

УДК 551.465

Ю.С. Тучковенко, к.ф.-м.н., О.А. Торгонская

*Одесский государственный экологический университет***АДАПТАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ ГИДРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕССА К УСЛОВИЯМ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЯ**

*Приведены результаты адаптации трехмерной численной прогностической термогидродинамической модели МЕССА (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment) к условиям северо-западной части Черного моря для описания сезонной изменчивости термохалинной структуры и циркуляции вод. **Ключевые слова:** термохалинная структура вод, моделирование, северо-западная часть Черного моря.*

Постановка проблемы. К числу характерных особенностей северо-западного шельфа Черного моря относятся: наличие устьевых областей четырех крупных рек (Дунай, Днепр, Днестр, Южный Буг), пресный сток которых оказывает существенное влияние на пространственно-временную изменчивость термохалинной структуры и динамику вод; наличие большого числа относительно мелководных областей – банок, заливов, бухт, лиманов (изолированных, частично или эпизодически изолированных, свободно сообщающихся с морем); доминирующее влияние ветровых условий на динамику и термохалинную структуру вод (изменчивость циркуляции, проникновение речных вод, апвеллинг и т.д.); формирование в весенне-летний период на глубинах 5-15 метров пикноклина, разделяющего прогретые и распресненные воды поверхностного слоя и холодные, соленые воды придонного слоя; систематическое развитие ветрового прибрежного апвеллинга, обеспечивающего водо- и массообмен между поверхностным и придонным слоями акватории в весенне-летний период года.

Для диагноза, имитации изменчивости и прогноза гидрологических, термодинамических и, тесно связанных с ними, экологических процессов в северо-западной части Черного моря (СЗЧМ) необходима гидродинамическая модель, способная учесть и адекватно описать указанные выше особенности акватории. В предлагаемой работе исследуются возможности использования в указанных целях численной гидротермодинамической модели МЕССА (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment) [1]. Описание математической структуры этой модели, а также результаты ее адаптации к Днепроовско-Бугскому приустьевому району СЗЧМ приведены в работах [2-3].

Цель представляемой работы заключается в изложении предварительных результатов адаптации гидротермодинамической модели МЕССА для описания сезонной изменчивости термохалинной структуры и циркуляции вод на всем северо-западном шельфе Черного моря (с учетом стока Дуная, Днепра, Южного Буга и Днестра).

Методы и материалы. В основу модели МЕССА положена полная система уравнений гидротермодинамики в приближении Буссинеска, несжимаемости и гидростатики, включающая уравнения: движения для горизонтальных составляющих вектора скорости течения, гидростатического приближения, неразрывности, состояния, сохранения тепла и солей. Для моделирования течений и переноса субстанций на подсеточных масштабах в каналах или реках, исходная система уравнений интегрировалась поперек потока (т.е. в нормальном к потоку направлении в

горизонтальной плоскости). Новая система уравнений, используемая в модели, получена в результате объединения проинтегрированных поперек потока и исходных уравнений таким образом, чтобы при отсутствии канала (трехмерный поток) получалась исходная система уравнений в традиционной форме, а при его наличии – осредненные поперек потока уравнения (двумерный поток). Численная реализация полученной системы уравнений выполнена в криволинейной по вертикали системе координат, с использованием неявных конечно-разностных схем [1].

Метод решения гидродинамической задачи предусматривает расщепление полной скорости течений на среднюю по глубине скорость (баротропная составляющая) и отклонения от нее на каждом расчетном горизонте (бароклинная составляющая). Вертикальная турбулентная вязкость аппроксимируется на основе полуэмпирической теории турбулентности как функция устойчивости водной колонки и локального вертикального сдвига скорости течений. Коэффициенты горизонтального турбулентного обмена рассчитываются исходя из значения локального горизонтального сдвига баротропной составляющей скорости течений и пространственного шага горизонтальной конечно-разностной сетки.

Модель содержит блоки расчета потока тепла через поверхность моря (на основе метеорологических данных), усвоения гидрометеорологической информации на границах расчетной области и позволяет воспроизводить пространственно-временную изменчивость уровня моря, термохалинной структуры вод, трехмерного поля течений и интенсивности турбулентного обмена на временных отрезках от нескольких суток до годового цикла в акваториях морского шельфа со сложными морфологическими и гидрологическими характеристиками.

Расчетная область северо-западной части Черного моря (рис. 1), к которой адаптировалась модель, аппроксимировалась горизонтальной сеткой 61×36 узлов с шагом 5 км. Шаг по времени составлял 5 секунд для баротропной составляющей скорости течений и 80 с. – для бароклинной. Использовались десять расчетных уровней по глубине в σ -системе координат.

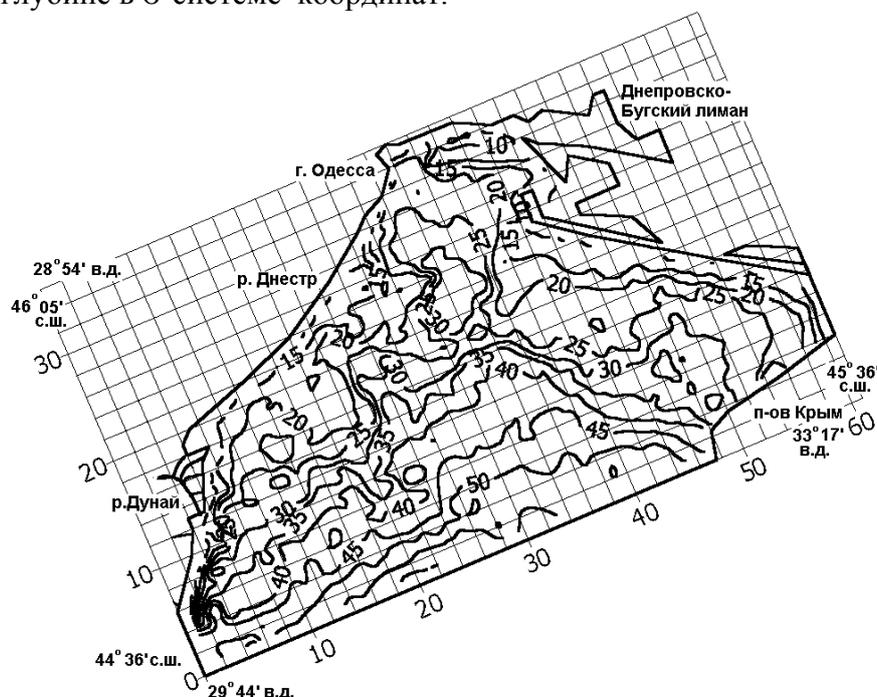


Рис. 1 Расчетная область и батиметрическая карта (глубины в метрах) северо-западного шельфа Черного моря

Численные эксперименты с моделью проводились с усвоением данных ежесрочных 6 - часовых наблюдений за температурой воздуха, скоростью и направлением ветра, выполненных на ГМС Одесса-порт в 1983 и 1994 годах. Указанные годы существенно различаются доминирующими направлениями ветра в весенне-летний период. В 1983 году при доминировании северо-западных ветров систематически отмечалось развитие ветровых прибрежных апвеллингов, а в 1994 году апвеллинги в июле-сентябре практически отсутствовали. При расчетах потока тепла использовались среднемесячные значения относительной влажности воздуха и балла общей облачности. Расход рек Дуная, Днестра и Южного Буга задавался для условий средневодного года (табл. 1). Термохалинная структура вод на открытой морской границе определялась в соответствии с информацией, приведенной в [4] и ГИС Black Sea Environmental Programme (BSEP), а отклонения уровня моря – в соответствии с [5].

Таблица 1 – Сезонная изменчивость расходов речного стока в СЗЧМ, м³/с, задаваемая при модельных расчетах

Реки или рукава их дельт	Месяц						
	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
р.Днепр+ р.Южный Буг	1600	2080	1500	1100	985	635	570
р.Днестр	195	249	250	324	223	187	155
Рукава дельты р.Дунай							
Очаковский	966	1261	1237	1046	853	688	625
Быстрый+ Восточный	1464	1911	1875	1589	1296	1045	950
Старостамбульский	1281	1673	1641	1388	1132	912	820
Сулинский	1472	1922	1886	1594	1300	1048	953
Георгиевский	1823	2379	2335	1973	1609	1297	1180

Результаты численных экспериментов. На первом этапе адаптации модели численные эксперименты проводились с одномерным (по вертикали) ее вариантом, когда отключались члены уравнений, описывающие горизонтальный турбулентный обмен и адвективный перенос, а также предполагалась независимость всех функций от горизонтальных координат. В такой постановке учитывается только бароклинная ветровая составляющая скорости течений, которая используется для расчета коэффициентов вертикального турбулентного обмена и диффузии. Таким образом, фактически решалась задача формирования вертикальной термохалинной структуры вод в результате вертикального турбулентного обмена импульсом, диффузии тепла и солей.

Цель расчетов заключалась в изучении адекватности воспроизведения моделью годовой изменчивости вертикальной термохалинной структуры вод исследуемой акватории под воздействием ветра и теплообмена с атмосферой. В ходе счета, помимо усвоения указанных ранее ежесрочных гидрометеорологических наблюдений, задавался годовой ход среднемесячных значений солёности на поверхностном и придонном горизонтах водной колонки глубиной 25 м, а также температура морского дна (соответствующая температуре вод придонного слоя по данным наблюдений). Вертикальное распределение температуры и солёности морской воды формировалось моделью в ходе счета. Результаты расчетов приведены на рис. 2-3. Видно, что модель правильно описывает годовой ход температуры поверхностного слоя воды,

формирование и разрушение сезонного термоклина, сезонную изменчивость толщины верхнего квазиоднородного слоя (ВКС), хотя расхождения результатов расчетов с данными наблюдений также имеют место. В первую половину года модель занижает на несколько градусов температуру воды поверхностного слоя, а в летние месяцы, наоборот, завышает. Эти расхождения объясняются исключением вклада горизонтальной адвекции в формирование термического режима вод СЗЧМ. В зимне-весенний период реальное охлаждение вод акватории меньше за счет притока тепла с Основным Черноморским потоком, а летом – наоборот. Кроме того, после формирования сезонного слоя скачка плотности в весенне-летний период, важную роль в обеспечении теплообмена между поверхностной и придонной водными массами играют обусловленные ветром сгонно-нагонные явления в прибрежных зонах акватории, которые не учитываются в одномерном варианте модели. Эффект влияния на температуру поверхностного слоя воды прибрежного ветрового апвеллинга особенно ярко проявляется на рис. 2.а, где ему соответствуют резкие понижения температуры в летний период, отмеченные в данных наблюдений.

В сезонной изменчивости вертикальной термохалинной структуры вод, полученной в одномерном варианте модели (рис. 3), обращает на себя внимание образование в весенне-летний период термоклина и разрушение его в осенне-зимний период. Толщина ВКС в летний период года составляет ≈ 6 м в 1983 г. и 10 м в 1994 г. Указанные особенности соответствуют общим представлениям об особенностях гидрологического режима вод акватории, установленных по данным наблюдений.

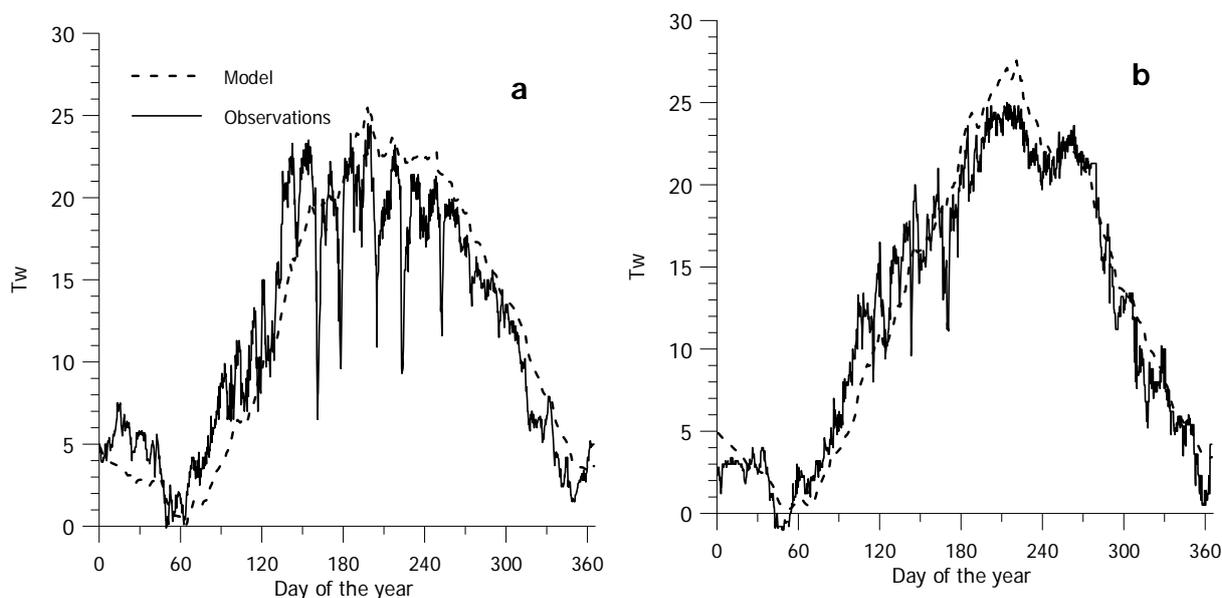


Рис. 2 Измеренный и рассчитанный в одномерном варианте модели годовой ход температуры поверхностного слоя воды при метеоусловиях 1983 (а) и 1994 гг. (б)

Расчеты пространственно-временной изменчивости термохалинной структуры и циркуляции вод с помощью трехмерного варианта модели проводились на временном отрезке с начала второй декады марта до конца сентября. Отдельные результаты расчетов для метеоусловий 1983 г. приведены на рис. 4 – 8. Видно, что модель правильно отражает основные особенности изменчивости пространственного

распределения температуры и солености воды в весенне-летний период. Весной отмечается проникновение языка распресненных вод из Днепровско-Бугского лимана вдоль Одесской банки в Одесский район СЗЧМ, где соленость понижается до 13 ‰. Второй, менее выраженный язык трансформированных речных вод распространяется на юг вдоль Тендровской косы (рис. 4). Летом, из-за сезонного уменьшения речного стока и развития ветрового прибрежного апвеллинга, соленость поверхностных вод Одесского района увеличивается до 15 – 16 ‰ (рис. 5).

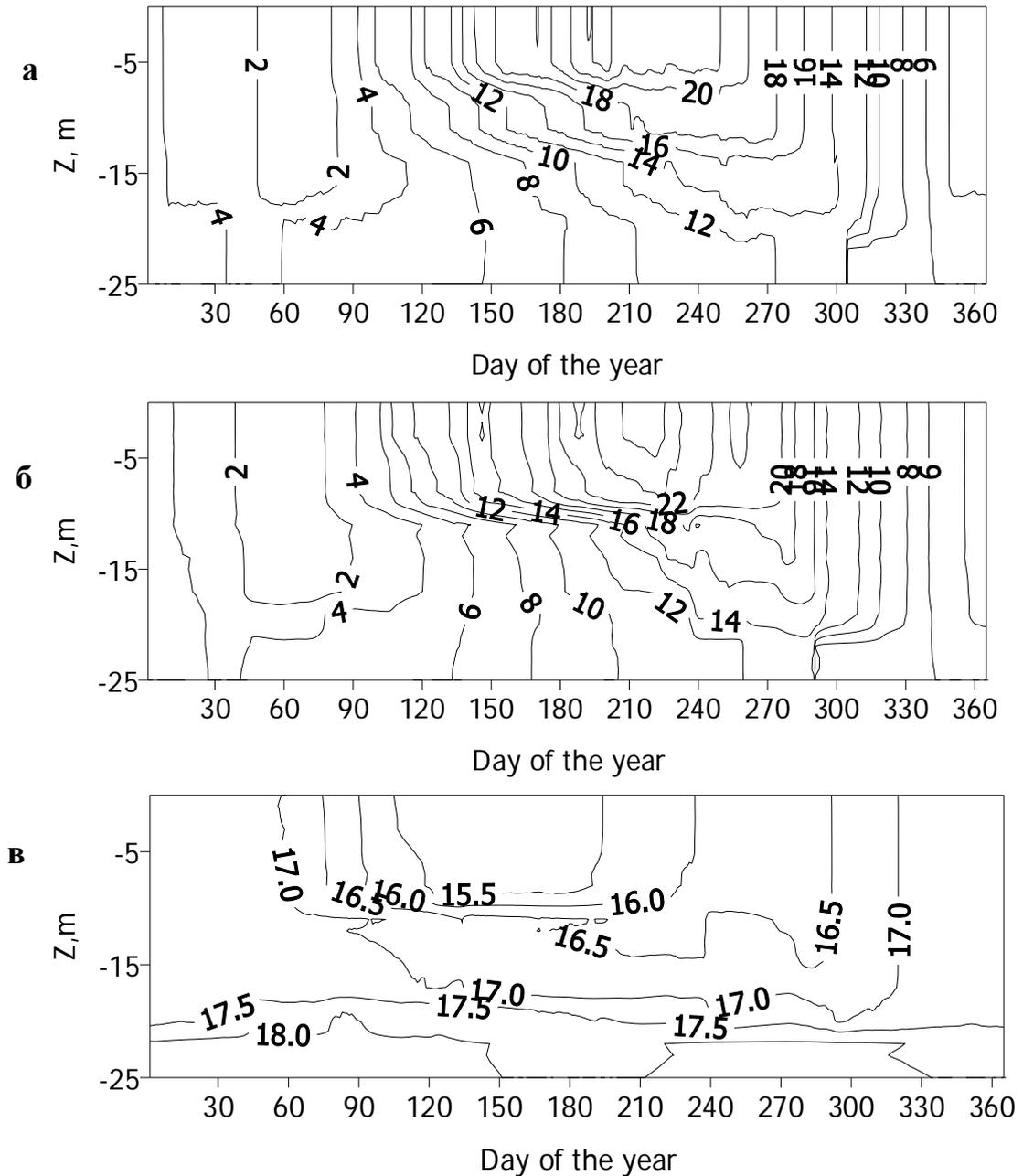


Рис. 3 Рассчитанная в 1-мерном варианте модели по метеорологическим данным внутригодовая изменчивость вертикального распределения температуры воды T , °C, (а – 1983 г., б – 1994 г.) и солености S , ‰ (в – 1994 г.)

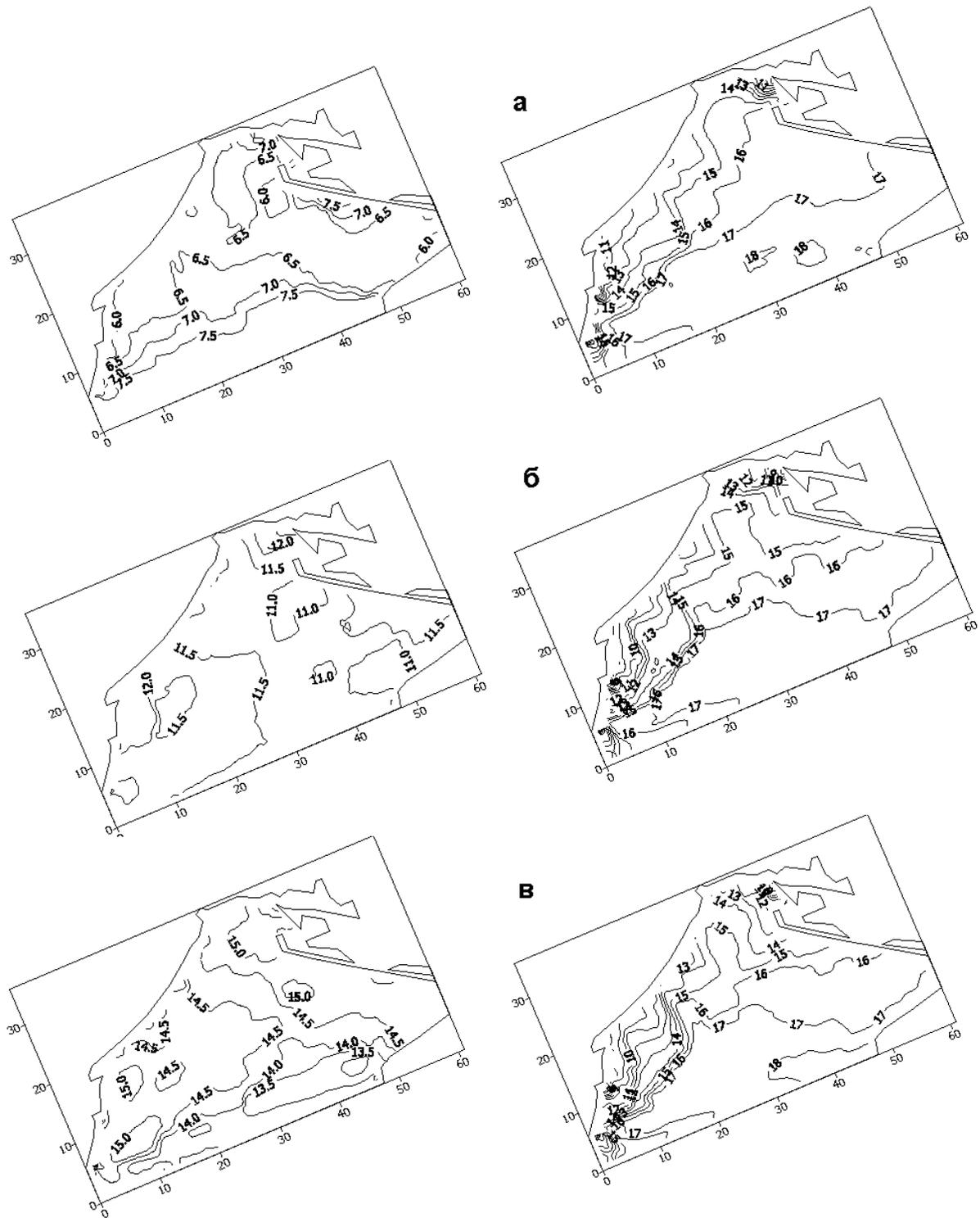


Рис. 4 Рассчитанные по модели поля температуры (слева) и солёности (справа) воды поверхностного слоя, относящиеся к датам: 14 апреля (а), 14 мая (б) и 24 мая (в), при метеоусловиях 1983 г.

В пространственном распределении температуры воды поверхностного слоя отмечаются следующие тенденции. В марте-апреле температура шельфовых вод СЗЧМ несколько ниже, чем в открытой глубокой части моря (южная граница расчетной области). К концу мая, в результате более быстрого прогрева речных и поверхностных

шельфовых вод, картина меняется на обратную (рис. 4). Систематическое развитие прибрежного апвеллинга в летний период года приводит к тому, что температура воды вдоль побережья СЗЧМ на несколько градусов ниже, чем на южной морской границе (рис. 6). Отчетливо прослеживаемые на рис. 6.б, г следы ветрового апвеллинга подтверждаются данными наблюдений на ГМС Одесса-порт. В частности, в период с 22 по 24 июля 1983 г. температура морской воды понизилась с 20 до 11 °С и 25 июля составляла 16 °С, а с 11 по 12 августа температура упала с 19.5 до 10 °С и к 14 августа снова повысилась до 16 °С. Осенью температура шельфовых вод понижается быстрее, чем в открытом море (рис. 6.е).

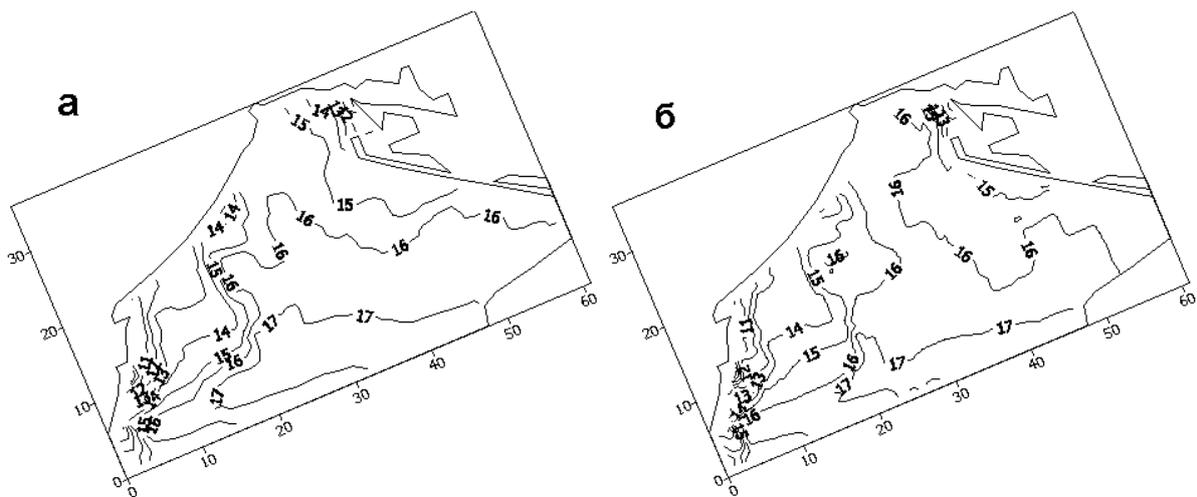


Рис. 5 Рассчитанные по модели поля солёности воды поверхностного слоя, относящиеся к датам: 20 июля (а) и 30 июля (б), при метеоусловиях 1983 г.

На рис. 7 приведена эволюция в период с марта по сентябрь вертикальных профилей температуры и солёности воды в одной из точек расчетной области глубиной 28 м. Следует обратить внимание на образование в летний период года верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) с глубиной нижней границы 5 - 7 м. В периоды безветрия температура воды монотонно понижается от поверхности до дна. В сентябре, в результате конвективного перемешивания, ВКС заглубляется до 18 м. В придонном слое температура воды возрастает за расчетный период с 4 до 12 °С, тогда как на поверхности – с 4 °С в марте до 22 °С в июле. Солёность вод поверхностного слоя в период с марта по июнь уменьшается с 16.5 до 15 ‰ и, затем, возрастает к августу до 16.2 ‰.

Динамика вод на акватории СЗЧМ характеризуется доминированием ветровой составляющей скорости течений. Весной, при слабых ветрах, существенную роль в формировании циркуляции вод играет плотностная составляющая течений. На глубинах 15-30 м формируются компенсационные течения, с генеральным направлением противоположным дрейфовым течениям (рис. 8). В южной части расчетной области в поверхностном слое вектора течений приобретают западную составляющую, соответствующую направлению потока Основного черноморского течения, а на глубинах более 35 м отмечается поток восточного направления с антициклоническим знаком завихренности.

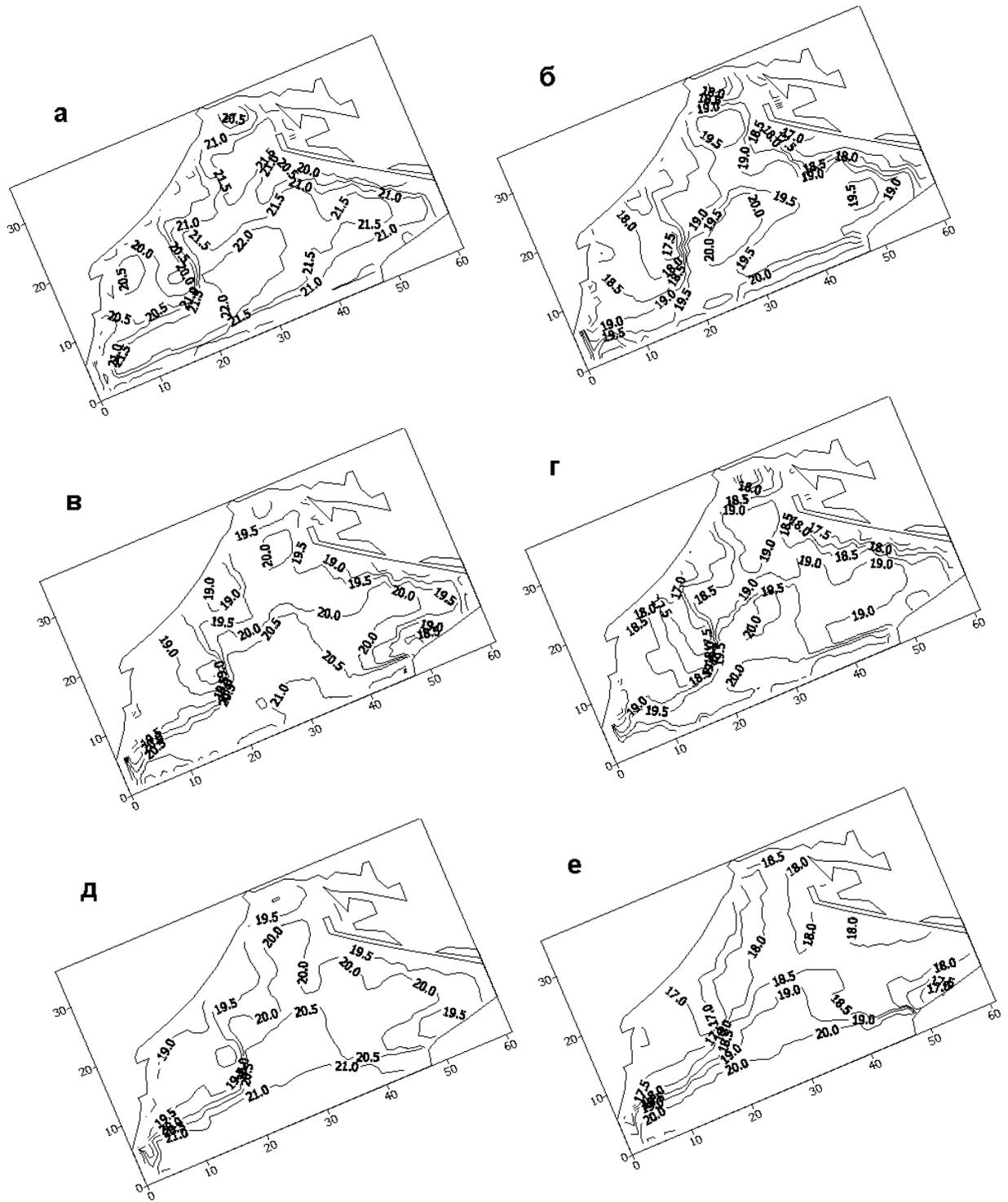


Рис. 6 Рассчитанные по модели поля температуры воды поверхностного слоя, относящиеся к датам: а) 20 июля; б) 25 июля; в) 9 августа; г) 14 августа; д) 29 августа; е) 13 сентября, при метеоусловиях 1983 г.

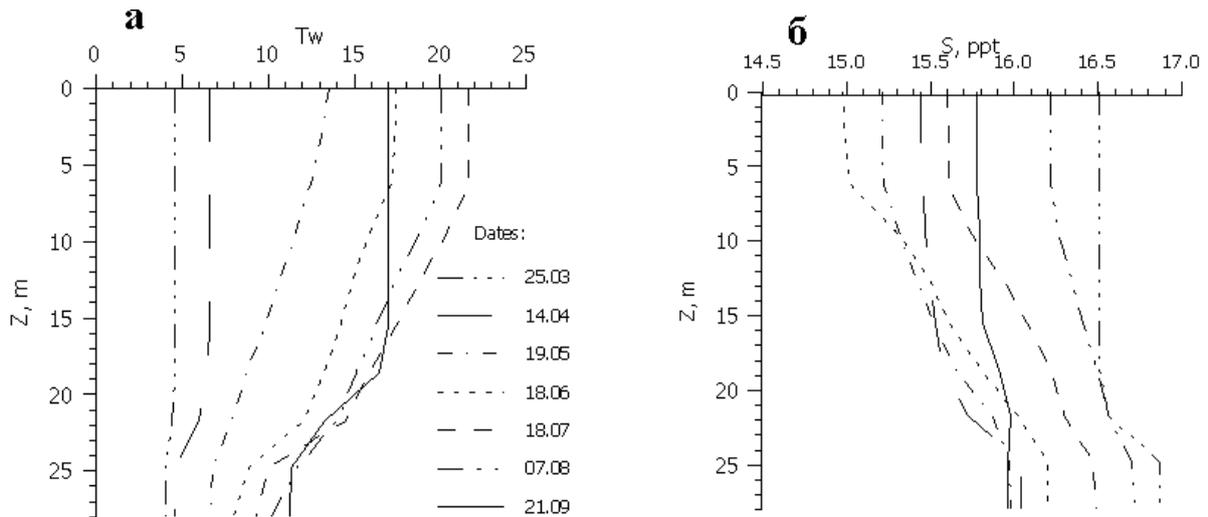


Рис. 7 Сезонная изменчивость вертикального распределения температуры (слева), °С, и солёности (справа), ‰, воды в точке (33; 27) расчетной области (см. рис. 1), при расчетах с усвоением метеоинформации за 1983 г. Приведенные кривые соответствуют указанным датам в период с марта по сентябрь

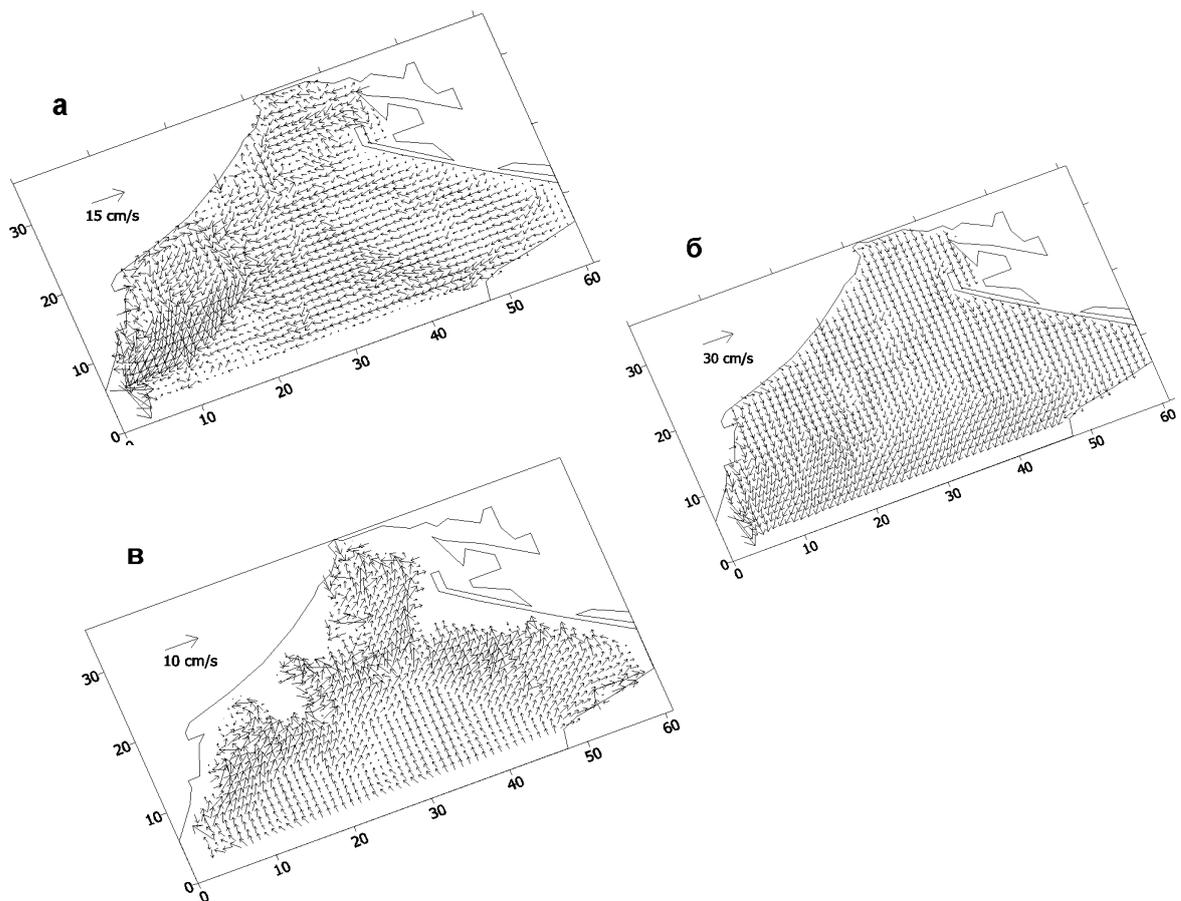


Рис. 8 Рассчитанные по модели поля векторов течений, см/с, 14 мая - в поверхностном слое (а) и 14 августа - в поверхностном слое (б) и на горизонте 20 м (в)

Выводы. Приведенные и описанные в работе результаты численных экспериментов по адаптации гидротермодинамической модели МЕССА к условиям северо-западной части Черного моря хорошо согласуются с данными натурных наблюдений и традиционными представлениями об особенностях сезонной изменчивости гидрологической структуры вод исследуемой акватории, изложенными в многочисленных литературных источниках [4 - 10].

Модель адекватно описывает образование и разрушение сезонного термоклина, динамику ВКС, распространение трансформированных речных вод, развитие в летний период ветрового прибрежного апвеллинга, пространственно-временную изменчивость термохалинной структуры вод в целом.

Исходя из вышесказанного, модель может быть использована в качестве базового гидродинамического блока при построении более сложных моделей формирования качества морских вод, функционирования экосистемы северо-западной части Черного моря.

Список литературы

1. Hess K.W. MECCA Programs documentation: Technical Report / NOAA.– NESDIS 46.– Washington, D.C., 1989.– 97 p.
2. Тучковенко Ю.С. Гидродинамическая модель для расчета трехмерной циркуляции и термохалинной структуры вод северо-западной части Черного моря // Метеорологія, кліматологія та гідрологія.– 2002.– № 45. – С. 129 - 139.
3. Тучковенко Ю.С. Математическая модель формирования термохалинной структуры и циркуляции вод в лиманах, приустьевых и шельфовых областях северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: НАН Украины, МГИ.– 2003.– С. 138-153.
4. Виноградов К.А., Розенгурт М.Ш., Толмазин Д.М. Атлас гидрологических характеристик северо-западной части Черного моря.– К.:Наукова Думка, 1966.
5. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР: Справочник. Т.4. Черное море.–Л.:Гидрометеиздат, 1986.– 99 с.
6. Большаков В.С. Трансформация речных вод в Черном море.– К.: Наукова Думка, 1970.– 328 с.
7. Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря.– Л.:Гидрометеиздат, 1984.– 240 с.
8. Доценко С.А. Сезонная изменчивость основных гидрологических параметров в Одесском регионе северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2002.– Вып. 1(6).– С. 47- 57.
9. Тучковенко Ю.С., Доценко С.А., Дятлов С.Е., Нестерова Д.А., Скрипник И.А., Кирсанова Е.В. Влияние гидрологических условий на изменчивость гидрохимических и гидробиологических характеристик вод Одесского региона северо-западной части Черного моря // Морской экологический журнал. – Севастополь: НАН Украины, МГИ.– 2004.–Т. 3, № 4. – С. 75 - 85.
10. Северо-западная часть Черного моря: биология и экология.– К.: Наукова Думка, 2006.– 700 с.

Адаптація числової гідротермодинамічної моделі МЕССА до умов північно-західного шельфу Чорного моря. Тучковенко Ю.С., Торгонская О.А.

Приведено результати адаптації тривимірної числової прогностичної термогідродинамічної моделі МЕССА (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment) до умов північно-західної частини Чорного моря для опису сезонної мінливості термохалинної структури і циркуляції вод.

Ключові слова: *термохалинна структура вод, моделювання, північно-західна частина Чорного моря.*

Adaptation of numerical hydrothermodynamic model MECCA to conditions of a northwest shelf of Black Sea. Tuchkovenko Y.S., Torgonskaya O.A.

The results of adaptation three-dimensional numerical time-dependent thermohydrodynamical model MECCA (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment) to conditions of a northwestern part of Black Sea are presented. The model is used for the description of seasonal variability of thermohaline structure and circulation of waters.

Key words: *thermohaline structure of waters, modelling, a northwestern part of Black Sea.*