

О СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЕ ГЛУБОКОВОДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

В.И. Бабий, М.В. Бабий

Морской гидрофизический институт НАН
Украины

Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: ocean@alpha.mhi.iuf.net

На основе прецизионных CTD-зондирований в глубоководной части Черного моря выявлены квазипериодические структуры с толщиной слоев ~ 200 м на глубинах от 700 до 1800 м – верхней границы придонного перемешанного слоя. Оценены их характеристики.

Введение. Знание характеристик изменчивости гидрофизических полей и в частности поля скорости звука в морской среде имеет определяющее значение при расчетах дальности действия и эффективности работы различных гидроакустических систем в областях подводной локации, связи и телеметрии, навигации и пеленгации, позиционирования, звуковидения, акустической томографии и т.п. В работах [1, 2] получены количественные оценки дисперсии и других статистических характеристик скалярных полей скорости звука C и температуры T в Черном море на глубинах z от поверхности до 750 м по результатам прямых измерений C и T , где показано, что уровень их флуктуаций уменьшается с глубиной. Однако на больших глубинах такие данные отсутствуют. Выполненные впоследствии измерения зондирующими CTD-системами позволили выявить существенно более слабую изменчивость первичных гидрологических T , S – характеристик глубинного слоя вод Черного моря по сравнению с ранее опубликованными гидрологическими данными, которые содержали значительные как методические, так и инструментальные погрешности [3]. Это естественно должно приводить к уменьшению связанной с ними изменчивости поля скорости звука. Одна из причин этого состоит том, что прежние расчеты изменчивости скорости звука на больших глубинах косвенным методом по архивным гидрологическим данным однократных измерений на стандартных горизонтах, полученных посредством опрокидывающихся батитермографов, имеют невысокую достоверность, поскольку при

этом не обеспечивалось необходимое для статистики количество, а также качество и единство измерений. Следовательно, по таким архивным данным невозможно исследовать мелкомасштабную (метровых масштабов) и тонкую структуру поля скорости звука.

Поскольку прямые измерения мелкомасштабных флуктуаций скорости звука в Черном море на глубинах $z > 750$ м отсутствуют, то для оценок сверху интенсивности мелкомасштабных флуктуаций скалярного поля скорости звука на больших глубинах применим косвенный метод расчета C . Для этого воспользуемся, как наиболее достоверными и метрологически обеспеченными, уникальными результатами интеркалибровок в натуральных условиях двух разных зондирующих CTD-систем на дрейфовых гидрологических станциях в черноморской экспедиции 33 рейса НИС «Профессор Колесников» [4].

Аппаратура и исходные данные. В этих натуральных исследованиях использовались прецизионные гидрологические зондирующие CTD-системы «ИСТОК-7» разработки МГИ НАНУ и SBE-911 разработки фирмы «Sea-Bird Electronics, Inc.» (США), отвечающие требованиям программы WOCE [5]. Первичная обработка измерительной информации зондов осуществлялась в реальном времени на ПЭВМ по своим штатным программам с учетом индивидуальных градуировок комплексов, причем градуировка SBE-911 выполнена NRCC США в марте 1994 г., а зонда «ИСТОК-7» – в марте 1995 г. метрологической службой МГИ НАНУ в лабораторных условиях. Измерения сопровождались отбором проб воды на заданных горизонтах кассетой батометров с последующим их анализом в судовой лаборатории посредством образцового электросолемера типа МГИ 4602 и сопоставлением результатов анализов с данными зондирований. Все это обеспечило высокое качество и достоверность измерений, характеризующих стабильность и однородность свойств глубинных слоев морской среды в Черном море в точках, значительно разнесенных в пространстве по горизонтали и во времени.

Целевые эксперименты по интеркалибрации этих систем проводились в 33 рейсе НИС «Профессор Колесников» в марте-апреле 1995 г. в рамках международных программ CoMSBlack и TU-BLACKSEA.

Выполнены сличения данных последовательных вертикальных зондирований на трех дрейфовых гидрологических станциях №№ 5955, 5975, 6031. Станции были размещены практически на одной широте в восточной, центральной и западной глубо-

ководных областях Черного моря [4]. Характеристики этих гидрологических станций и последовательных зондирований на каждой станции приведены в таблице 1, а расположение станций показано на рисунке 1.

Таблица 1 – Характеристики глубоководных станций интеркалибрации

№ станции	5955	5975	6031
Дата	18.03.95	21.03.95	03.04.95
Широта, φ сш	43°30'	43°10'	43°31'
Долгота, λ вд	36°15'	34°15'	31°44'
Глубина места, м	2145	2217	1885
Глубина зондирования, м	2000	2000	1878
Время начала зондирования	20:00	04:00	08:35
Время между зондированиями, с	10 800	6 300	11 100
Расстояние между зондированиями, м	750	1880	840
Средняя скорость дрейфа судна, см/с	7.0	30	7.6

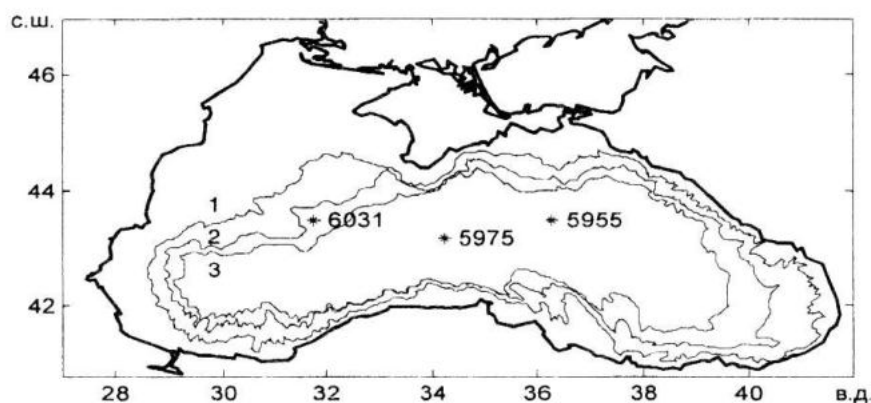


Рисунок 1 – Расположение глубоководных гидрологических станций на акватории Черного моря при интеркалибровке STD-зондов. Изобаты: 1 – 1600 м, 2 – 1800 м, 3 – 2000 м

Результаты исследований. Поскольку при интеркалибрации STD-зондов скорость звука прямо не измерялась, то ее значения находим косвенным методом по данным температуры и солёности. Расчет скорости звука C проводился на основе измерений температуры T , солёности S и избыточного давления P зондирующими STD-системами по современному стандартизованному алгоритму $C(T, S, P)$ из таблиц ГСССД 202 – 02 [6], содержащему 45 членов полинома.

Оценки интенсивности мелкомасштабных флуктуаций поля скорости звука рас-

считаны и представлены на рисунке 2 по рядам разностей $\Delta C_{ij}(z) = C_i(z) - C_j(z)$, где индексы соответствуют разным станциям. В структурной функции этим разностям отвечают пространственные сдвиги Δr , равные расстояниям между станциями (см. рис.1) и временные сдвиги τ , равные временным интервалам между зондированиями на этих станциях (см. табл.1). Реализациям, представленным на рис. 2, отвечают сдвиги: рис. 2а – $\Delta r = 1.6 \cdot 10^5$ м, $\tau = 2 \cdot 10^5$ с; рис. 2б – $\Delta r = 3.6 \cdot 10^5$ м, $\tau = 1.34 \cdot 10^6$ с; рис.2в – $\Delta r = 2 \cdot 10^5$ м, $\tau = 1.14 \cdot 10^6$ с.

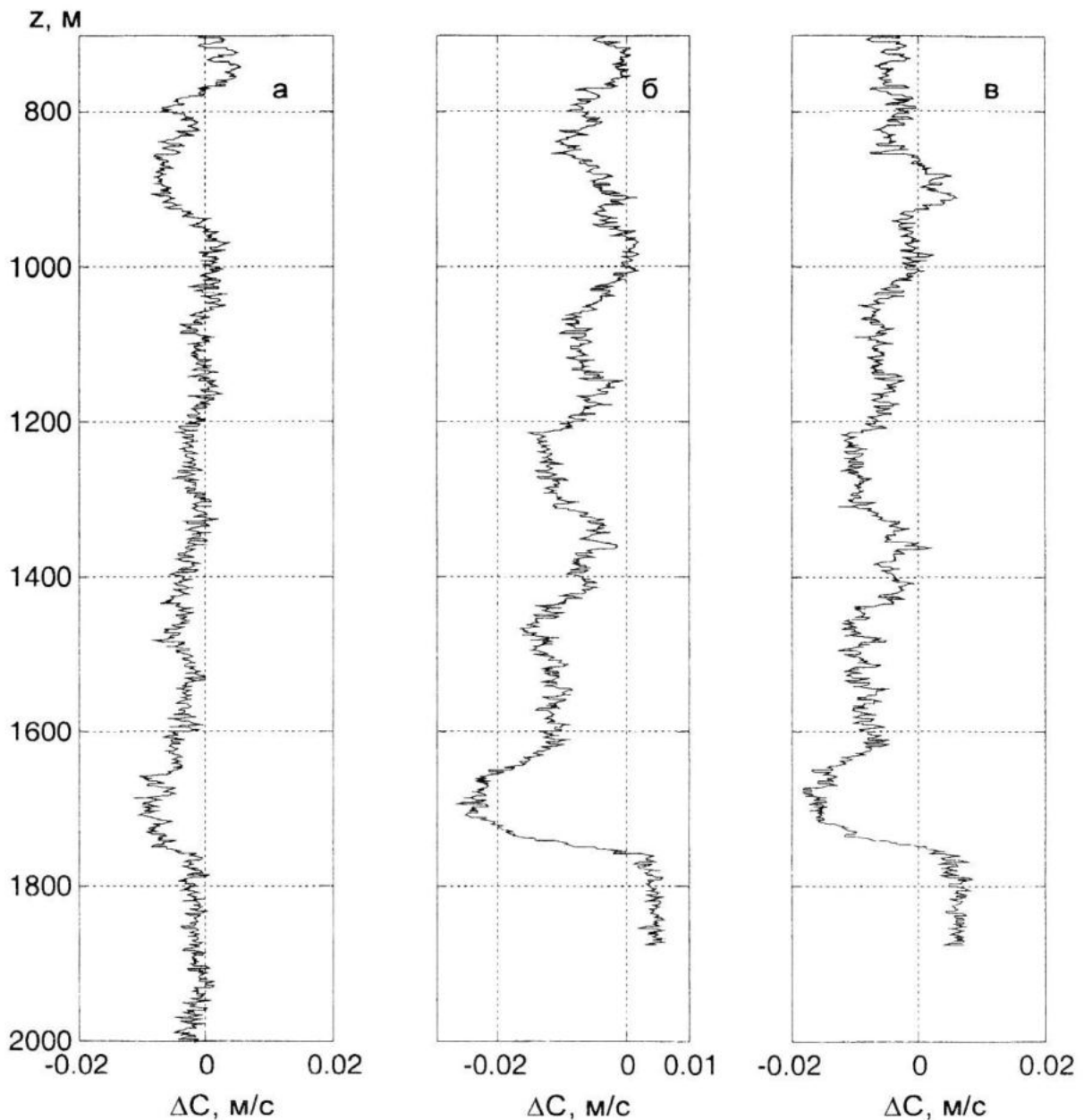


Рисунок 2 – Разности вертикальных распределений скорости звука (ВРСЗ) между станциями:
 а – $\Delta C = C(z)_{5955} - C(z)_{5975}$; б – $\Delta C = C(z)_{5955} - C(z)_{6031}$; в – $\Delta C = C(z)_{5975} - C(z)_{6031}$

На рисунке 3 представлены результаты расчетов скользящего среднего $\langle \Delta C(z) \rangle$ и среднего квадратического отклонения σ_c поля скорости звука для трех гидрологических станций. Средние значения разностных рядов позволяют оценить в конечных приращениях горизонтальные компоненты градиента C . Так, полагая (см. рис. 3а) $\langle \Delta C(z) \rangle = (1 \div 2) \cdot 10^{-2}$ м/с, получим их оценку $[\langle \Delta C(z) \rangle / \Delta r] \leq 1 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$. Из рис. 2

и рис. 3а следует, что на глубине $z = 1000$ м горизонтальная компонента градиента C равна нулю. При этом вертикальная компонента градиента скорости звука в полосе глубин 700 – 2000 м составляет $1.73 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ при среднем квадратическом отклонении линейной аппроксимации $C(z)$ от измеренных ВРСЗ на всех станциях $\leq 1.12 \cdot 10^{-2}$ м/с. Это свидетельствует о высокой линейности ВРСЗ при $z > 700$ м.

В придонном перемешанном слое (ППС) для $z > 1800\text{ м}$ $\text{grad}_z \langle C(z) \rangle = 1.72 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, соответствующему адиабатическому градиенту, который, по крайней мере, на пять порядков больше горизонтальной компоненты. Это отношение один из доводов в пользу модели плоскостройной среды.

Как видим на рис. 3а, в диапазоне глубин 1000 – 1800 м наряду со слабым линейным трендом среднего значения разности $\Delta C(z)$, на всех трех станциях явно наблюдается регулярная периодическая структура поля с пространственным периодом ~ 200 м по вертикали и протяженностью более 360 км по горизонтали (расстояние между станциями). Этот факт также подтверждает модель плоскостройной среды. Таким образом, на больших глубинах в море мы имеем дело с новым достоверным явлением слоистости, где относительная амплитуда $\langle \Delta C(z) \rangle$ находится на уровне $\sim 10^{-5}$. Как отмечено в [7], условия для конвективных движений вод в Черном море существуют выше придонного перемешанного слоя на глубинах 200 – 1500 м. Расчет интенсивности σ_c^2 флуктуаций скорости звука и ее зависимости от глубины выполнен возведением в квадрат разностей ВРСЗ и последующему их скользящему усреднению по заданному интервалу глубин. На рис. 3б приведены рассчитанные скользящие значения СКО $\sigma_c(z)$, которые находятся преимущественно в узких пределах (1–2) мм/с, кроме отдельного превышения для двух станций на глубине ~ 1750 м, обусловленного частично эффектом скользящей равновесной фильтрации на верхней границе придонного пограничного (перемешанного) слоя, т.е. эффектом методики математической обработки. Из рис. 3б следует, что мелкомасштабным флуктуациям скорости звука присущ эффект насыщения, т.е. фактически независимость их интенсивности от пространственных сдвигов, превышающих некоторый масштаб порядка десятка метров. Наименьшие значения СКО $\sigma_c < 1$ мм/с (см. рис. 3б) зарегистрированы на всех станциях на глубине $z = 1000$ м (где горизонтальные составляющие градиента равны нулю) и в придонном перемешанном слое 1800–2000 м. Заметим, что в эту оценку входит случайная

и дрейфовая составляющие инструментальной погрешности СТД–системы, а также методическая структурная погрешность, обусловленная приведением исходных данных на целочисленные горизонты.

Выводы. Основная толща вод Черного моря (как внутреннего и бесприливного) на больших глубинах представляет собой термодинамически и акустически весьма стабильную среду. Экспериментально получены количественные оценки интенсивности мелкомасштабных флуктуаций скалярного поля скорости звука в Черном море на глубинах от 700 до 2000 м. Достоверные значения их среднего квадратического отклонения $\sigma_c(z)$ в слое не превышают 1–2 мм/с или относительных флуктуаций $[\sigma_c(z)/C(z)] \approx 10^{-6}$, которым присущ эффект насыщения на масштабах, превышающих десятки метров. Эти результаты подтверждают полученные нами ранее оценки слабой изменчивости скорости течений и температуры на больших глубинах в Черном море [8]. На глубинах $z > 700$ м наблюдались идентичность и высокая линейность ВРСЗ. Вертикальная компонента градиента скорости звука в полосе глубин от 700 до 2000 м на всех станциях составляет $1.73 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, что близко к адиабатическому градиенту.

Очень слабая изменчивость гидрофизических полей в глубинных слоях Черного моря делает с одной стороны нецелесообразным использование в них гидроакустических измерителей скорости звука с погрешностью более 1–2 см/с, а с другой стороны в этих слоях желательным проводить интеркалибрацию и натурные испытания вновь разрабатываемых перспективных прецизионных СТД–зондов и измерителей скорости звука [9, 10], посредством которых станет возможным комплексное детальное исследование структуры полей и глубоководных процессов обмена.

В диапазоне глубин 1000 – 1800 м обнаружена на относительном уровне отклонений 10^{-5} устойчивая крупномасштабная квазипериодическая слоистая структура горизонтальной протяженностью более 360 км и пространственным периодом ~ 200 м по вертикали, природу которой еще предстоит выяснить.

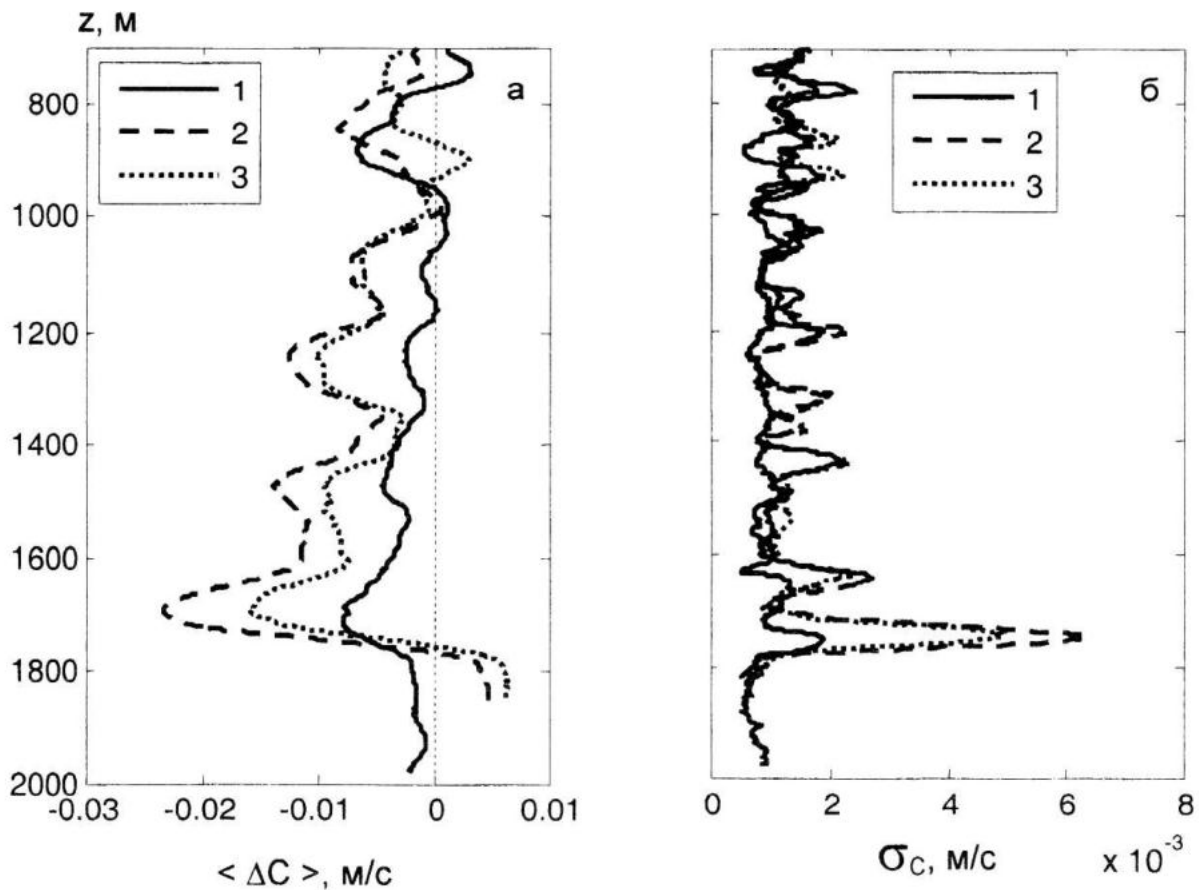


Рисунок 3 – Скользящие по интервалу $\Delta z = 50$ м: а – средние значения $\langle \Delta C(z) \rangle$, б – средние квадратические отклонения $\sigma_c(z)$ разностей ВРСЗ, приведенных на рис. 2, которым соответствуют: график 1 – рис. 2а; график 2 – рис. 2б; график 3 – рис. 2в

Л и т е р а т у р а

1. Бабий В.И. Мелкомасштабная структура поля скорости звука в океане. – Л.: Гидрометеоздат, 1983. – 200 с.

2. Бабий В.И., Толстошеев А.П. Рабочие средства измерения скорости звука в морской среде. Сб. науч. тр. Изд. МГИ НАН Украины. «ЭКОСИ – Гидрофизика». – Севастополь, 1999. – 36 с.

3. Murray J.W., Top Z., and Ozsoy E. Hydrographic properties and ventilation of the Black Sea // Deep – Sea Res., v. 38, Suppl. 2, 1991. – P. 663 – 689.

4. Отчет по 33 рейсу НИС «Профессор Колесников». Архив МГИ НАНУ, 1995.

5. Зима В.В., Шкворец И.Ю. Интеркалибрация STD-систем ИСТОК-7 и SBE-911 // Морское и экологическое приборостроение. Сб. научн. тр. – Севастополь: изд. МГИ НАН Украины, 1995. – С. 60 – 61.

6. ГСССД 202– 02 “Морская вода. Скорость звука при соленостях 0...40 ‰, температурах 0...40 °С и избыточных давлениях 0...60 МПа”.

7. Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. – Л.: Гидрометеоздат, 1984. – 240 с.

8. Бабий В.И., Бабий М.В. Оценка мезомасштабной изменчивости скорости течений и температуры в Черном море // Современные проблемы океанологии Черного моря. Ч. II. – Севастополь, 1986. – С. 239 – 247. (Деп. ВИНТИ № 6700 – В86 /АН УССР, МГИ)

9. Бабий В.И. Повышение спектральной чувствительности гидроакустических измерителей скорости звука для исследования структур в жидкостях // Международная конференция «Потоки и структуры в жидкостях». – М., 2009.

10. Бабий В.И. Проблемы и перспективы измерения скорости звука в океане. – Морской гидрофизический институт НАН Украины. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ – Гидрофизика», 2009. – 142 с.