

А.В. Багаев, С.Г. Демышев, Г.К. Коротаев,  
Е.В. Плотников

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь*

### **СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМОХАЛИННЫХ ПОЛЕЙ ЧЕРНОГО МОРЯ С ДАННЫМИ БУЕВ-ПРОФИЛЕМЕРОВ ARGO**

Приводится сравнение результатов численных расчетов циркуляции и термохалинной структуры Черного моря на синоптическом и сезонном масштабах и данных всплывающих буй-профилемеров ARGO. Трехмерная гидродинамическая модель характеризуется самым современным уровнем физического наполнения, максимально учитывает реальное атмосферное воздействие, потоки солнечной радиации и соли. В ней ассимилируются спутниковые данные об уровне моря и поверхностной температуре. Описываются специализированные методика валидации и программное обеспечение для анализа и визуализации итогов сопоставления. Показано, что модель в целом достаточно хорошо воспроизводит натурные данные. Максимальные расхождения отмечаются в позиционировании постоянного галоклина и сезонного термоклина в районах со сложной топографией дна и/или находящихся под непосредственным влиянием пресноводного стока.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** численное моделирование, гидрофизические поля, Черное море, ARGO, визуализация.

**Введение.** Современная концепция мониторинга морской среды основана на важной роли ассимиляции данных натуральных измерений в региональных моделях оперативного прогноза циркуляции. Начавшаяся более десяти лет тому назад эра прецизионных глубоководных буй-профилемеров ARGO, обеспечивает значительное улучшение прогноза гидрофизических параметров морской среды. На базе этих буйев разрабатывается первая *in situ* система наблюдения состояния океана в режиме реального времени. В начале измерительного цикла буй ARGO в течение примерно недели свободно дрейфует на запрограммированном горизонте – см. циклограмму работы буя, показанную на рис. 1. Затем он опускается на заданную фиксированную глубину и всплывает примерно за 10-часовой временной интервал, измеряя температуру и соленость на заданных горизонтах, максимальное число которых достигает 80. По достижении морской поверхности в течение 1 – 8 часов буй передает в эфир данные, которые принимаются спутниковыми системами сбора и передачи информации ARGOS или Iridium, установленными на ИСЗ серии NOAA. Затем измерительный цикл повторяется.

За период 2002 – 2010 гг. в Черном море было запущено в эксплуатацию 8 буйев ARGO. В итоге был получен массив уникальной информации о профилях температуры и солености, а также средних лагранжевых скоростях буйев, которые планируется ассимилировать в действующей оперативной модели Черного моря [1, 2].

Валидация продуктов численного моделирования циркуляции Черного моря на основе данных первых трех буев-профилемеров, запущенных в 2002 г., описана в работах [3, 4]. Целью нашей статьи является сравнение результатов моделирования, выполненного в рамках рабочей версии оперативной модели Черного моря, с данными, полученными с помощью буев-профилемеров (в дальнейшем тексте статьи будем называть их *ARGO*-данными) в период с 2007 по 2008 гг. Необходимость выбора лучшей версии модели для ассимиляции в ней *ARGO*-данных по температуре и солености потребовала разработки определенной эвристической верификационной методики и создания специализированного программного обеспечения, которое в будущем может применяться к последующим версиям оперативной модели.

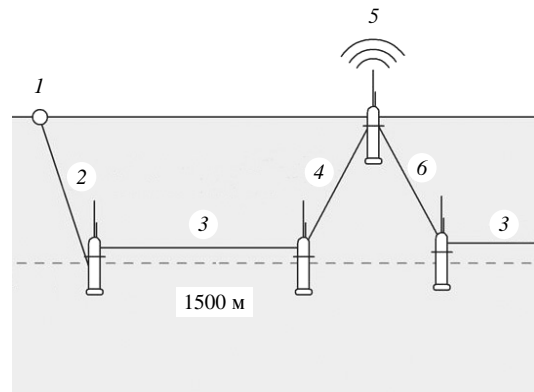


Рис. 1. Обобщенная циклограмма работы буя-профилемера *ARGO*: 1 – запуск буя; 2 – погружение; 3 – свободный дрейф (до 7 суток), 4 – всплытие (до 10 часов); 5 – дрейф на поверхности и передача сигнала (до 8 часов); 6 – погружение на глубину дрейфа;

**Данные, методы и инструменты.** В качестве исходных использовались данные о вертикальных распределениях температуры и солености в верхнем 1 400-метровом слое моря, измеренные на 71 горизонте с помощью четырех буев *ARGO*, оснащенных датчиками *SeaBird SBE-41 CTD*. На их основе был сформирован соответствующий 2007 – 2008 гг. анализируемый массив. Некоторые эксплуатационные параметры аппаратуры и характеристика выборки приведены в таблице. Глубина свободного дрейфа интересующих нас буев составляла 1 500 м. Технические параметры приборов можно найти на сайте корпорации *Sea-Bird Electronics, Inc.* (<http://www.seabird.com/alace.htm>).

Таблица. Некоторые характеристики буев и анализируемой выборки

Идентификационный номер ( <i>ID</i> ) буя <i>ARGO</i>	Координата начальной точки	Период эксплуатации (день/месяц/год)	Число станций в период с 2007 по 2008 гг.
4900489	41,88° с.ш., 29,58° в.д.	14/03/05 – 18/01/09	95
4900540	41,86° с.ш., 29,56° в.д.	14/03/05 – 02/10/08	84
4900541	42,13° с.ш., 30,25° в.д.	01/08/06 – 01/03/09	90
4900542	42,15° с.ш., 30,26° в.д.	25/07/06 – 23/12/09	86

*Термогидродинамическая модель.* В настоящее время в МГИ НАН Украины в квазиоперативном режиме функционирует система мониторинга

гидрофизических полей Черного моря, ядро которой составляют численная термогидродинамическая модель [1] и модуль ассимиляции альтиметрических данных [5]. Уравнения модели представляют собой систему примитивных уравнений, записанных в форме Громеки-Лэмба [1] для динамики океана в декартовой системе координат. Данный подход обеспечивает сохранение энергии и потенциальной энтропии в случае баротропного и бездивергентного движения [1]. Уравнение гидростатики позволяет более точно представить нелинейную зависимость плотности от температуры и солёности за счет непосредственного учета обмена кинетической и потенциальной энергии внутри ячейки [6]. На поверхности задаются 12-ти часовые поля тангенциального напряжения трения ветра, потоки тепла, осадки и испарения, полученные в рамках региональной атмосферной модели высокого разрешения (2,5 км) *ALADIN*, функционирующей при Национальной Метеорологической Администрации Румынии [7]. На дне и твердых боковых границах используются условия непротекания и прилипания для компонент вектора скорости, а также отсутствия потоков тепла и соли. На жидкой границе ставится условие Дирихле на входе и потоки импульса, тепла и соли – на выходе. Конечно-разностная аппроксимация реализуется по горизонтали на сетке *C* по классификации Аракавы [8] с шагом 5 км, что позволяет хорошо воспроизвести мезомасштабные процессы (характерный радиус деформации Россби в глубоководной части Черного моря составляет 20 – 25 км [9]). По вертикали – на 35-ти неравномерно распределенных по глубине горизонтах. Для аппроксимации по времени используется явная схема «чехарда» второго порядка точности с периодическим подключением схемы Мацуно. Турбулентный обмен импульсом и диффузия тепла и соли по горизонтали формализуются с помощью бигармонического оператора. В настоящей версии модели вместо используемого ранее турбулентного замыкания Филандера-Пакановски [10] для коэффициентов вертикальной турбулентности вязкости и диффузии применяется параметризация Меллора-Ямады 2.5 [11], которая позволяет более корректно описать летний прогрев приповерхностного слоя воды и непосредственно учесть интенсивное атмосферное воздействие в сезон зимних штормов. Эффективность включения такой параметризации в модель была изучена в работе [12].

*Процедура ассимиляции* данных спутниковых альтиметрических измерений [5] реализуется на основе теории фильтра Калмана. Для усвоения используются данные *ERS*, *TOPEX/POSEIDON*, *GFO*, *Jason*, *EnviSat*, прошедшие препроцессинг в центре космических исследований *AVISO* (Тулуза, Франция).

*Описание специализированного программного обеспечения.* Для первичной обработки *ARGO*-профилей температуры и солёности, полученных с сервера *USGODAE*, и их интерполяции были разработаны специализированные программы на языке *MATLAB*. Сначала была реализована пространственно-временная интерполяция модельных полей в точку, где измерялись профили. Затем *ARGO*-данные интерполировались на вертикальную сетку модели. Кроме пространственно-временной координации между телеметрией и численным расчетом, было выполнено преобразование данных в стандартный формат *CSV*, проведен их дополнительный контроль, а также по

каждой станции были построены изображения вертикальных профилей, предназначенные для качественного анализа.

Для количественной оценки степени близости данных моделирования и измерений, на языке *PHP* был реализован программный модуль с веб-интерфейсом. Такой подход обеспечивает следующие преимущества:

- универсальные и эффективные библиотеки функций для работы с файлами применяются для считывания и преобразования данных с предыдущего этапа и сохранения результатов верификации в формате, подразумевающим их последующее использование;

- наличие библиотеки математических функций позволяет проводить расчеты с достаточной точностью, используя внешние вычислительные мощности – удаленный сервер;

- подключение графической библиотеки *GD* снимает все ограничения на визуализацию результатов исследований, что важно при больших объемах поступающей информации и неравномерном ее пространственном распределении;

- веб-интерфейс обеспечивает доступ к инструментам и показателям верификации заинтересованным специалистам без необходимости изменения кода основной программы. Что, в свою очередь, позволяет размещать данные на удаленном сервере, повышая уровень их сохранности;

- в будущем это позволит применять методику сопоставления к произвольному набору данных, в том числе поступающих из различных источников в квазиоперативном режиме.

**Анализ полученных результатов.** Для каждого буя, данные которых использовались при выполнении работы, была проанализирована изменчивость профилей характеристик морской воды вдоль его трассы. В качестве примера на рис. 2 показана траектория движения буя № 4900542 в акватории Черного моря, а на рис. 3 – соответствующие диаграммы для температуры (см. рис. 3, *а*) и солёности (см. рис. 3, *б*) по траектории его дрейфа (см. рис. 2). Несмотря на то, что вариабельность определяется как временной, так и пространственной составляющей, в верхнем 50-метровом слое явно доминирует первая. Опираясь на структуру исходного массива данных, можно, прежде всего, судить о квазипериодической перестройке вертикальных термохалинных характеристик. Отчетливо видны процессы формирования особенностей поля температуры, типичных для Черного моря: зимних ячеек конвекции (в период с декабря по март) и термоклина (с апреля по ноябрь). По солёности в этом слое также прослеживается сезонный сигнал, который характеризуется временным сдвигом в фазе колебаний. Но он в большей степени маскируется перемещением буя в пространстве, за счет чего датчики, вероятно, фиксируют эпизодические интрузии речных вод. На разрезах четко идентифицируется холодный промежуточный слой, верхняя граница которого в зимний период поднимается к поверхности, и иногда, как, например, в феврале-марте 2008 г, на нее выходит.

В изменчивости слоя постоянного пикноклина 75 – 200 м, которую иллюстрирует разрез по солёности, на фоне пространственного сигнала сезонный – практически не просматривается. Глубже 200 м вариабельность температуры и солёности в целом резко падает. Это означает, что ее условное разделение на сезонную и пространственную составляющие теряет свой смысл.

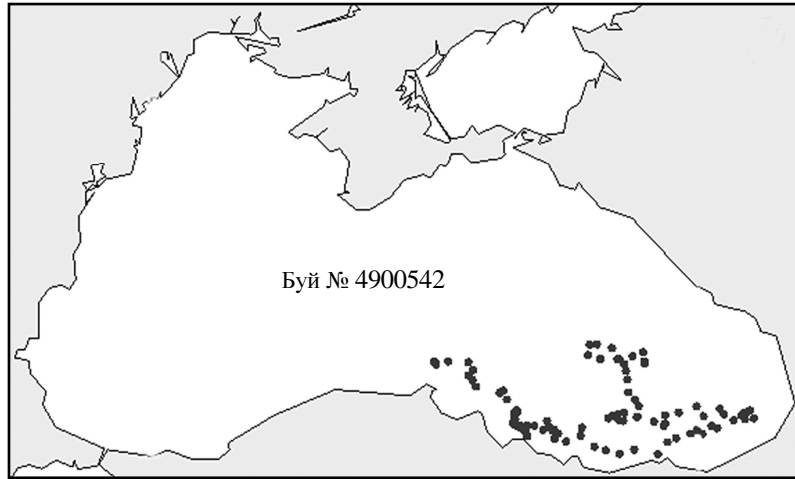


Рис. 2. Траектория дрейфа буя № 4900542 в акватории Черного моря.

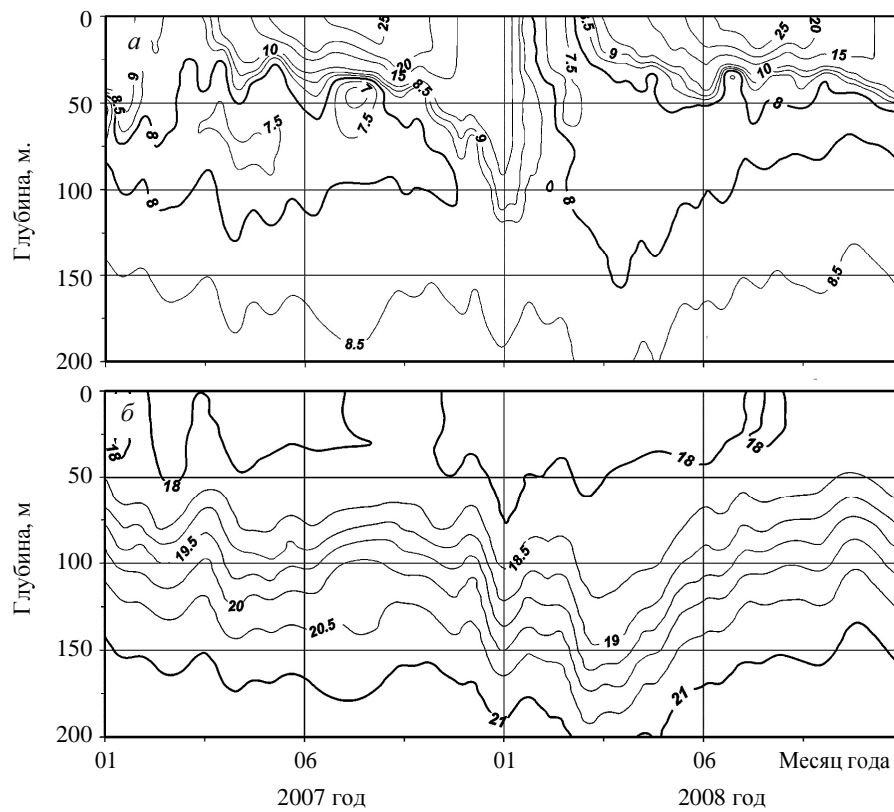


Рис. 3. Профили вдоль траектории дрейфа буя: *а* – температуры морской воды ( $^{\circ}\text{C}$ ); *б* – солёности морской воды ( $\text{‰}$ ).

Для сличения результатов моделирования с *ARGO*-профилями рассчитывались и сопоставлялись между собой среднеквадратичные отклонения (в дальнейшем тексте статьи будем обозначать их *RMS* – *root mean square*) и абсолютные разности в различных вариантах осреднения по пространству и времени. Целью графического представления итогов сравнения является получение простых и наглядных выводов на основе продуманного рендеринга сжатой информации. Так, понимание описанных в предыдущем параграфе физических механизмов изменчивости послужило основой для построения карт, на которых можно увидеть пространственную структуру полей *RMS*. При этом роль временной шкалы играет цветовая дифференциация.

На рис. 4 представлено соответствующее распределение для осредненных по слою 0 – 1 400 м *RMS* между модельными и *ARGO*-данными по температуре. Отчетливо видно, что по температуре модель приближается к показаниям датчиков на участках устойчивой циркуляции – вдоль турецкого побережья от г. Зонгулдак до г. Синоп, вдоль Кавказского побережья от Сочи до Новороссийска и далее вдоль изобаты 1 900 м в районе свала глубин Керченско-Таманского шельфа. Затем – вдоль Южного берега Крыма до центра западного циклонического круговорота. То есть, область низких значений *RMS* по температуре практически совпадает с интервалами устойчивости струи ОЧТ.

При этом данные наблюдений и модели незначительно различаются зимой и весной. Наибольшие отклонения характерны для районов палеodelьты рек Кызыл-Ирмак и Эшли-Ирмак, Батумского антициклона и центра западного круговорота. Подчеркнем, что максимальные отличия по температуре имеют место летом и осенью.

На рис. 5 приведена аналогичная карта по солености. Здесь уже не наблюдается явного разделения *RMS* по сезонам. По пространству низкими значениями характеризуется струя ОЧТ вдоль турецкого побережья и прикерченского шельфа. На фоне достаточно гладкого поля *RMS* выделяются три области с высокими значениями, которые, учитывая консервативный характер солености, требуют индивидуального изучения. Это – центральный район западной части моря, область Кызыл-Ирмакского антициклона и зона, находящаяся под непосредственным влиянием стока крупных кавказских рек – Риони и Чороха.

Представленные на рис. 4 и рис. 5 карты отражают свои интерактивные аналоги. Для формирования запроса используется *html*-форма, на выходе – изображение в необходимом формате. Разработанное программное обеспечение позволяет выбирать различные версии модели для сравнения, исследовать различные слои и месяцы, масштабировать карты с выводом необходимой информации по каждой станции. Кроме того, пользователю предоставляется выбор опций, которые дают возможность генерировать высококачественные изображения для печати.

Для того чтобы определить возможные причины отклонения модельных профилей от экспериментальных, *ARGO*-профили сопоставлены с модельными распределениями – см. рис. 6, после чего выполнен их визуальный анализ. Условно станции можно разделить на четыре группы. Рассмотрим профили температуры и солености, полученные на типичных станциях, принадлежащих к этим группам.

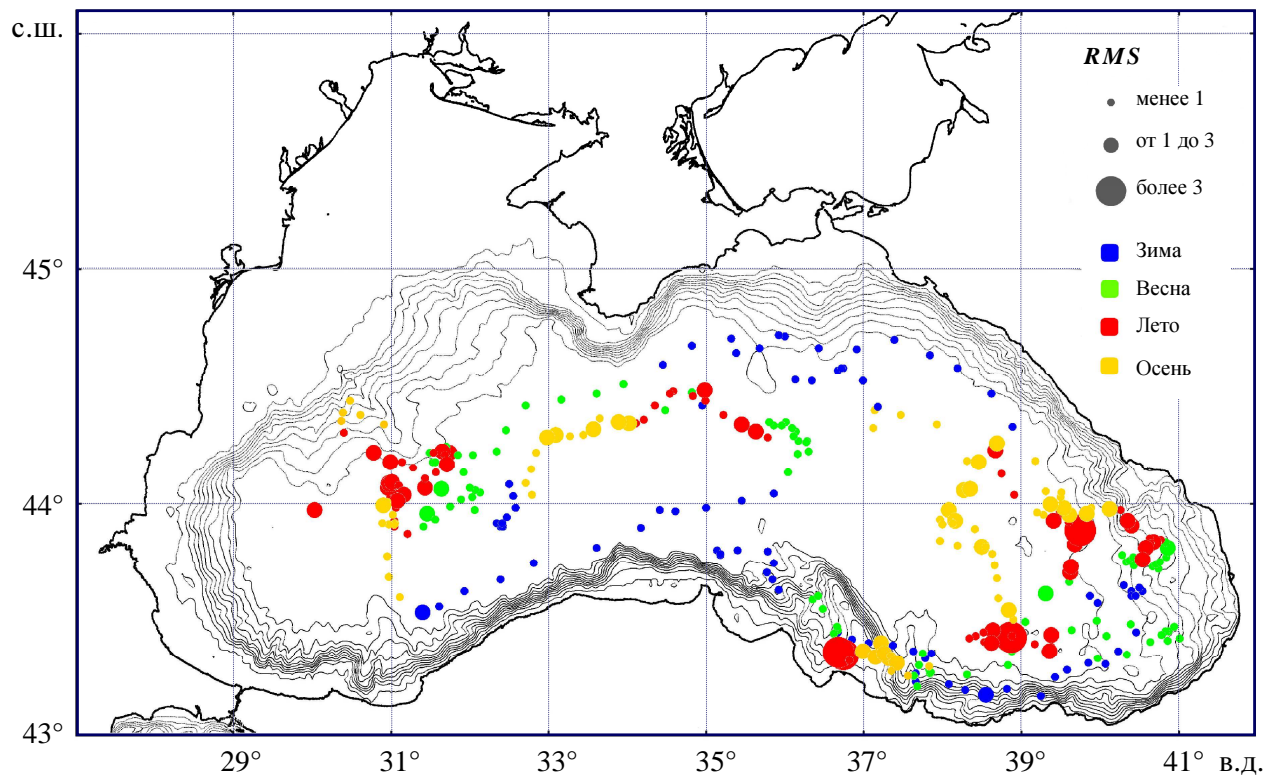


Рис. 4. Среднеквадратичные отклонения (*RMS*) модельных профилей температуры от *ARGO*-профилей. Изобаты проведены от 100 м с шагом 200 м.

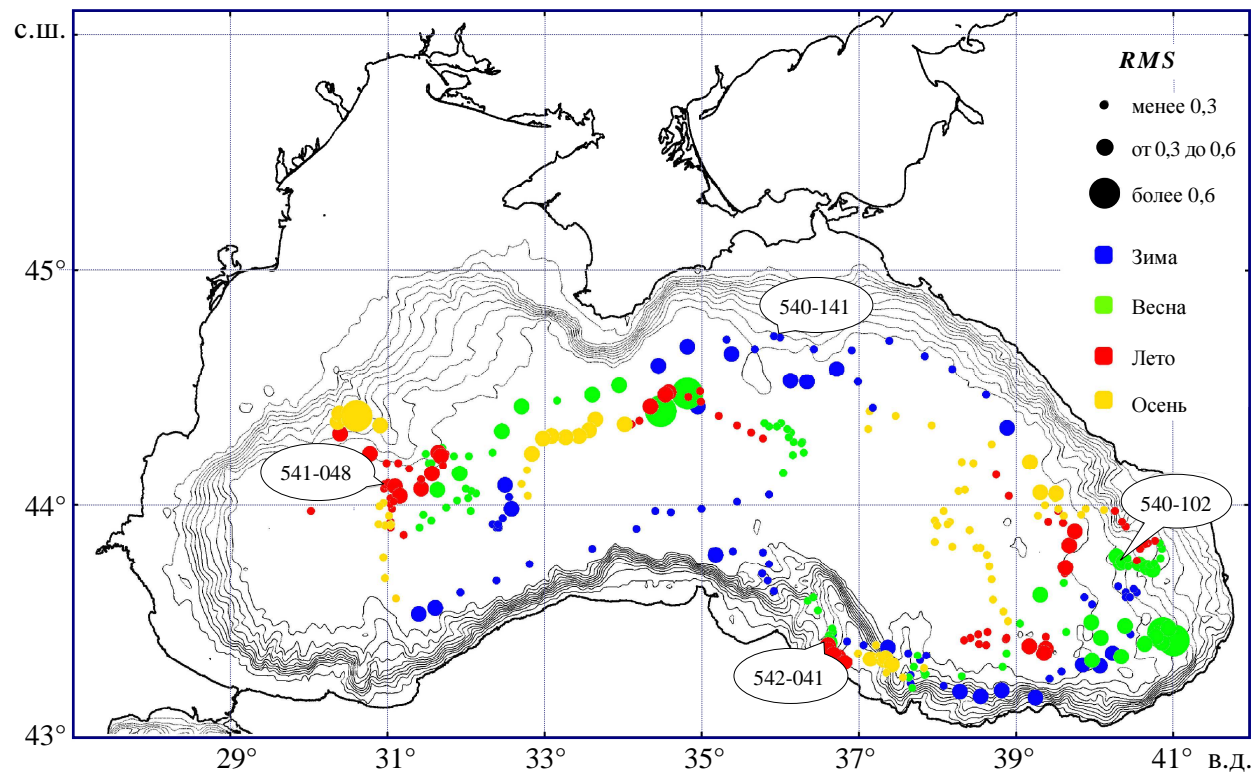


Рис. 5. Среднеквадратичные отклонения (*RMS*) модельных профилей солёности от *ARGO*-профилей. Изобаты проведены от 100 м с шагом 200 м. Цифрами в выносках обозначены номера буев-профилемеров (см. табл., последние три цифры идентификационных номеров) и номера точек их всплытия (станций).



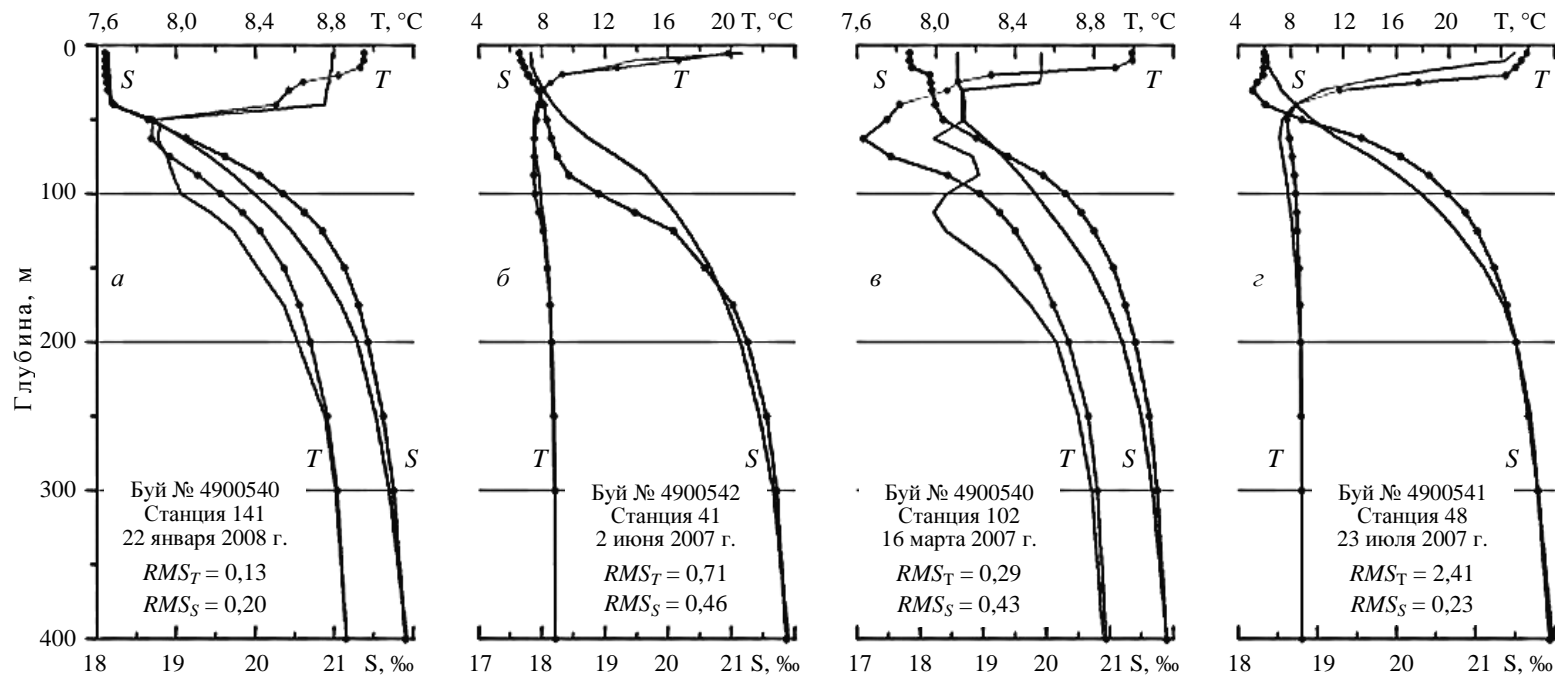


Рис. 6. Сопоставление модельных (—) и экспериментальных (—●—) профилей температуры и солёности для некоторых станций в акватории Чёрного моря. Номера станций – см. рис. 5.

На рис. 6, а приводится пример достаточно хорошего совпадения, которое имеет место для подавляющего количества измерений. Данный профиль 141 выполнен на свале глубин у Керченско-Таманского шельфа (см. рис. 5). Здесь модель правильно описывает не только глубинную водную массу, но и поверхностный слой, для которого характерен большой разброс значений. Подобные профили наблюдаются в немеандрирующем стрежне ОЧТ в зимний и весенний сезоны.

Рис. 6, б иллюстрирует процессы, происходящие в Кызыл-Ирмакском топографическом вихре (станция 41). Здесь в летние и весенние месяцы модель неверно позиционирует области максимальных градиентов постоянного галоклина и термоклина. Малые ошибки их определения ведут к большим отклонениям. Видно, что в данном случае модель обмеляет постоянный пикноклин примерно на 30 – 40 м.

На рис. 6, в приведены кривые, полученные на станции 102, находящейся в весенний период под прямым влиянием стока р. Риони – одной из крупнейших рек Кавказа. Возможно, в верхнем 70-ти метровом слое в численном эксперименте явно недооценено поступление пресной воды. Кроме того, модель завышает температуру ХПС на 0,4 °С и дает нереалистичную ступенчатую структуру профиля. Заметим, что положение верхнего локального температурного минимума, тем не менее, совпадает с реальным ядром ХПС.

Станция 48, которой соответствуют профили, приведенные на рис. 4, з, находится почти в центре западной части моря. Приведенные результаты относятся к летнему сезону. В верхнем 50-ти метровом слое на *ARGO*-солёности можно заметить слабый сигнал от максимального стока рек на северо-западном шельфе моря. Интересно, что в летний период он просматривается на нескольких близлежащих станциях, локализованных в области каньона Дуная. При этом временной сдвиг составляет около двух месяцев. Большое значение *RMS* по температуре объясняется небольшой ошибкой в позиционировании термоклина, который летом проявляется особенно резко. Отклонение модельного профиля солёности от *ARGO*-данных в слое 60 – 170 м, по-видимому, можно объяснить неточностями в параметризации обмена через пролив Босфор. Нетрудно заметить, что на всех приведенных станциях модель по сравнению с *ARGO*-данными дает несколько размытый по глубине постоянный галоклин.

Для количественной оценки близости модельных результатов и натуральных данных в терминах *RMS*, учитывая ее зависимость от глубины, мы разделили водный столб на четыре слоя:

- наиболее подверженный атмосферному воздействию поверхностный слой 0 – 15 м ;
- слой сезонного термоклина 15 – 60 м;
- слой постоянного пикноклина 60 – 100 м;
- глубинный слой 100 – 1500 м.

Затем рассчитали послойно *RMS* по температуре и солёности по двум временным интервалам: зима-весна и лето-осень. Результаты расчетов представлены на рис. 7.

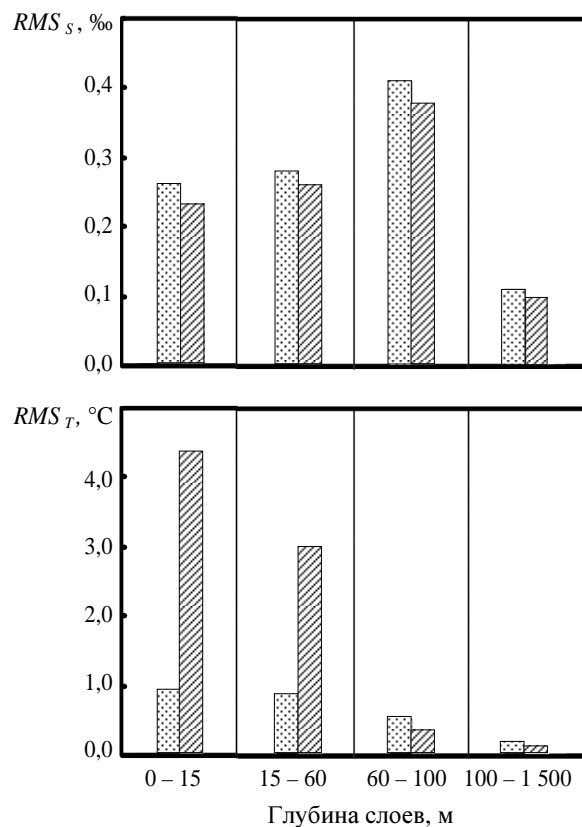


Рис. 7. Вертикальная структура среднеквадратичных отклонений ( $RMS$ ) по солености и температуре: – зима-весна; – лето-осень.

изведения термохалинной структуры слоя глубинных вод Черного моря – достаточно высока.

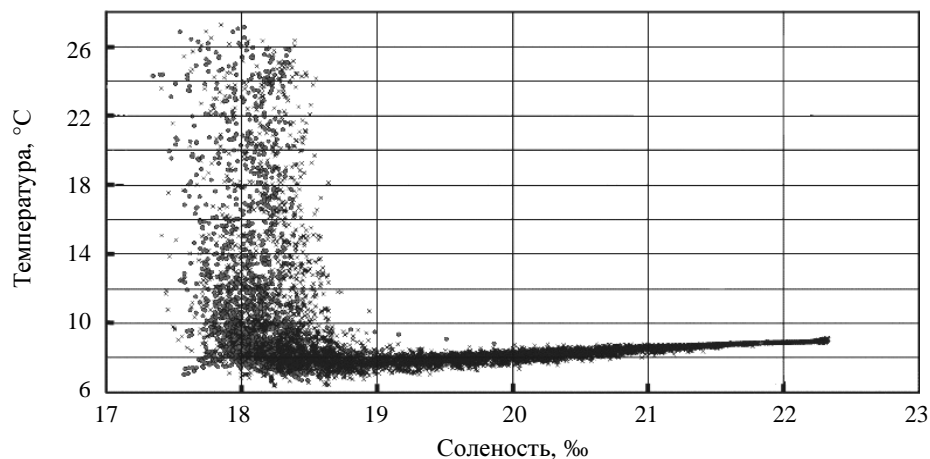


Рис. 8. Сравнение модельных и натуральных данных в  $T-S$  осях:  $\times$  – модельные данные;  $\bullet$  –  $ARGO$ -данные.

Как и ожидалось в соответствии с выводами работы [4], наибольшими невязками по температуре характеризуется слой 0–15 м в летне-осенний период. Точность воспроизведения температуры моделью растет с глубиной. Расхождения по солености практически не зависят от времени года. При этом, слой постоянного пикноклина 60–100 м демонстрирует максимальные значения  $RMS$ .

На рис. 8 приводится накопленная  $T-S$  диаграмма, которая позволяет оценить близость результатов моделирования и  $ARGO$ -данных в терминах абсолютных отклонений. Видно, что модель незначительно (в среднем примерно на 0,2 ‰) завышает соленость поверхностного слоя. При этом, точность модельного воспроиз-

Суммируя все вышесказанное, можно сказать, что:

1. Функционирующая в МГИ НАН Украины система мониторинга гидрофизических полей Черного моря в квазиоперативном режиме удовлетворительно воспроизводит *ARGO*-профили температуры и солёности.

2. В смысле абсолютных отклонений улучшенная версия модели имеет тенденцию к незначительному завышению солёности в поверхностном слое. При этом модель достаточно точно описывает термохалинный режим глубинных вод Черного моря.

3. Наилучшее согласие в терминах *RMS* модельных результатов и натурных данных имеет место в зоне устойчивого потока ОЧТ в зимний и весенний период.

4. Наибольшие отклонения характерны для района со сложным рельефом дна (Кызыл-Ирмакский топографический вихрь), для зоны, находящейся под прямым влиянием стока крупных кавказских рек (Риони и Чороха), а также для акватории, где эти два фактора накладываются друг на друга. Речь идет о станциях, находящихся в центре западного круговорота в каньоне Дуная, которые чувствительны к остаточному распределяющему сигналу от стока рек северо-западного шельфа.

5. Основной причиной увеличения *RMS* профилей является незначительная ошибка позиционирования границы сезонного термоклина (отсюда повышенные значения *RMS* летом и осенью) и постоянного пикноклина. Значимость этой ошибки особенно высока для Черного моря, так как именно положение постоянного пикноклина регулирует структуру оптических слоев и экологических компонент.

6. Предложенная в работе методика верификации и разработанное специализированное программное обеспечение могут быть использованы для сравнения данных буев-профилемеров с другими версиями модели, в том числе после процедуры усвоения *ARGO*-данных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьяшев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неравным дном на сетке *C* // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М.: ИВМ РАН. – 1992. – С. 163-231.
2. Korotaev G., Oguz T., Riser S. Intermediate and deep currents of the Black Sea obtained from autonomous profiling floats // Deep-Sea Res. – 2006. – 53. – P. 901-910.
3. Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К. Валидация результатов моделирования циркуляции Черного моря на основе данных всплывающих буев // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа / Дистанционное зондирование морских экосистем. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2004. – вып. 11. – С. 63-74.
4. Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К., Мартынов М.В., Ратнер Ю.Б. Система мониторинга гидрофизических полей Черного моря в квазиоперативном режиме // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа / Дистанционное зондирование морских экосистем. – Севастополь: «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2004. – вып. 11. – С. 9-24.

5. *Korotaev G.K., Saenko O.A., Koblinsky C.J.* Satellite altimetry observations of the Black Sea level // Journ. Geoph. Res. – 2001. – v.106, № C1. – P. 917-933.
6. Демышев С.Г. Аппроксимация силы плавучести в численной модели бароклинных течений океана. // Известия РАН: Физика атмосферы и океана. – 1998. – т. 34, № 3. – С. 404-412.
7. *Stefanescu S., Cordoneanu E., Kubryakov A.* Ocean wave and circulation modeling at NIMN Romania // Roman. J. Meteor. – 2004. – v. 6, № 1-2. – P.75-88.
8. *Arakawa A.* Computational design for long-term numerical integration of the equations of fluid motion: Two-dimensional incompressible flow. Part I // J. Comput. Phys. – 1966. – 1. – P. 119-143.
9. *Дорофеев В.Л., Демышев С.Г., Коротаев Г.К.* Вихререзающая модель циркуляции Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2001. – С. 73-82.
10. *Pacanowski R.C., Philander S.G.H.* Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans // J. Phys. Oceanogr. – 1981. – v. 11, № 11. – P. 1443-1451.
11. *Mellor G.L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. and Space Phys. – 1982. – v. 20, № 4. – P. 851-875.
12. *Багаев А.В., Демышев С.Г.* Климатическая циркуляция Черного моря по результатам численного моделирования с использованием параметризации Меллора-Ямады 2.5 для коэффициентов вертикальной турбулентности вязкости и диффузии // Морской гидрофизический журнал. – 2011. – № 3. – С. 66-76.

Материал поступил в редакцию 16.01.2011 г.

После доработки 10.06.2011 г.