

Влияние апвеллинга на развитие речного пюма в прибрежной зоне северо-западного шельфа Черного моря на основе численного моделирования

М. В. Цыганова *, Е. М. Лемешко, Ю. Н. Рябцев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
**e-mail: m.tsyganova@mhi-ras.ru*

Аннотация

Проявление прибрежного апвеллинга наблюдается у западного побережья Черного моря при южном ветре. В этом же районе сильное влияние на гидрологическую структуру вод оказывает сток рек, который формирует речной пюм и вдольбереговое течение, направленное на юг. Целью данной работы является изучение эволюции пюма на северо-западном шельфе Черного моря и его взаимодействие с апвеллингом на основе численного моделирования. Влияние развития апвеллинга под действием ветра южных румбов на распространение пюма исследовалось с помощью трехмерной сигма-координатной численной модели POM-типа для расчета циркуляции в прибрежной зоне с учетом стока реки. Расчеты проведены для прямоугольной области для случаев как однородной по глубине, так и типичной для мая (когда в среднем наблюдается максимальное развитие пюма Дуная) стратификации вод северо-западного шельфа. Получено, что совместная динамика апвеллинга и речного пюма тесно связана со стратификацией прибрежных вод. В случае нестратифицированных вод шельфа тонкий слой пюма усиливает апвеллинг и даунвеллинг на береговой и морской сторонах речного пюма соответственно. Полученные результаты позволили изучить особенности трансформации речных вод в период действия ветров, вызывающих развитие прибрежного апвеллинга. Оценки времени подъема придонных вод у берега при действии южных ветров с различными скоростями ветра и параметрами стратификации вод шельфа по данным численного моделирования могут быть использованы для разработки региональных индексов апвеллинга на основе спутниковых данных о температуре поверхности моря и скорости ветра.

Ключевые слова: Черное море, речной пюм, апвеллинг, численное моделирование, шельф, прибрежная зона, речной сток

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме FNNN-2021-0005.

Для цитирования: Цыганова М. В., Лемешко Е. М., Рябцев Ю. Н. Влияние апвеллинга на развитие речного пюма в прибрежной зоне северо-западного шельфа Черного моря на основе численного моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 20–30. EDN SYKFPE. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-20-30

© Цыганова М. В., Лемешко Е. М., Рябцев Ю. Н., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Influence of Upwelling on River Plume Development in the Coastal Zone of the North-Western Black Sea Shelf Based on Numerical Modelling

M. V. Tsyganova *, E. M. Lemeshko, Yu. N. Ryabtsev

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: m.tsyganova@mhi-ras.ru*

Abstract

In a south wind, coastal upwelling can be observed off the western coast of the Black Sea. In the same area, the hydrological structure of waters is strongly influenced by river runoff, which forms a river plume, and a southward longshore byoancy current. The paper studies the evolution of the plume on the northwest shelf of the Black Sea and its interaction with upwelling based on numerical modelling. The impact of upwelling development under the influence of the south wind on plume propagation was studied using a three-dimensional sigma-coordinate numerical model (POM-type) to calculate the circulation in the coastal zone taking into account the river runoff. The model runs were performed for a rectangular region for the cases: uniform depth stratification and typical water stratification of the northwestern shelf. The last stratification case was chosen for May condition, when, on average, the Danube plume development is maximal. It is obtained that the joint dynamics of upwelling and river plume are closely related to the stratification of coastal waters. In the case of unstratified shelf waters, the thin plume layer enhances upwelling and downwelling on the inshore and offshore sides of the river plume, respectively. The results allowed studying the peculiarities of river water transformation during winds that cause the development of coastal upwelling. Estimates of the time of bottom water rise near the coast under the action of south winds with different wind velocities and shelf water stratification parameters retrieved from numerical modelling data can be used to develop regional upwelling indices based on satellite data on the sea surface temperature and wind velocity.

Key words: Black Sea, river plume, upwelling, numerical modelling, shelf, coastal zone, river runoff

Acknowledgements: The work was performed under state assignment on topic no. FNNN-2021-0005.

For citation: Tsyganova, M.V., Lemeshko, E.M., Ryabtsev, Yu.N., 2023. Influence of Upwelling on River Plume Development in the Coastal Zone of the North-Western Black Sea Shelf Based on Numerical Modelling. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 20–30. EDN SYKFPE. doi:10.29039/2413-5577-2023-1-20-30

Введение

Северо-западная часть Черного моря характеризуется обширным шельфом и значительным речным стоком, а также разнообразием морфологических типов плюмов в районе дельты Дуная и Днепро-Бугского лимана [1]. Поэтому северо-западный шельф является уникальным полигоном для изучения динамики речных плюмов различных типов [2]. Многолетние архивные гидрологические наблюдения этого района позволяют проводить верификации численных моделей речных плюмов.

При южном ветре вдоль западного побережья Черного моря наблюдается проявление апвеллинга. На гидрологическую структуру вод этого района

сильное влияние оказывает сток рек, который является источником поступления пресных вод и формирования стокового гидрофронта. В случае вдольберегового апвеллинга в прибрежной зоне возникают различные гидролого-гидрохимические ситуации [3]. Они тесно связаны с динамикой плюма. Поэтому необходимо понимать, как меняется распространение речных вод при развитии прибрежного апвеллинга.

Возникновение и эволюция апвеллинга в Черном море ранее изучались на основе анализа контактных и спутниковых данных [4–9] и численного моделирования [10, 11]. Спутниковые данные позволяют регистрировать более холодные воды [7, 10, 11], но высокая изменчивость и транспорт речных вод в районе северо-западного шельфа существенно затрудняют изучение процессов такими способами [12, 13]. Поэтому важно наряду с контактными и дистанционными данными использовать численное моделирование [14].

Развитие апвеллинга у северо-западного берега Черного моря происходит под действием ветров южных направлений. Многолетняя статистика образования апвеллингов, полученная на основе анализа данных дистанционного зондирования о температуре поверхности моря, показала, что в период расширенного лета происходит от 3 до 10 интенсивных апвеллингов общей продолжительностью по времени от 35 до 65 % от длительности летнего периода соответственно [7]. Из сопоставления анализа контактных и спутниковых данных сделан вывод о значительном влиянии эволюции апвеллинга на распространение речного плюма [3, 15].

Возникновение прибрежного апвеллинга компенсируется геострофическим течением и связанным с ним пресноводным плюмом. Особый интерес вызывает изучение динамического взаимодействия прибрежного апвеллинга и речного плюма. Речные воды с низкой соленостью создают градиенты давления, вызывающие поверхностные геострофические течения, которые возникают в прибрежной зоне в антициклоническом направлении (в Северном полушарии) от устья [16]. Речной плюм может ослаблять развитие апвеллинга, если ветер слишком слабый для того, чтобы нарушить халинную стратификацию. Изменение стратификации вод шельфа является важным фактором, который обуславливает динамику плюма и апвеллинга, влияя на толщину плюма, перенос распресненных вод во внутреннюю область шельфа и придонный перенос более плотных придонных вод в сторону берега [17].

Поэтому данная работа посвящена изучению совместной динамики развития апвеллинга и речного плюма, выделению закономерностей влияния апвеллинга на трансформацию речных вод на шельфе моря в период развития прибрежного апвеллинга.

Материалы и методы

Из базы гидрологических данных МГИ (URL: <http://bod-mhi.ru/>) были отобраны поля температуры и солености для ветровых условий со значениями скорости ветра менее $3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. По пространственному распределению изолиний температуры и солености оценивалась эволюция речного стока в районе дельты Дуная и изучалась динамика речного плюма, которые рассматривались как фоновые характеристики в отсутствие воздействия ветра. Характерное время, за которое плюм достигает южной границы северо-западного шельфа в отсутствие воздействия ветра, составляет около пяти дней, что соответствует оценкам, полученным на основании подхода [2].

Влияние развития апвеллинга под действием ветра южных румбов на распространение плюма исследовалось с помощью численного моделирования на основе ранее адаптированной и протестированной для северо-западного шельфа Черного моря трехмерной сигма-координатной численной модели *POM*-типа для расчета циркуляции в прибрежной зоне с учетом стока реки [18, 19]. Расчеты проведены для прямоугольной области для случаев как однородной по глубине, так и типичной для мая (когда в среднем наблюдается максимальное развитие плюма Дуная) стратификации вод северо-западного шельфа.

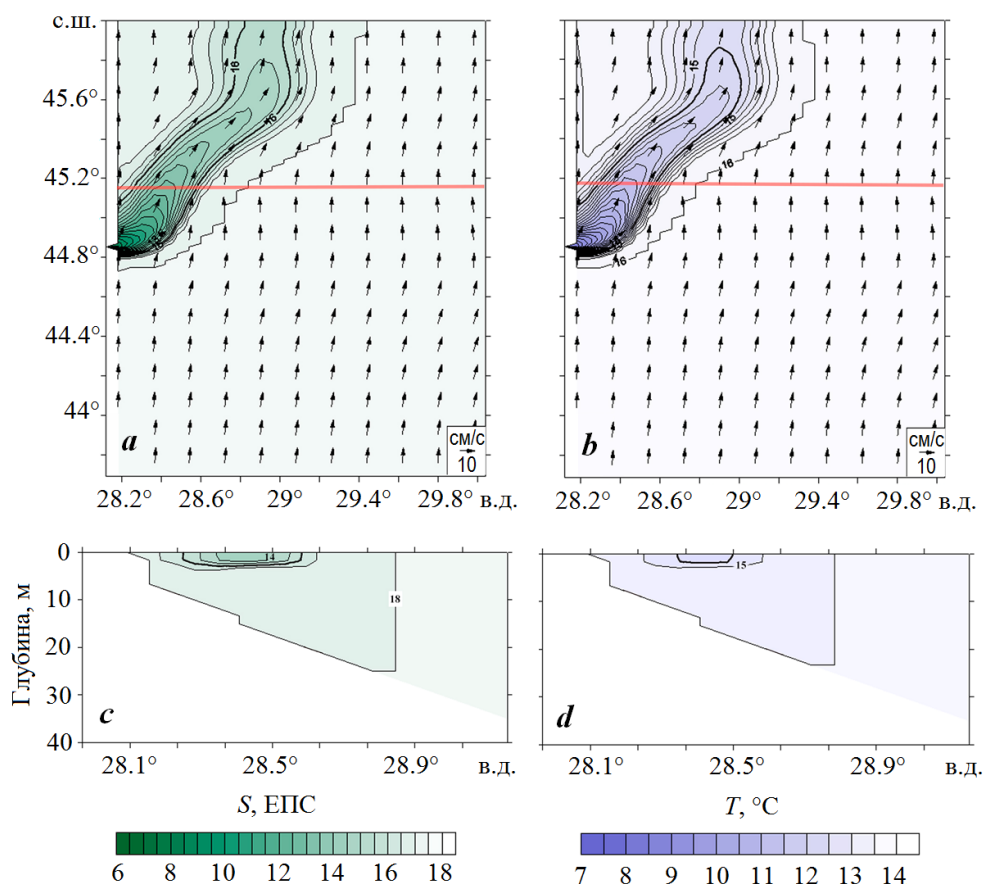
Параметры модели были подобраны таким образом, чтобы они соответствовали району впадения Дуная в Черное море. Модель была адаптирована для прямоугольной области и условий северо-западного шельфа Черного моря. Координаты расчетной области: 28° – 31° в. д. и 43° – 46° с. ш., число узлов сетки по оси X равно 51, число узлов сетки по оси Y – 171, шаг сетки – 2 км, шаг по времени – 2 мин, количество сигма-горизонтов – 25. В начальный момент времени расчета включается поступление пресной воды в районе устья Дуная.

Для первого варианта расчетов задавалась однородная стратификация: соленость вод шельфа – 18 ЕПС, температура 18°C , а соленость втекающей воды в районе устья Дуная – 6 ЕПС, температура воды в устье 10°C , расходы реки соответствовали климатическим значениям для апреля – мая ($8000\text{ м}^3\cdot\text{с}^{-1}$). На шельфе задавалось фоновое стационарное течение, направленное на юг, его скорость составляла $5\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ [19]. Для второго варианта расчета использовались климатические значения температуры и солености для мая в приустьевой области: на поверхности задавалась температура воды шельфа 15.75°C , соленость 12 ЕПС, температура у дна 6.5°C , соленость 18.25 ЕПС [20]. Термоклин находился на глубине 20 м, а галоклин – 12 м, глубина дна 40 м. Расход реки, температура и соленость такие же, как и в первом варианте расчета.

Результаты

При действии южного ветра со скоростью $5\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ и при расходе реки Q , равном $8000\text{ м}^3\cdot\text{с}^{-1}$, на 10-е сутки плюм вытягивается от берега в северо-восточном направлении (рис. 1).

При этом развитие прибрежного апвеллинга блокирует распространение вдольберегового течения распресненных вод из области плюма в южном направлении. Чтобы понять роль стратификации, проведено сопоставление результатов расчетов для вариантов без стратификации (рис. 1) и со стратификацией (рис. 2). Для случая без стратификации апвеллинг развивается через 3–5 дней, но он не проявляется в поле поверхностной температуры в силу однородности ее распределения по вертикали (рис. 1, *b*). Тем не менее развивается вдольбереговое течение со скоростями 5 – $10\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$, направленное на север, которое блокирует первоначальное распространение плюма на юг, и с течением времени плюм вытягивается во внутреннюю область шельфа, что трассируется как по солености (рис. 1, *a*), так и по температуре поверхности воды, поскольку температура речных вод меньше температуры вод шельфа на 8°C (рис. 1, *b*).



Р и с . 1 . Поверхностная солёность (a) и температура (b) воды по данным моделирования на 10-е сутки для однородной стратификации при воздействии южного ветра со скоростью $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Красной линией (a, b) обозначены зональные разрезы полей солёности (c) и температуры (d) вдоль широты 45.18° с. ш.

F i g . 1 . Surface salinity (a) and temperature (b) of water from modelling data on the 10th day for uniform stratification influenced by the south wind with a velocity of $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The red line (a, b) denotes zonal sections of salinity (c) and temperature (d) fields along 45.18°N latitude

Ширина плюма, определяемая по положению изохалины 16 ЕПС вдоль линии разреза по широте 45.18° с. ш., составляет примерно 25 км, в поле температуры это соответствует границе плюма по изотерме 16°C (рис. 1, a, b). При этом толщина плюма около 5 м, что видно на зональных разрезах полей солёности (рис. 1, c) и температуры (рис. 1, d).

Для случая со стратификацией на 10-е сутки апвеллинг приобретает хорошо развитую форму: изотерма 8°C , которая характеризует придонные воды, на 10-е сутки выходит на поверхность до 28.6° в. д. (~ 20 км от берега), кроме области в районе дельты реки (рис. 2, b).

Апвеллинг отодвигает плюм в сторону шельфа, положение изотермы 10°C сдвигается на восток, и она достигает на 10-е сутки долготы 28.9° в. д.

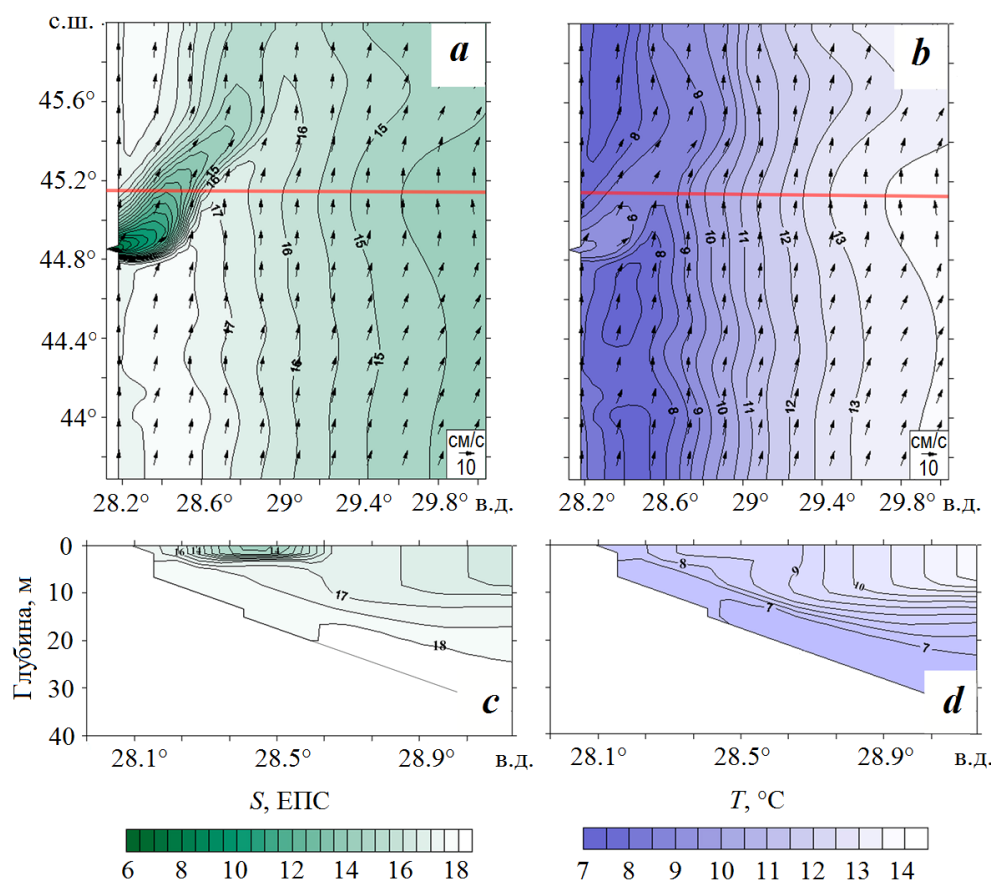


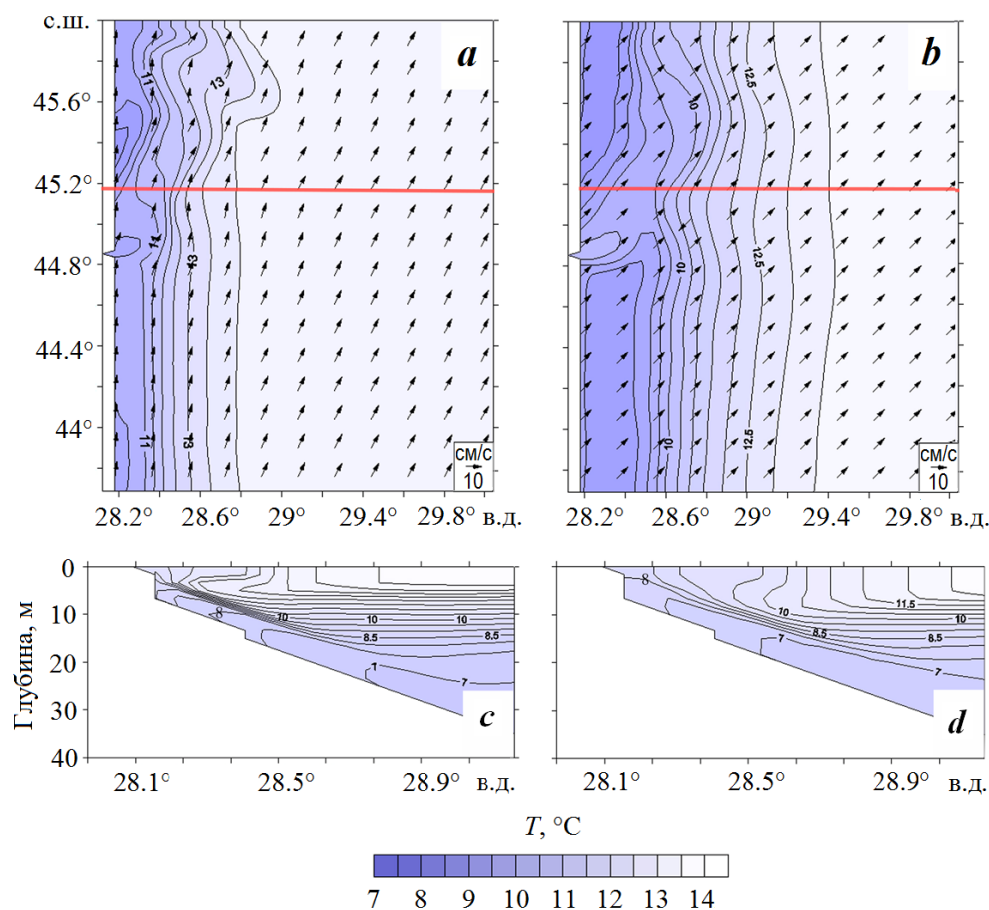
Рис. 2. Поверхностная соленость (a) и температура (b) воды по данным моделирования на 10-е сутки со стратификацией вод шельфа при воздействии южного ветра со скоростью $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Красной линией (a, b) обозначены зональные разрезы полей солености (c) и температуры (d) вдоль широты 45.18° с. ш.

Fig. 2. Surface salinity (a) and temperature (b) of water from modelling data on the 10th day with shelf water stratification influenced by the south wind with a velocity of $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The red line (a, b) denotes zonal sections of salinity (c) and temperature (d) fields along 45.18°N latitude

(рис. 2, b) – ~ 55 км от берега, что в поле солености соответствует положению изохалины 17 ЕПС, характеризующей придонные воды шельфа (рис. 2, a). Таким образом, из-за малых контрастов между температурой реки и вод шельфа идентификация плюма по спутниковым данным о температуре поверхности моря не дает вклада в статистику апвеллингов и плюмов. При анализе результатов численного моделирования в этом случае используется поле солености. Кроме того, в отличие от первого случая без стратификации (рис. 1, d), плюм не выделяется в поле температуры и на зональном разрезе (рис. 2, d). На 10-е сутки плюм вытягивается в северо-восточном направлении, ширина плюма по изохалине 16 ЕПС увеличивается по сравнению с первым случаем и составляет 30 км.

На зональном разрезе вдоль широты 45.18° с. ш. видно, что на 10-е сутки поднятие придонных вод (изохалина 18 ЕПС) достигает глубины 17 м, изохалина 17 ЕПС выходит на поверхность на расстоянии от берега ~ 8 км (рис. 2, *c*). В отличие от вод плюма, положение придонных вод хорошо выделяется на зональных разрезах в поле температуры: изотерма 7°C достигает глубины 10 м, а изотерма 8°C выходит на поверхность на расстоянии 8–10 км от берега (рис. 2, *d*).

Эволюция прибрежного апвеллинга по времени продемонстрирована на рис. 3. При расчете со стратификацией, типичной для условий мая, наблюдается развитие прибрежного апвеллинга уже на 2-е – 3-и сутки. На 3-и сутки придонные воды с температурой $7\text{--}8^\circ\text{C}$ образуют язык холодных вод, который



Р и с . 3 . Поверхностная температура воды по данным моделирования со стратификацией вод шельфа при воздействии южного ветра со скоростью $5\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ на 3-и (*a, c*) и 7-е сутки (*b, d*). Красной линией (*a, b*) обозначены зональные разрезы полей температуры на 3-и (*c*) и 7-е (*d*) сутки вдоль широты 45.18° с. ш.

F i g . 3 . Surface salinity of water from modelling data with shelf water stratification influenced by the south wind with a velocity of $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ on the 3^d (*a, c*) and 7th (*b, d*) day. The red line (*a, b*) denotes zonal sections of temperature fields on the 3^d (*c*) and 7th (*d*) day along 45.18°N latitude

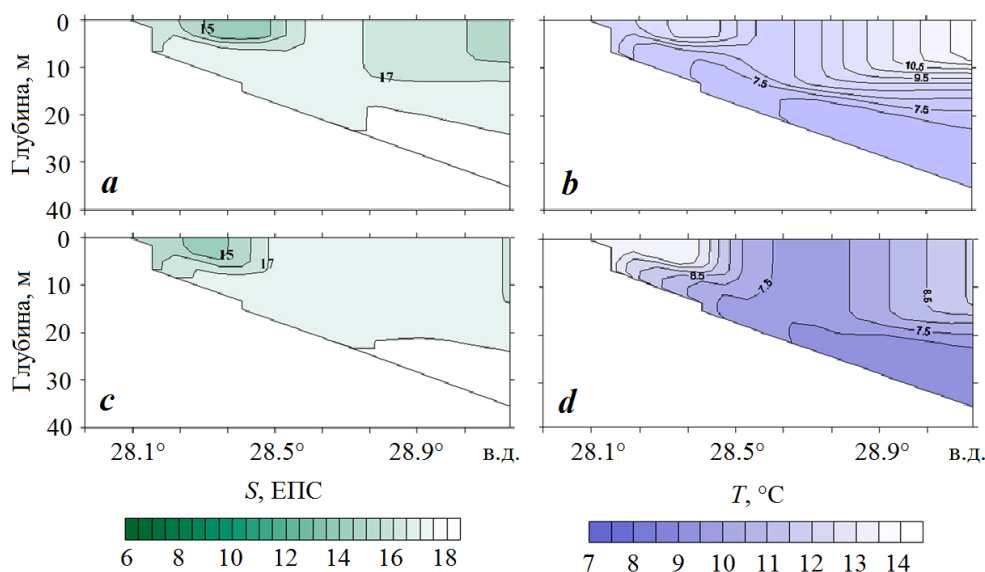
поднимается вдоль свала глубин и достигает отметки 10 м (рис. 3, *c*). На 7-е сутки изотерма 8 °С достигает глубины 3 м (рис. 3, *d*), на 8-е сутки выходит на поверхность. Изотерма 10 °С на 3-и сутки выходит на поверхность у берега (рис. 3, *c*) и маскирует в поле температуры положение плюма с температурой 10 °С. Воды с температурой 10–11 °С занимают всю вдольбереговую прибрежную область и хорошо проявляются в поле поверхностной температуры (рис. 3, *a*). С течением времени изотерма 10 °С сдвигается на восток и на 7-е сутки достигает 28.6° в. д. ~ 35 км от берега (рис. 3, *b*).

Развитие апвеллинга по времени также анализировалось на основании изменчивости положения изохалин на зональном разрезе через область плюма вдоль 45.18° с. ш. Время подъема придонных вод, характеризующихся соленостью 17 ЕПС, вдоль всего побережья в среднем составило 5 сут при скорости ветра 5 м·с⁻¹. При этом подъем придонных вод происходит вдоль берегового склона и в дальнейшем после 5-х суток развивается их перенос в поверхностном экмановском слое в область шельфа. По данным численного моделирования возможно получить детальные оценки скорости подъема вод при развитии прибрежного апвеллинга для различных значений скорости ветра, угла наклона дна и параметров стратификации вод шельфа. Время адвекции t_{ad} придонных вод вдоль склона шельфа прямо пропорционально произведению разности глубин залегания пикноклина H_0 и глубины подъема изопикны (изотермы) H_1 , характеризующей придонные воды, в процессе развития апвеллинга:

$$t_{ad} = \frac{\rho \cdot f \cdot d \cdot (H_0 - H_1)}{\alpha \cdot \tau}, \quad (1)$$

где ρ – плотность морской воды; f – параметр Кориолиса; d – толщина придонного слоя; α – угол наклона дна; τ – напряжение ветра. Уравнение (1) дает теоретическую оценку времени адвекции в зависимости от угла наклона дна и напряжения ветра. Для параметров, характерных для северо-западного шельфа, и напряжения ветра, соответствующего скорости ветра 5 м·с⁻¹, получаем значение 3 дня. Если время действия южного ветра меньше времени адвекции по формуле (1), в данном случае менее 3 дней, то холодные воды не успевают достигнуть поверхности. Таким образом, апвеллинг не проявится в поле поверхностной температуры моря, что необходимо учитывать при анализе спутниковых данных.

Время адвекции t_{ad} обратно пропорционально напряжению ветра. Для одного и того же значения угла наклона дна α были проведены численные расчеты для случая со стратификацией вод шельфа и с разными скоростями южного ветра (7 и 9 м·с⁻¹). При скорости ветра 7 м·с⁻¹ на 5-е сутки изохалина 17 ЕПС достигает поверхности (рис. 4, *a*), а язык холодных вод поднимается вдоль склона до глубины 5 м – по положению изотермы 8 °С (рис. 4, *b*). Для скорости ветра 9 м·с⁻¹ на 5-е сутки соленые воды (17 ЕПС) занимают более обширную область на поверхности (рис. 4, *c*), а холодные воды (менее 8 °С) находятся на поверхности, ширина зоны апвеллинга по этой изотерме составляет 30 км (рис. 4, *d*).



Р и с . 4 . Зональные разрезы вдоль широты 45.18° с. ш. полей солёности (*a, c*) и температуры воды (*b, d*) по данным моделирования со стратификацией вод шельфа на 5-е сутки при воздействии южного ветра со скоростью 7 (*a, b*) и $9 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ (*c, d*)

F i g . 4 . Zonal sections along 45.18°N latitude: salinity (*a, c*) and temperature (*b, d*) of water from modelling data with shelf water stratification on the 5th day influenced by the south wind with a velocity of $7 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ (*a, b*) and $9 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ (*c, d*)

Выводы

Полученные результаты позволили изучить особенности трансформации речных вод в период действия ветров, вызывающих развитие прибрежного апвеллинга. Проанализировано распространение плюма, обусловленное экмановским переносом в зависимости от стратификации вод шельфа и скорости ветра. Получено, что совместная динамика апвеллинга и речного плюма тесно связана со стратификацией прибрежных вод. В случае нестратифицированных вод шельфа тонкий слой плюма усиливает апвеллинг и даунвеллинг на береговой и морской сторонах речного плюма соответственно. Интенсивность апвеллинга увеличивается, когда плюм достигает его границы. При этом максимум транспорта вод в сторону шельфа в 1.5 раза превосходит экмановский перенос. После прохождения плюмом области апвеллинга транспорт вод регулируется вдольбереговыми вариациями плотности.

Полученные закономерности динамики плюма в условиях развития апвеллинга проявляются в поле поверхностной температуры моря, что позволяет использовать модельные оценки времени адвекции t_{ad} для интерпретации спутниковых данных о температуре поверхности моря. Оценки времени подъема придонных вод у берега при действии южных ветров с различными значениями скорости ветра и параметров стратификации вод шельфа по данным численного моделирования могут быть использованы для разработки региональных индексов апвеллинга на основе спутниковых данных температуры поверхности моря и скорости ветра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Horner-Devine A. R., Hetland R. D., MacDonald D. G.* Mixing and Transport in Coastal River Plumes // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2015. Vol. 47. P. 569–594. doi:10.1146/annurev-fluid-010313-141408
2. *Лемешко Е. М., Цыганова М. В.* Исследование формирования и распространения речного плюма Дуная на основе численного моделирования // *ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. Москва : Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27, ч. 3. С. 32–41. EDN FDPWAN. doi:10.35595/2414-9179-2021-3-27-32-41*
3. *Кондратьев С. И.* Три характерные гидролого-гидрохимические ситуации возле устья Дуная по данным экспедиционных исследований Морского гидрофизического института в 1997–2013 годах // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 4. С. 367–383. EDN VTJNWV. doi:10.22449/0233-7584-2019-4-367-383
4. *Богданова А. К., Кропачев Л. Н.* Сгонно-нагонная циркуляция и ее роль в гидрологическом режиме Черного моря // *Метеорология и гидрология*. 1959. № 4. С. 26–32.
5. Прибрежный черноморский апвеллинг и межгодовая изменчивость его интенсивности / Р. В. Боровская [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. Вып. 12. С. 42–48. EDN YUCFPP.
6. Прибрежный апвеллинг в северо-западной части Черного моря / А. И. Гинзбург [и др.] // *Исследование Земли из космоса*. 1997. № 6. С. 61–72. EDN LFUSLJ.
7. *Станичная Р. Р., Станичный С. В.* Апвеллинги Черного моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 4. С. 195–207. EDN BNEFXX. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-4-195-207
8. Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга и даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море / А. Г. Зацепин [и др.] // *Океанология*. 2016. Т. 56, № 2. С. 203–214. EDN VRYSTZ. doi:10.7868/S0030157416020222
9. *Сильвестрова К. П., Мысленков С. А., Ренков Д. С.* Система прогноза ветровых апвеллингов для российского побережья Черного моря // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2022. № 1 (383). С. 89–107. EDN AMWBXE. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-1-89-107>
10. *Дивинский Б. В., Куклев С. Б., Зацепин А. Г.* Численное моделирование события полного апвеллинга в северо-восточной части Черного моря на гидрофизическом полигоне ИО РАН // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 5. С. 683–689. EDN ZMDPIV. doi:10.7868/S0030157417050021
11. *Oguz T., La Violette P. E., Unluata U.* The upper layer circulation of the Black Sea: its variability as inferred from hydrographic and satellite observations // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1992. Vol. 97, iss. C8. P. 12569–12584.
12. Пространственно-временная изменчивость характеристик апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма в 2005–2008 гг. / Э. Н. Михайлова [и др.] // *Системы контроля окружающей среды*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 12. С. 318–321.
13. *Осадчиев А. А.* Речные плюмы. М. : Научный мир, 2021. 286 с.
14. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря / П. О. Завьялов [и др.] // *Океанология*. 2014. Т. 54, № 3. С. 293–308. EDN SEEDFF. doi:10.7868/S0030157414030150

15. *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. Vol. 179. P. 10–30. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.11.001>
16. *Fong D. A., Geyer W. R.* The alongshore transport of fresh water in a surface-trapped river plume // *Journal of Physical Oceanography*. 2002. Vol. 32, iss. 3. P. 957–972. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2002\)032<0957:TATOFI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032<0957:TATOFI>2.0.CO;2)
17. Coastal upwelling limitation by onshore geostrophic flow in the Gulf of Guinea around the Niger River plume / G. Alory [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 7. 607216. doi:10.3389/fmars.2020.607216
18. *Иванов В. А., Фомин В. В.* Математическое моделирование динамических процессов в зоне море – суша. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 363 с.
19. *Цыганова М. В., Лемешко Е. М., Рябцев Ю. Н.* Моделирование формирования гидрофронта в районе устья Дуная // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2016. № 3. С. 26–31. EDN XАНQUX.
20. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь : Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2011. 212 с. EDN XPERZR.

Поступила 20.12.2022 г.; одобрена после рецензирования 23.01.2023 г.; принята к публикации 01.02.2023 г.; опубликована 24.03.2023 г.

Об авторах:

Цыганова Марина Владимировна, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0003-2398-1756**, **ResearcherID: S-5426-2018**, **SPIN-код: 2256-0620**, m.tsyganova@mhi-ras.ru

Лемешко Евгений Михайлович, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0003-4676-1940**, **ResearcherID: S-7815-2018**, **SPIN-код: 3836-5786**

Рябцев Юрий Николаевич, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), **ORCID ID: 0000-0002-9682-9969**, **SPIN-код: 7853-4597**, ruab@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Цыганова Марина Владимировна – сбор, систематизация и анализ литературных источников, проведение численных экспериментов, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста и графических материалов статьи

Лемешко Евгений Михайлович – постановка проблемы, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи

Рябцев Юрий Николаевич – разработка математической модели, выбор и обоснование методов решения уравнений, коррекция математической модели

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.