

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

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

***Институт океанологии им. П.П.Шишова 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 плюм, 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 км³/год [1]. Суммарный сток Дуная, Днепра и Днестра в северо-западной части составляет 250 км³/год [1]. В Карское море впадают две крупнейшие реки Сибири – Обь и Енисей. Ежегодный сток Оби составляет 400 – 450 км³/год, Енисея 600 – 630 км³/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 протяжённости 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°. Поверхностные геострофические скорости течений рассчитывались из уравнения геострофического баланса.

Для анализа изменчивости ветра использовались данные *NCEP* (*National Centers for Environmental Prediction*) на 1° 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 $\tau = c_d \rho_a \cdot |\vec{v}| \cdot \vec{v}$. Здесь τ – 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°, в модели на основе серии численных экспериментов был выбран угол 45°, 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

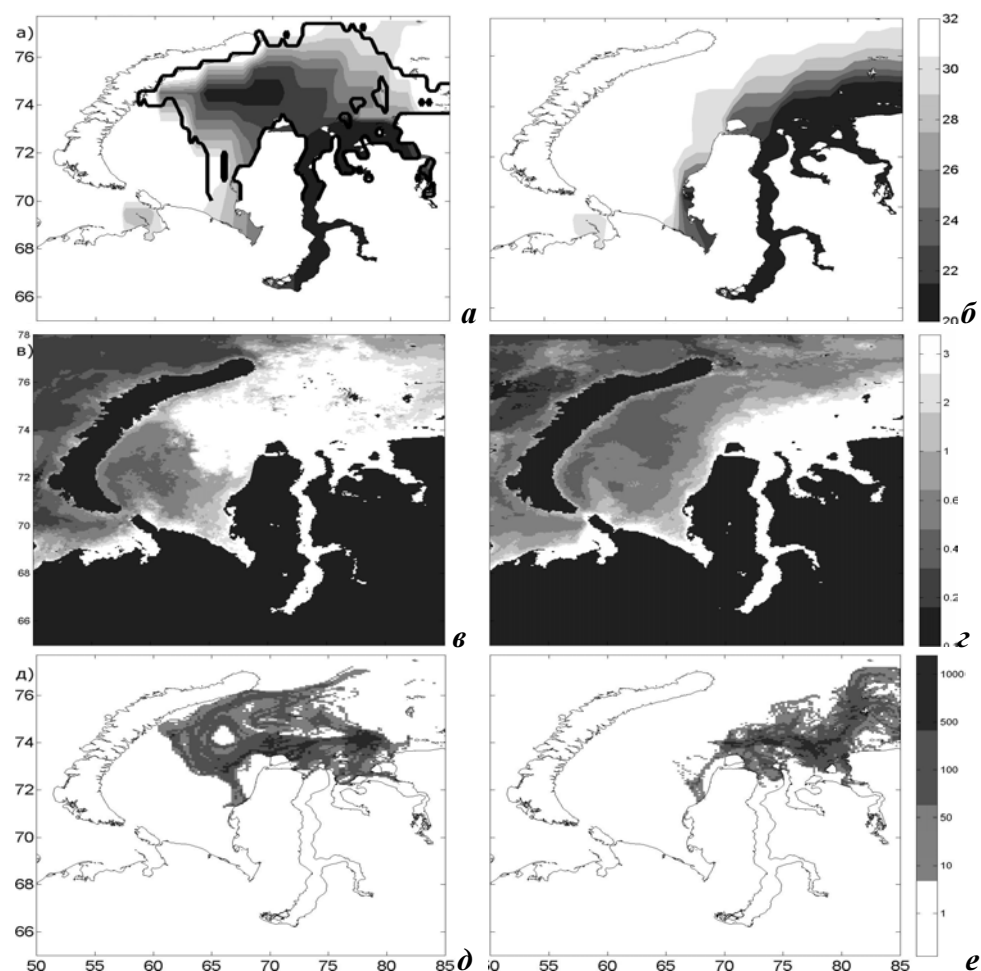
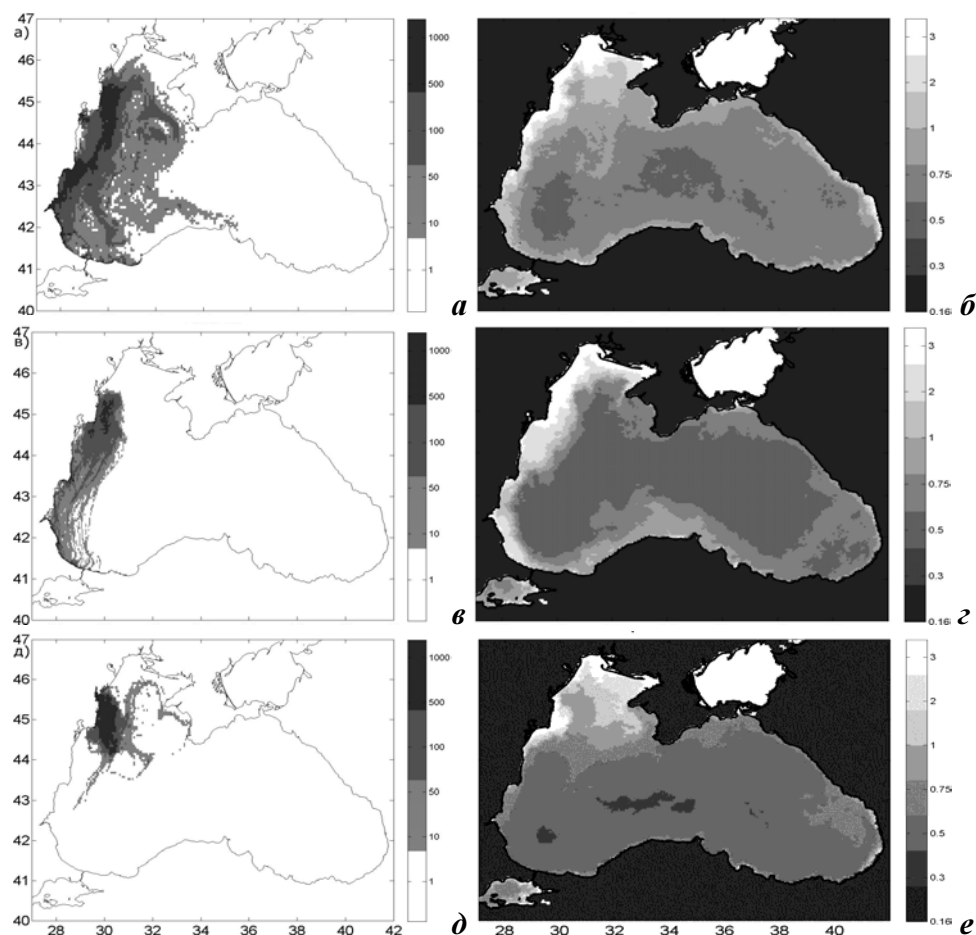


Рис. 1. Поля спутниковой солености за сентябрь 2011 (а) и 2012 (б) гг. Контурами нанесена изохалина 26 psu, рассчитанная по гидрологическим измерениям. Поля спутникового хлорофилла А за сентябрь 2011 (в) и 2012 (г) гг. Концентрация виртуальных трассеров, рассчитанных по модели за сентябрь 2011 (д) и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