

М.В.Цыганова<sup>1</sup>, Е.М.Лемешко<sup>1,2</sup>, Ю.Н.Рябцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

<sup>2</sup>Черноморский гидрофизический полигон РАН, пгт.Кацивели

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОФРОНТА В РАЙОНЕ УСТЬЯ ДУНАЯ

На основе численного моделирования исследуется влияние стока реки Дунай на формирование гидрологической структуры вод и особенностей циркуляции на северо-западном шельфе Черного моря. Используется трехмерная  $\sigma$ -координатная численная модель *ECOMSED*, адаптированная для шельфа и эстуариев, для расчета циркуляции в прибрежной зоне и переноса взвеси. Параметры модели были подобраны таким образом, чтобы они соответствовали району впадения Дуная в Черное море. Проведен ряд численных экспериментов по изучению влияния реальной конфигурации береговой черты западного побережья Черного моря на процесс формирования прибрежного гидрофронта и плотностного течения в отсутствие воздействия ветра.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** шельф, прибрежная динамика, бароклинное течение, сток рек, гидрофронт, численное моделирование, Дунай, Черное море

Одним из основных факторов, определяющих гидрологический режим северо-западной части Черного моря, является речной сток [1, 2], годовой объем которого ( $272 \text{ км}^3$ ) составляет сток трех крупных рек – Дуная, Днепра и Днестра. Сток Дуная составляет около 70 % общего речного стока в Черное море. Речные воды при попадании в приустьевые районы моря образуют гидрофронты [3], которые расположены на таком расстоянии от берега, где влияние стоковых течений не учитывается. Гидрофронт разделяет приустьевую зону распресненных вод и более плотные морские воды шельфа (соленость более 17 – 18 ‰), которые ограничивают дальнейшее распространение речной воды по нормали от берега в сторону открытого моря. При отсутствии внешних сил поток речных вод на выходе из устья реки вначале распространяется в сторону моря, а затем, под действием силы Кориолиса, поворачивает в антициклоническом направлении, при этом формируется вдольбереговое струйное течение, направленное на юг. Вблизи устья возникает характерная область, которая обычно включает антициклонический вихрь между основной струей и береговой чертой, для нее характерны пониженная соленость, а также высокое содержание взвеси и растворенной органики [4]. Вследствие большого различия в плотности между речными и морскими водами вертикальный обмен между ними мал, поэтому распреснение вод шельфа происходит в верхнем слое (~ 10 м).

Цель работы заключается в исследовании закономерностей распространения речных вод в море, формирования гидрологических фронтов в приустьевой зоне, образования плотностных течений и оценивании транспорта распресненных вод в прибрежной зоне моря. Результаты работы могут быть использованы для оценивания влияния поступления речных вод, богатых биогенами, на эволюцию морской экосистемы, что имеет важное теоретиче-

ское и практическое значение. Ранее исследовались динамика, формирование и эволюция гидрофронта и прибрежного течения с учетом сезонной изменчивости (взяты типичные условия для апреля и февраля) расхода воды реки и стратификации вод шельфа [4]. Морская граница устьевых взморья реки Дунай соответствует изогалине 17,8 ‰.

В работе использовалась трехмерная  $\sigma$ -координатная численная модель *ECOMSED*, адаптированная для шельфа и эстуариев для расчета циркуляции в прибрежной зоне и переноса взвеси [5]. Параметры модели были подобраны таким образом, чтобы они соответствовали району впадения Дуная в Черное море. Модель была адаптирована для условий северо-западного шельфа Черного моря с учетом топографии дна. Координаты расчетной области: 28 – 31° в.д. и 43 – 46° с.ш., число узлов сетки по оси  $X = 119$ , число узлов сетки по оси  $Y = 167$ , шаг сетки 2 км, шаг по времени 2 мин, количество  $\sigma$ -горизонтов 25. В начальный момент времени расчета включается поступление пресной воды в районе устья Дуная. Соленость вод шельфа 18 ‰, а соленость втекающей воды в районе устья Дуная 8 ‰, температура воды в устье и вод шельфа, расходы реки соответствовал климатическим значениям для апреля. На шельфе задавалось фоновое стационарное течение, направленное на юг, величина скорости течения составляла 5 см/с. Воздействие ветра не рассматривалось. Репрезентативный период расчета составлял в среднем 5 – 10 суток, за который плотностное течение достигало южной границы расчетной области и становилось стационарным. Вертикальное распределение солености по данным численного моделирования для гидрологических условий апреля на различных разрезах представлено на рис. 1.

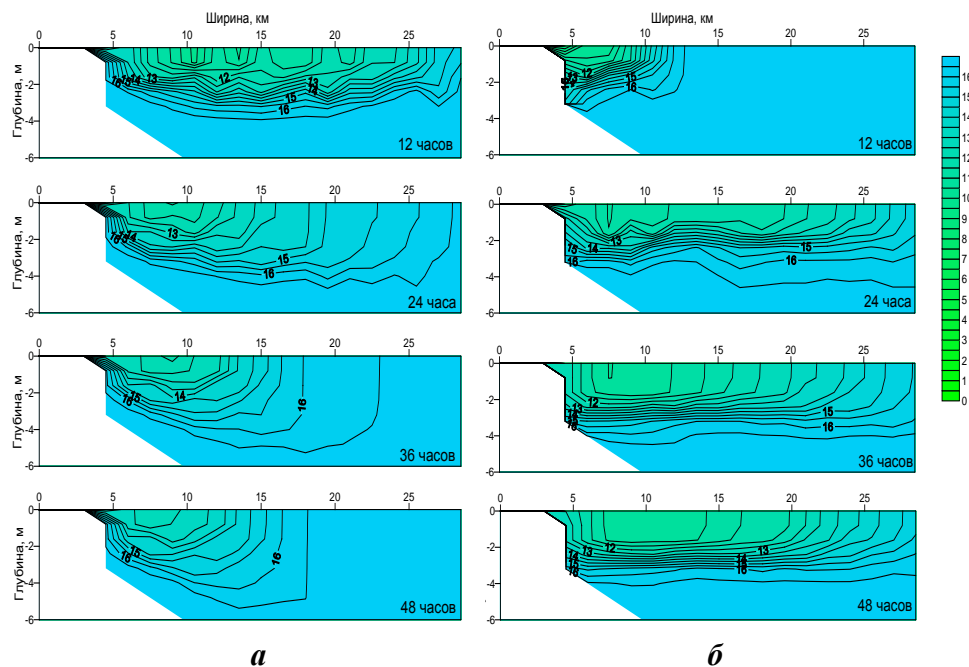
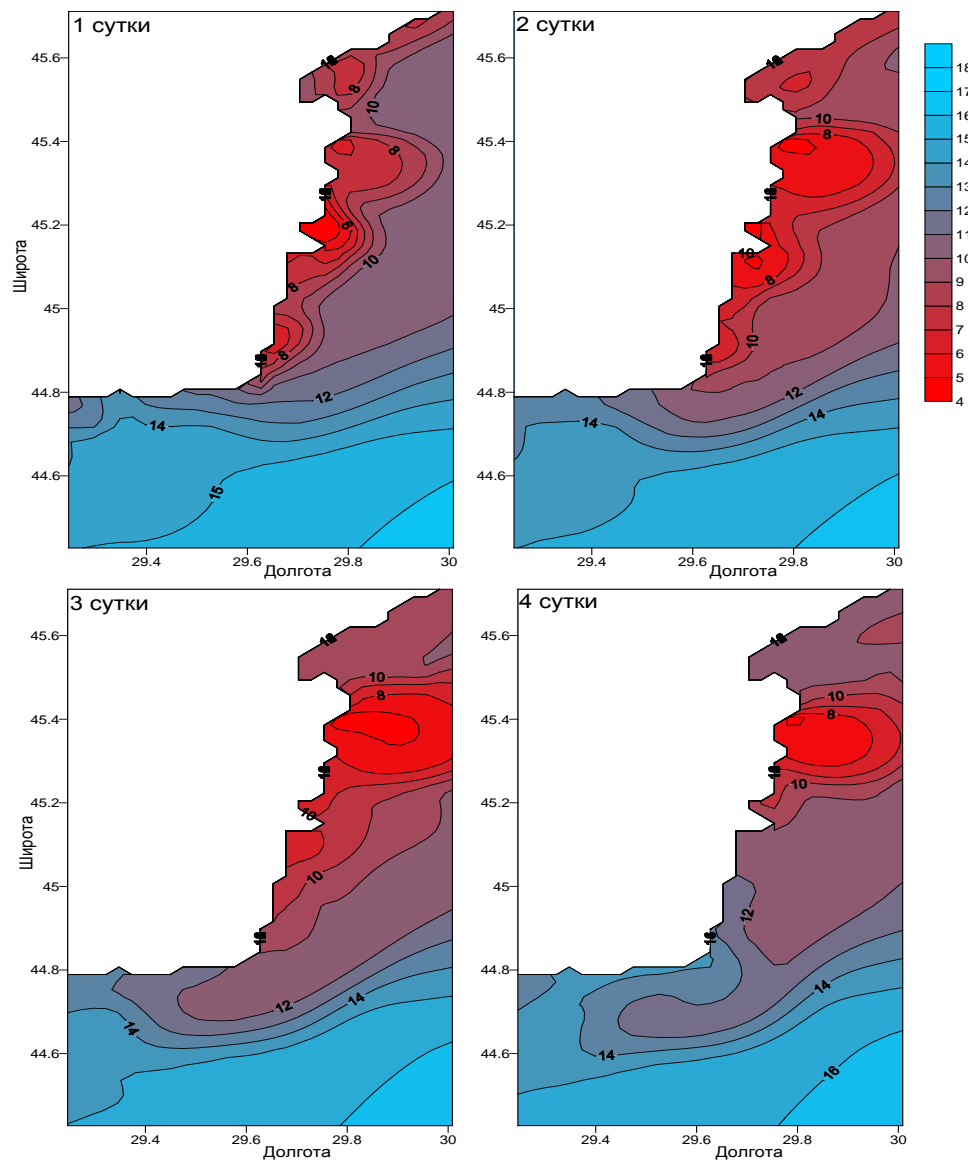


Рис. 1. Соленость по данным моделирования на зональном разрезе для бокса в районе устья (а) и южнее устья (б) для моментов времени 12, 24, 36, 48 часов для гидрологических условий апреля.

Из рисунка видно, что гидрофронт ( $S < 17 ‰$ ) вблизи устья (рис.1, а) в начальный момент времени имеет большую глубину и ширину, что объясняется большим количеством пресной воды, попадающей со стоком реки в районе устья по сравнению с областью, расположенной южнее устья на 44 км (рис.1, б).

Проведен ряд численных экспериментов по изучению влияния реальной конфигурации береговой черты западного побережья Черного моря на процесс формирования прибрежного гидрофронта и плотностного течения в различные сезоны года при различных режимах стратификации вод и вели-



Р и с . 2 . Соленость на поверхности по данным моделирования для моментов времени 1, 2, 3 и 4 суток для адапционного расчета с реальной береговой чертой.

чин расхода Дуная. Для этого расчетная область была подготовлена с учетом конфигурации береговой черты и наличия трех рукавов Дуная (рис.2). Речные воды при попадании в прибрежную область взаимодействуют с более солеными морскими, образуя гидрофронты в районе каждого гирла (всего три). На четвертые сутки численного эксперимента распереженная область увеличивается к востоку от устья и формируется вдольбереговое течение вдоль западного побережья.

По данным контактных измерений на основе подхода [6] оценивались характерные масштабы плюма. Бароклинный радиус деформации Россби для распереженных вод, основанный на толщине верхнего слоя, рассчитывался по формуле

$$R_{di} = (g'h_0)^{1/2} / f ,$$

где  $g' = g\Delta\rho/\rho_0 = g(\rho_0 - \rho_i)/\rho_0$ ;  $g$  – ускорение свободного падения;  $h_0$  – глубина устья;  $\rho_i$  – плотность воды в районе устья, значения брались из климатически данных;  $\rho_0$  – плотность вод шельфа;  $f$  – параметр Кориолиса. Для малого стока или большой разницы плотности вод шельфа и устья  $u = 4,24R_{di}$ . Таким образом, стоковый гидрофронт распространяется в поверхностном слое как минимум на четыре радиуса Россби от берега. В случае большого объема стока или малой разницы плотности вод шельфа и устья  $u = 5,46R_{di}$ . Бароклинный радиус деформации Россби зависит от ширины, формы и глубины прифронтального потока и связанного с ним перепада плотности.

Гидрологические условия для северо-западного шельфа в марте 2016 г. в целом соответствовали климатическим нормам, поэтому представлял интерес сравнить положение стокового гидрофронта, полученное в результате численного моделирования, с данными дистанционного зондирования для ситуаций, когда наблюдался слабый ветер. Для этого были выбраны данные

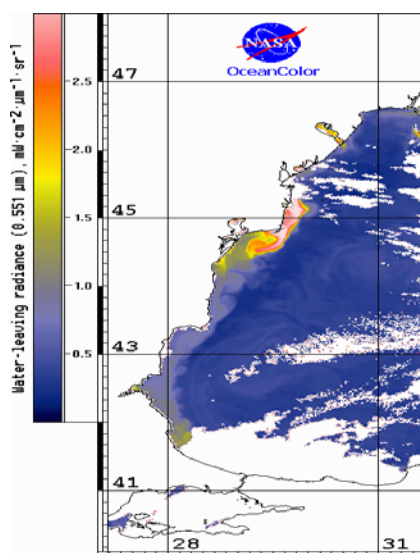


Рис. 3. Положение стокового фронта по данным MODIS 17 марта 2016 г.

высокого разрешения спутника MODIS (<http://dvs.net.ru/mp/data/>) по восходящему излучению на длине волны 551 нм (сигнал в зеленой области спектра пригоден для идентификации пигментов, оптических свойств воды, взвеси) с разрешением по пространству  $\sim 1$  км. На рис.3 выделяется область гидрофронта со сформировавшимся вдольбереговым течением, что качественно соответствует результатам расчета (рис.2).

Сопоставление положения внешней границы плюма по спутниковым снимкам в видимом диапазоне спектра хорошо согласуется с рассчитанными расстояниями и данными гидрологических съемок [7]. Для этого использовались значения расхода воды Дуная за период 1997 – 2012 гг., геометрические параметры рукавов дельты (глубина, ширина) и

данные гидрологических съемок на шельфе за тот же период. В результате проведенного анализа получены оценки межгодовой изменчивости масштабов трансформации вод реки Дунай на северо-западном шельфе Черного моря, глубины залегания и положения внешней границы стоковой фронтальной зоны в зависимости от расходов реки, геометрии устья и стратификации вод шельфа.

Полученные оценки среднего, минимального и максимального значений расстояния от устья до границы стоковой фронтальной зоны для различных сезонов года совпадают с результатами многолетних гидрологических наблюдений. Максимальное расстояние до внешней границы (50 – 54 км) было получено в периоды половодья многоводной фазы стока Дуная (1999, 2000, 2005, 2006 гг.). Минимальное расстояние (26 – 28 км) – в период межени в маловодную фазу стока (1997 – 1998 и 2001 – 2003 гг.).

Таким образом, для северо-западного шельфа Черного моря адаптирована и протестирована трехмерная  $\sigma$ -координатная численная модель *ROM* для шельфа и эстуариев для расчета циркуляции в прибрежной зоне и переноса взвеси *ECOMSED*. Учтена топография дна с реальным рельефом и показано ее влияние на процесс распространения распресненных вод вдоль побережья и положение внешней границы гидрофронта.

Анализ данных моделирования позволил оценить характерные вертикальные масштабы и расстояния от берега до внешней границы стокового фронта реки Дунай. Анализ архивных гидрологических измерений на шельфе позволил получить статистические характеристики расстояния до внешней границы стокового гидрофронта для типичных условий стратификации вод на шельфе и величин расхода воды реки Дунай, расчеты параметров стратификации и радиуса деформации  $R_{di}$  проводились по данным семи гидрологических съемок в районе устья Дуная [7]. При этом минимальное расстояние распространения дунайских вод от берега в сторону моря без учета действия ветра составило  $y = 4,24 R_{di}$ , а максимальное  $y = 5,46 R_{di}$ , где  $R_{di}$  – радиус деформации Россби, что хорошо согласуется как с результатами анализа гидрологических данных [7], моделирования (рис.2), так и со спутниковыми данными (рис.3). Полученные результаты дают представление о характерных пространственно-временных масштабах формирования плюма: вертикальный масштаб составил 4 – 5 м, горизонтальный – от устья до внешней границы гидрофронта 25 – 50 км, характерное время установления стационарного плотностного течения составило 5 – 10 суток.

Таким образом, результаты статьи могут быть использованы при дальнейшем изучении гидрологических процессов в районе устья Дуная для более детального изучения распространения речных вод и динамики вод шельфа, в том числе, с учетом ветрового воздействия, а также для планирования экспедиционных работ.

Работа выполнена в Морском гидрофизическом институте РАН в рамках гос. задания НИОКР № 115062410072 шифр «Фундаментальная океанология».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.А., Кубряков А.И., Михайлова Э.Н., Шатино Н.Б.* Моделирование распресняющего эффекта речного стока во время весеннего половодья на северо-западном шельфе Черного моря // Изв. РАН. ФАО.– 1996.– т.32, № 1.– С.152-160.
2. *Иванов В.А., Ильин Ю.П.* Атмосферные и гидрологические условия, способствующие распространению речных вод в северо-западной части Черного моря // Комплексные экологические исследования Черного моря.– Севастополь, 1995.– С.68-81.
3. *Журбасс В.М., Завьялов П.О., Свиридов А.С., Лыжков Д.А., Андрулионис Е.Е.* О переносе стока малых рек вдольбереговым бароклинным морским течением // Океанология.– 2011.– т.51, № 3.– С.440-449.
4. *Цыганова М.В., Хартиев С.М., Лемешко Е.М., Рябцев Ю.Н.* Исследование прибрежной циркуляции вод шельфа в районе дельты Дуная на основе численного моделирования // Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем.– Ростов н/Д, 2015.– т.1.– С.304-308.
5. *ECOMSED.* <http://www.hydroqual.com/ehst.html>.
6. *Yankovsky A.E., Chapman D.C.* A simple theory for the fate of buoyant coastal discharges // J. Phys. Ocean.– 1997.– v.27.– P.1386-1401.
7. *Кириленко Н.Ф.* Межгодовая изменчивость трансформации вод Дуная на северо-западном шельфе Черного моря // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008.– С.340-344.

Материал поступил в редакцию 12.02.2016 г.  
После доработки 12.09.2016 г.

M.V.Tsyganova, E.M.Lemeshko, Yu.N.Ryabcev

#### **MODELLING OF HYDROFRONT FORMING ON THE DANUBE MOUTH AREA**

The Danube river inflow influence on the hydrological structure of the shelf waters and circulation features on the western Black Sea shelf is studied on the basis of numerical modeling. The 3-D  $\sigma$ -coordinate numerical model ECOMSED, which was adapted to the shelf and estuarine conditions, is used for circulation computation in the coastal zone and sediment transport. Model parameters were chosen as appropriate for the Danube delta region in the Black Sea. The number of numerical experiments was fulfilled for investigation of real configuration the Black Sea coastal line influence on formation process of coastal hydrological front and buoyancy current.

**KEYWORDS:** *shelf, coastal dynamics, baroclinic current, river inflow, hydrofront, numerical modelling, the Danube, the Black Sea*