

УДК 551.465.

**Ю.И. Попов**, к.геогр.н., **А.С. Матыгин**, к. ф.-м. н.

*Украинский научный центр экологии моря*

## **ОСОБЕННОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ТЕРМИЧЕСКИМ СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ**

*На основании данных анимационного представления спутниковых среднесуточных термических полей поверхностного слоя воды Черного моря построены месячные схемы циркуляции вод, дан анализ их внутригодовой изменчивости. Подтверждена вихревая природа общециклонической циркуляции вод, сезонные смещения струи КЦТ, определены масштабы основных вихревых структур, а в ряде случаев скорости их горизонтального перемещения и времени жизни. Выявлен наклон общей границы между динамическими структурами западной и восточной половин моря.*

**Ключевые слова:** *Черное море, циркуляция вод, вихрь, циклонические и антициклонические течения.*

### **Введение**

Крупномасштабная циркуляция вод Черного моря характеризуется преобладающим циклоническим переносом. Оконтуривающим является Круговое циклоническое течение (КЦТ), которое, в зависимости от сезона и характера климатических атмосферных условий, может иметь вид удлиненной ячейки бассейнового масштаба или двух отдельных циклонических круговоротов в западной и восточной частях моря, но, как правило, имеет синтезированную картину вышеописанных представлений.

Общепринято, что КЦТ генерируется усредненной в синоптическом масштабе циклонической завихренностью ветра и термогалинными процессами, обусловленными поступлением в море значительного объема речных вод [4, 5, 6, 7, 11, 12, 13].

Зимой генеральная циркуляция имеет, как правило, более выраженную двудерную структуру, а летом преобразуется в одну ячейку, формируемую ослабленным потоком КЦТ; к осени циркуляция подвергается дроблению на ряд круговоротов [6].

Дрифтерные эксперименты [9] показали, что КЦТ интенсифицировано у континентального склона, где скорости течений достигают 1 м/с; период полной циркуляции вокруг бассейна – 90-180 суток.

Как правило, по периферии моря развиваются антициклонические мезомасштабные вихри. Их пространственные размеры имеют порядок 40-100 км, а орбитальные скорости течений – 50 см/с [3,8,14]. Вихри, сформировавшиеся на востоке бассейна, распространяются на запад по северной периферии моря вплоть до Крымского п-ова, где они замедляются и диссипируют [5,10]. Наиболее интенсивные вихри образуются в юго-восточной части моря и к западу от п-ова Крым. Время их существования от 50 (Севастопольский вихрь) до 210 суток (Батумский вихрь).

Целью работы является изучение особенностей общей циркуляции вод Черного моря в 2007 году на основе анализа анимации температурных спутниковых карт поверхностного слоя.

### **Объекты и выходные материалы исследования**

Наблюдения морской поверхности с использованием искусственных спутников Земли (ИСЗ) – прекрасный инструмент для изучения состояния и изменчивости океанологических процессов.

На сайте Морского портала НКАУ, поддерживаемого Морским гидрофизическим институтом по контракту УМАКС – 1 [15] представлены среднесуточные поля поверхностной температуры воды, полученные по модели усвоения всех внутрисуточных измерений с ИСЗ. Эти поля привязаны к единой в течение года цветотемпературной шкале и позволяют при их последовательном просмотре с определенной временной задержкой (анимация) получить визуальное представление об изменениях простран-

венной структуры полей температуры, а по ним и циркуляции вод поверхностного слоя.

Результатом проведенного исследования являются картосхемы и анализ переносов вод поверхностного слоя Черного моря и предварительное описание одного из возможных термохалинных механизмов черноморской циркуляции.

#### **Методы исследования**

Для анализа годового цикла изменчивости структуры течений поверхностных вод 2007 года были созданы месячные анимации температурных полей, на основе которых экспертно построены картосхемы циркуляции (см. рисунок). Анимационное представление спутниковых среднесуточных термических полей поверхностного слоя позволяет качественно оценить пространственно-временную изменчивость циркуляционных процессов, получить количественные оценки масштабов, скоростей перемещения, взаимодействия и времени жизни вихревых образований.

#### **Результаты исследований и их анализ**

В январе северная ветвь струи КЦТ прижата к побережью ЮБК и не активна. Западнее мыса Херсонес, ударяясь почти по нормали в материковый склон СЗШ, она разделяется на две ветви, внешняя уходит на северо-северо-восток и формирует к западу от Крыма слабую область орографической антициклонической завихренности (Севастопольский вихрь, в дальнейшем вихрь СЗШ), а основной поток уходит вдоль склона на запад по направлению основного течения. Крупномасштабные циклонические круговороты в январе несколько обособлены. Четко выделяется циклоническое кольцо циркуляции в западной части моря; ядро восточного циклонического круговорота смещено к северу. Южные, прибрежные регионы моря, охвачены активной мезомасштабной антициклонической деятельностью. Струя КЦТ смещена к северу. Вдоль турецкого побережья (от 30 до 38° в.д.) образовывалось до восьми прибрежных вихрей, причем большинство из них имело орографическую привязку. В центральных областях восточной половины моря январская циркуляция 2007 года имела существенные отличия от средней климатической, для которой характерно усиленное циклоническое движение. Это проявилось в развитии двуядерной антициклонической структуры. Вдоль кавказского побережья струя КЦТ была активна и имела слабовыраженный волновой характер.

В феврале усилилась интенсивность потока КЦТ в районе восточного побережья Турции, а также в области кавказско-крымского побережья, от порта Туапсе до порта Феодосия. Изменился характер циклонической циркуляции в срединных областях моря – в обеих половинах не проявлялось хорошо выраженных крупномасштабных циклонических образований. Срединные антициклонические круговороты открытой части восточной половины моря сместились на северо-восток и стали менее активны. Антициклонические вихри вдоль турецкого побережья визуализируются только в восточных районах. Начал формироваться Батумский антициклон и развились вихри в средней части кавказского побережья и в районе ЮБК. Вихрь СЗШ не развивается.

Март характеризовался интенсификацией крымского участка КЦТ и расширением области антициклонической завихренности СЗШ. В срединных районах западной части моря сформировалась трехядерная циклоническая циркуляция, а в центре восточной части аномальные антициклонические вихри сместились далее на север, образовав значительную по площади область антициклонической завихренности. Окончательно сформировался Батумский антициклон.

В апреле продолжилось расширение антициклонической зоны СЗШ. Поступление в море вод весеннего речного паводка привело к усилению южного вдольберегового переноса у западного побережья моря, параллельного основному потоку КЦТ. Под действием термохалинного фактора происходит постепенное упорядочивание циркуля-

ции и в срединной области западной половины моря – три циклонических вихря объединились в обширный круговорот, юго-восточная периферия которого в области турецкого склона сдвинулась далеко на восток, достигнув  $35^\circ$  в.д. Началось упорядочивание циклонического движения в восточной половине, срединные антициклоны диссипировали. Усилилась и прижалась к шельфу кавказская струя КЦТ. Антициклонические мезомасштабные вихри наблюдались только у берегов Турции.

В мае КЦТ активизировалось почти на всем своем протяжении. Западнее мыса Сарыч поток КЦТ обходит с юга расширенную область антициклонического вихря СЗШ и у материкового склона разделяется на две ветви: восточную, оконтуривающую с севера вихрь СЗШ, и западную, которая формирует циклоническую структуру. Хорошо выделяется западный циклонический круговорот. В восточной части моря циклонические движения также приобрели более четкие очертания. В юго-восточном секторе моря три антициклонических мезомасштабных вихря отгеснили к северу струю КЦТ.

В июне струя КЦТ в северных и западных районах моря представлена единым потоком. Циркуляция вод в срединных областях моря не активна. Вихрь СЗШ оторвался от западного побережья Крыма и начал движение вдоль материкового склона в направлении на ЗЮЗ (переместился на 55 миль за месяц). В срединной части турецкого побережья от южного потока КЦТ отделялась струя, которая, уходя на северо-запад, обозначила юго-восточную границу западного циклонического круговорота. В крайнем юго-восточном секторе моря ослабленный поток КЦТ сместился к северу, образовав в прибрежной зоне цепочку из пяти хорошо развитых мезомасштабных антициклонических вихрей. В центре восточной половины моря образовалась грибовидная структура с выраженной бифуркацией течения.

Середина летнего периода характеризовалась активизацией антициклонического вихреобразования в восточных и северных регионах моря. Активны двоядерная зона в юго-восточном секторе и присклоновый вихрь в средней части кавказского побережья. Существенно расширилась ранее слабо заметная антициклоническая зона, расположенная у ЮБК. Непосредственно к западу от мыса Херсонес начала развиваться область новой орографической завихренности СЗШ, а ранее занимавший эту акваторию вихрь продолжил смещение (примерно на 60 миль за июль) вдоль склона в ЮЮЗ направлении. Западный циклонический круговорот четко выражен, а восточный представлен двоядерной структурой. Следует отметить, что теперь уже на северной периферии потока КЦТ на траверзе мыса Херсонес происходило ответвление мористой ветви в юго-восточном направлении. Это крайняя западная граница восточного круговорота.

В августе существенно изменились энергетические состояния циклонических круговоротов: западный – ослаб, а восточный – усилился и обособился. Мористые ответвления потоков КЦТ в северных и южных секторах моря проходят в центральной части моря создавали параллельные друг другу потоки, соответственно ЮВ и СЗ направлений. Активизированы антициклоны в северных, западных и юго-восточных периферийных районах моря. "Старый" вихрь СЗШ продолжил свое движение вдоль материкового склона, сместившись за месяц примерно на 70 миль в ЮЮЗ направлении.

Характерной особенностью сентября является экстремально активное развитие вдольсклоновой зоны антициклонической завихренности. Исключение составляет сектор южного участка моря от мыса Кору-Бурну (южная граница Болгарии) до траверза порта Амасра (Турция). "Старый" вихрь СЗШ замедлил свое движение (сместился на 30 миль за месяц). Поток КЦТ, огибая вихрь СЗШ с востока, сформировал глубокий меандр в восточном направлении, доходящий до центра южной части западного круговорота.

Октябрь. Наблюдаемый вихрь СЗШ сместился на ЮВ еще на 15-20 миль за месяц и уже значительно меньше препятствует перемещению потоков КЦТ на юг. Пре-

кратил существование антициклонический вихрь СЗШ, а к западу от мыса Херсонес стал развиваться циклонический меандр КЦТ. Усилилась циклоническая деятельность в срединных областях западной половины моря. Ответвления КЦТ западного и восточного циклонических круговоротов снова сформировали два разнонаправленных потока в центральной части моря под углом  $45^\circ$  к меридиану. Продолжилось, начавшееся в сентябре, развитие мощного антициклонического вихря в районе кавказского шельфа. Несколько снизил интенсивность Батумский антициклон. В срединных областях восточной части моря наблюдалось хаотическое движение струй, формировавших грибовидные структуры бифуркации течений.

В ноябре сохранились основные качественные элементы циркуляции вод октябрьского периода - циклонический меандр западнее мыса Херсонес, антициклонические вихри в ЮЗ, ЮВ секторах моря и в срединной части кавказского побережья. В то же время вдоль турецкого побережья визуализируется цепочка из шести антициклонических вихрей; усилилась северная ветвь КЦТ (от Новороссийска до мыса Херсонес); исчезла южно-крымская область антициклонической завихренности вод. Поток восточного циклонического круговорота на северо-западной периферии проник до  $33^\circ$  в.д., после чего резко развернулся в ЮВ направлении.

Осенью включаются в работу все основные механизмы генерации общециклонической циркуляции вод Черного моря: вышеописанный механизм термогалинного уплотнения вод; термогалинный механизм, связанный с перераспределением в море осенних паводочных вод речного стока, и, наконец, механизм механического ветрового воздействия на водную поверхность. Совместная работа этих механизмов привела к усилению в декабре всей крупномасштабной системы циркуляции. КЦТ оконтуривает циклоническим потоком все море, четко выделяется циклонический круговорот западной части моря. Практически исчезли периферийные по отношению к КЦТ антициклонические вихри. Заметны только остатки двух вихрей в юге восточной части моря. Усилившийся северный поток КЦТ вновь начинает формировать орографический вихрь СЗШ. Впервые за год отмечалось эпизодическое внедрение отдельных струй поверхностных вод открытого моря у мыса Тарханкут в срединные районы северной половины СЗШ.

Важнейшими механизмами генерации циркуляции Черного моря считаются механическое воздействие приводных воздушных потоков и термохалинная неоднородность, связанная с активным поступлением в море вод речного стока и в процессе водообмена через Керченский пролив. Зимой происходит усиление циркуляции и смещение к северу ядер крупномасштабных циклонических круговоротов. Однако общеизвестные механизмы генерации движения водных масс не объясняют эти смещения. Взаимодействие воздушных и водных масс имеет комплексный термодинамический характер. Если говорить об открытом море, то максимальная повторяемость ветров северных румбов в зимние периоды года обуславливает повышенную теплоотдачу вод в его северных регионах и, прежде всего, в замкнутых областях к западу и востоку от Крымского полуострова [2]. Это как бы первая крупномасштабная мода избирательного в пространстве охлаждения вод. Второй модой является величина теплосодержания вод верхнего квазиоднородного слоя, наиболее низкая в ядрах крупномасштабных циклонических круговоротов.

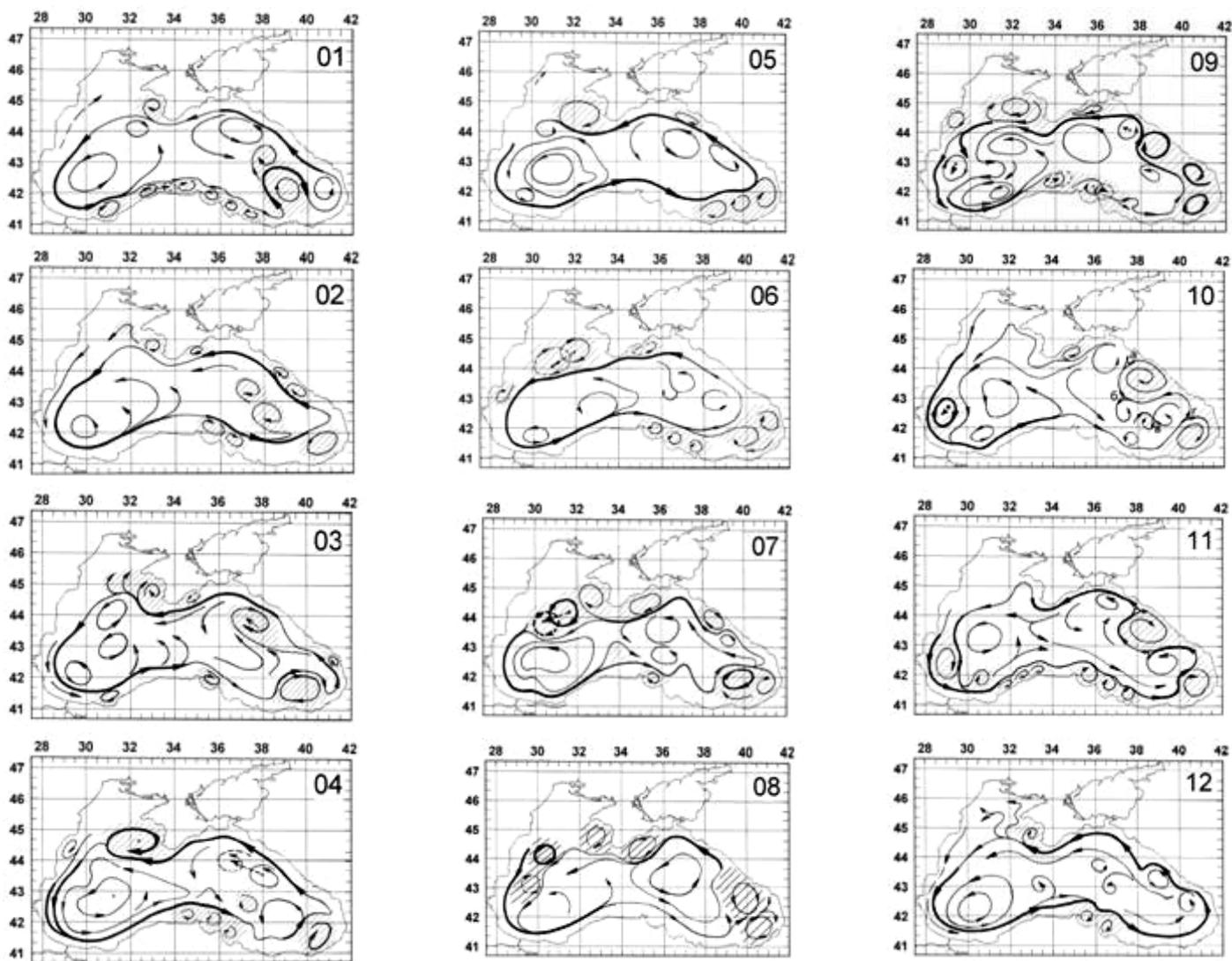


Рис. - Ежемесячные схемы циркуляции Черного моря по анимациям поверхностной температуры воды. Области антициклонической завихренности заштрихованы.

Совмещение этих условий приводит к избирательному охлаждению и уплотнению вод и усилению вертикальной конвекции в области северных периферий крупномасштабных циклонических круговоротов. Вовлечение в процессы перемешивания высокосоленых вод высоко расположенного основного галоклина вызывает резкое увеличение доступной потенциальной энергии и, как следствие, усиление циклонического движения. В результате работы данного механизма, который никем практически не рассматривался, зимой происходит направленное «деформационное» смещение к северу центров крупномасштабных циклонических образований и усиление общециклонического движения [1].

### **Выводы**

1. Анализ анимации спутниковых термических изображений поверхностного слоя воды показал, что они хорошо визуализируют поле течений, позволяют определить положение струйных течений, получить качественные и количественные характеристики масштабов вихревых образований и скоростей их перемещения по акватории моря.

2. КЦТ проявлялось в температурных полях по всему периметру моря в период с декабря по июнь, а в летом-осенью (с июля по ноябрь) оно утрачивало характер стационарного вдольсклонового потока. Наиболее выражено это проявлялось в восточной половине моря, когда многочисленные вихревые образования отодвигали от берега, деформировали и разрывали поток КЦТ.

3. Западный крупномасштабный циклонический круговорот в течение года был значительно более упорядочен по сравнению с восточным. Он хорошо идентифицировался в течение всего года и лишь в июне (частый облачный покров) и августе (высокий и относительно равномерный прогрев вод) недостаточно визуализировался.

4. Состояние восточного циклонического круговорота существенно изменялось в течение года. Зимняя циркуляция характеризовалась наличием аномальных антициклонических вихрей в срединных областях моря, а осенью (к октябрю) мезомасштабные движения полностью завуалировали общециклонический перенос. В период осенне-зимнего охлаждения и усиления ветрового режима (ноябрь-декабрь) произошло быстрое восстановление крупномасштабной циклонической циркуляции.

5. Условная динамическая граница между западным и восточным круговоротами моря не проходит меридионально по наиболее узкой срединной части моря, а является наклонной. Она существенно смещена на запад в северных и на восток в южных районах. Тем самым проявляется энергетическое влияние струй КЦТ и сопутствующих им вихрей.

6. Антициклоническая зона у мыса Херсонес развивалась и расширялась с января по июнь. При летнем ослаблении КЦТ, произошел отрыв квазистационарного вихря и началось его смещение вдоль склона в южные регионы моря. В период с июня по ноябрь он сместился на 235 миль со скоростями перемещения от 70 до 15 миль в месяц. При своем движении он оказывал сильное запирающее влияние на распространение основного мористого потока КЦТ. После ухода «старого» вихря у мыса Херсонес началось формирование новой антициклонической структуры, но она существовала только с июля по сентябрь.

7. Квазистационарные антициклонические вихри Анатолийского побережья наблюдались на неоднородностях рельефа практически во все месяцы года (цепочка из двух- восьми вихрей). Каких-либо выраженных периодичностей изменения их состояния в 2007 году выявлено не было.

8. Наиболее интенсивным квазистационарным антициклоном Черного моря считается вихрь юго-восточного сектора (Батумский вихрь). В течение года он идентифи-

цировался с февраля по ноябрь. Продолжительность жизни ~ 300 суток при среднестатистической - 210 суток.

9. Аномальный срединный антициклон в центральных областях восточной части моря был активен в январе и в феврале как двуйдерная структура. В марте, объединившись в одно ядро и поднявшись в северные области моря, он диссипировал. По данным спутниковых термических изображений эта вихревая структура появилась еще в октябре 2006 г. Общее время существования этой аномальной вихревой структуры в период 2006-2007 гг. составила около 5 месяцев.

10. Условия относительно теплой зимы 2006-2007 гг. способствовали развитию уже в феврале-марте небольшой антициклонической зоны в ялтинско-судакской области крымского побережья., хотя обычно такая зона появляется августе-сентябре при средней продолжительности жизни до 120 суток. В апреле-мае в связи с усилением северного потока КЦТ вихрь исчез, но в июне он вновь проявился и просуществовал, активизировавшись в июле-августе, вплоть до октября (время жизни ~ 180 суток). По всей видимости, мягкие климатические условия зимы 2006-2007 гг. обусловили аномально интенсивное развитие антициклонических структур в Черном море.

### Список литературы

1. *Георгиев В.Т., Герасимов С.А., Попов Ю.И.* Гидродинамическое состояние открытых вод северной половины Черного моря в 1992-1993 гг. - в сб. Исследование экосистемы Черного моря. Сб. Одесса. Ирен-полиграф.-1994. Вып.1. Стр.17-23.
2. *Ефимов В.В., Тимофеев Н.А.* Теплобалансовые исследования Черного и Азовского морей. М.: ВНИИГМИ МЦД, 1990. – 236 с.
3. *Afanasyev, Y.D., Kostianoy, A.G., Zatsepin, A.G., Poulain, P.-M.,* 2002. Analysis of velocity field in the Eastern Black Sea from satellite data during the Black Sea '99 experiment. *Journal of Geophysical Research* 107 (C8).
4. *Grey goire, M., Soetaert, K., Nezlin, N., Kostianoy, A.,* 2004. Modelling the nitrogen cycling and plankton productivity in the Black Sea using a three-dimensional interdisciplinary model. *Journal of Geophysical Research* 109, C05007.
5. *Korotaev, G.K., Saenko, O.A., Koblinsky, C.J.,* 2001. Satellite altimetry observations of the Black Sea level. *Journal of Geophysical Research* 106 (C1), 917–933.
6. *Korotaev, G., Oguz, T., Nikiforov, A., Koblinsky, C.,* 2003. Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data. *Journal of Geophysical Research* 108 (C4), 3122.
7. *Oguz, T.V., Latun, V.S., Latif, M.A., Vladimirov, V.V., Sur, H.I., Markov, A.A., Ozsoy, E., Kotovshchikov, V.V., Ereemeev, V.V., Unluata, U.,* 1993. Circulation in the surface and intermediate layer of the Black Sea. *Deep-Sea Research I* 40, 1597–1612.
8. *Oguz, T.V., Aubrey, D.G., Latun, V.S., Demirov, E., Koveshnikov, L., Sur, H.I., Diaconu, V.S., Besiktepe, S., Duman, M., Limeburner, R., Ereemeev, V.,* 1994. Mesoscale circulation and thermohaline structure of the Black Sea observed during HydroBlack '91. *Deep-Sea Research I* 41, 603–628.
9. *Poulain P-M, Barbanti R, Motyzhev S and Zatsepin A.* Statistical description of the Black Sea near-surface circulation using drifters in 1999–2003. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. Vol. 52, Issue 12, 2005, pp. 2250–2274
10. *Rachev, N.H., Stanev, E.V.,* 1997. Eddy processes in semienclosed seas: a case study for the Black Sea. *Journal of Physical Oceanography* 27, 1581–1600.
11. *Stanev, E.V.,* 1990. On the mechanisms of the Black Sea circulation. *Earth-Science Reviews* 28, 285–319.

12. Stanev, E.V., Roussenov, V.M., Rachev, N.H., Staneva, J.V., 1995. Sea response to atmospheric variability. Model study for the Black Sea. *Journal of Marine Systems* 6, 241–267.
13. Stanev, E.V., Beckers, J.-M., 1999. Numerical simulations of seasonal and interannual variability of the Black Sea thermohaline circulation. *Journal of Marine Systems* 22, 241–267.
14. Zatsepin, A.G., Ginzburg, A.I., Kostianoy, A.G., Kremenetskiy, V.V., Krivosheya, V.G., Stanichny, S.V., Poulain, P.-M., 2003. Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing. *Journal of Geophysical Research* 108 (C8), 3246.
15. <<http://dvs.net.ua/>>

**Особливості циркуляції вод поверхневого шару Чорного моря по термічним супутниковим даним Попов Ю.І., Матигін О.С.**

*На підставі даних анімаційного подання супутникових даних середньодобових термічних полів поверхневого шару води Чорного моря побудовані місячні схеми циркуляції вод і зроблено аналіз їхньої внутрішньорічної мінливості. Підтверджена вихрова природа загальної циклонічної циркуляції вод, сезонні зсуви струменя Основної чорноморської течії, визначені масштаби основних вихрових структур, а в ряді випадків швидкості їхнього горизонтального переміщення й часу життєдіяльності. Виявлено нахил загальної границі між динамічними структурами західної й східної половин моря.*

**Ключові слова:** Чорне море, циркуляція вод, вихор, циклонічні та антициклонічні течії.

**The Features of circulation of Black sea surface waters on thermal satellite data.**

**Popov Yu.I., Matygin A.S.**

*Using information which were presented by visual satellite data's, which consist mid twenty four hours thermal fields of surface waters of Black Sea, we have formed monthly water circulation diagram and give analyses of its annual variables. Exposed vorticial structure of total cyclonical water circulation, using seasonal removal of the flow RC (Rim Current) we have defined total scale of vorticial structure, and sometimes we even defined volume of its horizontal removal and capable of living time. We have found general slope limit among dynamical structure of western and eastern parts of the sea.*

**Keywords:** Black sea, circulation of waters, eddy, cyclonic and anticyclonic currents