

П.Н.Лишаев, В.В.Кныш, Г.К.Коротаев

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь*

**ПРОЦЕДУРА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОЛЕННОСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ РЕДКИХ КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И АЛЬТИМЕТРИИ**

Предложена оригинальная процедура восстановления трехмерных полей температуры и солёности для глубоководной области Черного моря, основанная на совместной обработке альтиметрических и малочисленных гидрологических наблюдений в Черном море за 1993 – 2012 гг. Восстановлены среднесуточные поля температуры и солёности моря. Структуры полей температуры и солёности коррелируют с топографией альтиметрического уровня. Выполнена оценка точности восстановленных полей посредством сопоставления с непосредственными данными зондирований.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *альтиметрия, буи Argo, температура, солёность, Черное море, малочисленные контактные наблюдения*

В данной работе предложен алгоритм восстановления трехмерных полей температуры и солёности Черного моря по данным альтиметрии. В его основе лежит представление о преобладании адиабатических процессов, определяющих изменчивость этих полей в широком диапазоне пространственно-временных масштабов.

**Восстановление полей температуры и солёности.** Опишем алгоритм установления связи между смещениями уровня моря и отклонениями изоповерхностей. Значения температуры и солёности, измеренные на гидрологических станциях, интерполированы по вертикали на горизонты модели 2,5; 5; 10;...; 30; 40; 50; 63; 75; 88; 100; 113; 125; 150; 175; 200; 250; 300; 400;...; 2100 м [1]. Данные измерений за период 1993 – 2012 гг. привязываются по координатам к значениям альтиметрического уровня моря [1]. На поверхности моря выделяются области между целочисленными значениями изолиний уровня с шагом 1 см, так называемые градации. Затем все измеренные профили температуры и солёности относятся к градациям уровня моря. Интервал накопления и осреднения профилей температуры и солёности для каждой градации уровня моря равен 90 суток [2]. Таким образом, мы получаем профиль температуры и солёности, соответствующий определенной градации уровня для большинства месяцев 1993 – 2012 гг. Ввиду редкости контактных наблюдений в рассматриваемый период, не удастся получить профили температуры и солёности для некоторых месяцев и отдельных градаций уровня моря. Из всего множества градаций уровня моря выделим так называемую «нулевую» градацию («-1, 0, 1») см, характеризующую невозмущенные профили солёности и температуры.

В [1] описана процедура получения среднемесячных профилей «нулевой» градации. Использование данной процедуры позволило получить непрерывный массив среднемесячных профилей невозмущенных температуры и солёности за период 1993 – 2012 гг.

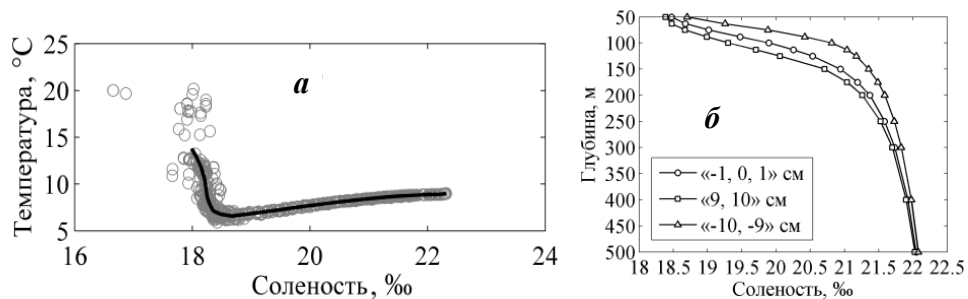


Рис. 1. Т, S-кривая (сплошная линия) «нулевой» градации уровня в мае 1994 г. (а); среднемесячные профили солёности, соответствующие выбранным градациям уровня моря для мая 1994 г. (б).

На рис.1 маркерами изображены значения температуры и солёности, измеренные на станциях. Большой разброс значений рассматриваемых величин в верхнем слое является следствием атмосферного воздействия. Начиная с глубин 50 – 100 м, разброс существенно уменьшается. Отмеченная особенность указывает на преобладание вклада адиабатических процессов на указанных глубинах.

Сравнение ежемесячных профилей солёности, построенных на рис.1, б для «нулевой» и других градаций уровня моря, позволяет определить глубину залегания изохалинной поверхности в остальных градациях уровня моря в слое 100 – 500 м. Для этого использовалась следующая процедура. Каждому месяцу соответствуют среднемесячные профили в градациях уровня. Из среднемесячного профиля солёности «нулевой» градации выбиралось значение солёности с определенного горизонта. Далее, посредством линейной интерполяции рассчитывалась глубина залегания  $h$  изоповерхности внутри каждой градации уровня. Данная процедура проводилась для всех значений профилей «нулевой» солёности на горизонтах в слое 63 – 600 м для периода 1993 – 2012 гг. Данные с глубинами записывались в таблицы.

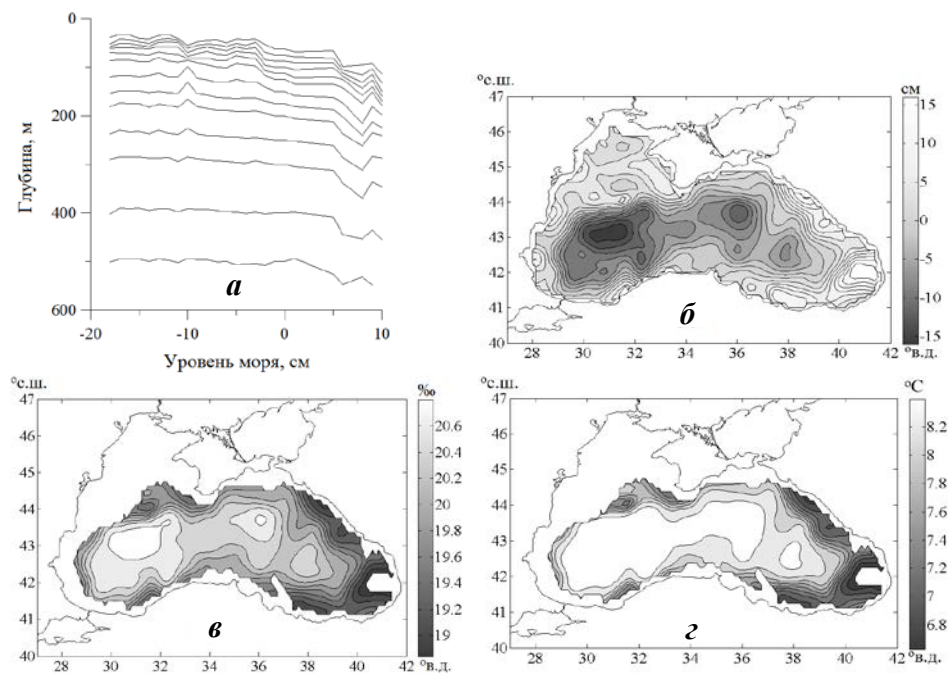
По данным таблиц были построены ежемесячные диаграммы зависимостей «градация уровня моря – глубина» (рис.2, а). Затем построенные зависимости для каждого значения невозмущенной солёности аппроксимировали линейной функцией вида

$$h(S_0, \zeta) = a(S_0)\zeta + b(S_0),$$

где  $h(S_0, \zeta)$  – искомая глубина,  $\zeta$  – значение уровня моря. Полученные функции позволяют рассчитать искомую глубину залегания выбранного значения невозмущенной солёности для всего диапазона изменчивости альтиметрического уровня.

Использование ежесуточных значений альтиметрического уровня моря [1, 3 – 5] позволяют восстановить ежесуточные поля солёности. Для каждого дня имеется набор следующих параметров: карта альтиметрического уровня, значения коэффициента « $a$ », свободного члена « $b$ », профиль солёности «нулевой» градации. Профили солёности строятся в точках сетки уровня моря, ограниченного 500-метровой изобатой. Подставляя значение уровня  $\zeta$  в уравнение

$$h(S, \zeta) = a(S)\zeta + b(S),$$



Р и с . 2 . Диаграмма зависимости глубин  $h$  от градаций уровня моря на горизонтах слоя для мая 2012 г. (*а*); топография альтиметрического уровня моря (*б*), восстановленные поля температуры (*в*) и солёности (*г*) на горизонте 100 м, соответствующие 25 мая 2012 г.

получаем глубину залегания изахолины. Для расчета значений солёности на выбранных горизонтах проводим линейную интерполяцию.

Поля температуры восстанавливались с использованием  $T, S$  соотношений «нулевой» градации уровня. Ежесуточные поля солёности и температуры восстанавливались во всех точках сетки альтиметрического уровня в слое 100 – 500 м за период 1993 – 2012 гг.

**Оценка статистических характеристик точности восстановленных полей температуры и солёности.** Оценка точности восстановления полей температуры и солёности проводилась путем сопоставления с данными контактных измерений. В таблице приведены средние и среднеквадратические отклонения восстановленной температуры и солёности на горизонтах слоя 100 – 500 м.

Данные таблицы свидетельствуют о том, что восстановленные температура и солёность занижены. Наибольшие по модулю средние отклонения температуры и солёности соответствуют горизонту 100 м. Среднеквадратические отклонения температуры и солёности уменьшаются с глубиной.

Большой интерес представляет пространственное распределение среднеквадратических ошибок восстановленных полей температуры и солёности. Акватория моря, ограниченная изобатой 500 м, была разбита на области. Размеры областей равнялись  $2^\circ$  по широте и  $1^\circ$  по долготе. Внутри каждой области оценивались статистические характеристики отклонений.

Т а б л и ц а . Средние (СО) и среднеквадратические (СКО) отклонения восстановленных температуры и солёности за 1993 – 2012 гг.

горизонт, м	СО		СКО	
	температура, °С	солёность, ‰	температура, °С	солёность, ‰
100	– 0,0424	– 0,0366	0,3110	0,3935
113	– 0,0282	– 0,0106	0,2782	0,3571
125	– 0,0220	– 0,0133	0,2371	0,3187
150	– 0,0091	– 0,0067	0,1740	0,2441
175	– 0,0087	– 0,0102	0,1127	0,1576
200	– 0,0105	– 0,0170	0,0768	0,1065
250	– 0,0069	– 0,0145	0,0583	0,0675
300	– 0,0042	– 0,0124	0,0522	0,0516
400	– 0,0014	– 0,0088	0,0341	0,0350
500	0,0004	– 0,0046	0,0239	0,0278

Максимальные значения среднеквадратических отклонений солёности получены в областях, примыкающих к северо-западному шельфу и материковому склону, а также в прибосфорском районе. Таким образом, повышенные значения СКО наблюдаются в районах, в которых нарушается приближение адиабатичности.

Значения СО и СКО восстановленных температуры и солёности, оцененные посредством сопоставления с данными измерений на станциях и осредненные по горизонтам и прямоугольным областям моря на горизонтах слоя 100 – 500 м, оказались, в основном, удовлетворительными.

**Заключение.** В данной работе описана процедура восстановления полей температуры и солёности для глубоководной области Черного моря. Процедура основана на совместном анализе данных контактных измерений и альтиметрии. Основополагающей является гипотеза преобладания адиабатических процессов в изменчивости поля плотности. Предполагается, что изоповерхности Черного моря достаточно точно зависят однопараметрически от топографии уровня моря.

В качестве «базовой» стратификации выбрана «нулевая» градация уровня. Рассчитанные глубины залегания солёности из профиля «нулевой» градации по профилям остальных градаций уровня моря позволили определить линейную зависимость между глубиной залегания изохалины и значением уровня моря. Использование этой зависимости позволило восстановить профили солёности в каждой точке сетки уровня моря. Профили температуры были восстановлены по  $T, S$  соотношениям «нулевой» градации уровня.

Анализ восстановленных полей температуры и солёности показал, что значения рассматриваемых величин слегка занижены. Повышенные значения среднеквадратических ошибок полей температуры и солёности в областях моря, примыкающих к склону северо-западного шельфа и юго-западного Крыма, указывают на нарушение приближения адиабатичности.

Построение трехмерных полей температуры и солёности Черного моря выполнялось при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-05-00264 а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коротаев Г.К., Лишаев П.Н., Кныш В.В.* Методика анализа данных измерений температуры и солёности Черного моря с использованием динамического альтиметрического уровня // *Морской гидрофизический журнал.*– 2015.– № 2.– С.3-4.
2. *Коротаев Г.К., Кныш В.В., Мизюк А.И.* Автомодельное формирование псевдополей плотности (солёности, температуры) Черного моря для решения задачи реанализа гидрофизических полей (модельные численные эксперименты) // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– вып.22.– С.7-21.
3. *Le Traon P.-Y., Dibarboure G., Ducet N.* Use of a High-Resolution Model to Analyze the Mapping Capabilities of Multiple-Altimeter Missions // *J. Atmos. Oceanic Technol.*– 2001.– № 18.– P.1277-1288.
4. *Pascual A., Faugère Y., Larnicol G. et al* Improved description of the ocean mesoscale variability by combining four satellite altimeters // *Geophys. Res. Lett.*– 2006.– № 33.– L02611.
5. *Url-1.* AVISO. <http://www.aviso.altimetry.fr/duacs>

Материал поступил в редакцию 12.02.2016 г.  
После доработки 01.09.2016 г.

P.N.Lishaev, V.V.Knysh, G.K.Korotaev

#### **PROCEDURE OF RECONSTRUCTION OF THE BLACK SEA THREE DIMENSIONAL TEMPERATURE AND SALINITY FIELDS BASED ON RARE HYDROLOGICAL DATA AND ALTIMETRY**

An original procedure to restore the three-dimensional fields of temperature and salinity, in the deep Black Sea, based on the joint processing of altimetry and rare hydrological observations in the Black Sea for 1993 – 2012 is proposed. Daily average fields of sea temperature and salinity are restored. Structure the temperature and salinity fields is correlated with topography of altimetric level. The accuracy of the reconstructed fields is evaluated by means of comparison with in situ data.

**KEYWORDS:** *altimetry, buoys Argo, temperature, salinity, the Black Sea, rare data of contact monitoring*