

Математическое моделирование морских систем

УДК 561.465

Ю.Б. Ратнер, А.И. Кубряков, А.Л. Холод, Т.М. Баянкина,
М.В. Иванчик

Использование данных измерений с дрейфующих буев SVP-BTC и Argo для валидации результатов прогноза температуры воды в прибрежной области Черного моря

В работе проводится оценка достоверности прогноза полей температуры в прибрежной области Черного моря. Прогностические поля получены с помощью модели циркуляции с высоким разрешением, функционирующей с использованием технологии вложенных сеток. Качество прогноза оценивается на основе сопоставления модельных данных с данными контактных измерений дрейфтеров SVP-BTC и буев-профилемеров Argo. Получены оценки среднего и среднеквадратического отклонений результатов прогноза температуры на 3 сут от данных наблюдений. Вне слоев залегания термоклина и холодных промежуточных вод абсолютная величина среднего отклонения результатов прогноза на 3 сут не превышает $0,2^{\circ}\text{C}$ при сравнении с данными профилемеров Argo и $0,5^{\circ}\text{C}$ при сравнении с данными дрейфтеров SVP-BTC. Величина среднеквадратического отклонения равна $0,9^{\circ}\text{C}$ при сравнении с данными профилемеров Argo и $0,7^{\circ}\text{C}$ при сравнении с данными дрейфтеров SVP-BTC.

Ключевые слова: локальная модель циркуляции, буйковые измерения, морской прибрежный прогноз.

Введение. В настоящее время на базе Морского гидрофизического института НАН Украины функционирует Национальный экспериментальный центр морских прогнозов (ЭЦМП), основным элементом которого является система *Marine Coastal Forecasting System (MCFS)*, предназначенная для прогноза состояния вод. С ее помощью выполняются прогнозы температуры и солености морской воды, скоростей течений и динамического уровня морской поверхности с заблаговременностью до 3 сут и пространственным разрешением 1 км. В качестве исходных данных, необходимых для задания начальных и граничных условий, требуемых для выполнения прогнозов, в системе MCFS используются результаты прогноза состояния вод Черного моря с пространственным разрешением 5 км, поступающие из Международного центра морских прогнозов *BS MFC (Black Sea Marine Forecasting Centre)*, действующего в составе Европейской системы центров морских прогнозов *MyOcean* [1 – 3].

В настоящей работе приводятся результаты оценки достоверности прогностических полей температуры, основанной на сопоставлении рассчитанных величин, полученных с помощью системы MCFS, с данными контактных измерений дрейфтеров SVP-BTC и буев-профилемеров Argo. Разработка и создание систем морских прибрежных прогнозов, выделенных из региональных

© Ю.Б. Ратнер, А.И. Кубряков, А.Л. Холод, Т.М. Баянкина, М.В. Иванчик, 2014

ISSN 0233-7584. Мор. гидрофиз. журн., 2014, № 5

33

прогностических систем, обусловлены необходимостью учета специфических особенностей морской прибрежной зоны, среди которых можно отметить относительно малые глубины, большую неравномерность рельефа дна, речной сток. Эти особенности приводят к изменению роли и значения различных физических процессов по сравнению с открытыми областями глубоководного моря. В частности, в прибрежных акваториях придонное трение играет более важную роль по сравнению с открытым морем; имеют место большие вариации температуры и относительно большие градиенты солености, температуры и плотности вследствие распреснения речными водами; ветровые течения испытывают сильное влияние берега, приводящее к возникновению апвеллингов и штормовых нагонов. В то же время прибрежную область нельзя рассматривать вне ее связи с открытыми прилегающими областями моря. Иногда интенсивные течения, проходящие над континентальным склоном, оказывают большое воздействие на прибрежные воды. В процессе меандрирования таких течений воды открытого моря могут вторгаться в прибрежную область или, наоборот, прибрежные воды могут захватываться образовавшимися рингами и уноситься в открытое море.

Для того, чтобы учесть все перечисленные выше особенности, расчеты необходимо выполнять с более высоким пространственным разрешением, чем для всего бассейна Черного моря в целом, поскольку именно прибрежные акватории представляют наибольший интерес, с одной стороны, из-за максимальной биологической продуктивности, а с другой, – из-за максимальной антропогенной нагрузки. При этом возникает потребность получения информации о гидрологическом режиме в прибрежных зонах в связи с необходимостью создания систем мониторинга и контроля загрязнения акваторий, в частности, нефтяных разливов. Такая информация нужна для предотвращения и минимизации ущерба в результате аварий, а также для систем интегрированного управления прибрежной зоной, предполагающих разработку и осуществление скоординированной стратегии по размещению экологических, социокультурных и промышленных ресурсов для сохранения, восстановления и устойчивого развития прибрежной зоны [4]. Одним из путей решения этой проблемы является создание локальных моделей циркуляции с высоким разрешением и применением технологии вложенных сеток. Эта технология давно используется в метеорологии и в последнее время успешно применяется в самых разных океанологических задачах [5 – 11]. Эта же технология была использована нами при разработке и создании системы морских прибрежных прогнозов [12, 13].

Поскольку любая модель не может охватить все многообразие физических процессов, протекающих в море, то рассчитанные данные будут, как правило, отличаться от реальных, в качестве которых мы будем понимать данные непосредственных измерений тех или иных параметров среды. Отклонение модельных данных от реальных зависит как от качества используемой модели, так и от качества данных о начальном состоянии, поступающих в модель. Важной составной частью любой системы прогноза является подсистема валидации прогнозируемых данных, с помощью которой можно получать оценки достоверности модельного прогноза и контролировать его качество на основе сопоставления с реальными данными.

В настоящей работе проводится сопоставление прогностической температуры, полученной с помощью модели, с данными контактных измерений дрейфтеров *SVP-BTC* и буев-профилемеров *Argo* в прибрежной области Черного моря.

Краткое описание локальной модели, используемой для выполнения морских прибрежных прогнозов. Разработанная локальная модель с высоким разрешением [14] представляет собой адаптированную к условиям Черного моря модификацию австралийской версии [15] модели океанической циркуляции Принстонского университета (*Princeton Ocean Model – POM*) [16]. Модель *POM* основана на полной системе уравнений термогидродинамики океана со свободной поверхностью в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости жидкости. В этой модели используется «спрямленная» система координат, или σ -координатная система с нормировкой вертикальной координаты на глубину океана.

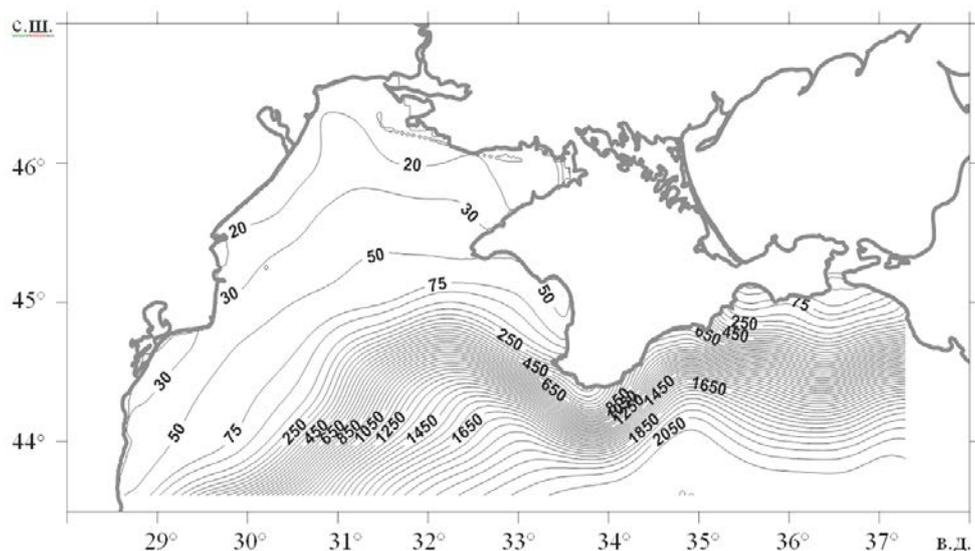
Преимуществом моделей в σ -координатах является сглаженное представление топографии дна, которое, ко всему прочему, дает возможность более точно описать физику процессов в придонном пограничном слое. Адекватное пространственное разрешение поверхностного и придонного слоев также представляет собой значительное преимущество σ -координатных моделей [17], при этом единственным нежелательным элементом при хорошем разрешении поверхностного слоя в глубоководной части моделируемой области будет некоторое избыточное разрешение этого слоя в мелководных частях [18]. Кроме того, модели в σ -координатах позволяют использовать гораздо более низкие значения горизонтальной вязкости и диффузии [19], чем модели в z -координатах, а ошибки в z -координатных моделях, обусловленные вязкостью, могут в мелководных областях значительно превосходить ошибки в градиентах давления в σ -координатных моделях.

Для параметризации вертикального перемешивания в модель циркуляции *POM* включена модель турбулентности, основанная на гипотезах турбулентности Ротта – Колмогорова и обобщенная Меллором и Ямадой [20] на случай стратифицированного потока. В этой модели учитывается проникновение коротковолновой солнечной радиации в толщу вод, которое параметризуется, следуя работам [21, 22].

При реализации задачи нами использовалась технология вложенных сеток без обратной связи (*one-way nested grid model*) [14], что позволяет проводить расчеты для всего моря и выбранного региона независимо друг от друга и дает выигрыш во времени при эксплуатации системы мониторинга и прогноза гидрофизических полей в оперативном режиме.

Данные, необходимые для задания начальных и граничных условий локальной модели, поступают из массивов результатов глобальных прогностических расчетов через выходные интерфейсы *BS MFC* [23] и затем трансформируются таким образом, чтобы как можно более точно учесть обмен теплом, солью и импульсом между водами, лежащими в пределах рассматриваемого прибрежного района, и водами, принадлежащими остальной части Черноморского бассейна [14]. Следует отметить, что поскольку локальная прибрежная модель имеет более высокое пространственное разрешение, то с ее

помощью значительно лучше аппроксимируются рельеф дна и береговая черта рассматриваемой области, что позволяет проводить расчеты для примыкающих к берегу областей моря, которые не охватываются крупномасштабной моделью. Расчетная область локальной модели показана на рис. 1.



Р и с. 1. Расчетная область и рельеф дна (м) локальной модели

Основные характеристики используемых локальной и глобальной моделей приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Основные характеристики локальной и глобальной моделей

Характеристики	Модель МГИ с процедурой усвоения данных	Модель POM
Расчетная область	Бассейн Черного моря	Прибрежная зона (43,6189 – 46,5077° с. ш., 28,5122 – 37,3122° в. д.)
Вертикальные координаты	z -координаты	σ -координаты
Шаг сетки по горизонтали	~ 4900 м	~1000 м
Число узлов	237 × 131 × 38	719 × 324 × 18
Шаг по времени	5 мин	1 мин (бароклинная мода) 1,5 с (баротропная мода)

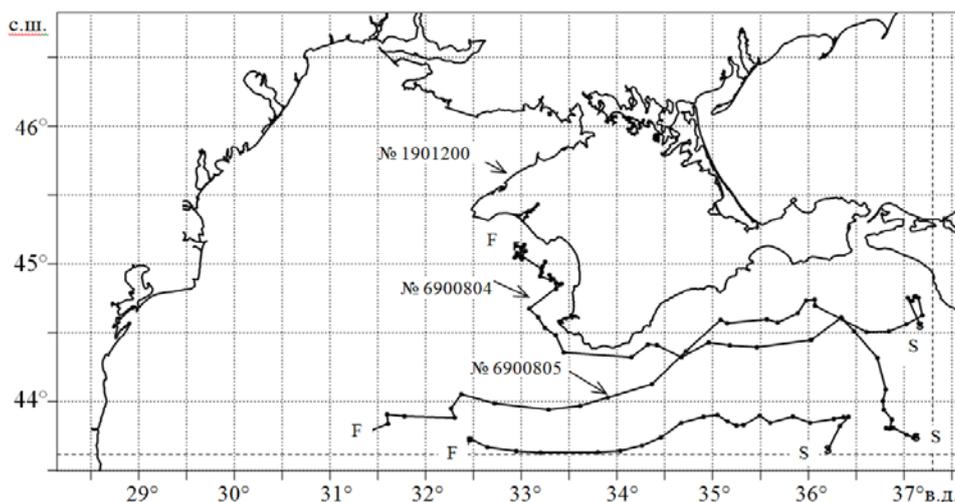
Локальные морские прогнозы выполняются ежедневно сроком на 3 сут в стандартные метеорологические сроки 0, 6, 12 и 18 ч Всемирного координированного времени (*UTC*).

Данные измерений. Для сопоставления с модельными данными используются вертикальные профили и временные ряды температуры морской воды, полученные вдоль траекторий движения дрейфтеров *SVP-BTC* и буев-профилемеров *Argo*. Следует отметить, что относительно малый объем имеющихся данных контактных измерений и их неравномерное распределение по акватории Черного моря затрудняют получение оценок достоверности прогнозов для всей рассматриваемой акватории. Важным преимуществом исследований с помощью буев-профилемеров *Argo* и дрейфтеров *SVP-BTC* является возможность проводить измерения в толще моря, а не только на его поверхности. И, кроме того, контактные измерения до сих пор остаются наиболее точной информацией о состоянии морской среды.

Данные измерений с буев-профилемеров *Argo* и дрейфтеров *SVP-BTC* различны по структуре и составу. Так, с помощью буев-профилемеров *Argo* измеряются температура и соленость морской воды. Дрейфтеры *SVP-BTC* предназначены только для измерения температуры морской воды. Обладая сопоставимыми характеристиками точности измерений температуры воды, буи *Argo* и *SVP-BTC* существенно различаются по таким важным параметрам, как частота и предельная глубина измерений. Используемые в 2012 – 2013 гг. буи-профилемеры *Argo* позволяли выполнять измерения до глубин 1500 м с периодичностью 1 раз в 5 сут. Периодичность измерений температуры дрейфтером *SVP-BTC* составляет 1 раз в час, измерения выполняются до глубин 80 м. Периоды времени проведения измерений буями-профилемерами *Argo* и дрейфтерами *SVP-BTC* в районе выполнения локальных прогнозов существенно различаются.

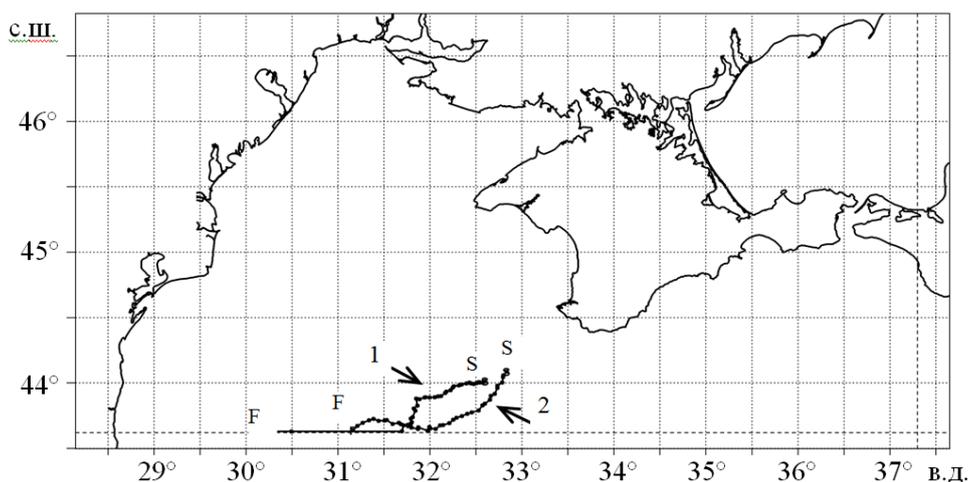
Запуск буев-профилемеров *Argo* и распространение данных измерений обеспечиваются Черноморским подразделением тематического центра подготовки данных контактных измерений (г. Варна, Болгария), функционирующим в составе Европейской системы центров морских прогнозов *MyOcean* [23]. Информация о технических характеристиках буев-профилемеров, организации хранения и доступе к данным приведена в [23]. В период 2012 – 2013 гг. в акватории Черного моря дрейфовали 12 буев-профилемеров *Argo*. Однако в районе выполнения локальных прогнозов в указанный период времени находились только 3 буя-профилемера № 1901200, 6900804 и 6900805. Их траектории движения показаны на рис. 2.

Всего за период 2012 – 2013 гг. было получено 77 профилей температуры и солености. Измерения выполнялись на глубинах от 5 до 1500 м на различных горизонтах, неравномерно расположенных по глубине. Максимальное количество горизонтов – 82.



Р и с. 2. Траектории движения буй-профилемеров *Argo* (буквами *S* и *F* обозначены соответственно точки начала и конца траекторий)

Буй-профилемер № 6900804 находился в исследуемом районе с 17 января по 1 июля 2013 г. Буй-профилемер № 6900805 пересекал район выполнения локальных прогнозов с 13 января по 6 июня 2012 г. Буй-профилемер № 1901200 проводил измерения в районе выполнения локальных прогнозов с 19 апреля 2012 г. по 22 февраля 2013 г. При этом с августа 2012 г. он находился в одном и том же небольшом районе у западного берега Крыма с координатами 32,9 – 33,4° в. д. и 44,3 – 45,1° с. ш., в котором глубины не превышают 100 м. Это значение глубины не соответствует номинальному уровню, необходимому для нормального функционирования буй-профилемеров *Argo*. Поэтому измерения, выполненные с августа 2012 г. по февраль 2013 г., были исключены из рассмотрения из-за высокой вероятности их недостоверности. Изготовление, запуск дрейфтеров *SVP-BTC* в Черном море и распространение данных измерений обеспечиваются научно-производственной фирмой «Марлин-Юг» [24] и Морским гидрофизическим институтом при поддержке ряда международных проектов, направленных на изучение Черного моря и Мирового океана [25, 26]. С помощью дрейфтеров *SVP-BTC* выполняются измерения температуры морской воды с периодичностью 1 раз в час на номинальных горизонтах 0, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 и 80 м. Из-за различия скоростей дрейфа буя и течений морской воды на разных глубинах реальные горизонты расположения датчиков температуры, как правило, отличаются от номинальных. Реальные глубины выполнения измерений оцениваются с помощью специального дополнительного датчика, функционирующего в составе измерительной аппаратуры дрейфтера *SVP-BTC*. Технология обработки и контроля качества данных измерений с дрейфтеров *SVP-BTC* описана в работах [24 – 26]. Для выполнения валидации были использованы данные дрейфтера № 249940. Первый цикл измерений в рассматриваемом районе выполнялся с 14 по 29 декабря 2012 г., а второй – с 19 по 29 сентября 2013 г. Траектории движения дрейфтера в периоды первого и второго циклов выполнения измерений показаны на рис. 3.



Р и с. 3. Траектории движения дрейфтера *SVP-BTC* № 249940: 1 – период выполнения первого цикла измерений; 2 – период выполнения второго цикла измерений (буквами *S* и *F* обозначены соответственно точки начала и конца траекторий)

Подготовка данных для сопоставления. Данные расчетов и измерений, как правило, не совпадают по времени и пространству, поэтому для выполнения валидации локальных прогнозов необходимо сформировать совместную выборку данных, включающих в себя результаты прогностических расчетов и данные контактных измерений. Процедура формирования такой совместной по времени и пространству выборки заключалась в следующем.

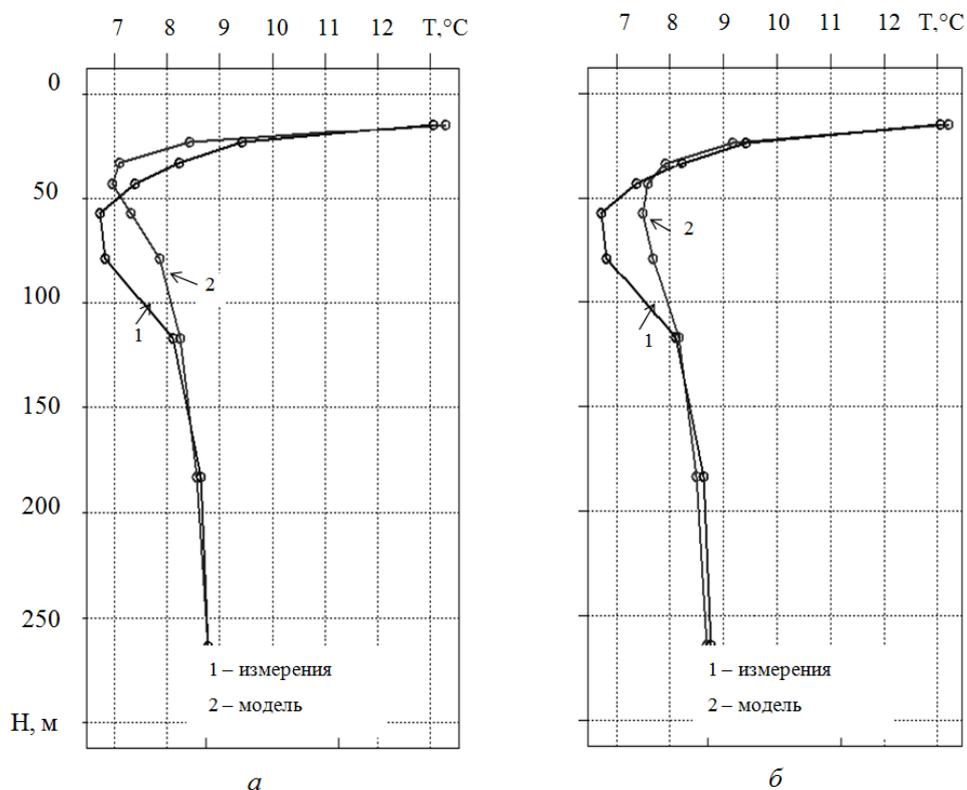
По времени. Так как результаты расчетов записывались через каждые 6 ч в стандартные метеорологические сроки (0, 6, 12 и 18 ч *UTC*), а измерения буями-профилемерами *Argo* выполнялись в произвольные моменты времени, то данные прогностических расчетов линейно интерполировались по времени на моменты проведения измерений *in situ*. Для данных измерений дрейфтера *SVP-BTC* интерполяция не требуется, так как они производились каждый час.

По горизонтали. Результаты прогноза, полученные в узлах расчетной сетки с шагом около 1 км по широте и долготе, билинейно интерполировались в точки выполнения измерений *in situ*.

По вертикали. Число уровней по глубине, на которых выполнялись контактные измерения, значительно больше числа σ -слоев модели. Толщины этих слоев различны в каждой точке акватории, где производились измерения, поэтому по вертикали были получены оценки средних значений данных измерений в каждом σ -слое. Эти оценки рассчитывались как отношение одномерных интегралов по глубине от измеренных величин в пределах каждого σ -слоя модели к толщине этого слоя. Интегрирование проводилось по методу трапеций.

В результате выполнения перечисленных этапов обработки данных были сформированы два массива данных (измеренных и модельных), совпадающих по пространству и времени. Сопоставление и оценка статистических характеристик отклонений результатов прогноза от измерений проводились с использованием этих массивов.

Сопоставление результатов прогностических расчетов температуры морской воды с данными измерений буев-профиломеров *Argo*. На рис. 4 приведены примеры сопоставления одного и того же измеренного профиля температуры морской воды, полученного 13 июня 2012 г. с помощью буя-профиломера № 1901200, и рассчитанных профилей на тот же момент времени для прогнозов на 25 ч (рис. 4, *а*) и 49 ч (рис. 4, *б*).



Р и с. 4. Сопоставление прогностических значений температуры воды с одним и тем же профилем, полученным по данным измерений с буя-профиломера *Argo* № 1901200 13 июня 2012 г. в 01 ч 07 мин *UTC* в районе с координатами 44,5° с. ш., 36,5° в. д., для следующих сроков прогнозов: *а* – 25 ч; *б* – 49 ч

Прежде всего, отметим большие расхождения как в глубине залегания, так и в интенсивности холодного промежуточного слоя (ХПС) для суточного прогноза (рис. 4, *а*). По данным измерений толщина ХПС составляет около 80 м, при этом его ядро расположено примерно на глубине 60 м, тогда как расчет дает величину толщины ХПС около 60 м с ядром на глубине около 43 м. И хотя температура в ядре ХПС измеренного профиля отличается менее чем на 0,3°C по сравнению с температурой в ядре ХПС модельного профиля, значительные различия в структуре ХПС приводят к большим (до 1°C) расхождениям в температуре в слое его расположения. Выше и глубже ХПС имеет место достаточно хорошее соответствие между модельными и изме-

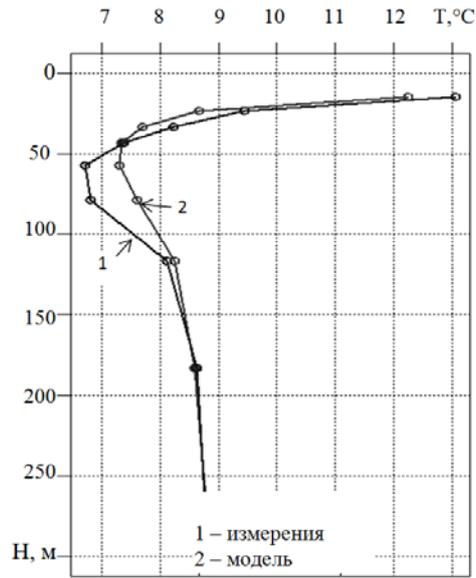
ренными величинами. Сопоставление профилей температуры для двухсуточного прогноза (рис. 4, б) дает аналогичную величину расхождений в значениях температуры в слое ХПС, однако здесь толщина ХПС и глубина залегания его ядра практически совпадают. Вне ХПС также наблюдается удовлетворительное соответствие результатов модельных расчетов и данных измерений.

Проведенный анализ показал, что основной причиной расхождения в структуре вертикальных профилей измеренной и рассчитанной температуры являются отклонения начального профиля, задаваемого для проведения расчета, от реального. На рис. 5 представлен тот же измеренный профиль температуры и профиль температуры, поступающий из глобальной модели для того же момента времени в качестве начального профиля для выполнения прогноза по локальной модели.

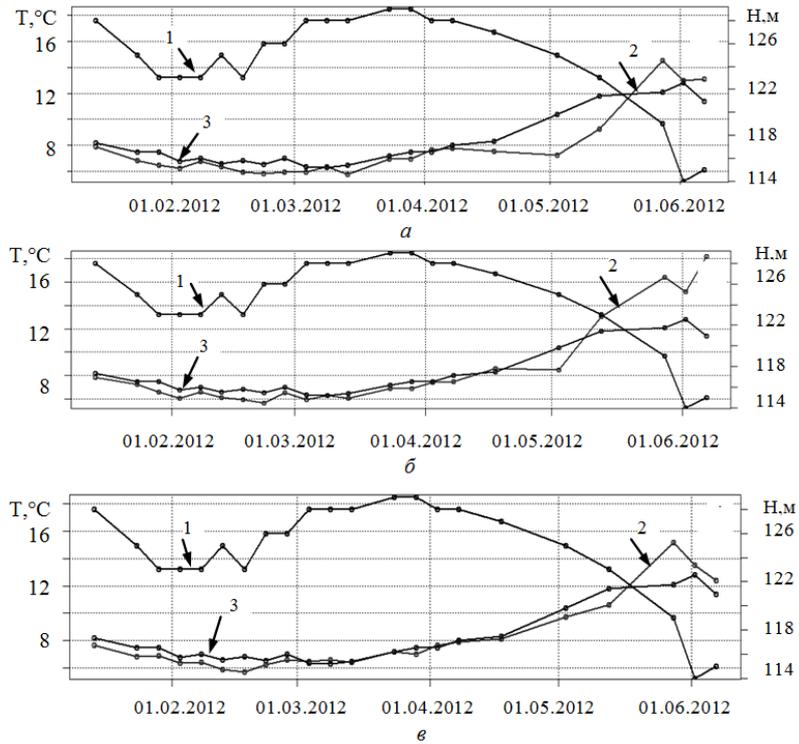
Видны аналогичные расхождения в структуре профилей температуры, наблюдаемые при суточном прогнозе: прежде всего в глубине залегания, толщине и холодозапасе ХПС. Локальная гидродинамическая модель не нивелирует такие расхождения при проведении прогностического расчета на 3 сут.

При анализе всех 77 профилей выявлены как случаи удовлетворительно-го соответствия между прогностическими и измеренными величинами, так и случаи с достаточно большими отклонениями. Дополнительную информацию о характере отклонений дают временные ряды рассчитанных и измеренных значений. Временной ряд температуры воды в пределах второго σ -слоя модели представлен на рис. 6. Этот слой выбран ввиду того, что изменение глубины его залегания вдоль траектории буя незначительно – в пределах 13 м. Видно, что до середины апреля разность между рассчитанными и измеренными величинами температуры морской воды мала по абсолютной величине для всех прогностических сроков. Однако с начала мая она становится более существенной, что, по-видимому, связано с началом формирования сезонного термоклина. Отметим немонотонность поведения величин отклонений между рассчитанными и измеренными значениями при увеличении срока прогноза в мае – июне 2012 г. Наилучшие результаты имеют место при наибольшем сроке прогноза (рис. 6, в). Такой характер поведения отклонений между прогностическими и измеренными величинами наблюдается и в ряде других случаев сопоставления.

Статистические характеристики отклонений рассчитывались для всех трех буюв-профилемеров и трех прогностических сроков (0 – 24; 24 – 48 и 48 – 72 ч). В качестве примера в табл. 2 приведены данные для буюв-профилемера № 6900805 и интервала прогноза 48 – 72 ч. Для этого буюв перепады глубин лежат в гораздо более узких диапазонах по сравнению с двумя другими, и здесь оценки, полученные для σ -слоев, имеют такую же информативность, как и для фиксированных уровней по глубине.



Р и с. 5. Сопоставление того же измеренного профиля температуры, что и на рис. 4 (кривая 1), и профиля, поступающего из глобальной модели для того же момента времени в качестве начального профиля для проведения прогностического расчета по локальной модели (кривая 2)



Р и с. 6. Изменение со временем прогностических и измеренных 13 января – 6 июня 2012 г. значений температуры воды в пределах второго σ -слоя модели вдоль траектории буя-профилятора *Argo* № 6900805 для следующих сроков прогнозов: *a* — 17–19 ч; *б* — 41–43 ч; *в* — 67–69 ч (1 – измерения; 2 – прогноз; 3 – изменение глубины залегания σ -слоя модели вдоль траектории буя)

**Статистические характеристики отклонений между прогностическими
и измеренными значениями температуры морской воды
для буя-профилемера *Argo* № 6900805**

Номер σ -слоя	Глубина, м		Число измерений	Среднее отклонение температуры, °С	СКО температуры, °С
	min	max			
2	11,4	12,9	22	-0,124	0,887
3	21,0	23,6	22	0,127	0,815
4	34,3	38,6	22	0,488	0,725
5	53,4	60,0	22	-0,188	0,734
6	76,3	85,8	23	-0,302	0,269
7	99,2	111,5	23	-0,187	0,129
8	131,6	148,0	23	-0,057	0,079
9	181,2	203,7	23	-0,016	0,053
10	267,1	300,2	23	-0,005	0,021
11	419,7	471,8	24	-0,006	0,014
12	607,7	679,8	6	0,008	0,019
13	795,6	890,0	6	0,021	0,021
14	981,6	1098,0	6	0,036	0,023

Из приведенных результатов видно, насколько малым является объем совместных выборок данных, используемых для оценки статистических характеристик отклонений между измеренными и прогностическими значениями температуры и солености морской воды. Результаты, полученные по совместным выборкам с количеством данных менее 10, могут в большинстве случаев оказаться недостоверными. Поэтому к ним надо относиться с осторожностью. Согласно анализу результатов для всех трех буюв наибольшие ошибки прогноза относятся к ХПС и сезонному термоклин и обусловлены прежде всего отклонениями начального поля температуры от реального. Причем для буюв № 1901200 и 6900804 среднее отклонение для отдельных σ -слоев может превышать 1°С по абсолютной величине, а среднее квадратическое отклонение (СКО) может достигать до 2,7°С.

Отметим, что измерения с бую № 6900805 проводились до начала июня – в период развития сезонного термоклина, а с буюв № 1901200 и 6900804 – в период существования ярковыраженного сезонного термоклина (июнь – сентябрь), что может приводить к различиям в точности прогноза как по локальной, так и по глобальной моделям. Отметим также, что глубины залегания σ -слоев в точках выполнения измерений с буюв-профиломеров № 1901200 и 6900804 изменяются в намного больших пределах по сравнению с глубинами измерений с бую № 6900805, что также может повлиять на результаты сопоставления с данными измерений.

Сопоставление прогностических расчетов температуры морской воды с данными измерений дрейфера SVP-BTC № 249940. В табл. 3 представлены статистические характеристики отклонений между прогностическими и измеренными величинами температуры воды в каждом σ -слое модели в период 14 – 29 декабря 2012 г., а в табл. 4 – в период 19 – 29 сентября 2013 г. за интервал сроков наблюдений 48 – 72 ч. Данные, приведенные в табл. 3, показывают относительно неплохое соответствие между рассчитанными и измеренными значениями температуры в верхних слоях до глубины 30 м. Но на больших глубинах, где в это время еще прослеживается сезонный термоклин, соответствие между рассчитанными и измеренными величинами температуры воды ухудшается. При этом на всех глубинах рассчитанные величины температуры воды оказываются систематически завышенными по отношению к измеренным значениям на 0,5 – 1,0°C. Различия между прогнозом и измерениями для сентября (табл. 4) значительно выше, особенно в слое сезонного термоклина. Необходимо подчеркнуть, что в пределах залегания ХПС наблюдается сильно выраженная зависимость средних величин отклонений от срока прогноза.

Т а б л и ц а 3

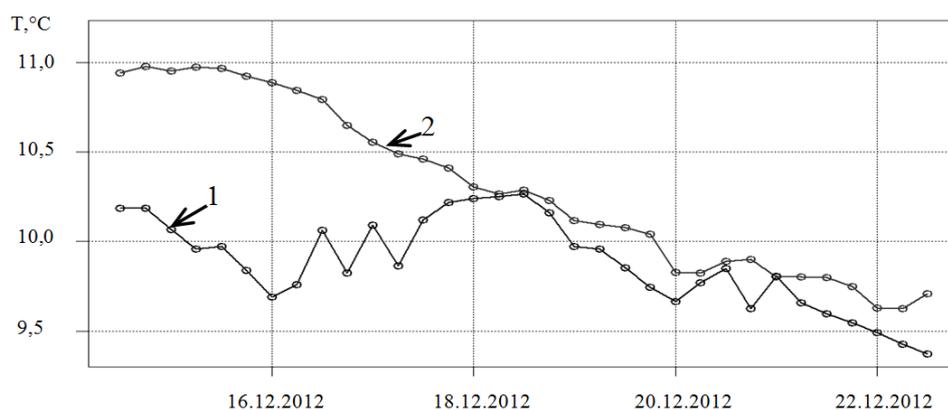
Статистические характеристики отклонений между прогностическими и измеренными с помощью дрейфера SVP-BTC № 249940 значениями температуры морской воды в период 14 – 29 декабря 2012 г.

Номер σ -слоя	Глубина, м		Число измерений	Среднее отклонение температуры, °С	СКО температуры, °С
	min	max			
1	1,6	3,6	35	0,465	0,427
2	9,7	10,7	33	0,514	0,366
3	10,9	19,5	34	0,468	0,398
4	14,4	32,0	35	0,459	0,718
5	22,4	49,8	35	1,178	0,929
6	32,0	71,1	24	1,395	0,532

Т а б л и ц а 4

Статистические характеристики отклонений между прогностическими и измеренными с помощью дрейфера SVP-BTC № 249940 значениями температуры морской воды в период 19 – 29 сентября 2013 г.

Номер σ -слоя	Глубина, м		Число измерений	Среднее отклонение температуры, °С	СКО температуры, °С
	min	max			
1	3,0	3,8	40	0,898	0,933
2	9,0	11,3	40	-0,804	2,248
3	16,4	20,7	40	-0,547	3,227
4	26,9	33,9	40	1,310	2,265
5	41,8	52,8	40	1,151	0,953
6	59,7	71,2	12	1,007	0,377



Р и с. 7. Пример сопоставления временных рядов прогностических и измеренных значений температуры воды в пределах второго σ -слоя вдоль траектории дрефтера *SVP-BTC* № 249940 в период 14 – 29 декабря 2012 г. (1 – измерения; 2 – модель)

Пример сопоставления временных рядов данных прогноза и измерений в пределах второго σ -слоя приведен на рис. 7. Из рисунка видно, что в начальный момент расхождение с измерениями составляет около $1,5^{\circ}\text{C}$. Это расхождение сохраняется на весь срок прогноза, т. е. в течение первых суток расчета. К концу вторых суток расчета разница между модельными расчетами и данными измерений практически исчезает и далее не превышает $0,25^{\circ}\text{C}$.

Заключение. Проведено сопоставление прогностических расчетов распределения температуры, полученных по модели циркуляции с высоким разрешением, с данными контактных измерений температуры с помощью дрефтеров *SVP-BTC* и буев-профилемеров *Argo*. Поскольку результаты модельных расчетов и данные измерений с разных буев представляют собой разнородные по структуре массивы, для проведения валидации была разработана специальная процедура формирования совместной выборки данных, включающих в себя результаты прогностических расчетов и данные контактных измерений. Анализ показал, что наибольшее отклонение модельных данных от измеренных имеет место в диапазоне глубин залегания ХПС и сезонного термоклина: абсолютная величина среднего отклонения здесь может достигать 1°C , а среднеквадратическое отклонение – величины в $2,5^{\circ}\text{C}$ для обоих буев. Причем это отклонение обусловлено прежде всего несоответствием структуры вертикального профиля температуры, поступающего в качестве начального распределения в локальную модель из глобальной, реальному профилю температуры. С увеличением времени прогноза наблюдается тенденция к уменьшению отличий рассчитанного вертикального профиля температуры от измеренного. Вне слоев залегания сезонного термоклина и холодных промежуточных вод сопоставление прогностических и измеренных значений температуры свидетельствует об удовлетворительном качестве ее воспроизведения моделью: для буй-профилемера *Argo* величина среднего отклонения в основном не превышала $0,2^{\circ}\text{C}$ по абсолютной величине, а среднеквадратическое отклонение изменялось в пределах от $0,7$ до $0,9^{\circ}\text{C}$; для дреф-

тера *SVP-BTC* средняя ошибка не превышала $0,5^{\circ}\text{C}$ по абсолютной величине, а среднеквадратическое отклонение составляло $0,7^{\circ}\text{C}$. Следует отметить, что использование измерений дрейфтеров *SVP-BTC* позволяет выполнить сопоставление профилей температуры воды в верхнем 80-метровом слое с существенно более высоким разрешением по времени по сравнению с буями-профилимерами *Argo*. Однако при этом для получения достаточно надежных выводов необходимо использовать более длительные временные интервалы выполнения измерений, чем были доступны на момент написания статьи.

На основе выполненного сопоставления можно сделать вывод о том, что для улучшения качества прогноза температуры воды в прибрежной области Черного моря, производимого на основе представленной локальной модели циркуляции с высоким разрешением, необходимо прежде всего повысить качество начальных данных, поступающих из региональной модели для осуществления расчетов, что не отменяет необходимости продолжения работ по совершенствованию локальной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коротаев Г.К., Демьшев С.Г., Дорофеев В.Л. и др.* Архитектура и результаты работы международного черноморского центра морских прогнозов, созданных на базе МГИ НАН Украины в рамках проекта Европейского Союза «Мой океан» // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. – Вып. 27. – С. 128 – 133.
2. *Korotaev G.K., Oguz T., Dorofeyev V.L. et al.* Development of Black Sea nowcasting and forecasting system // *Ocean Sci.* – 2001. – 7. – P. 629 – 649. – doi: 10.5194/os-7-629-2011.
3. *Korotaev G., Cordoneanu E., Dorofeyev V. et al.* Near Operational Black Sea nowcasting / forecasting system // *European Operational Oceanography: Present and Future* / Eds. H. Dahlin, N.C. Flemming, P. Marshand, S.E. Petersson. – Proceedings of the Fourth EuroGOOS International Conference on EuroGOOS, 6 – 9 June 2005. – France, Brest, 2006. – P. 269 – 275.
4. *Еремеев В.Н., Коротаев Г.К., Кубряков А.И.* Глобальная океаническая наблюдательная система Черного моря: научные стратегия и дизайн // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. – Вып. 2 (7). – С. 5 – 17.
5. *Oey L., Chen P.* A nested-grid ocean model: with application to the simulation of meanders and eddies in the Norwegian Coastal Current // *J. Geophys. Res.* – 1992. – 97, № C12. – P. 20063 – 20086.
6. *Oey L., Zhang Y.-H., Chen P.* Simulation of the Norwegian Coastal Current in the vicinity of the Halten Bank: comparison with observations and process study of bank-induced meanders // *J. Mar. Syst.* – 1992. – 3, № 4. – P. 391 – 416.
7. *Fox A.D., Maskell S.J.* A nested primitive equation model of the Iceland-Faroe front // *J. Geophys. Res.* – 1996. – 101, № C8. – P. 18259 – 18278.

8. Михайлова Э.Н., Шаниро Н.Б. Моделирование распространения и трансформации речных вод на северо-западном шельфе и в глубоководной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 1996. – № 3. – P. 30 – 40.
9. Martin P.J. Description of the navy coastal ocean model version 1.0. Naval Research Laboratory Technical Report; NRL/FR/7322-00-9962. – 2000. – P. 45.
10. Brenner S. High-resolution nested model simulations of the climatological circulation in the southeastern corner of the Mediterranean Sea // Annal. Geophys. – 2003. – 21, № 1. – P. 267 – 280.
11. Zodiatis G., Lardner R., Lascaratos A. et al. High resolution nested model for the Cyprus, NE Levantine Basin, eastern Mediterranean Sea: implementation and climatological runs // Ibid. – 2003. – 21, № 1. – P. 221 – 236.
12. Kubryakov A., Korotaev G., Ramer Y. et al. The Black Sea Neashore Regions Forecasting System: operational implementation // Coastal to Global Operational Oceanography: Achievements and Challenges. – Proceedings of the Fifth International Conference on EuroGOOS, 20 – 22 May 2008. – Exeter, UK, EuroGOOS Office, SMHI, Norkoping, Sweden, 2010. – P. 293 – 296.
13. Kubryakov A., Grigoriev A., Kordzadze A. et al. Nowcasting / forecasting subsystem of the circulation in the Black Sea nearshore regions // European Operational Oceanography: Present and Future / Eds. H. Dahlin, N.C. Flemming, P. Marshand, S.E. Petersson. – Proceedings of the Fourth EuroGOOS International Conference on EuroGOOS, 6 – 9 June 2005. – France, Brest, 2006. – P. 605 – 610.
14. Кубряков А.И. Применение технологии вложенных сеток при создании системы мониторинга гидрофизических полей в прибрежных районах Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – Вып. 11. – С. 31 – 50.
15. Hunter J.R. OzPOM: A version of the Princeton Ocean Model. – 2002. – <http://www.antcrc.utas.edu.au/johunter/ozpom.html>.
16. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of a three-dimensional coastal ocean model. Three Dimensional Shelf Models // Coastal Estuarine Sci. Vol. 5 / Ed. N. Heaps. – Washington, D.C.: ACU, 1987. – P. 1 – 16.
17. Song Y.T., Haidvogel D. A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system // J. Comput. Phys. – 1994. – 115, № 1. – P. 228 – 244.
18. Mellor G., Häkkinen S., Ezer T. et al. A generalization of a sigma coordinate ocean model and an intercomparison of model vertical grids // Ocean Forecasting: Conceptual Basis and Applications / Eds. N. Pinardi, J. Woods. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2002. – P. 52 – 72.
19. Shchepetkin F., McWilliams J.C. A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate // J. Geophys. Res. – 2003. – 108, № C3. – doi:10.1029/2001JC001047.
20. Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. – 1982. – 20, № 4 – P. 851 – 875.

21. *Sathyendranath S., Platt T.* The spectral irradiance field at the surface and in the interior of the ocean: a model for applications in the oceanography and remote sensing // *J. Geophys. Res.* – 1988. – 93, № C8. – P. 9270 – 9280.
22. *Кубряков А.И., Суслин В.В., Чурилова Т.Я. и др.* Влияние оптических свойств воды на динамику вод верхних слоев Черного моря в период с 1985 до 2001 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – Вып. 26. – Т. 2. – С. 224 – 255.
23. <http://www.myocean.eu/>.
24. <http://marlin-yug.com>.
25. *Ратнер Ю.Б., Толстошеев А.П., Холод А.Л. и др.* Создание базы данных мониторинга Черного моря с использованием дрейфующих поверхностных буев // *Морской гидрофизический журнал.* – 2009. – № 3. – С. 50 – 68.
26. *Мотыжев С.В., Лунев Е.Г., Толстошеев А.П.* Развитие дрейферных технологий и их внедрение в практику океанографических наблюдений в Черном море и Мировом океане // *Морской гидрофизический журнал.* – 2011. – № 3. – С. 259 – 273.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: alex.kubr@gmail.com,
yubrat@gmail.com

Материал поступил
в редакцию 03.02.14
После доработки 09.04.14

АНОТАЦІЯ У роботі проводиться оцінка достовірності прогнозу полів температури в прибережній області Чорного моря. Прогностичні поля отримані за допомогою моделі циркуляції з високим розділенням, яка функціонує з використанням технології вкладених сіток. Якість прогнозу оцінюється на основі зіставлення модельних даних з даними контактних вимірів дрейферів *SVP-BTC* і буйів-профілемерів *Argo*. Отримані оцінки середнього і середньоквадратичного відхилень результатів прогнозу температури на 3 доби від даних спостережень. Поза шарами залягання термокліну і холодних проміжних вод абсолютна величина середнього відхилення результатів прогнозу на 3 доби не перевищує 0,2°C при порівнянні з даними профілемерів *Argo* та 0,5°C при порівнянні з даними дрейферів *SVP-BTC*. Величина середньоквадратичного відхилення дорівнює 0,9°C при порівнянні з даними профілемерів *Argo* та 0,7°C при порівнянні з даними дрейферів *SVP-BTC*.

Ключові слова: локальна модель циркуляції, буйкові виміри, морський прибережний прогноз.

ABSTRACT Assessment of reliability of temperature fields' forecast in the Black Sea coastal zone is considered. Prognostic fields are obtained by the circulation model with high resolution which runs due to application of the nested grid technology. The forecast quality is estimated based on comparison of the model data with in situ measurements of *SVP-BTC* drifters and *Argo* profile-meters. Mean and standard deviations of a 3-day temperature forecast from the observational data are estimated. Beyond the bounds of thermocline and cold intermediate layers, the absolute value of a 3-day temperature forecast mean deviation does not exceed 0.2°C as compared to *Argo* profile-meters' data and 0.5°C as compared to *SVP-BTC* drifters' data. The value of standard deviation is 0.9°C as against *Argo* profile-meters' measurements and 0.7°C as against *SVP-BTC* drifters' measurements.

Keywords: local circulation model, buoy measurements, marine coastal forecast.