

**Подготовка математической модели динамики вод с улучшенным
пространственным разрешением в районе полуострова Крым и Большого Сочи**

Коршенко Е.А.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект № 17-05-41101 РГО_а): «Определение природных гидролого-гидрохимических и антропогенных факторов влияния на качество вод прибрежных акваторий Черного моря у Крыма и Кавказа и разработка практических рекомендаций по снижению антропогенной нагрузки на морские экосистемы».

Численные расчеты циркуляции Черного моря проводились с использованием гидродинамической σ -модели морской и океанической циркуляции INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [1], реализованной в двух версиях:

- ***Модель Черного моря со сгущением в районе п-ова Крым***

Для данной версии модели была построена сеточная область для Черного и Азовского морей со сгущением в прибрежной области п-ова Крым. Для этого использовалась сферическая система координат с положением северного полюса в точке с координатами 33.96°E и 44.74°N. Сеточная область задавалась так, что шаги по пространству составляли порядка 200 м в районе п-ова Крым и доходили до 4.5-5 км. Количество точек по пространству составило 889x498 точек по модельной долготе и широте соответственно. По вертикали задавались неравномерно распределенные по глубине 20 σ -уровней.

- ***Модель Черного моря со сгущением в районе Большого Сочи (БС)***

Для акватории Большого Сочи была построена сеточная область для всей акватории Черного моря со сгущением в прибрежной области БС. Северный полюс в модельной системе координат располагался в точке с координатами 40.205°E и 43.84°N в районе города Сочи. Шаги по пространству составляли порядка 200 м в районе БС и доходили до 4.5-5 км на западе ЧМ. Количество точек по пространству составило 642x715 точек по модельной долготе и широте соответственно. По вертикали задавались неравномерно распределенные по глубине 20 σ -уровней.

Сгущение сеточных областей в определенных районах позволяет наиболее качественно описывать циркуляцию в прибрежных районах, что особенно важно для анализа прибрежной циркуляции в исследуемых регионах и расчетов распространения загрязнений от различных источников. При этом расчет циркуляции в остальной части ЧМ не оказывает существенного влияние на быстроедействие моделей, так как основная вычислительная нагрузка заключается в расчетных областях у п-ова Крым и БС.

Конфигурация регионов для модели Черного моря со сгущением в районе п-ова Крым и со сгущением в районе БС показаны на рис.1 и 2 соответственно. Для задания глубин Черного моря использовались данные по топографии Земли GEBCO (<http://www.gebco.net>) с пространственным разрешением 30''. Исходные данные высокого разрешения сглаживались несколько раз и ограничивались 4 м для модели со сгущением в районе п-ова Крым и 3.5 м для модели со сгущением в районе БС. Данная процедура необходима для σ -моделей, так как функция, описывающая невозмущенную глубину моря должна быть отличной от нуля и обладать достаточной гладкостью [1].

Для построения начальных условий по T и S в случае модели со сгущением в районе п-ова Крым были использованы трехмерные среднемесячные климатические поля Азовского и Черного моря. В качестве климатических полей температуры и солености Азовского моря брались данные из Атласа. Для Черного моря брались данные, предоставленные МГИ РАН с разрешением по горизонтали $0.1^\circ \times 0.0625^\circ$ и с 36 уровнями по вертикали, с 0 до 2150 м [2]. Для модели со сгущением в районе БС использовались аналогичные данные, но без учета Азовского моря. Все необходимые данные интерполировались на сеточные области моделей.

Атмосферное воздействие рассчитывалось с использованием балк-формул [3] на основе параметров, получаемых при расчете атмосферной негидростатической модели WRF (Weather Research and Forecasting Model [4]) с пространственным разрешением 10 км и с дискретностью по времени, равной 1 часу.

Для задания стока рек в модели со сгущением в районе п-ова Крым использовались данные климатического года CORE в виде псевдоосадков, сосредоточенных в акваториях, примыкающих к устьям рек. В модели со сгущением в области БС для крупных рек Черного моря, среди которых были Дунай, Днестр, Днепр, Риони, Ингури, Ешилъырмак, Кызылырмак, Сакаръя и малых рек БС (Мзымта, Кудепста, Мацеста, Сочи, Хоста) задавались реальные климатические расходы стоков и водообмен с Керчью и Босфором на основе имеющихся в открытом доступе данных [5].

Обе версии реализованы на основе модели INMOM, которая относится к классу σ -моделей океана [6]. Наиболее полно модель INMOM описана в [1]. В её основе лежит система примитивных уравнений в приближениях гидростатики и Буссинеска, записанная в обобщённых сферических ортогональных координатах по горизонтали и в σ -системе координат по вертикали. Прогностическими переменными модели служат горизонтальные компоненты вектора скорости, потенциальная температура, солёность и отклонение уровня океана от невозмущённой поверхности. Для расчёта плотности используется уравнение состояния, учитывающее сжимаемость морской воды и специально

предназначенное для моделей циркуляции океана [7]. С использованием обеих версий модели были проведены расчеты циркуляции Черного моря за 2011 год с 1 января по 25 мая. На рис.3-4 представлены результаты расчета уровня моря. Выбор конечной датой расчета 25 мая обусловлен тем фактом, что к данному сроку подготавливается контрольная точка для обеих моделей, которая в дальнейшем будет использоваться для расчетов распространения загрязняющих веществ. Представленные на рисунках среднемесячные карты уровня моря построены по мгновенным данным с дискретностью по времени, равной 3 часам.

Результаты расчетов показывают, что обе версии модели достаточно хорошо воспроизводят циркуляцию Черного моря. Выделяется Основное черноморское течение (ОЧТ) в виде крупномасштабных полужамкнутых круговоротов, занимающих почти всю акваторию Черного моря. В тоже время вдоль ОЧТ воспроизводятся квазистационарные антициклоны (Севастопольский, Батумский и др.), наблюдаемые на акватории Черного моря [8].

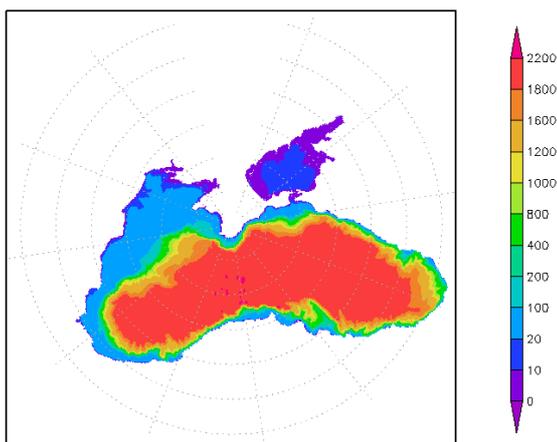


Рис.1. Расчетная область для модели Черного моря со сгущением в районе п-ова Крым. Показана топография [м] в модельной повернутой системе координат.

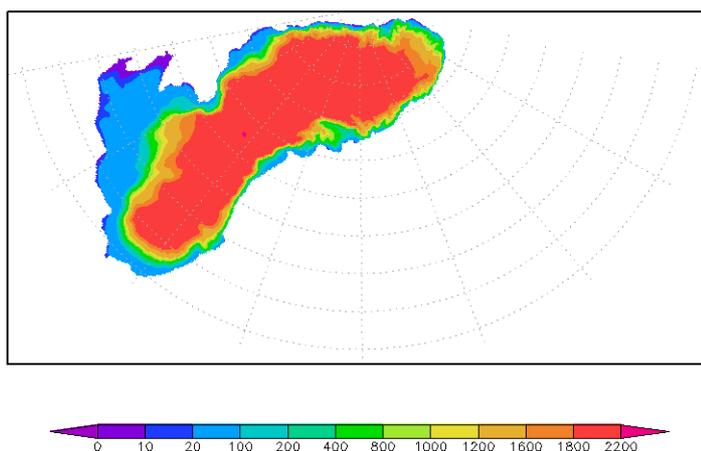
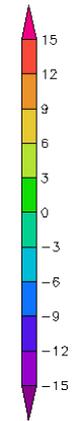
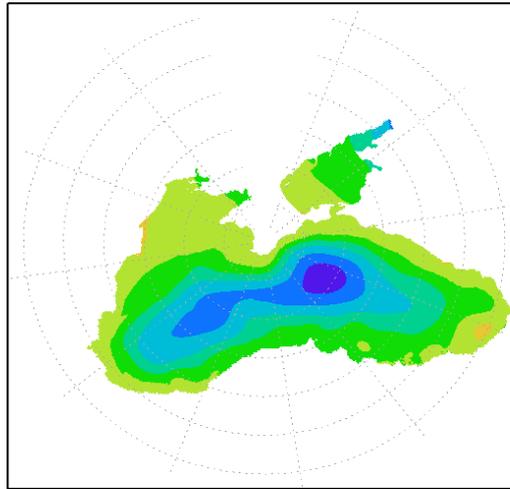
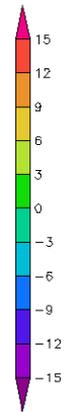
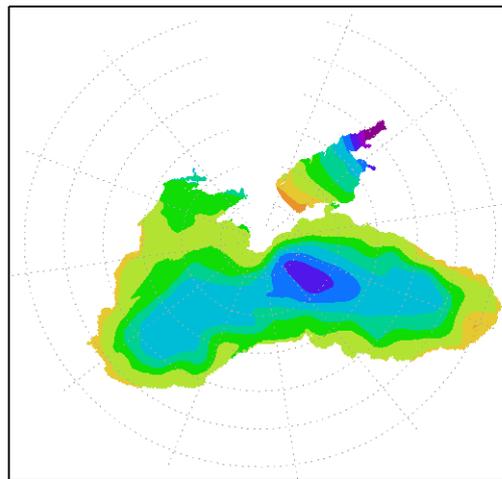


Рис.2. Расчетная область для модели Черного моря со сгущением в районе БС. Показана топография [м] в модельной повернутой системе координат.

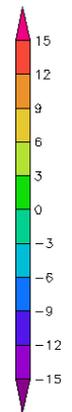
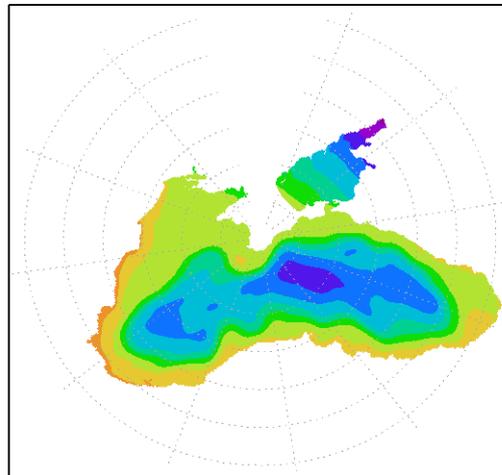
Январь



Февраль



Март



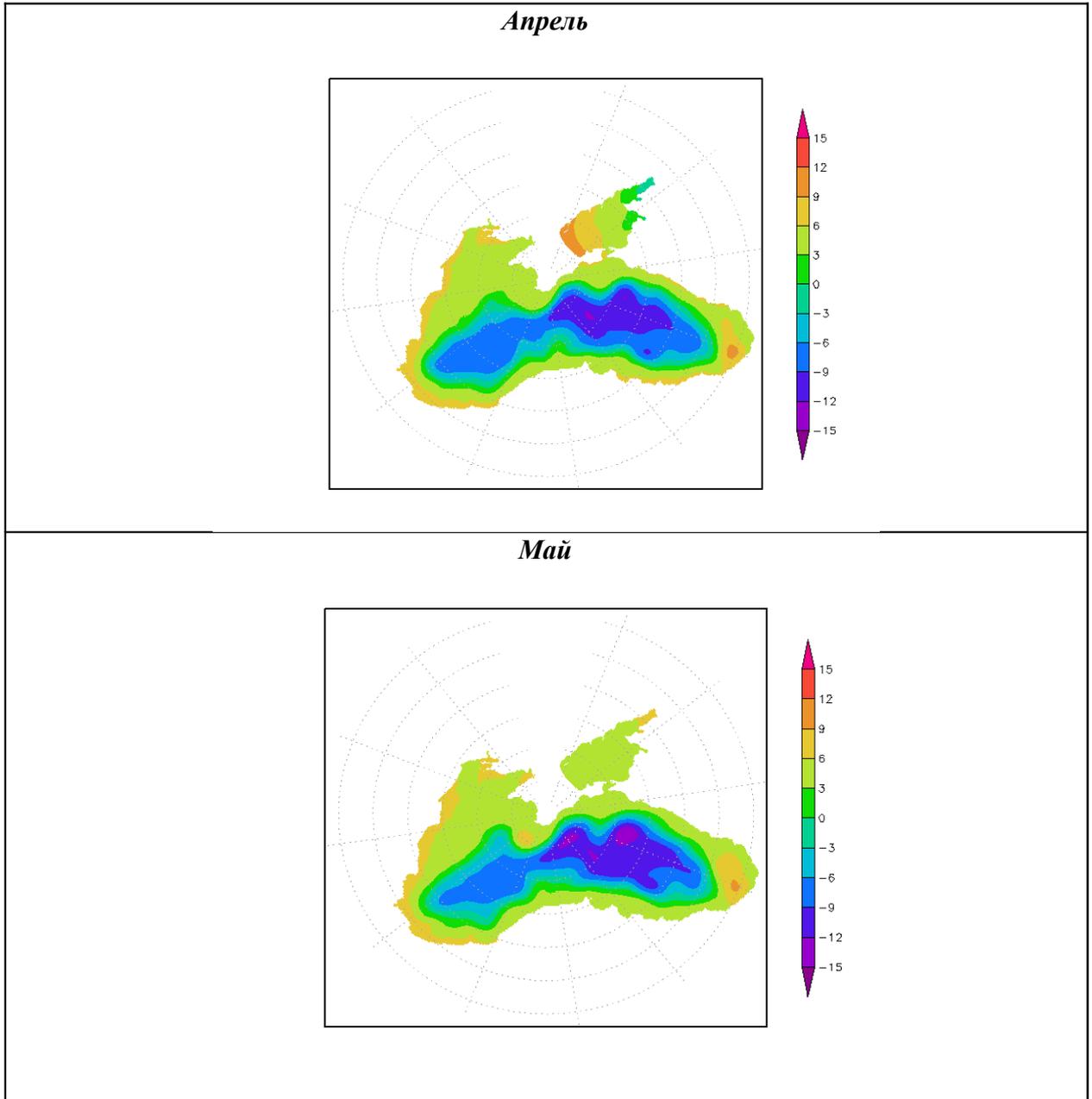
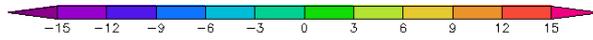
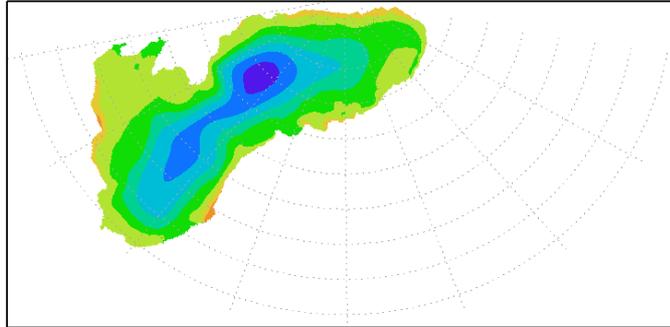
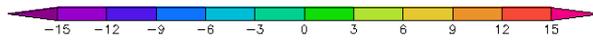
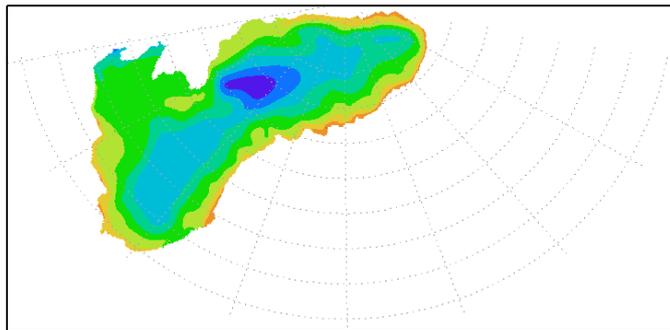


Рис. 3. Среднемесячные уровни моря (см) с января по май 2011, рассчитанные по модели с высоким пространственным разрешением у п-ова Крым.

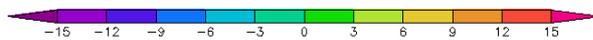
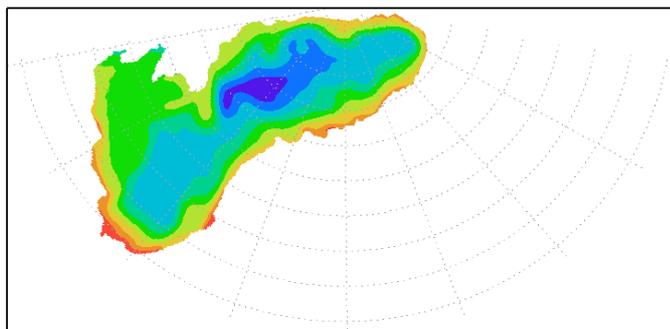
Январь



Февраль



Март



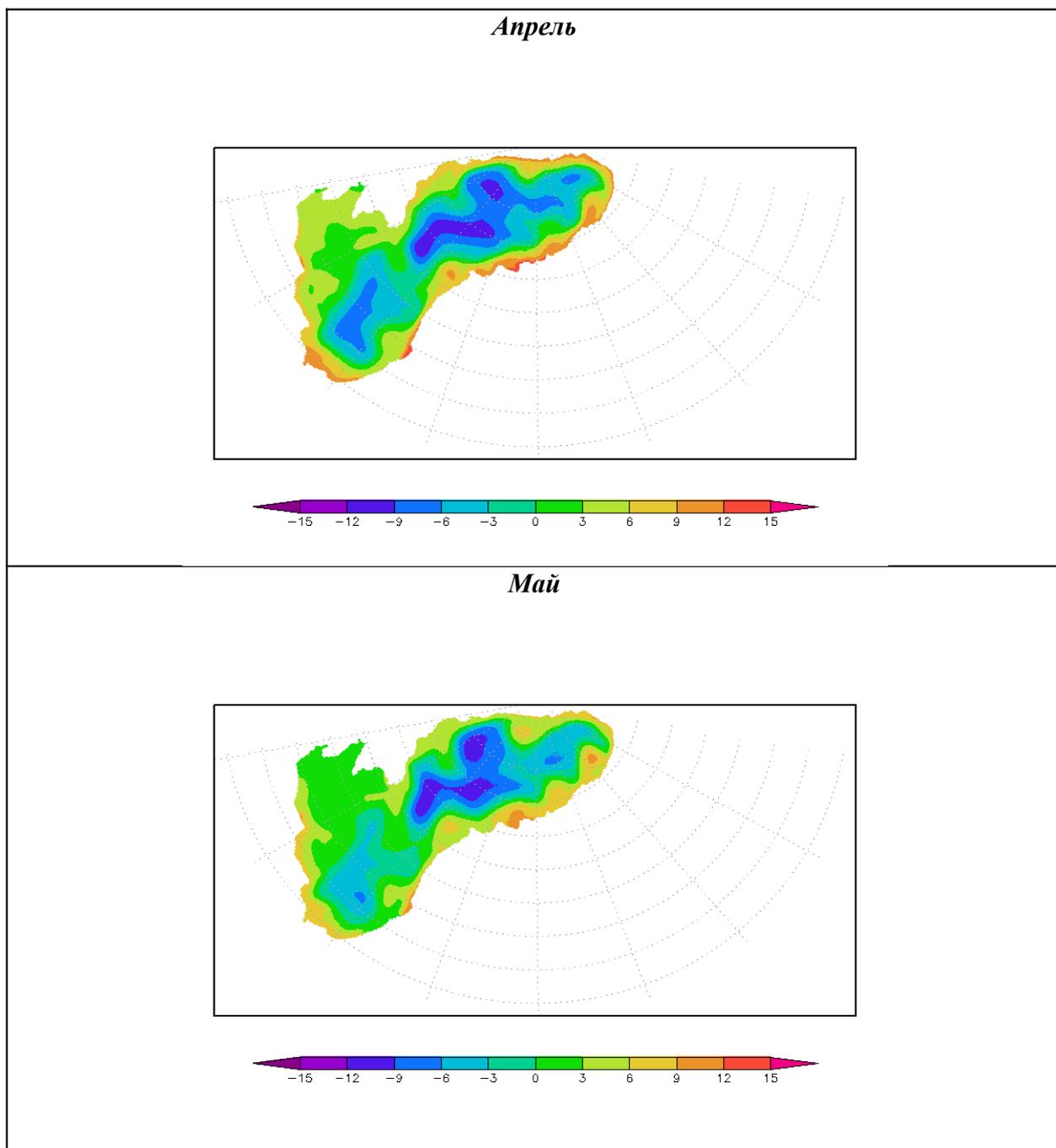


Рис. 4. Среднемесячные уровни моря (см) с января по май 2011 г., рассчитанные по модели с высоким пространственным разрешением в районе БС.

Литература

1. Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М. Физматлит, 2013. 272 с.
2. Иванов В.А, Белоклытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: НАН Украины, Морск. гидрофиз. ин-т, 2011. 212 с.
3. Гилл. А. Динамика атмосферы и океана. – М.: Мир, 1986.
4. <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>

5. Джаошвили Ш.В. Речной сток и сток наносов в Черное море // Водные ресурсы. 1999. Т. 26. № 3. С. 275–282
6. Griffies, S.M. Some ocean model fundamentals. In: Ocean Weather Forecasting: an integrated view of Oceanography. E.P. Chassignet & J. Verron, eds. 2005. Berlin, Germany. Springer. P. 19-74.
7. Brydon D., San S., Bleck R. A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models // J.Geoph.Res. 1999. V. 104. № C1. P. 1537 –1540.
8. Korotaev G.K., Oguz T., Dorofeev V.L. et al. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system // Ocean Sci. 2011. V. 7. P. 629–649.