

А.В. Матвеев, н.с., Ю.И. Попов, к.г.н.
Український научний центр екології моря

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДУНАЙСКИХ ВОД В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЯ

По результатам спутниковых наблюдений получены статистические характеристики изменчивости направлений распространения дунайских вод в различные сезоны года и среднегодовые направления их распространения за период с 2005 по 2010 гг. Произведен совместный анализ ветров и поверхностных переносов вод. Получены оценки расстояний от устья, на которых ощущается динамическое влияние струи выходного речного потока.

Ключевые слова: циркуляция вод, дунайское взморье, визуальные спутниковые данные, северо-западный шельф Черного моря.

Введение. Циркуляция трансформированных речных вод в западной части мелководного северо-западного шельфа (СЗШ) имеет большое значение как для его экологического состояния, так и Черного моря в целом. Три крупных речных системы – Днестро - Бугская, Днестровская и Дунайская, вносят в морскую среду основные объемы загрязняющих веществ различного происхождения. Биогенные питательные вещества способствуют развитию приповерхностной эвтрофикации и, как следствие, глубоинной гипоксии и аноксии вод. Как правило, воды Днепро - Днестровско - Днестровского междуречья могут частично распространяться к востоку, в область Каркинитского залива, но в основном медленно переносятся на юг вдоль западного побережья СЗШ. Расход Дунайская примерно на порядок превышает расходы северных речных источников и его воды, в области моря прилегающей к разветвленной и обширной дельте, способствуют резкой активизации приповерхностных динамических процессов за счет усиления баротропных и бароклинных эффектов. В приустьевых районах моря воды речного стока растекаются в тонком 1-2-метровом слое, поэтому их распространение существенно зависит от силы и направленности местных ветров. Вопросы распространения и трансформации речных вод в западной части СЗШ, основные факторы, управляющие этими процессами, исследовались ранее на основе гидрологических измерений, численного моделирования и анализа спутниковых изображений [1 – 4]. Основной целью работы является определение взаимосвязи ветрового режима с характером перераспределения речных вод, хорошо выраженных на спутниковых цветных изображениях по величине мутности воды и концентрации пигмента фитопланктона – хлорофилла «а».

Материалы и методы исследования. Расчет направления распространения дунайских вод на СЗШ Черного моря основывался на визуальных данных со спутников Aqua и Terra, получаемых при помощи спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) [5,6]. Данные доступны на сайте NASA <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov>. Снимки принимались, с частотой раз в сутки, с каждого спутника при условии отсутствия облачности над исследуемым районом (рис. 1). В работе проанализированы данные, полученные за период с 2005 по 2010 годы.

Анализ ветровых потоков проводился по данным метеостанции о. Змеиный. Для совместного анализа ветровых потоков и поверхностных течений рассчитывались среднесуточные вектора ветра и далее идентифицировались, как и течения, по 8 румбам, для которых рассчитывалась средняя скорость ветра.

Анализ материалов. На визуальных спутниковых снимках дунайские воды видны как желтовато-коричневые потоки, распространяющиеся в виде струй по северо-

западной части Черного моря. Наиболее заметными являются потоки шести выходных рукавов (гирл): Потаповского, Акундиново, Быстрого, Старостамбульского, Сулинского и Георгиевского.

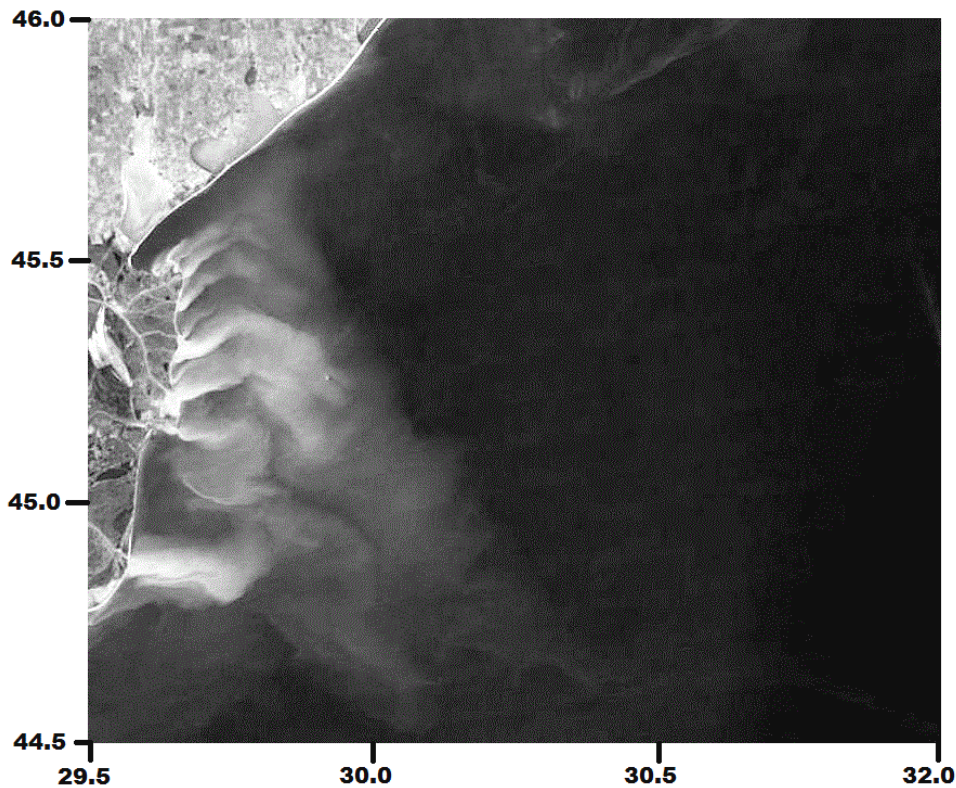


Рис. 1 - Пример снимка западной части СЗШ в видимом спектре (спутник Aqua). В левой части снимка видны потоки дунайских вод в виде белых струй.

Для учета направления распространения дунайских вод выбирались участки струй до момента, когда они теряют цветовую индивидуальность, т.е. произошло осаждение основной массы взвешенного вещества и речные воды в значительной мере смешались с водами открытого моря. Далее определить направления распространения речных вод по визуальным снимкам становится затруднительным (рис. 2). Исключения составляют отдельные весенние ситуации, когда вихревые системы северо-западного склона моря втягивают в себя с запада дунайские, или с севера дунайско-днестровские воды. При этом происходит распространение трансформированных речных вод в глубь СЗШ, а трассером уже является не взвешенное вещество, а исключительно пигменты фитопланктона. В данной работе такие ситуации не рассматривались.

Разбиение области дельты на 8 румбов приводит к тому, что при анализе распространения вод на морскую часть приходится четыре (СВ, В, ЮВ и Ю) сектора и восемь (Ю, ЮЗ, З, СЗ, С, СВ, В, ЮВ) – при анализе приводных ветровых потоков. Для каждой из шести речных струй, в зависимости от того в какой сектор она распространялась, определялось соответствующее направление. Среднее направление прибрежного потока дунайских вод вычислялось арифметическим осреднением направлений исходных потоков.

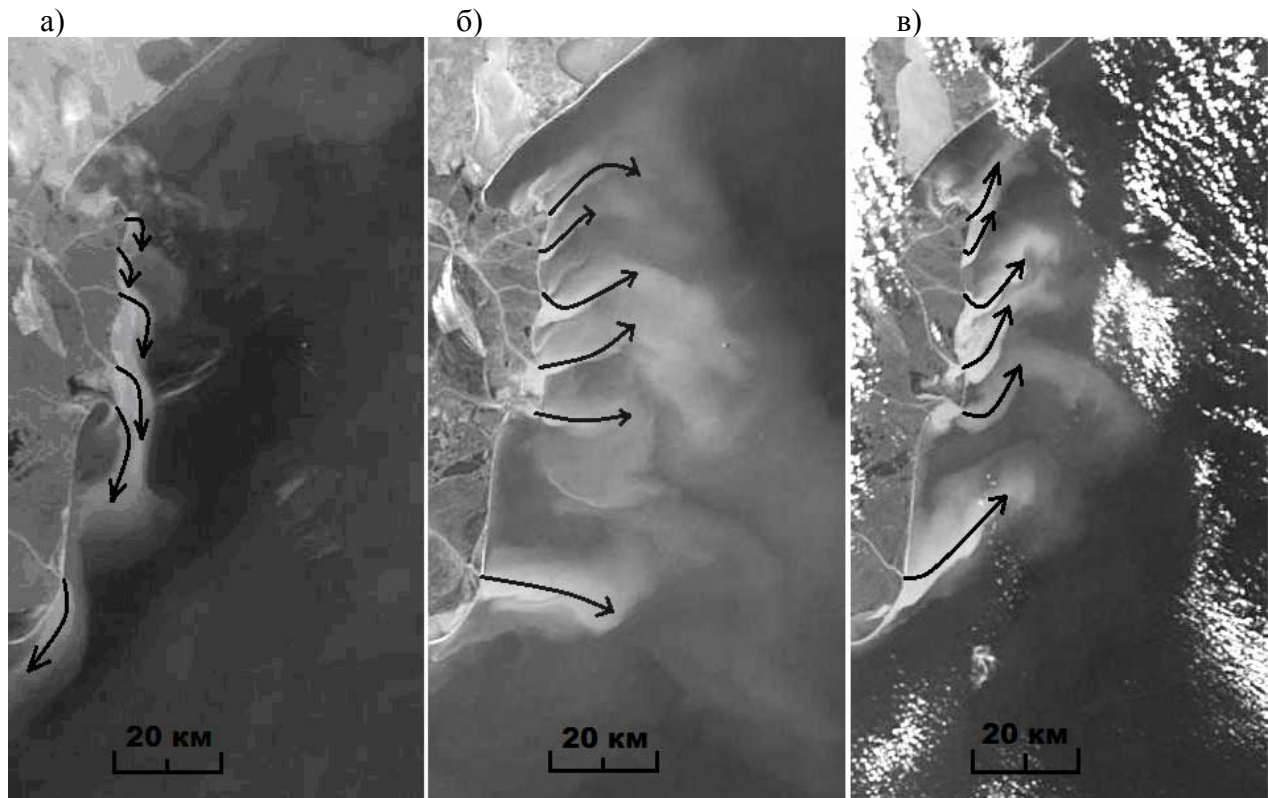


Рис. 2 - Примеры направления распространения дунайских вод на СЗШ Черного моря: а) перенос дунайских вод на юг, б) на восток и с) на северо-восток. Стрелками указаны основные потоки рукавов сверху в низ: Потаповского, Акундиново, Быстрого, Старостамбульского, Сулинского и Георгиевского соответственно.

В результате расчетов были получены статистические характеристики изменчивости направления распространения дунайских вод в различные сезоны года (табл.1) и среднегодовые направления их распространения за период с 2005 по 2010 гг. (табл.2).

Таблица 1 - Сезонная повторяемость направления распространения дунайских вод

Направления переноса	Зима		Весна		Лето		Осень	
	Колич.	%	Колич.	%	Колич.	%	Колич.	%
Ю	12	35,3	67	45,0	152	54,9	55	50,0
ЮВ	11	32,5	29	19,5	54	19,4	19	17,3
В	6	17,6	29	19,5	37	13,4	12	10,9
СВ	5	14,7	24	16,0	34	12,3	24	21,8
Всего	34	100	149	100	277	100	110	100

Как видно из табл.1, во все сезоны года преобладают течения южных направлений, от 35.3% - зимой до 54.9% - летом, с промежуточными значениями в остальные сезоны. Далее по повторяемости следуют течения юго-восточных, восточных и северо-восточных направлений. Исключение составляет осеннее распределение повторяемости, где на втором месте стоят северо-восточные течения. Наименее представительны-

ми выглядят зимние и осенние выборки данных из-за более частого облачного покрова.

Естественно, что при сравнении переносов вод по годам наблюдается такая же картина (табл.2): южные переносы вод преобладают над остальными от 43.8% случаев в 2007 году до 62% в 2009 году. Минимальные повторяемости отмечаются для восточных (7.4-19.2%) и северо-восточных (3.2-17.9%, без 2007 года) направлений переносов вод. Исключением являлся 2007 год, в котором северо-восточный перенос вод имел место в 33.7% случаев.

Таблица 2 - Ежегодная повторяемость направлений распространения дунайских вод

Направления переноса	2005		2006		2007		2008		2009		2010	
	Кол	%	Кол	%	Кол	%	Кол	%	Кол	%	Кол	%
Ю	30	44,1	40	45,5	39	43,8	37	50,0	59	62,0	80	51,6
ЮВ	19	27,9	18	20,5	10	11,2	12	16,2	12	12,7	42	27,1
В	10	14,7	17	19,2	10	11,3	13	17,6	7	7,4	28	18,1
СВ	9	13,3	13	14,8	30	33,7	12	16,2	17	17,9	5	3,2
Всего	68	100	88	100	89	100	74	100	95	100	155	100

Совместный анализ ветров и поверхностных переносов вод позволил получить коэффициенты взаимной корреляции (табл. 3), а также количественного соответствия средних векторов ветра направлению переноса вод (табл. 4 - 7).

Таблица 3 - Среднегодовые коэффициенты корреляции между направлениями ветра и направлением распространения дунайских вод

Год	2005	2006	2007	2008
Коэф. кор.	0,47	0,47	0,24	0,58

Средние за год коэффициенты корреляции между усредненными по румбам ветровыми потоками и направлением переносов поверхностных вод примерно одинаковы 0.47 – 0.58. Исключением является 2007 год, о чем будет сказано ниже. Небольшие величины корреляции объясняются тем, что на направление поверхностного переноса вод влияет не только направление ветра, но и динамика прилегающих к рассматриваемому району вод [1 - 4].

На основании данных о резких разворотах выходных струй основных рукавов Дуная были получены оценки расстояний от устья, на которых ощущается гидравлическое влияние струи выходного речного потока (расстояние до разворота струи к северу или к югу). При западных ветрах и, очевидно, при отсутствии поперечных сдвиговых течений восточное распространение речных вод прослеживается до 20 км. Но это скорее влияние ветровых потоков, нежели гидравлических напряжений. Среднее расстояние, где еще проявляется динамическое напряжение выходных струй, составило 1-3 км, что сопоставимо с теоретическими расчетами. В [7], при выполнении численных экспериментов, получена величина начального участка речной струи протяженностью 2-10 км.

В табл. 4-7 представлены повторяемости направлений ветра для разных направлений распространения дунайских вод из горловин основных рукавов. Для южного переноса дунайских вод характерно северо-восточное направление ветра от 23.1% в 2007 году до 43.5% в 2005 году. В 2006-2008 годах при генерации южных переносов вод на втором месте были ветры восточных направлений (17.9 - 27%), а минимальные повторяемости отмечались для южных и западных ветров (в пределах 2.5- 16.7%).

Юго-восточный, южный и юго-западные ветра являются характерными для юго-восточного, восточного и северо-восточного переносов дунайских вод, с повторяемостью (50-60%), а повторяемость северных и восточных ветров для юго-восточного, восточного и северо-восточного переноса значительно уменьшается (1-20%).

Таблица 4 - Повторяемость направления распространения дунайских вод в зависимости от направления ветра за 2005 год

Напр. течения		Направления ветров								Всего
		С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	
Ю	Кол. наб.	1	13	4	1	5	5	1		30
	%	03,3	43,3	13,4	03,3	16,7	16,7	03,3		100
	Ветер м/с	0,7	04,6	04,9	01,7	04,0	03,0	02,0		
ЮВ	Кол. наб.		3		1	8	5	2		19
	%		15,8		05,3	42,1	26,3	10,5		100
	Ветер м/с		02,0		02,3	04,3	02,1	02,2		
В	Кол. наб.				1	2	6	1		10
	%				10,0	20,0	60,0	10,0		100
	Ветер м/с				01,7	05,0	03,1	04,3		
СВ	Кол. наб.				3	4	2			9
	%				33,3	44,4	22,3			100
	Ветер м/с				06,8	05,3	03,0			

Таблица 5 - Повторяемости направления распространения дунайских вод в зависимости от направления ветра за 2006 год

Напр. течения		Направления ветров								Всего
		С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	
Ю	Кол. наб.	3	15	8	5	5	1	2	1	40
	%	07,5	37,5	20,0	12,5	12,5	02,5	05,0	02,5	100
	Ветер м/с	02,0	03,6	04,4	03,9	03,4	04,0	05,5	04,0	
ЮВ	Кол. наб.		1	1	3	5	4	1	3	18
	%		05,6	05,6	16,7	27,8	22,0	05,6	16,7	100
	Ветер м/с		02,7	02,7	03,3	02,8	03,2	04,0	04,1	
В	Кол. наб.		1	1	4	9	1	1		17
	%		05,9	05,9	23,5	52,9	05,9	05,9		100
	Ветер м/с		01,3	04,7	03,6	04,3	03,3	04,3		
СВ	Кол. наб.		2	2	2	5	1	1		13
	%		15,4	15,4	15,4	38,4	07,7	07,7		100
	Ветер м/с		05,5	02,9	05,9	05,1	03,7	05,7		

Таблица 6 - Повторяемости направления распространения дунайских вод в зависимости от направления ветра за 2007 год

Напр. течения		Направления ветров							Всего	
		С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З		СЗ
Ю	Кол. наб.	5	9	7	5	6	4		3	39
	%	12,8	23,1	17,9	12,8	15,4	10,3		07,7	100
	Ветер м/с	05,8	4,0	03,7	04,3	03,0	05,3		04,7	
ЮВ	Кол. наб.		2	1	1	5	1			10
	%		20,0	10,0	10,0	50,0	10,0			100
	Ветер м/с		1,9	05,0	03,0	04,1	06,3			
В	Кол. наб.	2		1		3	1	3		10
	%	20,0		10,0		30,0	10,0	30,0		100
	Ветер м/с	01,9		01,0		03,2	05,3	4,5		
СВ	Кол. наб.	1		1	10	15	2		1	30
	%	03,3		03,3	33,4	50,0	06,7		03,3	100
	Ветер м/с	02,7		03,7	04,3	05,9	03,5		05,3	

Таблица 7 - Повторяемости направления распространения дунайских вод в зависимости от направления ветра за 2008 год

Напр. течения		Направления ветров							Всего	
		С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З		СЗ
Ю	Кол. наб.	10	12	10		2	1	1	1	37
	%	27,0	32,4	27,0		05,5	02,7	02,7	02,7	100
	Ветер м/с	03,9	04,1	03,2		03,5	01,7	04,0	07,0	
ЮВ	Кол. наб.	1		1	4	1		1	4	12
	%	08,3		08,3	33,4	08,3		08,3	33,4	100
	Ветер м/с	02,3		02,7	03,7	03,3		06,0	04,9	
В	Кол. наб.		2		2	8	1			13
	%		15,4		15,4	61,5	07,7			100
	Ветер м/с		03,0		05,2	03,7	07,0			
СВ	Кол. наб.			1	2	7	2			12
	%			08,3	16,7	58,3	16,7			100
	Ветер м/с			03,3	03,7	06,4	06,5			

Продолжительные ветры с южной составляющей над западной половиной Черного моря заслуживают особого внимания, так как они нарушают циклоническую циркуляцию как во всем бассейне, так и в его северо-западной части. Их повторяемость и сила определяют степень нарушения традиционного обмена вод между северо-западным шельфом и открытым морем вдоль западного шельфа и склона моря. Особенно велика повторяемость этих ветров в западной половине шельфа в теплое полугодие. Под их воздействием может полностью прекращаться вдольбереговой поверхностный перенос трансформированных речных вод в южном направлении и их отклонение в центральные и северные районы шельфа. Наиболее характерной картиной такого состояния был летний период 2007 года (рис. 3). В июле-августе 2007 года устойчивые

ветры ЮЮВ и ЮЮЗ направлений (по данным наблюдений на метеостанции о. Змеиный) на длительное время практически полностью исключили перенос на юг (особенно заметно южнее мыса Сфынтул-Георге) эвтрофированных речных вод. Основная трансформация шельфовых вод в этот период происходила как внутри шельфа, так и за счет активного вовлечения их и более соленых вод шельфа в вихревые структуры северо-западного участка вдоль склоновой конвергенции.

Об этом свидетельствовали спутниковые данные о распределении хлорофилла-А (рис. 3а) и визуальные спутниковые данные о перераспределении потоков мутных вод в придунайском районе (рис. 3б). При этом площади распространения шельфовых вод в течение всего лета оставались стабильно на невысоком среднем уровне

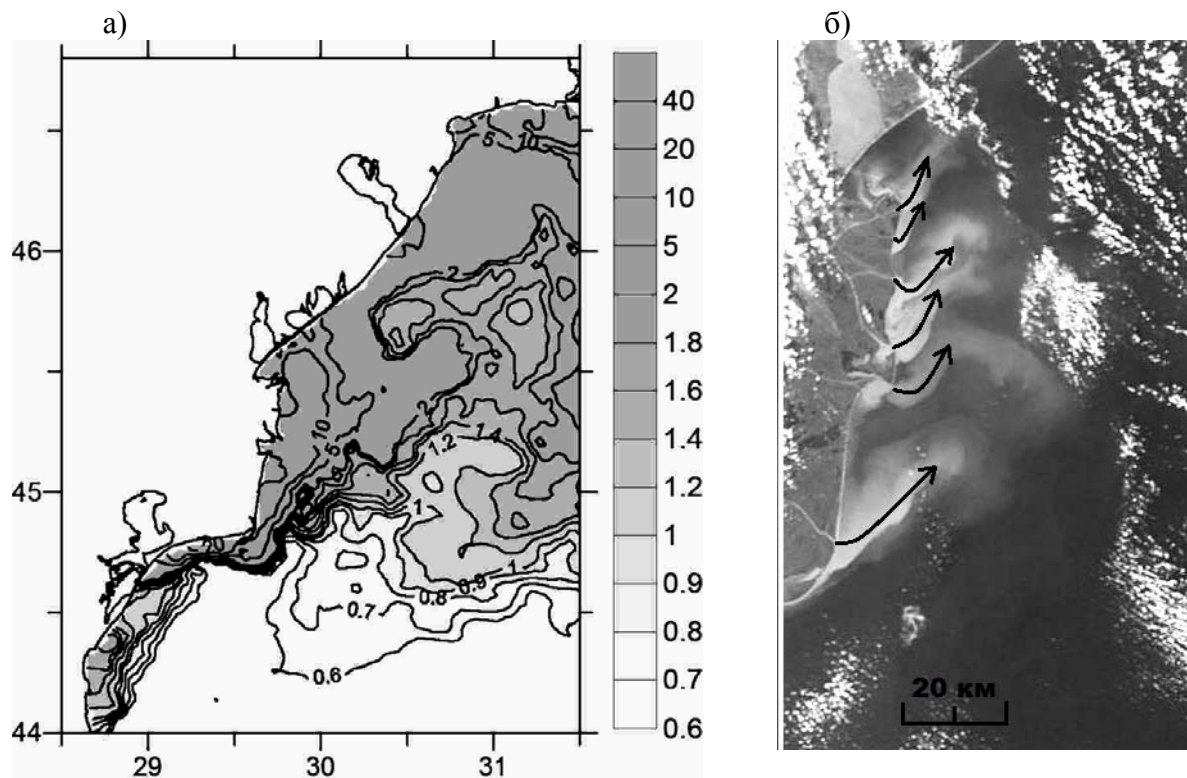


Рис. 3 - Распределение: а) хлорофилла-А ($\text{мг}/\text{м}^3$) по данным MODIS и б) визуальный спутниковый снимок дунайского взморья и окрестностей, июль 2007 года.

Для определения степени влияния южных ветров различной интенсивности на характер переноса речных вод были рассчитаны средние характеристики скорости ветра с южной составляющей при различных направлениях переноса дунайских вод (табл.8). Южные и юго-восточные течения, характерные для плотностной структуры этого района, при южных ветрах наблюдаются только при слабых скоростях ветра (2.6-3.3 м/с). Восточные направления выходных струй воды при южных ветрах характерны для их средних скоростей– 3.3 – 5.3 м/с. Северные течения могут возникать только при ветрах со скоростями - 4.6 – 5.5 м/с и, естественно, при более сильных. Аномальным в этой интерпретации выглядит 2007 год, в котором была высокая повторяемость южных ветров в июле-августе. При этом практически прекратились переносы речных вод в

южных направлениях вдоль побережья, произошло их перераспределение в центральные и северные районы шельфа.

К сожалению, в последнем случае нами не учитывались такие существенные факторы как повторяемость и продолжительность действия ветров. Следует ожидать, что при их учете факт существенного влияния южных ветров, противоположных обычному направлению движения речных вод в западной половине шельфа, на прибрежные переносы вод был бы более очевиден.

Таблица 8 - Среднегодовые скорости ветра с южной составляющей (ЮВ, Ю, ЮЗ) и соответствующие им направления переноса дунайских вод.

Направление течения	2005	2006	2007	2008
Ю	2.9	3.7	4.2	2.6
ЮВ	2.9	3.1	4.5	3.5
В	3.3	3.7	4.3	5.3
СВ	5.3	4.9	4.6	5.5

Выводы.

1. Распространение дунайских вод имеет преимущественно южное направление. В среднем, за период с 2005 по 2010 год, оно составляет 49.5% случаев. Повторяемость юго-восточного, северо-восточного и восточного направлений распространения дунайских вод составляет 19.3%, 16.5% и 14,7% соответственно.

2. Относительно небольшие величины коэффициента корреляции между направлениями распространения дунайских вод и направлениями ветра свидетельствуют о существенном вкладе плотностной циркуляции вод в динамически активном районе придунайского взморья и прилегающих районах моря. Наибольший средний коэффициент корреляции был получен в 2008 году (0.58), наименьший в 2007 году (0.24).

3. Продолжительные ветры с южной составляющей могут быть причиной прекращения вдольберегового поверхностного переноса речных вод в южном направлении и их накопления в центральных и северных районах СЗШ Черного моря. Наиболее характерной картиной такого состояния был летний период 2007 года.

4. Средняя величина расстояния от береговой черты, где прослеживается динамическое напряжение выходных струй, составила 1-3 км.

5. Для южного переноса дунайских вод характерно северо-восточное направление ветра, а минимальные повторяемости южного переноса отмечались при южных и западных ветрах. Юго-восточный, южный и юго-западные ветра являются характерными для юго-восточного, восточного и северо-восточного переносов дунайских вод.

Список литературы

1. *Большаков В.С.* Трансформация речных вод в Черном море. – К.: Наукова думка, 1970. – 328 с.

2. Ильин Ю.П. Гидрологическая структура вод при различных ветровых ситуациях по данным полигонных и спутниковых наблюдений // Природные условия взморья реки Дунай и острова Змеиный: современное состояние экосистемы / Под ред. Иванова В.А., Гошовского С.В. - Севастополь: МГИ НАНУ, 1999. – С.134-146.
3. Ильин Ю. П. Гидрологический режим распространения речных вод в северо-западной части Черного моря. // Научные труды УкрНИГМИ. –2006. – Вып.255. – С.242-251.
4. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – 192 с.: ил.
5. Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. – М.:Аспект Пресс, 2004.– 184 с.
6. Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Дистанционное зондирование Земли из Космоса. Цифровая обработка изображений: Учебное пособие. – М.: Изд-во Логос, 2001. – 264 с.: ил.
7. Илюшин В. Я. Частное решение уравнения Сен-Веннана для участка потока с нулевым уклоном водной поверхности // Український гідрометеорологічний журнал. -2009. – Вып.5.-С.219-230.

Поширення дунайських вод в західній частині північно-західного шельфу Чорного моря.

Матвєєв А. В., Попов Ю. І.

За результатами супутникових спостережень отримані статистичні характеристики мінливості напрямків поширення дунайських вод в різні сезони року і середньорічні напрями їх розповсюдження за період з 2005 по 2010 рр.. Зроблено спільний аналіз вітрів і поверхневих вод переносів. Отримано оцінки відстаней від гирла, на яких відчувається динамічний вплив струменя вихідного річкового потоку.

Ключові слова: циркуляція вод, дунайське узмор'я, візуальні супутникові дані, північно-західний шельф Чорного моря.

Distribution of the Danube waters in the western part of north-western shelf Black Sea. Matvieiev A. V., Popov Y. I.

According to the results of satellite observations statistical characteristics of the variability for the propagation directions in the Danube water during different seasons and the average direction of their propagation in the period from 2005 to 2010. By a joint analysis of winds and surface water transfers were done. It is obtained estimates of the distance from the mouth, where there is a dynamic effect of the jet outlet of the river flow.

Keywords: water circulation, the Danube shore, visual satellite data, northwestern Black Sea shelf.