

А.А.Кубряков\*, С.В.Станичный\*,  
А.Г.Зацепин\*\*, В.В.Кременецкий\*\*

\**Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

\*\**Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, г.Москва*

### **РАСПРОСТРАНЕНИЕ РЕЧНЫХ ВОД В ЧЕРНОМ И КАРСКОМ МОРЯХ ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ УРОВНЯ, СОЛЕННОСТИ И ХЛОРОФИЛЛА А**

На основе спутниковых измерений солёности и хлорофилла А и данных гидрологических зондирований анализируются ареалы распространения речных вод в Карском и Черном морях. Для определения траекторий распространения опреснённых вод предлагается модель, основанная на спутниковых альтиметрических измерениях и данных о скорости ветра. Предложенная модель позволила описать динамику трансформации областей, занятых речными водами, идентифицированную по спутниковым и контактными данным. Исследовано влияние различных факторов на динамику опреснённого слоя речных вод.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *распространение речных вод, речной плум, спутниковая солёность, спутниковая альтиметрия.*

Речной сток оказывает существенное влияние на гидрофизические и биологические характеристики морских экосистем. Речные воды участвуют в формировании солевого баланса морей, их термохалинной структуры, биологического режима в прибрежных районах, значительно воздействуют на оптические свойства вод. Опреснённый слой также может вызывать развитие халинной циркуляции и влиять на локальную динамику региона.

Особенно этот фактор важен для тех бассейнов, в которые впадают крупные реки, к которым относятся Черное и Карское моря. На северо-западном шельфе бассейна Черного моря находится устье второй крупнейшей реки Европы – Дуная, которая ежегодно приносит ~ 150 км<sup>3</sup>/год [1]. Суммарный сток Дуная, Днепра и Днестра в северо-западной части составляет 250 км<sup>3</sup>/год [1]. В Карское море впадают две крупнейшие реки Сибири – Обь и Енисей. Ежегодный сток Оби составляет 400 – 450 км<sup>3</sup>/год, Енисея 600 – 630 км<sup>3</sup>/год [2].

Речные воды распространяются под действием различных факторов, - дрейфовых течений, геострофической крупно- и мезомасштабной динамики. Пресные, обогащенные биогенами воды переносятся в открытое море, тем самым воздействуя на характеристики отдалённых районов океана. При этом существует заметная межгодовая изменчивость в направлении и протяженности распространения пресных вод в зависимости от метеорологических и гидрологических условий [2].

В настоящей работе на основе спутниковых измерений солёности и хлорофилла А, а также данных гидрологических зондирований анализируются ареалы распространения речных вод в Карском и Черных морях. Для определения траекторий распространения опреснённых вод предлагается

модель, основанная на спутниковых альтиметрических измерениях и данных о скорости ветра.

**Данные.** В работе использовались среднемесячные карты солёности, полученные по спутниковым измерениям микроволнового радиометра *Aquarius* с пространственным разрешением 100 км (<http://podaac.jpl.nasa.gov/>). Солёность определяют по данным о диэлектрической проницаемости жидкости, вычисленной как отношение температуры и измеренной яркостной температуры на длине волны 21 см [3].

Карты концентрации хлорофилла А получены по данным измерений прибора *MODIS* (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>).

Для расчёта геострофической скорости поверхностных течений использовались карты полной динамической топографии, полученные с архива *AVISO* (<http://www.aviso.oceanobs.com>). Динамическая топография определялась как сумма картированных аномалий уровня моря, рассчитанных по комбинированным вдольтрековым измерениям современных спутниковых альтиметров и средней динамической топографии из работы [4] для Чёрного моря и из работы [5] для Карского. Временное разрешение картированных данных 7 дней, пространственное  $0,25^\circ$ . Поверхностные геострофические скорости течений рассчитывались из уравнения геострофического баланса.

Для анализа изменчивости ветра использовались данные *NCEP* (*National Centers for Environmental Prediction*) на  $1^\circ$  равномерной сетке с 6-ти часовым интервалом (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>).

Контактные измерения поверхностной солёности получены во время 59 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Карском море в сентябре 2011 г.

**Метод расчёта траекторий распространения речных вод.** Для определения траекторий распространения речных вод в точках вблизи Дунайского и Обь-Енисейского взморья располагались постоянные источники лагранжевых частиц. Каждый шаг по времени (6 ч) из каждой точки выпускалась новая частица. Перемещение частицы рассчитывалось по схеме Эйлера  $\vec{r}_{i+1} = \vec{r}_i + \vec{V} \cdot dt$ . Шаг по времени  $dt$  был равен 6 ч, что соответствует временной дискретности данных по скорости ветра. Полная скорость течения в приповерхностном слое определялась как сумма  $\vec{V} = \vec{V}_g + \vec{U}_e$ , где  $\vec{V}_g$  – геострофическая скорость,  $U_e$  – интегральная скорость Экмановского переноса. Скорость  $U_e$  определялась по формуле [2]

$$U_e = \tau / \rho_w f H_0,$$

где  $\tau = c_d \rho_a \cdot |v| \cdot v$ . Здесь  $\tau$  – напряжение трения ветра;  $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho_a = 1,3 \text{ кг/м}^3$  – плотность воды и атмосферы, соответственно;  $v$  – скорость ветра;  $f$  – параметр Кориолиса;  $H_0 = 10 \text{ м}$  – характерная толщина ПОС;  $c_d = 1,4 \cdot 10^{-3}$  – коэффициент трения ветра. Поскольку для речного плюма при нестационарном ветровом воздействии угол направления экмановского переноса может быть меньше  $90^\circ$ , в модели на основе серии численных экспериментов был выбран угол  $45^\circ$ , при котором модель максимально соответствовала измерениям.

**Результаты.** На рис.1 на среднее поле солёности для Карского моря за сентябрь 2011 г., полученное по данным *Aquarius*, нанесена линия постоянной

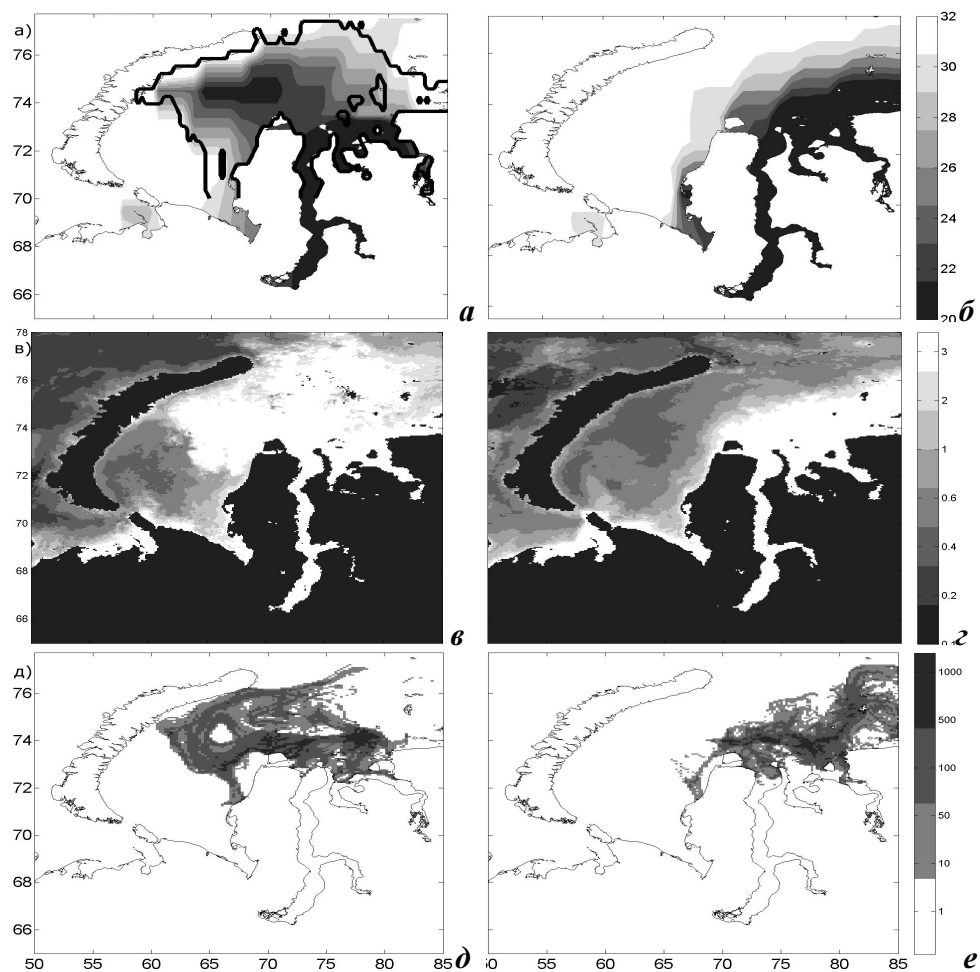
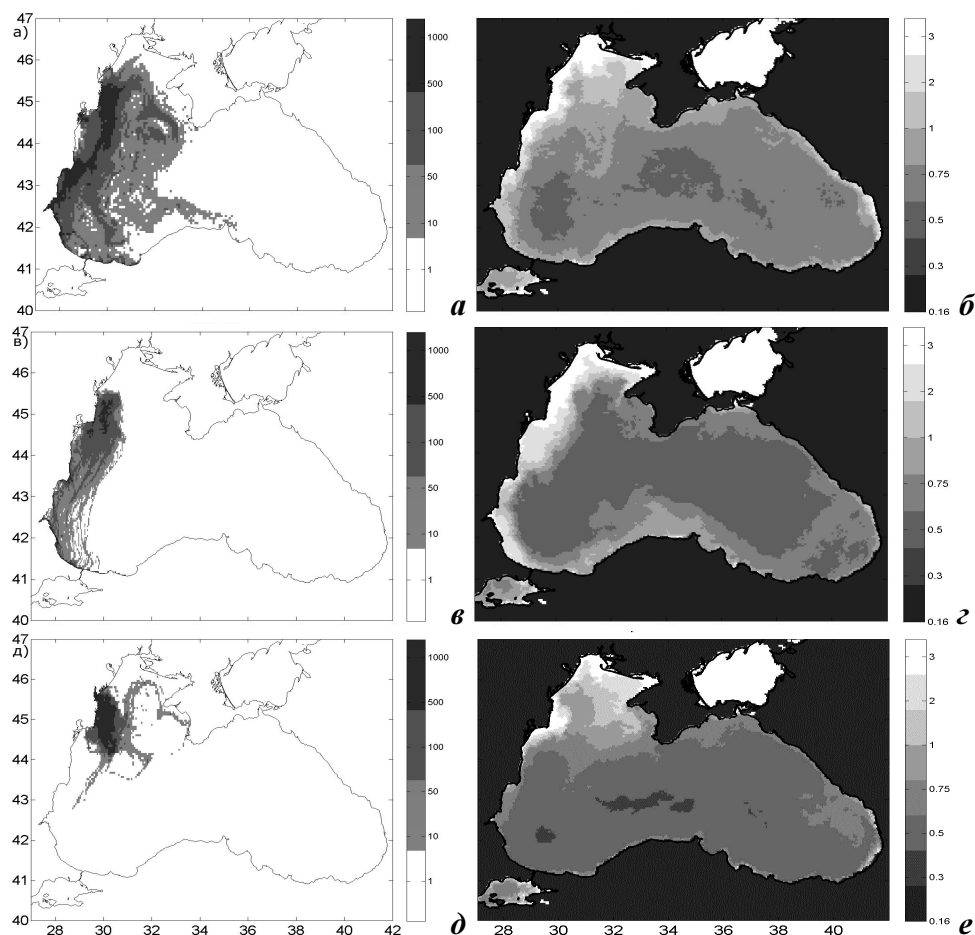


Рис. 1. Поля спутниковой солености за сентябрь 2011 (а) и 2012 (б) гг. Контурами нанесена изохалина 26 psu, рассчитанная по гидрологическим измерениям. Поля спутникового хлорофилла А за сентябрь 2011 (в) и 2012 (г) гг. Концентрация виртуальных трассеров, рассчитанных по модели за сентябрь 2011 (д) и 2012 (е).

солености  $S = 26$  psu, построенная по данным контактных измерений. Оба поля достаточно хорошо согласуются между собой. Тип распространения речных вод, наблюдавшийся в 2011 г., соответствует "западному" типу распространения, когда опресненный слой вод распространяется на северо-запад, достигая Новой Земли.

Это же можно наблюдать и по оптическим измерениям – область повышенных значений хлорофилла А, соответствующая богатым речным водам, имеет такой же вид. На рис.1, в изображены концентрации виртуальных трассеров, рассчитанные по предложенной модели. Концентрации рассчитывались как сумма всех частиц, прошедших через соответствующий бокс на сетке  $0,2^\circ$ . Предложенная модель достаточно хорошо описала наблюдавшуюся картину. Модель показала, что частицы распространялись на запад из-за возникшей антициклонической ячейки циркуляции, которая, возможно, сформировалась из-за локального действия плюма.



Р и с . 2 . Примеры рассчитанных концентрации виртуальных трассеров и спутникового хлорофилла А за сентябрь 2004 (а, б), август 2006 (б, з), и 2007 (д, е) гг.

В следующем 2012 г. наблюдалась другая картина (рис.2). Пресные воды распространялись на восток и были сильно прижаты к берегу. Это демонстрируют карты спутниковой солености и хлорофилла. Аналогичный результат был получен по расчетам модели (рис.2, в). Как показал анализ, различие в характере распространения пресных вод может быть связано с направлением преобладающих ветров. В 2011 г. превалировал северо-восточный ветер, а в 2012 г. – северо-западный. При северо-восточном ветре отклонение интегрального экмановского дрейфа на  $45^\circ$  направо от направления ветра, действительно, приводит к западному направлению распространения ПОС. При северо-западном ветре такое же отклонение приводит к южному направлению распространения и прижатия ПОС к материку.

Таким образом, предложенная модель позволила правильно воспроизвести оба различных типа распространения речных вод в Карском море, что свидетельствует о её пригодности для расчетов в другие года и регионы.

Поскольку данные альтиметрии доступны с 1993 г., модель позволяет восстановить историю распространения вод с 1993 по 2012 гг. На рис.2 изо-

бражены примеры рассчитанных ареалов дунайских вод в Черном море за некоторые года и соответствующие им карты хлорофилла А. Можно выделить несколько типов распространения пресных вод: 1) пресные воды прижаты к западному берегу (например, 2006 г.); 2) в теплые года из-за возникновения антициклонического ветра распространение пресных воды блокировано и они позиционируются на северо-западном шельфе (2007 г.); 3) прижатые к берегу пресные воды переносятся на значительное расстояние мощными антициклонами и занимают практически половину западной части бассейна (2004 г.).

Таким образом, в работе были исследованы особенности распространения пресных вод в Карском и Черных морях. Предложенная модель, основанная на альтиметрических измерениях и параметризации экмановского переноса, позволила воспроизвести динамику распространения речных вод за период с 1992 по 2012 гг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А.* Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее / Под ред. В.Н.Еремеева.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– 210 с.
2. *Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В., Поярков С.Г., Соловьев Д.М.* Поверхностный опресненный слой в Карском море // *Океанология.*– 2010.– т.50, № 5.– С.698-708.
3. *Кубряков А.А., Станичный С.В.* Восстановление средней динамической топографии Черного моря для альтиметрических измерений // *ИЗК.*– 2011.– № 4.– С.1-7.
4. *Rio M.H., Guinehut S., Larnicol G.* New CNES-CLS09 global mean dynamic topography computed from the combination of GRACE data, altimetry, and in situ measurements // *J. Geophys. Res.*– 2011.– 116, C07018. doi:10.1029/2010JC006505.
5. *Lagerloef G., et al* Resolving the global surface salinity field and variations by blending satellite and in situ observations // *Proc. OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society.*– 2010.– v.2.– P.

Материал поступил в редакцию 15.08.2013 г.

**АНОТАЦІЯ** На основі супутникових вимірювань солоності і хлорофілу А і даних гідрологічних зондувань аналізуються ареали поширення річкових вод в Карському і Чорному морях. Для визначення траєкторій поширення опреснених вод пропонується модель, заснована на супутникових альтиметричних вимірах і даних про швидкість вітру. Запропонована модель дозволила описати динаміку трансформації областей, зайнятих річковими водами, ідентифіковану за супутниковими і контактними даними. Досліджено вплив різних факторів на динаміку опреснення шару річкових вод.

**ABSTRACT** The river plumes distribution in the Kara and Black seas are investigated basing on the satellite measurements of salinity and chlorophyll a and hydrological data. To determine the propagation paths of desalinated water, a model based on satellite altimetry measurements and wind speed data is proposed. The model allows to describe the river plume dynamics, identified from satellite and in-situ data. Impact of various factors on the dynamics of the freshened layer of river water is investigated.