего подводный звуковой канал (ПЗК), глубинной водной массы, обеспечивающей постоянный положительный градиент скорости звука ниже оси ПЗК, проникновение азовоморских вод (<17‰), вносящих дополнительную изменчивость в поверхностном слое.



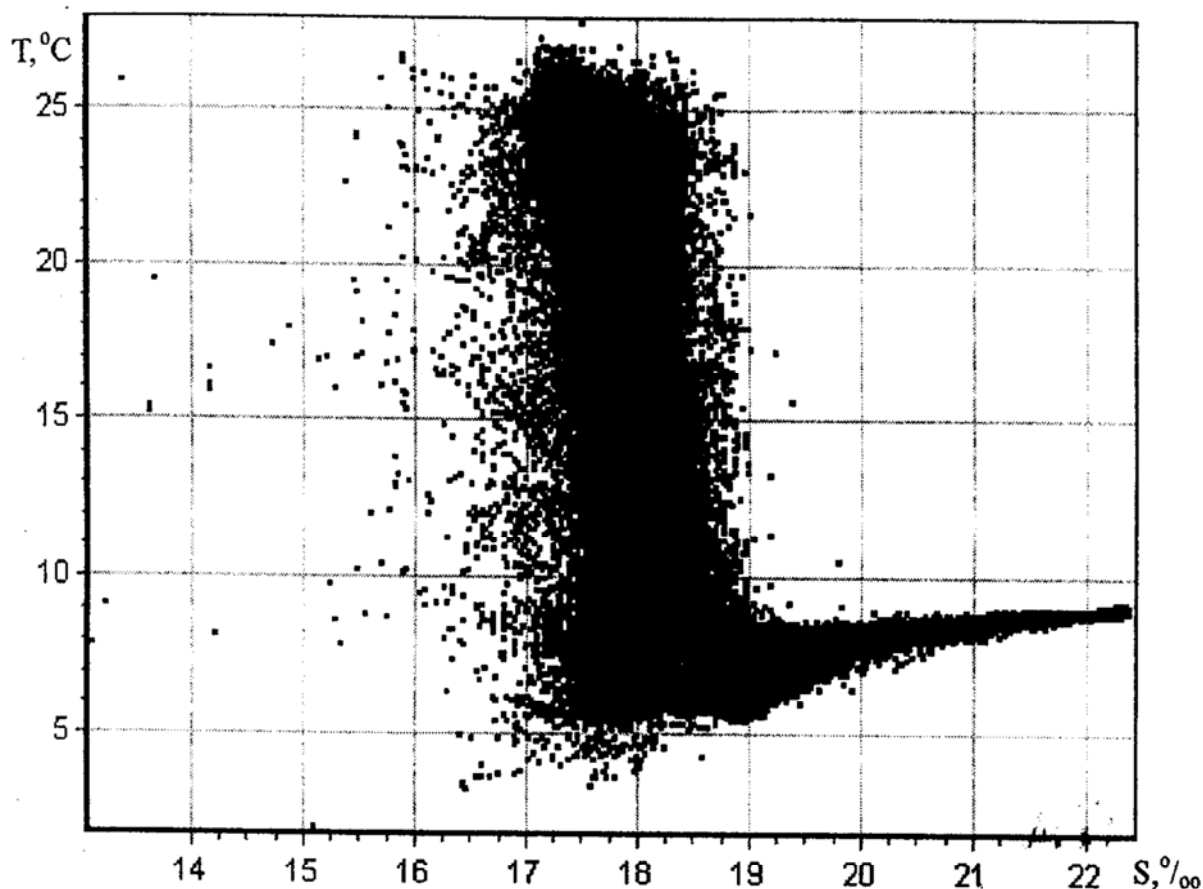
Р и с. 2. Совокупность вертикальных профилей скорости звука в районе 34 — 38° в.д. и 44 — 45° с.ш. за 1924 — 2000 гг.

Климатические характеристики скорости звука рассчитывались в два этапа:

- создание массива первичных среднемесячных значений скорости звука за каждый конкретный год за период 1924 — 2000 гг. из данных, прошедших контроль качества в условных

квадратах $20' \times 30'$ на горизонтах: через 5 м до 100 м, через 10 м до 300 м, через 50 м до 1000 м и через 100 м до дна;

— объективная интерполяция первичных среднемесячных значений на регулярную сетку $20' \times 30'$ для 12 мес в слое 0 — 200 м и среднегодовых в слое ниже 200 м.



Р и с. 3. Совокупность TS -кривых в районе $34 - 38^\circ$ в.д. и $44 - 45^\circ$ с.ш за 1924 – 2000 гг.

Скорость звука рассчитывалась по формуле из работы [1]. Для вертикальной интерполяции на выбранные горизонты применялась 4-точечная схема Рейнигера – Росса [2], представляющая собой комбинацию метода взвешенных парабол и линейной интерполяции. Схема объективного анализа аналогична схеме, используемой в [3] для построения атласов Мирового океана. Это итерационная схема последовательных приближений, разработанная в [4], с весовой функцией, предложенной в работе [5]:

$$g_l(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{l,m,n} [f(m, n) - g_{l-1}(m, n)]}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{l,m,n}} + g_{l-1}(i, j), \quad (1)$$

где весовая функция

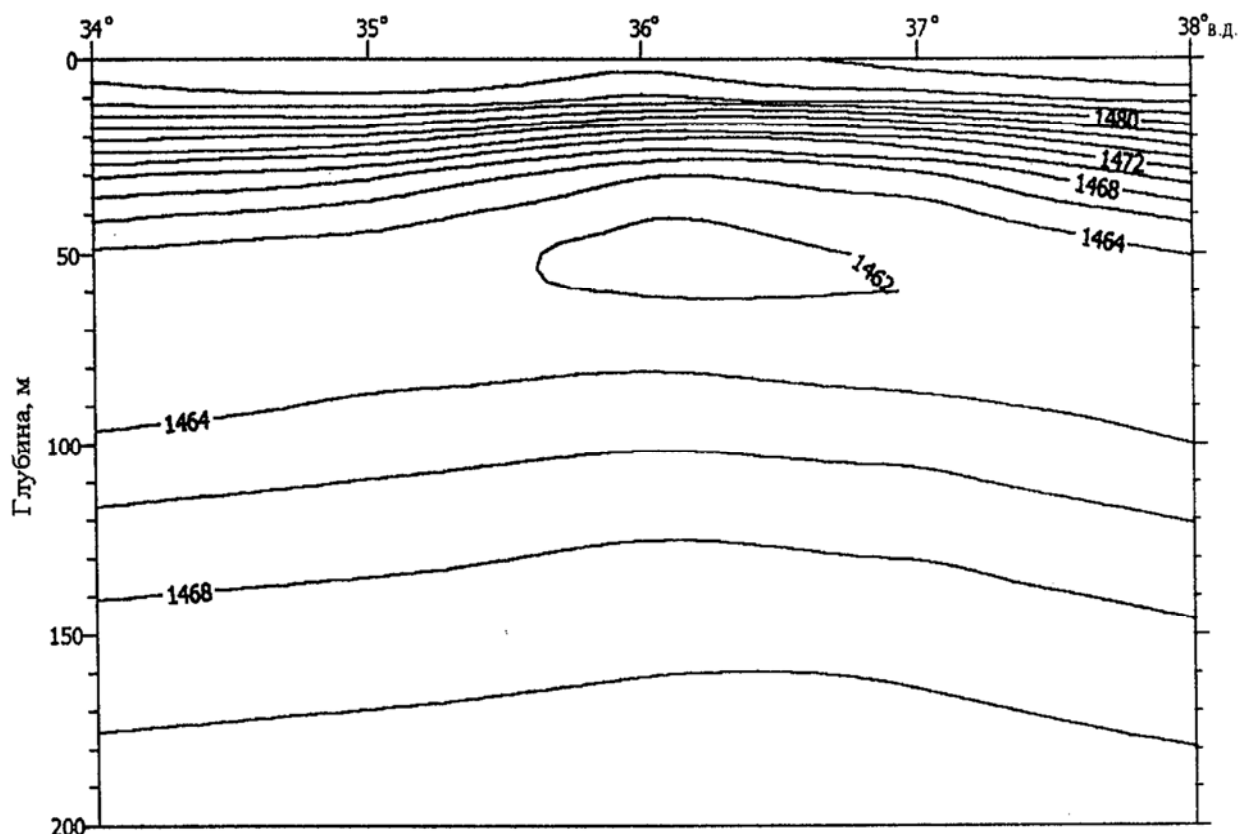
$$w_{l,m,n} = \exp(-r_{m,n}^2 / 4K_l - t_{m,n}^2 / 4V_l), \quad (2)$$

g — интерполируемое значение; f — исходное значение; l — номер итерации; t — время; r — расстояние; K — пространственный радиус; V — временной радиус; i, j — индексы массива интерполированных значений; m, n — индексы массива наблюдавшихся значений; M, N — количество наблюдений в широтном и меридиональном направлениях.

Начальное приближение рассчитывалось как

$$g_0(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{0,m,n} f(m, n)}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{0,m,n}} \quad (3)$$

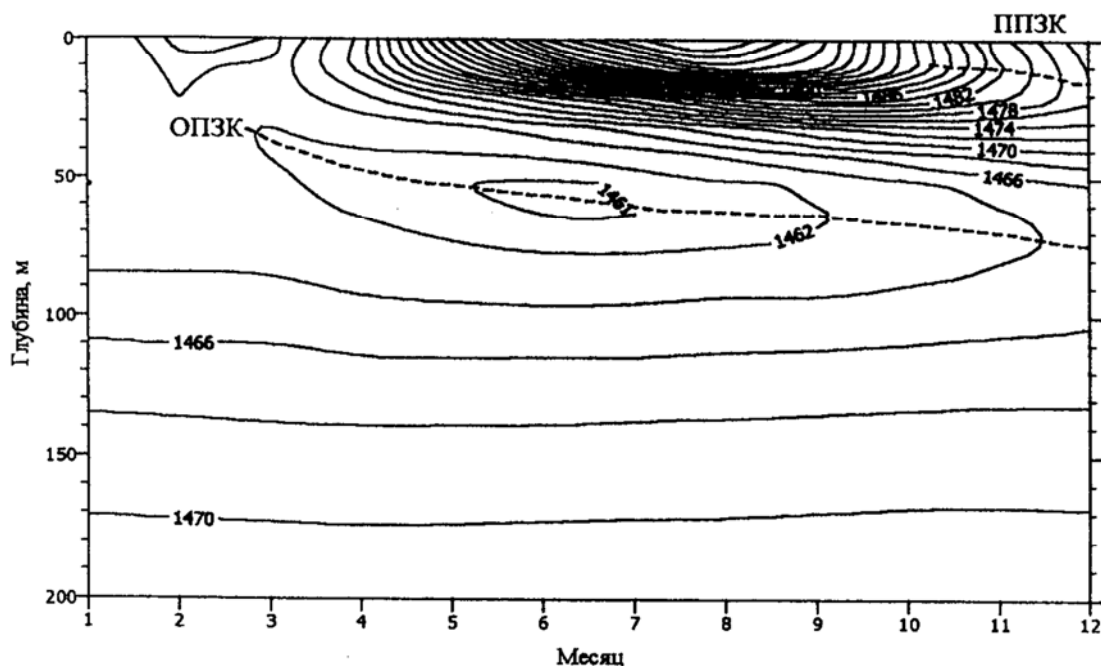
К интерполированным значениям последовательно применялись 5-точечный нелинейный медианный фильтр [6] и двукратно 5-точечный линейный фильтр [7]. Вся схема расчёта выполнялась в две итерации с радиусами влияния 32 и 64 мили соответственно.



и с. 4. Среднегодовая климатическая скорость звука (м/с) на разрезе Качивели – Геленджик

Среднегодовое распределение скорости звука на трассе (рис. 4) характерно для периферии основных циклонических круговоротов Черного моря, где ось ПЗК с пониженной скоростью звука приподнята в центре разреза и заглубляется с повышением скорости звука у берегов.

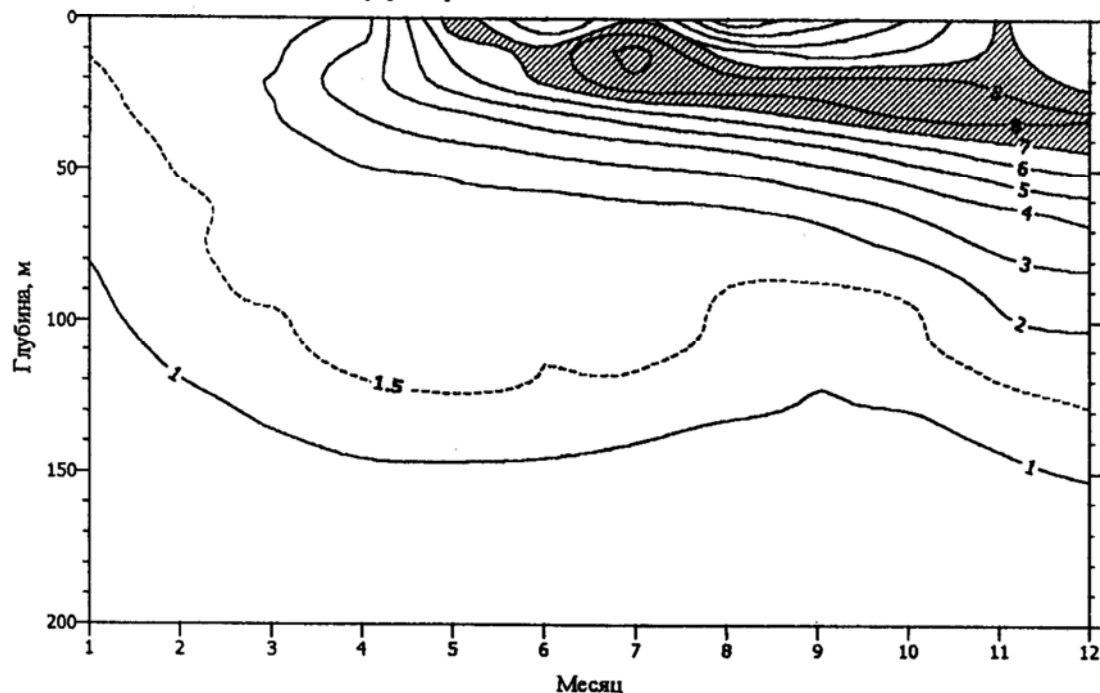
Сезонный цикл (рис. 5) проявляется в разрушении ПЗК зимней конвекцией (январь — март), формировании и последовательном заглублении оси ПЗК (в марте — 30 м, в декабре — 75 м), существовании приповерхностного звукового канала в слое до 20 м (октябрь — декабрь). Сезонный ход условий распространения звука можно обобщить как: преобладание положительной рефракции в январе — марте, отрицательной рефракции в апреле — сентябре и сочетание положительной и отрицательной рефракций в октябре — декабре. В первую половину года скорость звука на оси ПЗК зависит от местных условий вертикальной конвекции в зимний период, так как трасса находится в одном из источников вод ХПС. Во второй половине года наблюдается влияние адвективного переноса вод ХПС из западной половины моря.



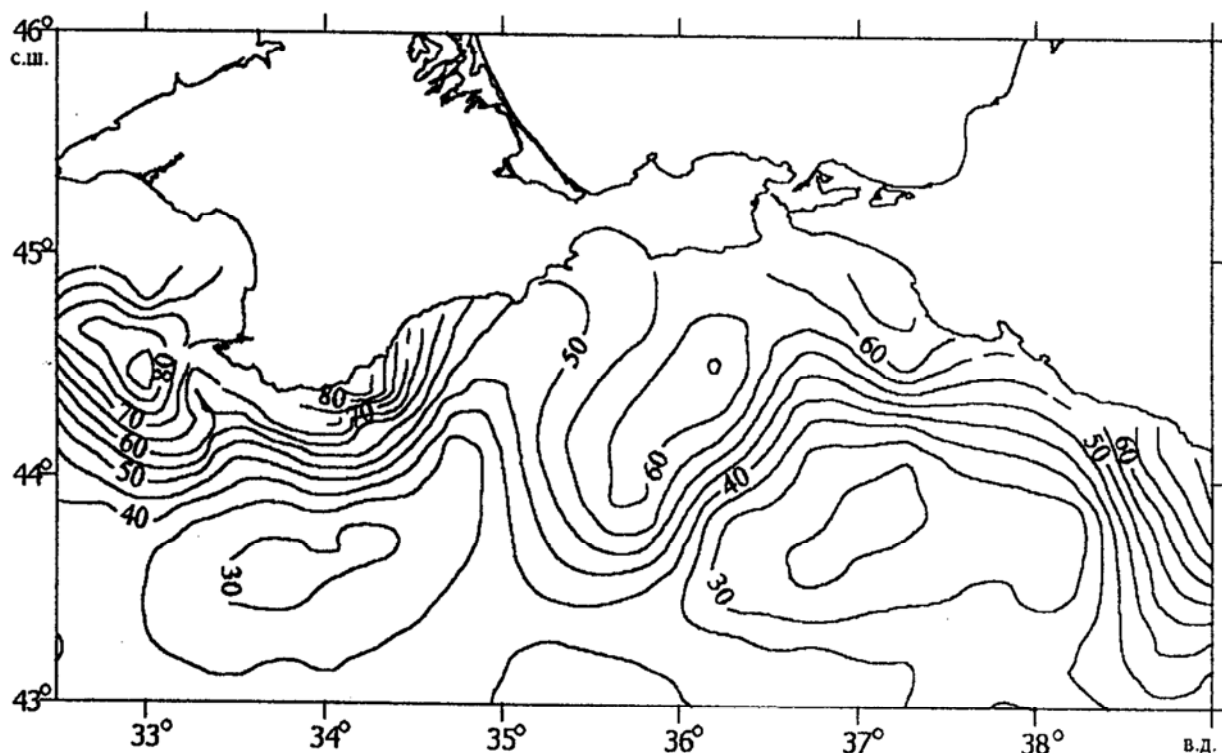
Р и с. 5. Сезонный ход среднего по трассе вертикального распределения климатической скорости звука (м/с) на разрезе Кацивели – Геленджик (ППЗК – приповерхностный звуковой канал, ОПЗК – ось подводного звукового канала)

Внутримесячная дисперсия скорости звука (рис. 6), характеризующая сумму межгодовой, синоптической и мезомасштабной изменчивости, соответствует сезонному развитию термоклина и максимальна в слое скачка температуры ($\sigma = 8 - 9$ м/с).

Дистанционные и контактные средства измерений фиксируют в северо-восточной части Черного моря, как и в других районах близ материкового склона, значительную пространственную синоптическую изменчивость, вызванную неустойчивостью Основного Черноморского течения и завихренностью поля ветра [8 – 10]. Конкретная гидрологическая ситуация и соответствующее ей поле скорости звука могут значительно отличаться от климатического распределения. На рис. 7 показано пространственное распределение глубины залегания оси ПЗК по данным съемки программы *CoMSBlack* в сентябре 1991 г., которое качественно полностью противоположно климатическому распределению.



Р и с. 6. Сезонный ход среднего по трассе вертикального распределения внутримесячного среднеквадратичного отклонения σ скорости звука (м/с) на разрезе Кацивели – Геленджик (заштрихована область максимальных значений)



Р и с. 7. Пространственное распределение глубины залегания (м) оси ПЗК по данным океанографической съемки программы *CoMSBlack* в сентябре 1991 г.

В практическом плане климатические значения скорости звука на трассе Кацивели – Геленджик могут быть использованы при расчете отклонений характеристик распространения акустического сигнала от средних, многолетних условий и корректном восстановлении параметров соответствующей гидрологической структуры вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Algorithms for computation of fundamental properties of sea water*// UNESCO technical papers in marine science. — 1983. — № 44.
2. *Reiniger R.F., Ross C.F.* A method of interpolation with applications to oceanographic data// *Deep-Sea Res.* — 1968. — № 9. — P. 185 – 193.
3. *Levitus S.* Climatological Atlas of the World Ocean// NOAA Prof. — Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, 1982. — Paper № 13. — 173 p.
4. *Cressman G.P.* An operational objective analysis scheme// *Mon. Wea. Rev.* — 1959. — № 87. — P. 329 – 340.
5. *Barnes S.L.* A technique for maximizing details in numerical weather map analysis// *J. Appl. Meteor.* — 1964. — № 3. — P. 396 – 409.
6. *Beaton A.E., Tukey J.W.* The fitting of power series, meaning polynomials, illustrated on band – spectroscopic data// *Technometrics.* — 1974. — № 16. — P. 147 – 185.
7. *Shapiro R.* Smoothing, filtering and boundary effects// *Rev. Geophys. Space Phys.* — 1970. — № 8. — P. 359 – 387.
8. *Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Soloviev D.M. et al.* Remotely sensed coastal/ deep – basin water exchange processes in the Black Sea surface layer// *Satellites, Oceanography and Society*/ Ed. D. Halpern. — Elsevier Science, 2000. — P. 273 – 287.
9. *Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др.* Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. — Л: Гидрометеиздат, 1984. — 238 с.

10. *Кривошея В.Г., Овчинников И.М., Титов В.Г. и др.* Меандрирование Основного Черноморского течения и вихреобразование в северо – восточной части Черного моря летом 1994 г. // *Океанология*. — 1998. — № 38. — С. 546 – 553.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 22.07.02
После доработки 10.10.02

ABSTRACT Climatic sound speed values for the prospective acoustic signal trace Katsiveli – Gelendzhik are presented. Objective analysis scheme of oceanographic survey data is applied for constructing climatic fields. General, seasonal and intra-month variability of sound speed and sound channel axis location are analyzed. Climatic characteristics of the sound speed value distribution can be used for the objectives of acoustic tomography in the northeastern part of the Black Sea.