

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТРАНСФОРМАЦИИ ВОД ДУНАЯ НА СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

Н.Ф. Кириленко

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

Работа посвящена изучению межгодовой изменчивости трансформации речных вод в приустьевой области реки Дунай за период 1992–2007 гг. Цель исследования заключалась в проверке результатов расчетов по аналитической модели с данными гидрологических съемок, в определении масштабов фронтальной зоны и чисел Россби, Бюргера в зависимости от расхода реки, геометрии устья и параметров стратификации шельфа.

Введение. Область на поверхности моря, в которой происходит разрушение слоя почти пресной речной воды, называется речным гидрофронтом [1]. Как следует из определения, на гидрофронте всегда существует резкий скачок солёности в горизонтальном направлении. Распределение солёности в поверхностном слое вод взморья определяется характером распределения речного стока по длине морского края дельты. В местах впадения крупных рукавов дельты (Прорвы и Потаповского, а также Старостамбульского и Сулинского) имеются обширные области сильно опресненных вод. На участках, не имеющих стока речных вод (между Сулинским и Георгиевским рукавами), солёность поверхностных вод почти также высока, как и у дна. Большое различие в плотности дунайских и черноморских вод препятствует их вертикальному перемешиванию. Поэтому воды Дуная, попадая на взморье, распространяются в тонком (1 – 5 м) поверхностном слое. Только в этом слое опреснение взморья зависит от характера распределения речного стока по длине морского края дельты. Нижележащие слои взморья заняты однородными водами, значительно более солёными, чем поверхностные. Согласно классификации фронтальных зон К.Н. Федорова [2] халинный фронт, образуемый распространением вод речного стока в прибрежном районе, называется стоковым фронтом. Все многообразные режимы развития стоковой фронтальной зоны определяется соотношением расхода воды в реке, формой и размерами устья, общей глубиной и протяженностью шельфа. В статье ниже будет использоваться термин «стоковая линза» наряду с термином «стоковая фронтальная зона».

Процесс трансформации речных вод Дуная можно рассматривать в три этапа. Первый этап происходит на участках от устьев рукавов реки до гидрофронтов. Этот этап можно назвать основным. Солёность речной воды на этом участке увеличивается в среднем до 6 – 8 ‰, т.е. вода становится на 35 – 47 % морской. На втором этапе, на гидрофронте, солёность воды резко увеличивается до 10 – 12 ‰, т.е. вода здесь становится уже на 59 – 71 % морской. Этот этап целесообразно назвать гидрофронтальным [1]. Далее, до положения изогалины 15 – 16 ‰ стоковая фронтальная зона образует на поверхности моря сравнительно тонкий слой – «линзу» распресненных вод. Наконец, на довольно обширном пространстве моря, от гидрофронтов до изохалины 17 ‰, ограничивающей чисто морскую поверхностную воду (летом), происходит последний, заключительный, этап трансформации речной воды в морскую. В конце этого этапа речная вода полностью теряет свою индивидуальность и уже не отличается от морской поверхностной воды летом или придонной зимой. В межень зона опреснения поверхностных вод в северной (Килийской) части взморья не достигает о. Змеиногорского, а в половодье о. Змеиный оказывается внутри этой зоны. Поэтому в межень солёность у о. Змеиногорского в меньшей степени, чем в половодье, зависит от стока Дуная. В суровые зимы при установлении на взморье сплошной полосы припая зависимость солёности у о. Змеиногорского от стока Дуная отсутствует, так как лёд препятствует распространению распресненных поверхностных вод прибрежной полосы в море.

Аналитическая модель [3] используется для расчета вертикального масштаба стоковой фронтальной зоны и расстояния до её внешней границы в зависимости от расходов реки, геометрии устья и стратификации вод шельфа. Следует заметить, что в данном подходе не учитывается влияние ветра на трансформацию речных вод. Речные воды распространяются в приповерхностном слое и отклоняются в правую сторону по

течению реки под действием силы Кориолиса, что формирует вдольбереговое течение с антициклонической циркуляцией. На рисунке 1 показана схема циркуляции вод в приустьевой зоне реки, 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.

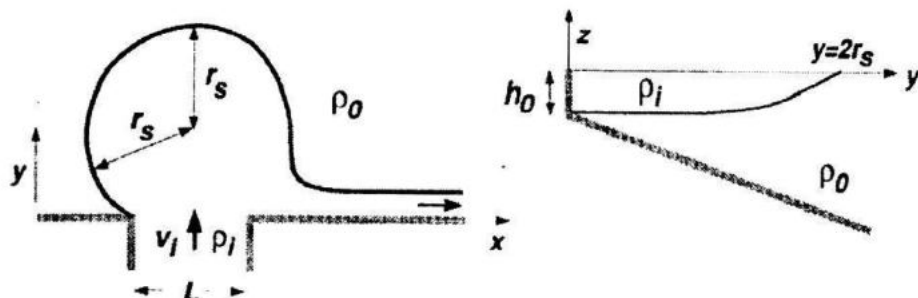


Рисунок 1 – Схема циркуляции вод в районе устья реки

Для оценки расстояния распространения гидрофронта от устья реки, согласно [3], применима следующая формула

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

где $g' = g\Delta\rho/\rho_0 = g(\rho_0 - \rho_i)/\rho_0$; g – ускорение свободного падения; $R_{di} = (g'h_0)^{1/2}/f$ – бароклинный радиус деформации Россби для распресненных вод; $F_i = v_i/(g'h_0)^{1/2}$ – число Фруда.

Рассмотрим два предела в формуле (1). 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 $y = 2v_i/f$. S – число Бюргера, мера влияния сил плавучести, Ro – число Россби, мера нелинейной адвекции или скорости потока

$$S = (g'h_0)^{1/2}/fL; Ro = v_i/fL. \quad (2)$$

Тогда формулу 1 можно переписать в виде

$$y = \frac{2(3S^2 + Ro^2)}{(2S^2 + Ro^2)^{1/2}}L. \quad (3)$$

Таким образом, два безразмерных параметра S и Ro определяют поведение поверхностного стокового гидрофронта.

В качестве данных использовались значения расхода воды Дуная Q за период 1997–2006 гг. и геометрические параметры придельтового участка (глубина, ширина) [4]. По формуле (3) были рассчитаны значения расстояния до внешней границы гидрофронта, радиус деформации Россби и статистические параметры (таблица 1). Значения параметров плотности воды взяты из климатического массива МГИ НАНУ.

Таблица 1 – Параметры стратификации и средние значения положения гидрофронта за 1997–2006 гг.: ρ_1 – плотность воды вблизи устья; ρ_0 – плотность вод на шельфе; R_{di} – радиус деформации Россби; μ – среднее расстояние до внешней границы гидрофронта; σ – среднеквадратичное отклонение; U_{min}, U_{max} – минимальное и максимальное значения формулы (3)

Период осреднения	ρ_1 , кг/м ³	ρ_0 , кг/м ³	R_{di} , км	μ , км	σ , км	U_{min} , км	U_{max} , км
Фазы половодья	1003	1012.4	9.0	42.8	3.2	39.0	53.7
Фазы межени	1005	1012.0	7.8	38.2	3.7	33.5	50.4

Расчеты в таблице 1 – среднее, минимальное и максимальное значения расстояния до границы стоковой фронтальной зоны для различных сезонов года совпадают с результатами многолетних наблюдений [1]. 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 гг., 2001 – 2003 гг.). Величина отношения $\mu/R_{di} = 4.75$ в половодье, т.е. поверхностное распространение стокового гидрофронта более чем в 4 раза превышает радиус деформации Россби. Значение числа Фруда $F_i < 1$ получено для сентября 2000 г., июля 2002 г., июля–декабря 2003 г., сентября 2004 г., октября–декабря 2006 г. В эти периоды складывались благоприятные условия для проникновения клина морских вод в устье Дуная.

Речной гидрофронт отличается резко выраженной цветовой границей, поэтому для дополнительного анализа использовались данные спутника SeaWiFS – нормализованное уходящее излучение на длине волны 555 нм (сигнал в зеленой области спектра пригоден для идентификации пигментов, оптических свойств воды, взвеси) с разрешением по пространству 9 км и осреднением по времени – 8 дней за период 1997 – 2007 гг. Для заданного интервала

осреднения необходимо оценить площадь придунайского участка шельфа, занятого водами речного происхождения. Скорость распространения стоковой линзы можно оценить по следующей формуле [5]

$$c_p \approx c_w / (1 + c_w / c_\alpha), \quad (4)$$

$$\text{где } c_\alpha = \alpha g' / f; c_w = \sqrt{g' h_b}.$$

Выбирались следующие среднелиматические величины $\Delta\rho = 1.5 \text{ кг м}^{-3}$; $\rho_0 = 1014 \text{ кг м}^{-3}$; $\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$ – уклон шельфа; $h_b = 3 \text{ м}$; для них скорость распространения c_p составила 0.3 м/с, а расстояние распространения вод от устья за 8 дней составило 210 км вниз по течению. Это расстояние учитывалось для выбора области осреднения спутниковых данных. Данная оценка получена без учета ветрового воздействия, которое значительно увеличивает или уменьшает скорость распространения речных вод. Таким образом, мы можем сопоставить расстояние до внешней границы гидрофронта, рассчитанное по формуле (3), со спутниковыми данными за период 1997 – 2007 гг. Для приведения к единому масштабу данные нормировались, график приведен на рисунке 2.

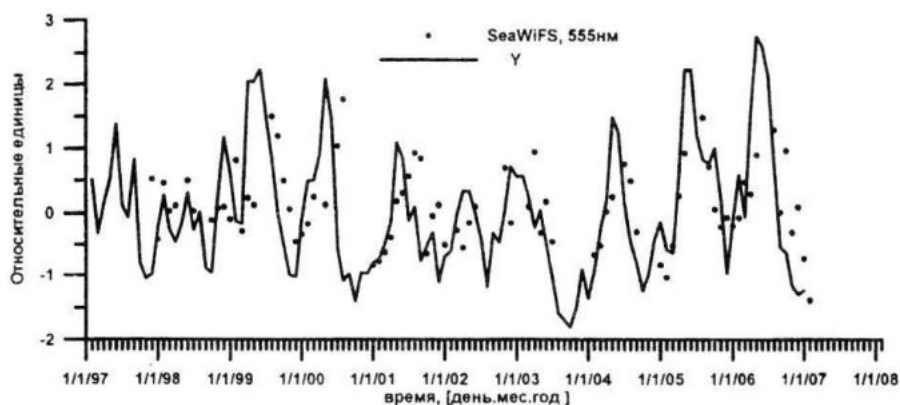


Рисунок 2 – Нормированные величины расстояния от берега до внешней границы гидрофронта и пространственно осредненные данные SeaWiFS 555 нм

На рисунке 2 приведен график, характеризующий трансформацию речных вод на северо-западном шельфе Черного моря. Положение границы стоковой линзы по спутниковым изображениям в видимом диапазоне спектра хорошо согласуется с рассчитанными расстояниями от берега до внешней границы гидрофронта, что дает основание для развития количественных методов спутникового мониторинга распространения речных вод на северо-западном шельфе Черного моря.

С целью определения адекватности по формуле (3) при расчете положения границы трансформации речных вод, вместо климатических значений, плотность воды ρ_i в районе устья реки Дунай и шельфа ρ_0 выбирались из данных гидрологических съемок. Глубина стокового гидрофронта h_b

может быть определена [3], исходя из предположения, что транспорт речных вод во фронтальной зоне оценивается при условии однородности вертикального сдвига вдоль береговой скорости течения и геострофического баланса для кросс-фронтального градиента плотности

$$h_b = (2Lv_i h_0 f / g')^{1/2}. \quad (5)$$

В качестве примера такого сопоставления приведен гидрологический разрез НИС «Академик» за 3, 4 октября 2003 г. (рисунок 3), отличие h_b от h составило 0.2 м, а расстояние от берега до границы стокового гидрофронта 0.5 км, отношение $y/R_{di} = 4.4$, что соответствует случаю малого стока.

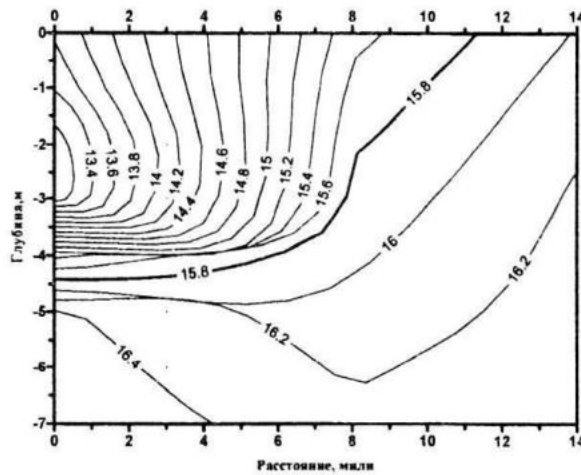


Рисунок 3 – Соленость, разрез 45° с.ш. 3–4.10.2003 г. НИС «Академик»
Расчетные величины u и h_b сравнивались с h и u_s по изогалине 15.8 ‰ в таблице 2

Всего было обработано семь гидрологических разрезов, результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение расчетных параметров h_b и u с данными гидрологических съемок h и u_s ; ρ_i , ρ_0 – плотность воды в районе устья и шельфа; R_{di} – радиус деформации Россби; F_i – число Фруда; φ – широта разреза

Дата рейса	широта φ	ρ_i , кг/м ³	ρ_0 , кг/м ³	h_b , м	h , м	u , км	u_s , км	R_{di} , км	F_i
11.07.92	$44^{\circ}50'$	1003.0	1014.0	3.4	11.0	44.0	45.2	9.7	0.9
4–5.04.93	$45^{\circ}10'$	1006.0	1013.0	5.0	5.5	39.7	39.1	7.8	1.5
15–18.09.97	$45^{\circ}12'$	1008.2	1010.6	6.5	6.0	23.2	22.4	4.5	1.5
7–8.10.97	$45^{\circ}15'$	1008.4	1013.0	4.3	4.5	28.5	29.5	6.3	0.9
21–22.11.01	$45^{\circ}10'$	1011.2	1012.8	7.6	7.5	19.5	19.0	3.7	1.6
3–4.10.03	$45^{\circ}00'$	1008.0	1010.8	4.4	4.2	21.8	21.3	4.9	0.7
14–15.10.07	$45^{\circ}15'$	1007.0	1010.4	5.4	6.0	26.0	24.3	5.4	1.2

Примечание: Величины h_b , u рассчитывались для каждой съемки по данным наблюдений, h и u_s оценивались по распределению солености на гидрологическом разрезе по формуле 3,5.

Наибольшее отличие между величинами h_b и h (для 11.07.1992 г. – единственный случай из семи съемок) составило 7.6 м, что объясняется сильным ветровым воздействием (скорость ветра была до 10 м/с в период с 5 по 10 июля 1992 г.), которое привело к вертикальному перемешиванию, в то время как расхождение величин u и u_s не велико – 1.2 км. В целом, соответствие параметров в таблице 2 – удовлетворительное.

Сопоставление положения границы стоковой линзы по спутниковой информации в видимом диапазоне спектра хорошо согласуется с рассчитанными расстояниями и данными гидрологических съемок (таблица 2). Распределение нормализованной уходящей радиации на длине волны 555 нм ИСЗ SeaWiFS, осредненной за период 30.09 – 7.10.2003 г., демонстрирует хорошее соответствие с рассчитанным по формуле (3) значением положения границы стокового гидрофронта $y = 21.8$ км для данных съемки 3, 4 октября 2003 г. НИС «Академик» (таблица 2), что показано на рисунке 4.

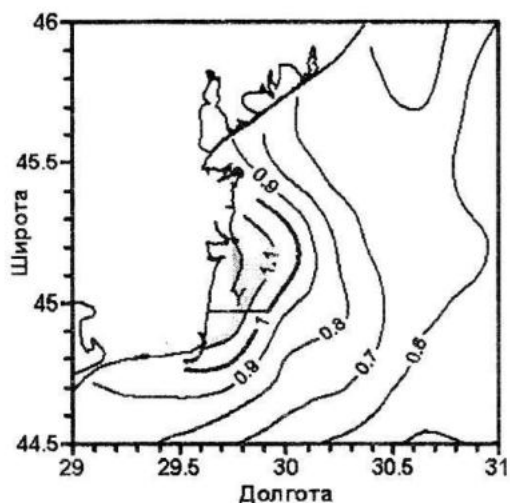


Рисунок 4 – Распределение нормализованной уходящей радиации на длине волны 555 нм ИСЗ SeaWiFS (30.09 – 7.10.2003 г.), $y = 21.8$ км (табл. 2, 3 – 4 10. 2003 г.)

Заключение. Результаты проверки расчетов по формуле 3,5 для данных гидрологических разрезов (таблица 2) показали пригодность простой аналитической модели для определения горизонтальных и вертикальных масштабов стоковой фронтальной зоны в зависимости от расхода реки,

геометрии устья и параметров стратификации шельфа. Применение модели позволяет оценить вертикальный масштаб и расстояние от берега до внешней границы стокового фронта реки Дунай. Получены статистические характеристики расстояния до границы стокового гидрофронта для типичных условий стратификации вод на шельфе и величин расхода воды реки Дунай за период 1997 – 2006 гг., при этом минимальное расстояние распространения дунайских вод составляло $y = 4.24R_{di}$, а максимальное $y = 5.46R_{di}$. Положение границы стоковой линзы по спутниковым изображениям в видимом диапазоне спектра 555 нм хорошо согласуется с рассчитанными расстояниями от берега до внешней границы гидрофронта. Сопоставление спутниковых данных и результатов расчетов позволяет оценить сезонную и межгодовую трансформацию речных вод на северо-западном шельфе Черного моря. Полученные оценки чисел Россби, Бюргера и Фруда могут быть использованы при планировании гидрологического полигона в районе устья Дуная для более детального изучения процессов распространения речных вод и проникновения морских вод в рукава дельты.

Автор благодарна проекту SESAME за поддержку при выполнении работы.

Л и т е р а т у р а

1. В.С. Большаков. Трансформация речных вод в Черном море. – Наукова думка, Киев, 1970. – 328 с.
2. К.Н. Федеров. Физическая природа и структура океанических фронтов. – Гидрометеоздат. Ленинград, 1983. – 296 с.
3. А.Е. Yankovsky, D.C. Chapman. A simple theory for the fate of buoyant coastal discharges. *Journal of physical oceanography*, vol. 27. 1997. – P. 1386–1401.
4. В.Н. Михайлов. Гидрология дельты Дуная. – М.: ГЕОС. 2004. – 448 с.
5. А.Е. Yankovsky, E.M. Lemeshko, Y.P. Ilyin. The influence of shelfbreak forcing on the alongshelf penetration of the Danube buoyant water, Black Sea. *Continental Shelf Research*, vol. 24. 2004. – P. 1083–1098.