

УДК 551.465.55

**О.Р. Андрианова\***, к.г.н., **Р.Р. Белевич\***, к.г.н., **В.И.Мединец\*\***, к.ф.-м.н.

\*Отделение гидроакустики МГИ НАН Украины

\*\*Одесский Национальный университет им. И.И.Мечникова

## **ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ И НАПРАВЛЕНИЙ ПЕРЕНОСА ВОДНЫХ МАСС НА ГРАНИЦЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЯ**

*Оценены интенсивность и направление переноса водных масс на границе северо-западного шельфа Черного моря на участках между станциями Приморское – остров Змеиный - Черноморское на основании данных об уровне моря на них. Установлено периодическое образование в 2005-2006 гг. прибрежных антициклонических вихрей вблизи острова Змеиный, определяющих перенос водных масс: в периоды апрель - июль 2005г. и май - декабрь 2006 г. – с севера на юг, а с августа 2005 г. по апрель 2006 г. – с юга на север. Результаты тестирования метода восстановления пропущенных данных наблюдений уровня моря по острову Змеиный показали целесообразность его использования.*

*Ключевые слова:* Черное море, уровень моря, перенос вод, скорость потока, Дунай.

Известно [1], что изменения направления и скорости течений оказывают огромное влияние на природную экосистему северо-западной части Черного моря (СЗЧМ), находящуюся под непосредственным воздействием стока рек. Северо-западное мелководье характеризуется весьма сложной системой течений. Здесь можно встретить почти все типы морских течений. Одними из наиболее существенных являются стоковые течения. В СЗЧМ впадает четыре реки (Дунай, Днепр с Южным Бугом и Днестр), дающие почти 3/4 общего пресного стока всего моря. Наряду с речным стоком определенный вклад в формирование и развитие динамики вод региона вносят ветровые или дрейфовые течения, имеющие наибольшее значение в холодную часть года. Заметную роль играют также геострофические и бароградиентные течения [2]. Однако особенности циркуляции вод в СЗЧМ в настоящее время являются мало изученными, несмотря на широкое внедрение спутниковых методов, поскольку практически отсутствует возможность интерпретации их с помощью фактических данных.

Целью нашей работы являлась оценка интенсивности и направления переноса морских масс воды на границе шельфа СЗЧМ на разрезах между станциями Приморское – о. Змеиный – Черноморское по разности высот уровня моря на этих станциях.

В качестве исходных данных использованы результаты ежедневных наблюдений за уровнем моря, которые проводились на гидрометеорологических станциях Приморское и Черноморское и на научно-исследовательской станции «Остров Змеиный» Одесского национального университета им. И.И. Мечникова [3] с апреля 2005 г. до декабря 2006 г. (рис. 1). Данные по первым двум станциям были любезно предоставлены директором Дунайской ГМО Морозовым В.Н. и начальником морского отдела БП ЧАМ Заволокиной З.П.

Для сравнения были использованы также среднемесячные данные о расходах Дуная за этот же период времени.

Расстояние от станции о. Змеиный до станции Приморское (западное побережье Черного моря (дельта Дуная)) составляет около 53 (38,3 – без мелководной части) км, а до станции Черноморское (восточное побережье Крыма (м. Тарханкут)) соответственно – 199 (178) км. Расстояние между станциями Приморское и Черноморское составляет

238 км. Площадь шельфа к северу от линий, соединяющих м. Тарханкут, о. Змеиный и станцию Приморское составляет 27600 км<sup>2</sup>, средняя глубина без учета мелководной части на разрезах: Приморское – о.Змеиный – 21,7 м, о. Змеиный – Черноморское – 43,5 м. Основные морфометрические характеристики разрезов сведены в таблице 1.



Рис. 1 – Расположение станций наблюдений Приморское, остров Змеиный и Черноморское.

Оценка интегрального переноса масс воды через разрезы о. Змеиный – Черноморское и Приморское – о.Змеиный проводилась с использованием динамического метода расчета скоростей течений и их направления, основываясь на разностях наклона уровня [4], рассчитанных по среднемесячным значениям уровня моря на трех рассматриваемых станциях наблюдений.

Расчеты скоростей течений выполнялись по основной формуле динамического метода в ее геометрической интерпретации [4].

$$C = \frac{g \cdot \Delta H}{2\omega \cdot L \cdot \sin \varphi}, \quad (1)$$

где  $C$  – скорость течения в м/сек;  
 $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  
 $\Delta H$  – разность высот уровня между станциями в м;  
 $\omega \approx 0,729 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$  – угловая скорость вращения Земли;  
 $L$  – расстояние между станциями в м (таблица);  
 $\varphi$  – географическая широта места.

Расход течений рассчитывался по формуле:

$$Q = C \cdot S, \quad (2)$$

где  $C$  – скорость течения в м/с;  
 $S$  – площадь сечения разреза в м<sup>2</sup>.

Результаты расчета площади сечений разрезов по данным о глубинах (указанных выше) также приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Морфометрические характеристики разрезов

Разрезы	L, км	H, м	S, км <sup>2</sup>
Приморское – о. Змеиный	53 (38,3)	21,7	0,831
Черноморское – о. Змеиный	199 (178)	43,5	7,743

По известным же (рассчитанным) площадям этих разрезов оценивались и нормальные разрезам интегральные расходы переноса вод к западу и востоку от острова.

Прежде чем приступать к расчетам и анализу основных характеристик, исходя из поставленной в настоящей работе задачи (разности высот уровня, скоростей течений и расходов воды на частях разреза дельта Дуная (Приморское) – о. Змеиный и о. Змеиный – м. Тарханкут (ст. Черноморское)), необходимо обратить внимание на некоторые характерные особенности колебаний среднемесячных высот уровня моря за рассматриваемый период с апреля 2005 года по декабрь 2006 года на анализируемых станциях (рис.2).

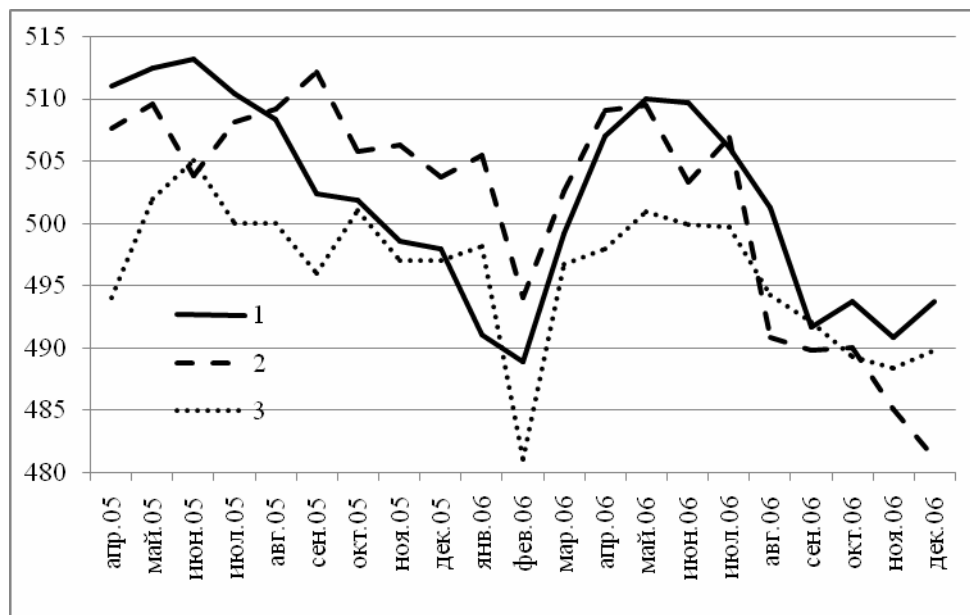


Рис. 2 – Ход среднемесячных высот уровня моря на станциях о. Змеиный (1), Приморское (2) и Черноморское (3) за 2005-2006 гг.

Общие представления о сезонной изменчивости высот уровня моря на ст. о. Змеиный приведены одним из соавторов в работе [3]. На фоне сезонного хода во внутригодовой изменчивости этой характеристики на всех станциях выделяются довольно резкие короткопериодные колебания, обусловленные, по всей вероятности, бароградиентными воздействиями. В годовом ходе среднемесячных высот уровня выделяются два вида экстремумов: основной, тесно связанный со стоком Дуная, и вторичный – слабо выраженный зимний, происхождение которого обусловлено, как мы полагаем, обычной интенсификацией атмосферных процессов в этот период года. Максимум основного экстремума уровня на всех станциях был приурочен к маю-июню (паводок Дуная IV-V), а минимум более размыт и отличается по станциям – от июня на ст. Приморское до сентября-октября на двух других станциях (межень Дуная X-XI). Вторичный экстремум не синхронен на рассматриваемых станциях по максимуму, а минимум их приходится на январь для всех станций. На станции Приморское прослеживается еще третий короткопериодный летний экстремум. Амплитуда основного экстремума уровня составляла по фактическим данным около 20 см, а вторичного – лишь 2-3 см. Существование во внутригодовом ходе уровня моря двух, а иногда даже трех экстремумов является характерным для большинства станций северного и западного побережий шельфа, что отмечалось нами и ранее [5].

Следующим этапом работы явилось вычисление разности высот уровня моря. Расчеты велись между измеренными значениями их на станции Приморское (район

устья Дуная) и соответствующими значениями уровня на ст. о. Змеиный с одной стороны и между данными уровня прибрежной станции Черноморское (район м.Тарханкут) и теми же данными ст. о. Змеиный с другой. Расчитанная разница между высотами уровня моря на станциях остров Змеиный – Приморское и Черноморское – остров Змеиный, а также отклонения расходов Дуная в 2005-2006 годах, представлены на рисунке 3. Абсолютные величины разности высот при таком осреднении колебались в пределах первых десяти сантиметров (рис.3). При этом в обобщенных данных выявлено присутствие во внутригодовых колебаниях разности высот уровня всех станций (рис.3), как и в сезонном ходе самого уровня, все тех же хорошо прослеживаемых двух экстремумов, т.е. имеет место полугодовая цикличность.

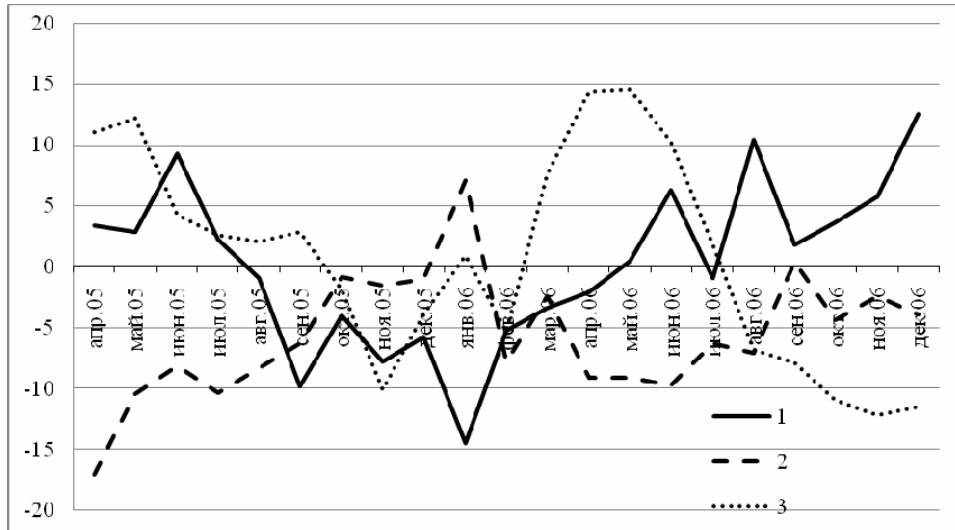


Рис. 3 – Ход разности высот уровней между станциями о. Змеиный – Приморское (1), Черноморское – о. Змеиный (2) и отклонений расходов Дуная (3) за 2005-2006 гг.

Соответствующие временным экстремумам в разностях высот уровня моря отмечаются максимумы и минимумы в скоростях течений и в расходах вод, поскольку именно ими они и определяются (рис. 4).

На рис. 4а приведены среднемесячные значения скоростей потоков на обоих разрезах, рассчитанные по формуле 1 по фактическим наблюдениям с апреля 2005 до декабря 2006 гг. Поскольку течение – величина векторная, то и характеризуется помимо скорости еще и направлением. В северном полушарии справа от потока всегда должны быть большие значения высот (геометрических или динамических), а слева – меньшие. Поэтому на рис. 4 положительные значения соответствуют потокам вод, направленным в северные румбы, а отрицательные – в южные. Исходя из этого, следует, что на представленных рисунках преобладает перенос на юг на обоих разрезах. Однако, скорости переноса на разрезе ст. Черноморское – о.Змеиный существенно меньше (рис.4а), что показывает определяющее значение огромных объемов вод приносимых стоком Дуная. Поэтому в весенние месяцы на разрезе о.Змеиный – ст. Приморское прослеживается перенос на север, который объясняется формированием потоков паводковыми водами Дуная. Это наиболее наглядно следует из рис.3, по которому видно, что в то время, когда расход Дуная максимальный, потоки на границе СЗЧМ шельфа направлены на юг, даже на участке между станциями Черноморское – остров Змеиный. Хотя известно [2], что в СЗЧМ преобладает циклонический характер циркуляции: вода из открытого моря поступает в регион вдоль западного побережья Крыма, а вдоль побережья близ устья Дуная происходит отток воды.

Анализируя внутригодовую изменчивость расходов воды на шельфе СЗЧМ (рис.4б) можно констатировать, что колебания их повторяют описанные выше колебания разности высот уровня (рис.3). Общей характерной особенностью внутригодовых колебаний расходов явилось наличие в их временной изменчивости полугодовой цикличности с двумя максимумами и двумя минимумами в годовом ходе.

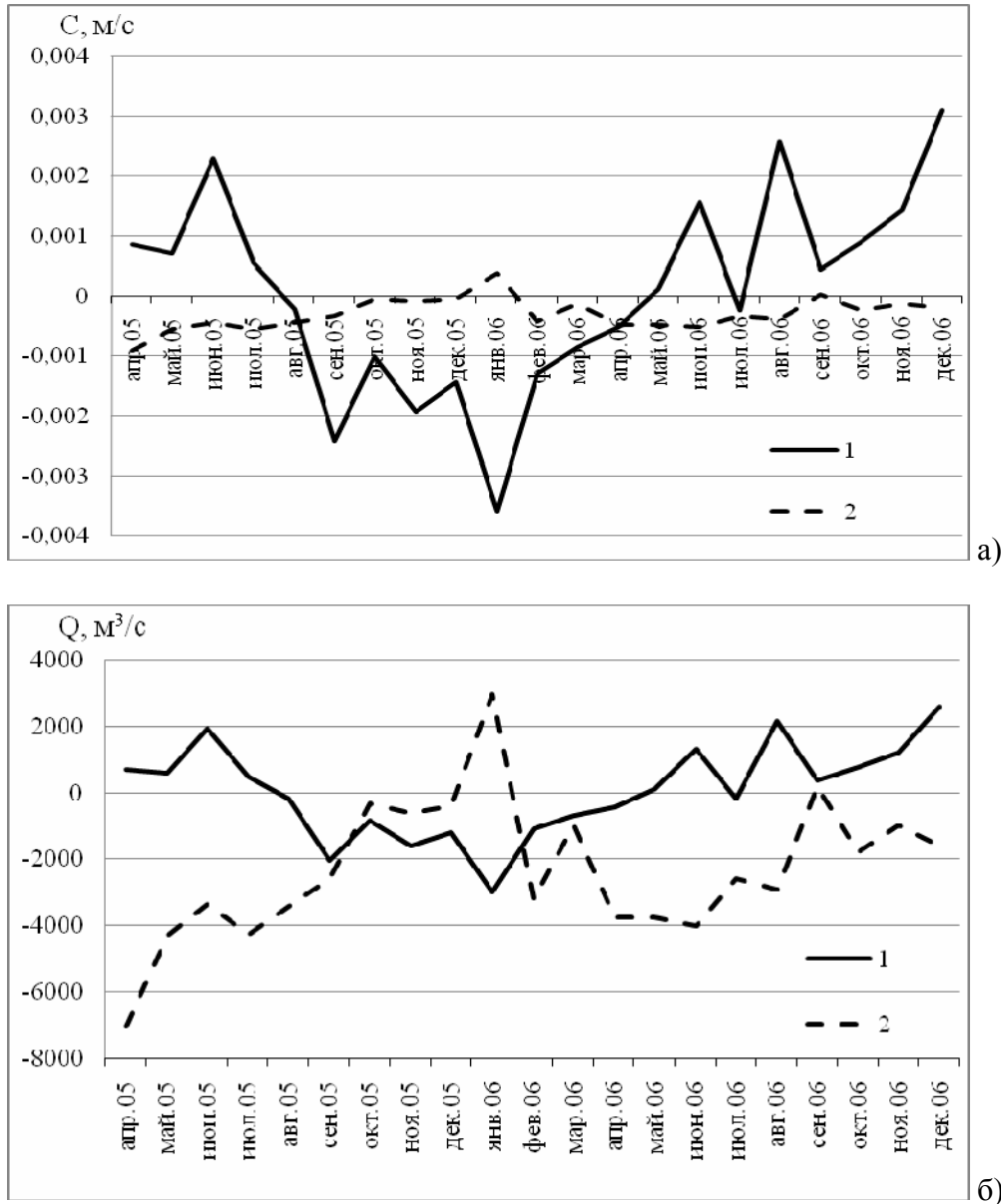


Рис. 4 – Ход скорости потоков (а) и расходов воды (б) на разрезах между станциями о. Змеиный – Приморское (1) и Черноморское – о. Змеиный (2) за 2005-2006 гг.

В результате проведенных расчетов и вычислений получены количественные величины интегрального переноса масс воды между о. Змеиный и западным побережьем и о. Змеиный и восточным побережьем СЗЧМ по месяцам и расходы через разрезы за 2005-2006 гг. Установлено, что на разрезе о. Змеиный – ст. Приморское в период паводка поток дунайских вод поступает на север и длится это на протяжении теплого времени года (с мая по август, а в 2006 году даже до октября) (рис.4б). И только в холодное время года поток на этом разрезе направлен на юг. Как отмечено выше, на разрезе ст. Черноморское – о. Змеиный существенно меньшие скорости

течения, чем на разрезе о. Змеиный – ст. Приморское (рис.4а), но величины расходов вод при этом на разрезе ст. Черноморское – о. Змеиный оказываются большими (рис.4б), поскольку протяженность этого разреза намного больше разреза о. Змеиный – ст. Приморское (табл. 1). Таким образом, нельзя говорить о традиционной циклонической циркуляции на границе северо-западного шельфа Черного моря. Под действием паводковых вод Дуная на СЗЧМ возможно формирование потоков вод, образованных трансформированными речными водами, направленных также на север вблизи устья Дуная и на юг на разрезе Черноморское–Змеиный. Это способствует формированию антициклонических меандров и вихрей в зоне материкового склона на границе Основного Черноморского течения (ОЧТ). Образование антициклонической завихренности в этом районе согласуется с результатами, которые наблюдаются довольно часто в других районах Черного моря в прибрежной зоне конвергенции между стержнем ОЧТ и берегом [7], а также результатами спутниковых наблюдений.

Учитывая, что начиная с 2004 года по настоящее время на острове Змеиный измерения уровня моря, как правило, имеют пропуски наблюдений в период с января по март-апрель, нами по непрерывному ряду данных 2005-2006 гг. был опробован метод восстановления значений пропущенных измерений с помощью метода водного нивелирования, который детально описан в работе [8]. Результаты апробации представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты апробации метода восстановления уровня на станции остров Змеиный с помощью метода водного нивелирования.

Год	Месяц	Уровень моря (фактический, см)	Уровень моря (расчетный, см)	Абсолютная ошибка, см
2005	4	511.0	506.1	4.9
2005	5	512.4	511.2	1.2
2005	6	513.1	504.6	8.5
2005	7	510.4	506.7	3.7
2005	8	508.3	505.6	2.7
2005	9	502.3	506.7	-4.4
2005	10	501.8	502.2	-0.3
2005	11	498.5	503.5	-5.0
2005	12	498.0	499.3	-1.3
2006	1	491.1	499.6	-8.5
2006	2	488.8	491.6	-2.7
2006	3	499.2	502.5	-3.4
2006	4	507.0	509.7	-2.7
2006	5	510.0	513.1	-3.1
2006	6	509.7	508.4	1.2
2006	7	506.0	509.6	-3.5
2006	8	501.3	496.8	4.5
2006	9	491.6	491.8	-0.1
2006	10	493.7	492.0	1.7
2006	11	490.9	490.6	0.3
2006	12	493.7	488.6	5.1
Средние значения		501.85	501.91	-0.06

Процесс апробации этого метода на примере станции остров Змеиный состоял в следующем. Мы исключили из реального ряда наблюдений данные по январю, февралю, марту и апрелю, затем используя метод водного нивелирования [8], рассчитали восстановленные данные для этих месяцев и сравнили их с реальными данными. Для восстановления по методу водного нивелирования использовались измерения уровня по «кусту» станций – Севастополь, Приморское, Усть-Дунайск, Ильичевск за этот период времени. На основании полученных результатов, приведенных в табл. 2, можно сделать вывод о том, что использованный нами метод восстановления пропущенных данных наблюдений можно использовать в дальнейшем анализе для восстановления рядов данных по острову Змеиный за последующие годы.

В заключение можно сделать следующие выводы.

Показано преобладание циклонической циркуляции вод в СЗЧМ по данным наблюдений над уровнем моря на прибрежных станциях: воды из открытого моря поступают в регион вдоль западного побережья Крыма, а отток вод происходит вдоль побережья в районе устья Дуная. Во время паводка на Дунае (максимальных расходов) потоки на границе северо-западного шельфа направлены на юг, даже на участке между станциями Черноморское – о. Змеиный. Это может вызывать периодическое образование прибрежных антициклонических вихрей вблизи острова Змеиный, определяющих перенос водных масс.

Результаты регулярных наблюдений уровня моря на сети станций СЗЧМ возможно использовать для оперативного мониторинга долговременных изменений циркуляционных процессов в этой части моря и аномальных явлений в системе течений этого района в результате глобальных и региональных изменений климата. Эти сведения также могут быть применимы для контроля экологического состояния акватории.

Учитывая важную роль уровенных наблюдений на станциях о. Змеиный, Приморское и Черноморское для оценки и расчета интегрального водообмена северо-западного шельфа с открытыми водами моря, т.е. для получения более качественных и надежных величин расходов, необходимо организовать на них проведение непрерывных круглогодичных наблюдений над уровнем моря с помощью самописцев (СУМ или мареографов), а не ограничиваться срочными (1 – 2 раза в сутки) наблюдениями.

Исследования были проведены в рамках научно-исследовательской тематики Отделения гидроакустики МГИ НАНУ финансируемой Национальной академии наук Украины (2010-2012 гг.) и Одесского национального университета им. И.И.Мечникова в рамках научно-исследовательских проектов, которые финансировались Министерством образования и науки Украины (2003-2010 гг.) и европейской программой FP7 (проект EnviroGrids № 226740. Авторы выражают свою благодарность директору Дунайской ГМО Морозову В.Н. и начальнику морского отдела БП ЧАМ Заволокиной З.П. за предоставленные материалы.

### Список литературы

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. – Т.IV – Черное море – Вып.1 – Гидрометеорологические условия / Под ред. А.И. Симонова, Э.Н. Альтмана – Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат. – 1991. – 430 с.
2. D. Tolmazin. Changing coastal oceanography of the Black Sea // Progress in Oceanography V.15. N 4. Pergamon Press – 1985. – P.316.

3. Медінець В.І., Газетов Є.І. Гідрологічні дослідження морських вод біля острова Зміїний // Острів Зміїний. Екосистема прибережних вод. Вик. Ред. Медінець В.І. – Одеса: Астропринт. – 2008. – С. 51-77.
4. Зубов Н.Н., Мамаев О.И. Динамический метод вычисления элементов морских течений. – Ленинград: Гидрометеиздат. – 1956. – 116 с.
5. Андрианова О.Р., Белевич Р.Р., Буров А.М., Скипа М.И. Сезонные колебания уровня Черного моря и некоторые особенности его изменчивости // Сб. Экологические проблемы Черного моря. Материалы международной научно-практической конференции. – Одесса – 2007. – С.15-19.
6. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. – Москва: Мир. – 1974. – 463 с.
7. Динамические процессы береговой зоны моря / Под ред. Р.Д. Косьяна, И.С. Подымова, Н.В. Пыхова – Москва: Научный мир. – 2003. – 320 с.
8. Победоносцев С.В. Использование водного нивелирования для проверки и восстановления значений уровня моря. Труды Государственного океанографического института. – 1978.– Вып.137. – С. 97-107.

**Оцінка інтенсивності та напрямку переносу водних мас на границі північно-західного шельфу Чорного моря. Андрианова О.Р., Белевич Р.Р., Медінець В.І.**

*Оцінено інтенсивність та напрямок переносу водних мас на границі північно-західного шельфу Чорного на ділянках між станціями Приморське – острів Зміїний - Чорноморське на підставі даних про рівень моря на них. Встановлено періодичне утворення у 2005-2006 рр. прибережних антициклонічних вихорів поблизу острова Зміїний, які визначають перенос водних мас: в періоди квітень - липень 2005р. та травень - грудень 2006 р. – з півночі на південь, а з серпня 2005 р. по квітень 2006 р. – з півдня на північ. Результати тестування методу відновлення відсутніх даних спостережень за рівнем моря показали по острову Зміїний доцільність його використання у наступні роки.*

**Ключові слова:** Чорне море, рівень моря, перенос вод, швидкість потоку, Дунай.

**The estimation of the intensity and direction the transport of the water masses at the boundary of the north-western Black Sea shelf. Andrianova O.R., Belevich R.R., Medinets V.I.**

*The intensity and direction of the marine water transport at the boundary of the north-western Black Sea shelf on the sections between the stations Primorskoe – Zmiinyi Island – Chernomorskoe using of the sea level data on these stations was evaluated. The conclusion about the periodic formation in 2005-2006 of the coastal anticyclonic gyre close to Zmiinyi Island was based: transport from north to south in the periods April – July 2005 and May – December 2006 but transport of the sea water masses from south to north in the period August 2005 – April 2006. The method of the restoration the missing sea level data was testing and results was very positive.*

**Keywords:** Black Sea, sea level, water transport, flow rate, Danube River.