

УДК: 551.468+465

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-32-41

Е.М. Лемешко¹, М.В. Цыганова¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЕЧНОГО ПЛЮМА ДУНАЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

Актуальность исследований прибрежной циркуляции, связанной с речным стоком, обусловлена антропогенной нагрузкой на экологическое состояние вод шельфа. Речные воды, попадая в море, образуют в районе устья мезомасштабные структуры, отличающиеся пониженной соленостью с высоким содержанием взвеси и растворенной органики. Такие структуры в современной литературе называют «плюмами». При свободном инерционном движении плюм принимает вид области округлой формы или «горба» (от англ. bulge), течение в которой имеет антициклонический характер. Целью данной работы является исследование распространения распресненных вод, образованных стоком реки, и закономерностей формирования гидрологической структуры вод, динамики стокового течения, образования термохалинных фронтов на шельфе на основе численного моделирования.

С помощью численного моделирования исследуется формирование и дальнейшее распространение речного плюма на шельфе без учета воздействия приливов. Использована трехмерная σ -координатная численная модель, адаптированная для шельфа и эстуариев. Расчеты проведены для прямоугольной области. Рассмотрено влияние изменения основных параметров стока, геометрии устья, уклона дна и ветра на развитие плюма и распространение вдольберегового плотностного течения. Полученные результаты моделирования для условий северо-западного шельфа Черного моря и стока Дуная согласуются с оценками характеристик плюма по данным архивных гидрологических наблюдений температуры и солености воды.

Результаты работы могут быть использованы при дальнейшем изучении гидрологических процессов в районе устьев рек, особенностей формирования и эволюции плюмов, оценки транспорта взвешенных веществ, биогенных элементов и микропластика в прибрежной зоне морей и океанов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: речной плюм, шельф, численное моделирование, Дунай, Черное море.

Evgeny M. Lemeshko², Marina V. Tsyganova²

INVESTIGATION OF DANUBE RIVER PLUME FORMATION AND PROPAGATION BASED ON NUMERICAL MODELING

ABSTRACT

The relevance of the studied circulation caused by the water river runoff deals with the anthropological impact on the ecological state of the shelf. River waters, entering into the sea, form mesoscale structures in the delta's area, characterized by low salinity with a high level of

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Капитанская, д. 2, 299011, Севастополь, Россия, e-mail: m.tsyganova@mhi-ras.ru

² Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Kapitanskaya, 2, 299011, Sevastopol, Russia, e-mail: m.tsyganova@mhi-ras.ru

suspended matter and dissolved organic matter. Such structures are called "plume" in modern literature. In this case, the inertial motion of the plume is free to form a rounded area or "bulge" like anticyclonic circulation type of flow.

The purpose of this work is to investigate the propagation of freshened waters, formed by the river inflow, the formation of the waters hydrological structure regularities, dynamics of the buoyancy current, and thermohaline front formation on the base of numerical modeling.

Numerical modeling is used to study the formation of a river plume and downward propagation of buoyancy current on the shelf without taking into account the tides forcing. A three-dimensional σ -coordinate numerical model was used, adapted for the shelf and estuaries. The calculations were carried out for a rectangular box area.

The influence of changes in the main parameters of the runoff, the mouth geometry and wind forcing are considered to development of the plume and the alongshore propagation of buoyancy current. The obtained modeling results for the conditions of the Northwestern Black Sea shelf and the Danube discharge are consistent with the estimates of plume characteristics based on the archival hydrological observations data of water temperature and salinity.

The results of this work can be used for further study of hydrological processes in the region of river mouths, the peculiarities of the plumes formation and evolution, assessment of the suspended matter, biogenic elements and microplastics transport in the sea and ocean coastal zones.

KEYWORDS: river plume, shelf, numerical modelling, Danube Black Sea.

ВВЕДЕНИЕ

На экологическое состояние вод шельфа морей и океанов значительное влияние оказывает пресноводный материковый сток. В первую очередь, с речными водами поступают биогенные вещества и продукты антропогенного загрязнения. Также распресненные воды существенно влияют на потоки плавучести, тепла и динамику в прибрежной зоне. Речные воды характеризуются высокой временной изменчивостью, а также резкими градиентами на границах. Поэтому исследование распространения речных плумов является сложной задачей и использование, например, только гидрологических зондирований или спутниковых данных недостаточно для изучения закономерностей распространения плумов и оценивания их пространственно-временных характеристик. Поэтому основное внимание в этой статье уделено численному моделированию для изучения речных плумов.

Динамика и изменчивость речных плумов являются ключевыми факторами для понимания механизмов распространения, трансформации и перераспределения материкового стока и речных составляющих в прибрежных морях и их влияния на континентальные шельфы [Fong, 2002; Hetland, 2005]. Типы речных плумов в мире характеризуются широким разнообразием структуры, морфологии и динамических характеристик, обусловленных большими различиями в региональных особенностях [Завьялов, 2020; Осадчиев, Коршенико, 2017; Осадчиев, Седаков, 2019; Horner-Devine, 2015].

Перенос пресной воды на шельфе определяется потенциальной энергией прибрежного течения у береговой зоны. Более интенсивные прибрежные течения те, которые имеют большую аномалию плавучести, они способны переносить больше пресной воды до 70 % от объема стока реки. Потенциальная энергия прибрежного течения и, следовательно, перенос пресной воды в основном зависят от числа Россби, связанного с речным стоком [Fong, 2002].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наличие обширного шельфа на северо-западе Черного моря и стока крупных рек - Днепра, Днестра и крупнейшей реки Европы, Дуная, делает его природным лабораторным объектом для изучения динамики плюмов и процесса распространения распресненных вод на шельфе. Отсутствие в Черном море приливов частично упрощает эту задачу. Разнообразие морфологических типов плюма [Horner-Devine, 2015], от дельты Дуная с четырьмя крупными рукавами до Днепро-Бугского лимана, как обширного эстуария, позволяет использовать многолетние архивные данные гидрологических наблюдений в этих районах для верификации широкого класса моделей речных плюмов.

На динамику вод на северо-западном шельфе Черного моря, в первую очередь, влияют значительный речной сток, интенсивный водообмен с открытым морем и ветер. Влияние этих факторов определяет такой режим вод на шельфе, когда в осенне-зимнее время вода перемешана от поверхности до дна, а в весенне-летнее из-за сильного прогрева образуется двухслойная стратификация [Блатов, 1992]. Поэтому изучению трансформации речных вод Дуная при впадении в море уделяется большое внимание. Определенный прогресс в изучении распространения плюма Дуная достигнут на основе анализа спутниковых оптических изображений, данных атмосферного реанализа и численного моделирования [Кубряков, 2017; Цыганова, 2016; Dinu, 2017; Meladinova, 2020]. В последнее время становится актуальным исследование переноса микропластика речными водами. В работе [Завьялов, 2020] сформулирована гипотеза о том, что плавающий пластиковый мусор в прибрежных водах океана в основном сосредоточен в речных плюмах, связанных с пресноводным материковым стоком, и его динамика в значительной степени определяется именно динамикой плюмов.

Распространение плюмов также имеет сезонный характер. Распресняющее действие стока рек способствует усилению общей стратификации и формированию фронтальной зоны, существующей в весеннее время и распространяющейся вдоль западного побережья Черного моря. Для летнего периода характерен слабый водообмен между верхним и нижним слоями водных масс, обновление нижнего слоя которых происходит исключительно за счет водообмена с открытой частью моря. В осенне-зимнее время перемешивание слоев происходит за счет конвективного перемешивания, ветрового воздействия и процессов вовлечения в придонном пограничном слое [Блатов, 1992]. Для режима стока воды Дуная характерны хорошо выраженное длительное и высокое весенне-летнее половодье и летне-осенняя межень. Весенне-летнее половодье наблюдается в марте-июне, летне-осенняя межень - в августе-сентябре [Михайлов, 2004].

Для проведения численных экспериментов в данной работе выбрана трехмерная сигма-координатная модель совместной динамики мелкого моря [Фомин, 2008, Tsyganova, 2020]. 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: координаты расчетной области: 28–31 °в.д. и 43–46 °с.ш., число узлов сетки по X = 119, число узлов сетки по Y = 167, шаг сетки 2 км, шаг по времени 2 мин., количество сигма-горизонтов 25. В качестве начальных значений использовалась соленость вод шельфа 18‰, а соленость втекающей речной воды в районе устья Дуная 6 ‰, температура воды в устье и вод шельфа, расходы реки задавались климатическими значениями [Tsyganova, 2020]

Распространение речных вод на шельфе локализовано в поверхностном слое и под действием силы Кориолиса поток отклоняется в антициклоническом направлении в Северном полушарии. В результате, формируется вдольбереговое течение, схема которого изображена на рис. 1, где L – ширина устьевой области; h_0 – глубина устья; $v_i = Q/h_0L$ –

постоянная скорость реки; Q – расход воды в реке; ρ_i – плотность воды в районе устья; ρ_0 – плотность вод шельфа; r_s – радиус стоковой линзы [Yankovsky, 1997].

Для оценки расстояния распространения гидрофронта от устья реки, согласно [Yankovsky, 1997], применима следующая формула, :

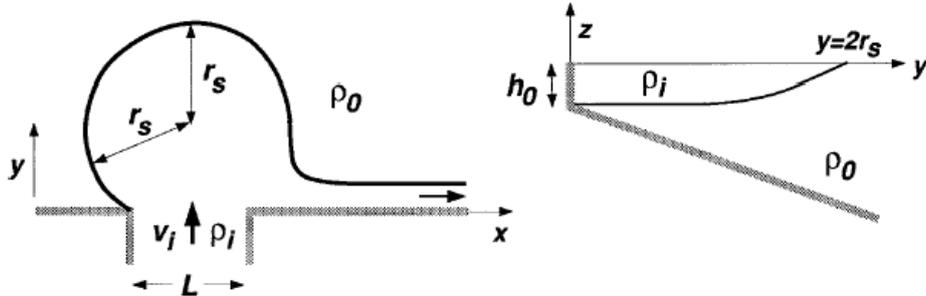


Рис. 1. Схема образования плюма и циркуляции вод в районе устья реки

Fig. 1. Diagram of plume formation and water circulation in the river mouth area

$$y = 2r_s = \frac{2(3g'h_0 + v_i^2)}{f(2g'h_0 + v_i^2)^{1/2}}, \quad (1)$$

где $g' = g\Delta\rho / \rho_0 = g(\rho_0 - \rho_i) / \rho_0$, g - ускорение свободного падения, ширина устьевой области (L), глубина устья - h_0 , $v_i = Q / (h_0 \cdot L)$ - постоянная скорость течения реки, Q - расход воды в реке, ρ_i – плотность воды в районе устья, $y = 2r_s$ – расстояние от берега до внешней границы плюма, то есть до мористой границы распространения распресненных вод в районе устья, ρ_0 - плотность вод шельфа. Формулу (1) можно переписать в безразмерном виде:

$$y = 2r_s = R_{di} \frac{2(3 + F_i^2)}{(2 + F_i^2)^{1/2}}, \quad (2)$$

$R_{di} = (g'h_0)^{1/2} / f$ – бароклинный радиус деформации Россби для распресненных вод, $F_i = v_i / (g'h_0)^{1/2}$ – число Фруда. Рассмотрим два предела в формуле (2). Первый случай – малого стока или большой разницы плотности вод шельфа и устья: $v_i^2 \leq g'h_0$; $F_i \leq 1$, что дает $y = 4.24R_{di}$. Таким образом, стоковый гидрофронт распространяется в поверхностном слое как минимум на четыре радиуса Россби от берега. Второй предел в случае большого объема стока или малой разницы плотности вод шельфа и устья $v_i^2 \geq g'h_0$; $F_i \geq 1$, что приводит к $y = 2v_i / f$ [Yankovsky, 1997].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты численных экспериментов для прямоугольной области без влияния ветра показали, что формируется стоковое течение, которое распространяется вдоль берега от дельты Дуная на юг. Скорость распространения фронта плотностного вдольберегового течения можно оценить по следующей формуле [Yankovsky, 2004]:

$$c_p \approx c_w / (1 + c_w / c_\alpha), \quad (3)$$

где $c_\alpha = \alpha g' / f$; $c_w = \sqrt{g' h_b}$, где h_b – глубина распресненного слоя. Для гидрологических условий северо-западного шельфа были выбраны следующие величины $\Delta\rho = 3,5 \text{ кг м}^{-3}$; $\rho_0 = 1014 \text{ кг м}^{-3}$; $\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$ – уклон шельфа; $h_b = 15 \text{ м}$ (по изохалине 16‰); и скорость распространения c_p по формуле (3) составила $0,4 \text{ м с}^{-1}$. Тогда при расстоянии от устья до южной границы расчетной области 180 км (рис. 2) время добегания фронта вниз по течению составило 5,2 суток. Данная оценка получена без учета ветрового воздействия, которое значительно увеличивает или уменьшает скорость распространения речных вод в зависимости от направления ветра.

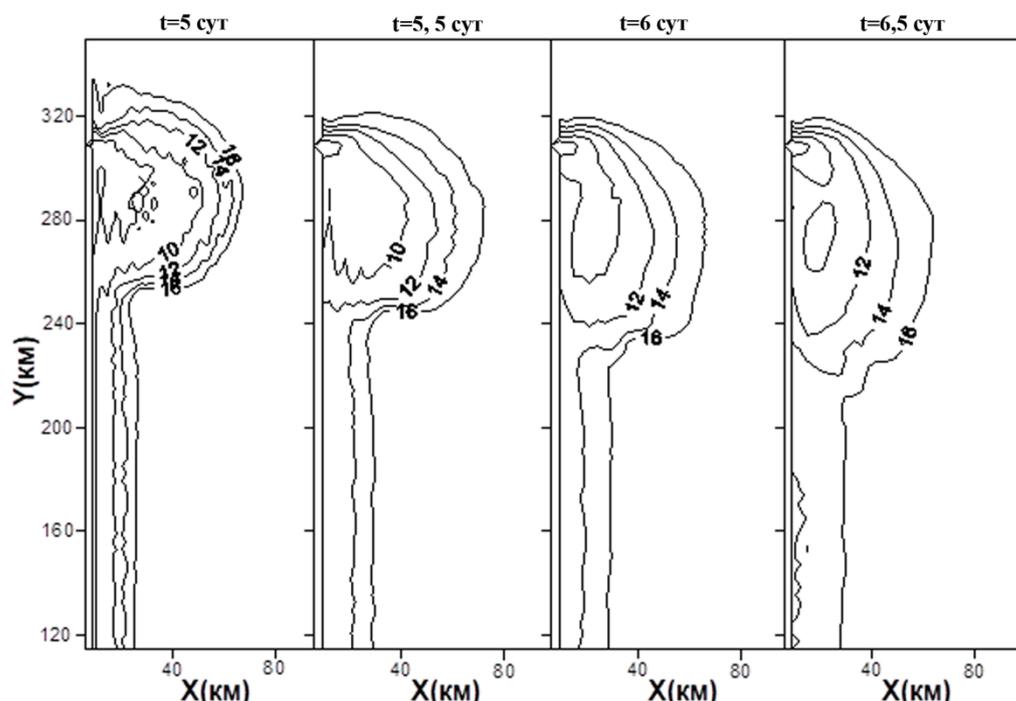


Рис. 2. Соленость на поверхности моря по данным моделирования

Fig. 2. Salinity at the sea surface according to modeling data

Приведенные параметры использовались для численного эксперимента. На рис. 2 приведена эволюция стокового гидрофронта непосредственно в районе дельты Дуная и вдольберегового течения, южная граница гидрофронта по изохалине 16‰ достигает границы расчетной области на пятые сутки, что соответствует приведенным выше оценкам, в последующие дни наблюдается эволюция ширины плюма и вдольберегового течения (рис. 2). Ширина плотного течения W_p на пятый день составила 15 км (рис. 2), по формуле (4) с учетом (3) получаем оценку 11,5 км для тех же параметров, и 15 км для $\Delta\rho = 8 \text{ кг м}^{-3}$.

$$W_p = (c_w / f) \cdot (1 + c_w / c_\alpha) \quad (4)$$

$$h_b = \sqrt{2Qf / g'} \quad (5)$$

Расстояние от берега до внешней границы плюма в районе устья по данным моделирования составило 55 км от берега уже через 5 суток после начала стока воды в море. Через 6,5 суток градиент солености по нормали к берегу значительно уменьшается и

картина распределения солености на поверхности моря достигает квазистационарного состояния (рис. 2, а). Характерное расстояние до границы $\sim 55\text{--}60$ км в целом соответствует климатическим значениям солености по архивным гидрологическим данным и согласуется с оценками по формулам (1–2).

Был проведен ряд численных экспериментов по изучению влияния ветра на распространение плюма. На рис. 3 показано, что при действии северного ветра 10 м с^{-1} и при расходе реки $Q = 7000\text{ км}^3\text{ с}^{-1}$ плюм смещается вдоль берега вниз по течению, и его ширина уменьшается со временем, достигая значения 24 км через 5 суток и 17 км через 6,5 суток (рис. 3, а).

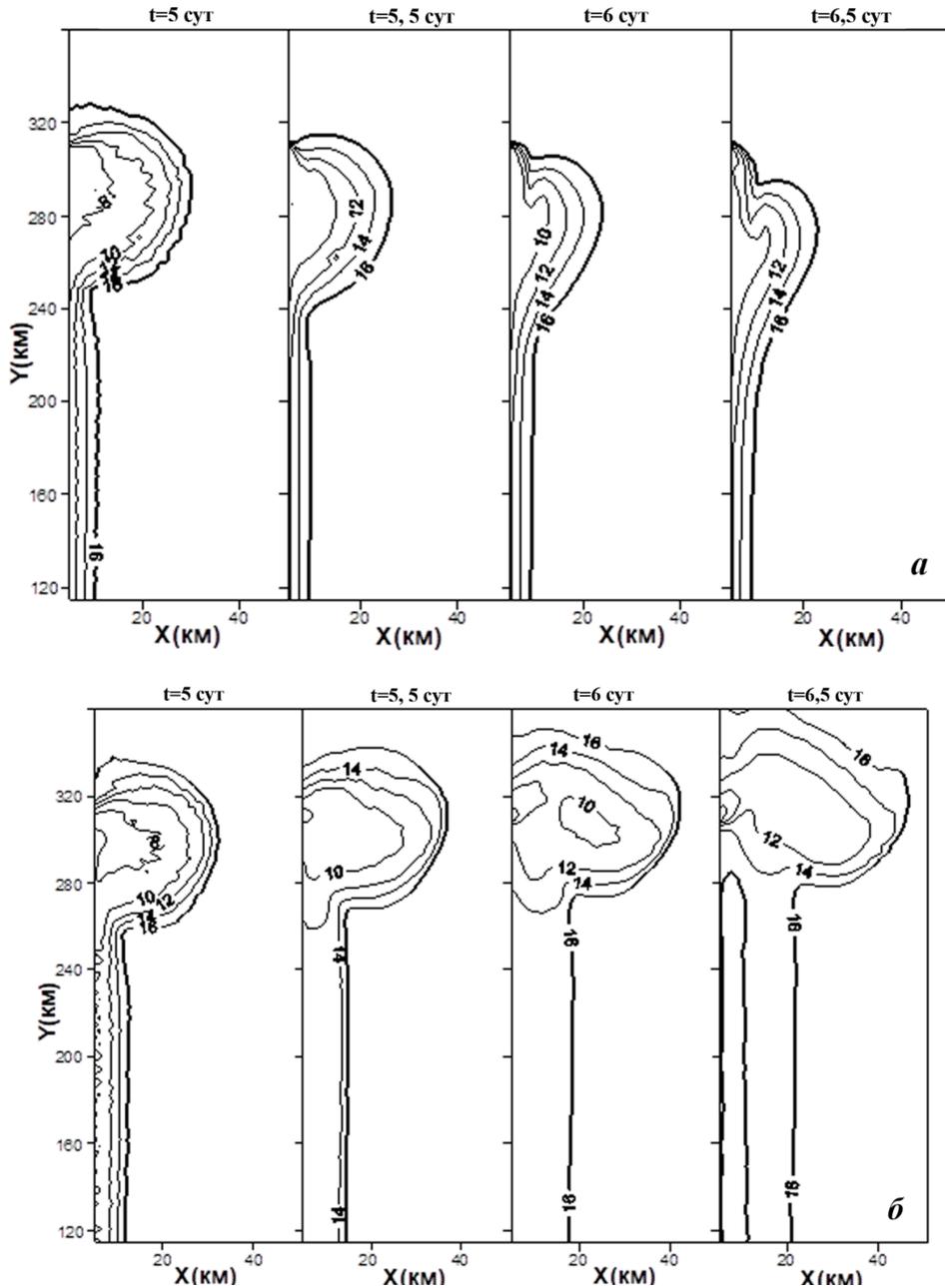


Рис. 3. Соленость на поверхности моря по данным моделирования при северном (а) и южном (б) ветре

Fig. 3. Salinity on the sea surface according to modeling data for southward (a) and northward (b) wind

Ветер усиливает перемешивание речных вод с морскими и уменьшает долю речного стока, вовлеченную в процесс рециркуляции в плюме в районе устья, увеличивая ее во вдольбереговом течении. Несмотря на то, что ширина течения также уменьшается по сравнению со случаем без ветра, достигая 5,5–6 км (рис. 3, а), скорости течения увеличиваются, компенсируя увеличение расхода. А при южном ветре (рис. 3, б), наоборот, размеры плюма увеличиваются за счет роста объема стока, поступающего в плюм в процесс рециркуляции, достигая значений 27 км на 5 сутки и 40 км через 6,5 суток. Таким образом, наблюдается нестационарный рост плюма со временем. Распространение вдольберегового течения на юг затрудняется, что приводит к увеличению его ширины до 8–14 км.

Также был проведен ряд численных экспериментов с учетом влияния уклона дна и действия ветра. На рисунке 4 приведена соленость по данным моделирования на зональном разрезе в районе устья Дуная для моментов времени 12 суток для случая отсутствия ветра, и ветра северного и южного направлений. Ширина плюма в случае отсутствия ветра составила 27 км, при действии северного ветра она уменьшилась до 24 км, а при действии южного ветра увеличилась до 30 км. Глубина плюма составила 4 м по изохалине 16 ‰. Результаты расчетов без ветра согласуются с оценками ширины плюма (1–2) и глубины его залегания (5). Для значений, характерных для октября, перепад плотности составил $\Delta\rho = 4,5 \text{ кг м}^{-3}$, что по формулам (1–2) дает ширину плюма 29 км и глубину его залегания 4,3 м (5), что согласуется с рисунком 4, а.

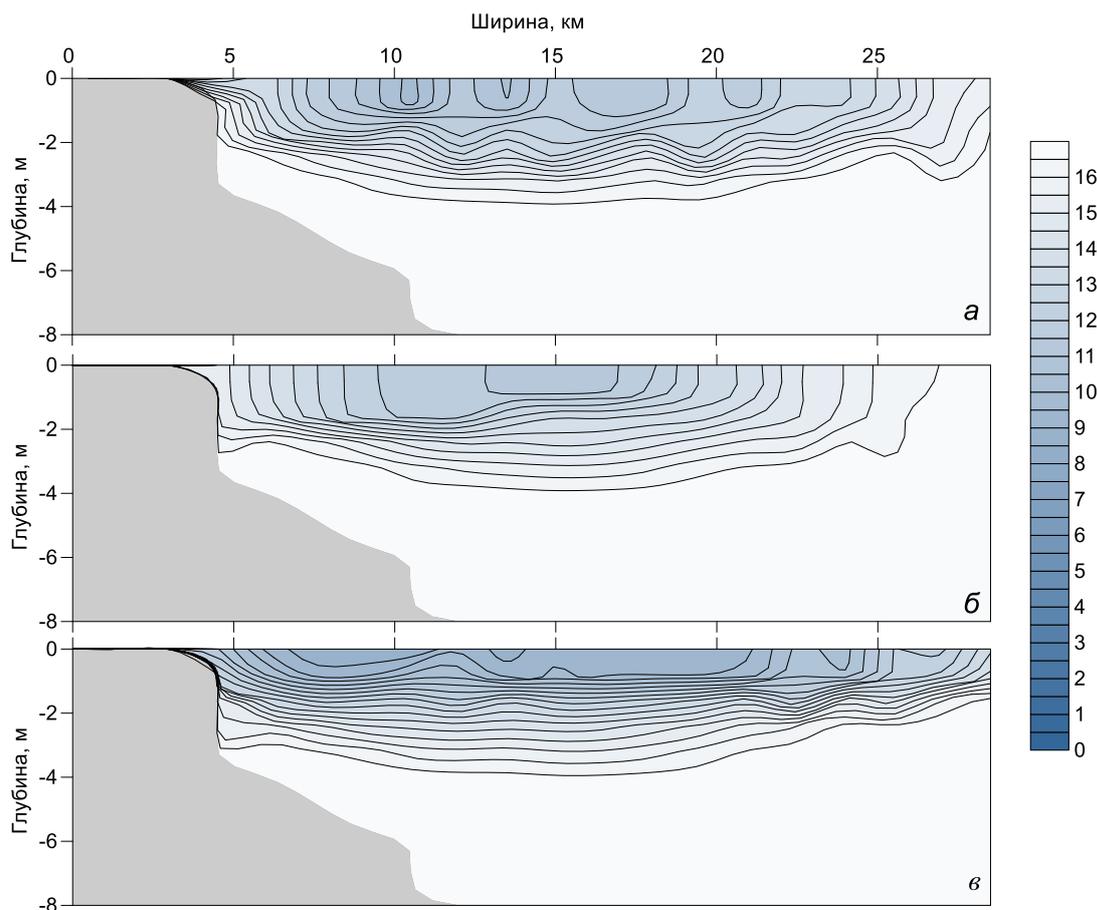


Рис. 4. Соленость по данным моделирования на зональном разрезе, соответствующему положению устья: а) без ветра; б) северный ветер; в) южный ветер

Fig. 4. Salinity according to modeling data on a zonal section corresponding to the position of the mouth: a) no wind; b) southward wind; c) northward wind

ВЫВОДЫ

Таким образом, для северо-западного шельфа Черного моря адаптирована и протестирована трехмерная сигма-координатная численная модель для шельфа и эстуариев для расчета циркуляции в прибрежной зоне. Расчеты проведены для прямоугольной области, показано влияние ветра и уклона дна на процесс распространения распресненных вод вдоль побережья и на положение внешней границы гидрофронта. Результаты численного моделирования для гидрологических условий северо-западного шельфа Черного моря согласуются с оценками пространственно-временных масштабов плюма и скорости распространения плотностного течения, рассчитанных с учетом климатических значений температуры, солености и объема стока реки по формулам (1–5).

В итоге получены карты типичного пространственного положения распресненных вод на северо-западном шельфе, характеризующие динамику плюма и транспорт распресненных вод в зависимости от направления ветра. Результаты работы могут быть использованы при дальнейшем изучении гидрологических процессов в районе устьев рек, особенностей формирования и эволюции плюмов, оценки транспорта взвешенных веществ, биогенных элементов и микропластика в прибрежной зоне морей и океанов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 0555-2021-0005.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded within the framework of the state task No 0555-2021-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Блатов А.С., Иванов В.А.* Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря. Киев: Наукова думка, 1992. 244 с.
2. *Завьялов П.О., Моллер мл. О.О., Ванг К.Х.* Связь между морским пластиковым мусором и речными плюмами: первые результаты проекта PLUMPLAS. Океанологические исследования, 2020. Т. 48. № 4. С. 32–44.
3. *Иванов В.А., Фомин В.В.* Математическое моделирование динамических процессов в зоне море-суша. Севастополь: НАН Украины МГИ, 2008. 363 с.
4. *Михайлов В.Н.* Гидрология дельты Дуная. Москва: ГЕОС, 2004. 448 с.
5. *Цыганова М.В., Лемешко Е.М., Рябцев Ю.Н.* Моделирование формирования гидрофронта в районе устья Дуная. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря, 2016. No 3. С. 26–31.
6. *Dinu I., Bajo M., Umgiesser G., Stănică A., (2017).* Romanian coastal dynamics during cold and warm seasons analyzed by means of a numerical model. Geo-Eco-Marina, 23. P. 71–101.
7. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G.* Interannual variability of Danube waters propagation in summer period of 1992–2015 and its influence on the Black Sea ecosystem) Journal of Marine Systems, 2018. V. 179. P. 10–30. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2017.11.001.
8. *Miladinova S., Stips A., Macias Moy D., Garcia-Gorriz E.* Pathways and mixing of the north western river waters in the Black Sea. Estuarine, Coastal and Shelf Science 236 (2020) 106630. P. 1–9.
9. *Fong D.A., Geyer W.R.* The alongshore transport of freshwater in a surface-trapped river plume. J. Phys. Oceanogr., 2002. V. 32. P. 957–972.

10. *Horner-Devine Alexander R., Hetland Robert D., MacDonald Daniel G.* Mixing and Transport in Coastal River Plumes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2015. V. 47 (1). P. 569–594. DOI: 10.1146/annurev-fluid-010313-141408.
11. *Hetland R.D.*, 2005. Relating River Plume Structure to Vertical Mixing. *J. Phys. Oceanogr.*, 2005. V. 35. P. 1667–1688, DOI: 10.1175/JPO2774.1.
12. *Osadchiev A., Korshenko E.* Small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea under average climatic and flooding discharge conditions. *Ocean Science*, 2017. V. 13. No 3. P. 465–482. DOI: 10.5194/os-13-465-2017.
13. *Osadchiev A., Sedakov R.* Spreading dynamics of small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea observed by Landsat 8 and Sentinel 1-2. *Remote Sensing of Environment*, 2019. V. 221. P. 522–533. DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.043.
14. *Tsyganova M.V., Lemeshko E.M.* (2020) Dynamics of Riverine Water in the Black Sea Shelf Zone. In: Olegovna C. (eds) *Processes in GeoMedia. Volume I.* Springer Geology. Springer, Cham DOI: 10.1007/978-3-030-38177-6_15.
15. *Yankovsky A.E., Lemeshko E.M., Ilyin Y.P.* The influence of shelfbreak forcing on the alongshelf penetration of the Danube buoyant water. *Black Sea. Continental Shelf Research*, 2004. V. 24. P. 1083–1098.
16. *Yankovsky A.E., Chapman D.C.* A simple theory for the fate of buoyant coastal discharges. *Journal of physical oceanography*, 1997. V. 27. P. 1386–1401.

REFERENCES

1. *Blatov A.S., Ivanov V.A.* Hydrology and hydrodynamic of shelf zone of the Black Sea. Kiev: Naukova dumka, 1992. 244 p. (in Russian).
2. *Dinu I., Bajo M., Umgiesser G., Stănică A.* (2017). Romanian coastal dynamics during cold and warm seasons analyzed by means of a numerical model. *Geo-Eco-Marina*, 23. P. 71–101.
3. *Fong D.A., Geyer W.R.* The alongshore transport of freshwater in a surface-trapped river plume. *J. Phys. Oceanogr.*, 2002. V. 32. P. 957–972.
4. *Hetland R.D.*, 2005. Relating River Plume Structure to Vertical Mixing. *J. Phys. Oceanogr.*, 2005. V. 35. P. 1667–1688, DOI: 10.1175/JPO2774.1.
5. *Horner-Devine Alexander R., Hetland Robert D., MacDonald Daniel G.* Mixing and Transport in Coastal River Plumes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2015. V. 47:1. P. 569–594. DOI: 10.1146/annurev-fluid-010313-141408.
6. *Ivanov V.A., Fomin V.V.*, Mathematical modeling of dynamic processes in the sea-land zone. Sevastopol: MHI UAS, 2008. 363 p. (in Russian).
7. *Mikhailov V.N.* Hydrology of Danube delta. Moscow: GEOS, 2004. 448 p. (in Russian).
8. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G.* Interannual variability of Danube waters propagation in summer period of 1992–2015 and its influence on the Black Sea ecosystem. *Journal of Marine Systems*, 2018. V. 179. P. 10–30. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2017.11.001.
9. *Miladinova S., Stips A., Macias Moy D., Garcia-Gorriz E.* Pathways and mixing of the north western river waters in the Black Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 236 (2020) 106630. P. 1–9.
10. *Osadchiev A., Korshenko E.* Small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea under average climatic and flooding discharge conditions. *Ocean Science*, 2017. V. 13. No 3. P. 465–482. DOI: 10.5194/os-13-465-2017.

11. *Osadchiev A., Sedakov R.* Spreading dynamics of small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea observed by Landsat 8 and Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment*, 2019. V. 221. P. 522–533. DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.043.
 12. *Tsyganova M.V., Lemeshko E.M., Ryabcev Yu.N.* Modelling of hydrofront forming on the Danube mouth area. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, 2016. No 3. С. 26–31 (in Russian).
 13. *Tsyganova M.V., Lemeshko E.M.* (2020). Dynamics of Riverine Water in the Black Sea Shelf Zone. In: Olegovna C. (eds) *Processes in GeoMedia. Volume I.* Springer Geology. Springer, Cham DOI: 10.1007/978-3-030-38177-6_15.
 14. *Zavialov P.O., Moller Jr. O.O., Wang X.H.* Relations between marine plastic litter and river plumes: first results of PLUMPLAS project *Journal of Oceanological Research*, 2020. V. 48. No 4. P. 32–44 (in Russian).
 15. *Yankovsky A., Lemeshko E., Ilyin Y.* The influence of shelfbreak forcing on the alongshelf penetration of the Danube buoyant water. *Black Sea. Continental Shelf Research*, 2004. V. 24. P. 1083–1098.
 16. *Yankovsky A., Chapman D.* A simple theory for the fate of buoyant coastal discharges. *Journal of physical oceanography*, 1997. V. 27. P. 1386–1401.
-