

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ШЕЛЬФОВЫХ ВОД В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ И ИХ ОБМЕН С ВОДАМИ ОТКРЫТОГО МОРЯ

Рассмотрены некоторые аспекты расчета площадей распространения шельфовых вод в северо-западной части Черного моря по распределениям солёности и концентраций хлорофилла-а в поверхностном слое. Определено существенное влияние направленности ветров на характер распространения вод. Получены оценки расходов шельфовых вод, внедряемых в синоптические круговороты северо-западного материкового склона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *шельф, открытое море, шельфовые воды, солёность, хлорофилл-а, северо-западная часть, Черное море.*

Знание механизмов пространственного распространения шельфовых вод (ШВ) и их трансформации является основополагающим при изучении экологического состояния обширного и мелководного северо-западного шельфа (СЗШ). Этой проблематике посвящено много работ [1, 2]. По своим показателям ШВ не являются собственно водной массой, их характеристики изменчивы, а объёмы относительно невелики. Но, если рассматривать влияние этих вод на экологическое состояние региона, то следует отметить, что в области их распространения развивается ряд самых неблагоприятных процессов, таких как эвтрофикация вод поверхностного слоя, дефицит кислорода и местное сероводородное заражение глубинных слоев и другие. Объёмы и характер распространения вод на шельфе существенно зависят от внешних факторов, внутренней динамики вод и процессов их взаимодействия с водами открытого моря.

Целью работы является определение влияющих факторов на процессы распространения шельфовых вод и получение количественных оценок трансформации вод в вихревых структурах северо-западного склона (СЗС).

Данные и их анализ. В работе использованы материалы спутниковых наблюдений над содержанием хлорофилла-а (*Sea WIFs*) и данные о ветровом режиме в Одессе, Евпатории и на о.Змеиный. Для анализа процессов вихреобразования на свале глубин были также использованы материалы океанографических наблюдений трех экспедиционных рейсов: 20-го рейса НИС «Владимир Паршин» (сентябрь 1996 г.); 22-го рейса НИС «Владимир Паршин» (май 1999 г.) и 58-го рейса НИС «Виктор Бугаев» (сентябрь – октябрь 1994 г.).

Для определения площадей, занимаемых ШВ, необходимо знать границу или передний фронт их распространения. Сейчас этим параметром является солёность, как одна из наиболее консервативных характеристик морских вод. Гистограмма повторяемости поверхностной солёности на СЗШ по всему историческому массиву данных показывает (рис.1), что величина 17,5 ‰ является надежной характеристикой границы ШВ. В этой точке мы



Рис. 1. Повторяемость солёности поверхностного слоя воды на СЗШ Черного моря.

имеем резкое увеличение повторяемости при переходе от изменчивых ШВ к относительно солёным и однородным водам восточной половины шельфа.

В халинном выражении эта граница не является абсолютно неизменной в течение года и при разных ветровых и волновых условиях. Активное осенне-зимнее конвективное и вет-

ровое перемешивание может несколько повышать значение солёности на границе до 17,6 – 17,9 ‰, в летнее время понижать до 17,3 – 17,4 ‰. Последнее связано с общим, сезонным распреснением вод деятельного слоя моря.

Значительную часть теплого полугодия ШВ распространяются в поверхностном слое. Во второй половине лета и начале осени достигают дна в мелководных районах моря (на глубинах 0 – 30 м). В зимние периоды на большей площади СЗШ, как правило, наблюдается почти полная вертикальная однородность вод. В последние годы, в связи с постепенным повышением средних и экстремальных зимних температур, это правило все чаще нарушается.

К сожалению, регулярные и массовые наблюдения над солёностью в шельфовой области моря фактически не проводятся уже около 10 лет. Необходимо какой-то другой параметр, альтернативный по методам получения данных и подобный по способности фиксации внешних границ распространения ШВ. Одним из таких параметров может быть хлорофилл-а. Спутниковые цифровые и растровые данные о распределении хлорофилла в поверхностном слое моря доступны за предшествующий, более чем 10-летний период с пространственно-временным разрешением 4 – 9 км и 1 – 8 суток.

Поля хлорофилла-а не столь консервативны, как поля солёности. Развитие фитопланктона, связано с изменениями концентраций питательных веществ, режима освещения, температуры и т.д. Эпизодические или частые вспышки фитопланктона, могут существенно менять структуру поля хлорофилла-а. Детальный анализ пространственно временной изменчивости спутниковых полей хлорофилла-а показал, что наибольшим временным изменениям величин его содержания подвержены приустьевые области дунайского и днепро-бугского стоков с удалением границ этой зоны непосредственно от устьев до 20-40 миль.

Принимая хлорофилл-а за параметр выделения границ, необходимо выяснить его согласованность с солёностью и определить величину концентрации этого параметра в области внешнего фронта распространения ШВ.

Для получения статистической оценки соответствия значений солености в 17,5 ‰ определенному значению хлорофилла-а произведена интерполированная выборка последнего в местах судовых измерений солености воды. Для анализа отбирались

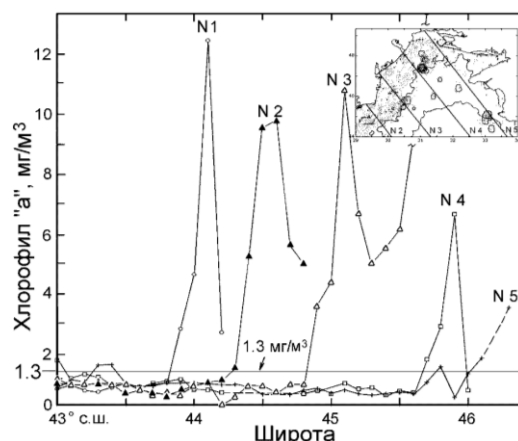
все данные по солености и хлорофиллу, расположенные в непосредственной близости от фронтальной зоны. Данные, удаленные в шельфовую область принимались в расчет только в случае отсутствия всплеск хлорофилла. Поля корреляции отдельно по всем трем съемкам СЗШ представлены на рис.2. Уравнение линейной регрессии между соленостью и хлорофиллом-а имеет вид:

$$Sal = -0,7 \cdot Chl + 18,4.$$

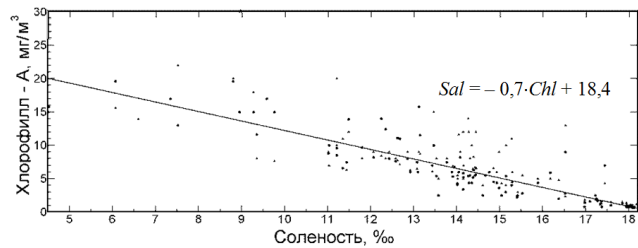
Рассчитанная по уравнению регрессии концентрация хлорофилла, при значении солености 17,5 ‰, составляет величину 1,3 мг/м³.

Расчеты горизонтальных градиентов концентраций хлорофилла-а по детальным спутниковым данным показывают, что переднему фронту ШВ соответствует величина градиента, равная 0,05 мг/м³/км, которая резко (на порядок и более) увеличиваются по мере приближения к приустьевым участкам и, особенно, к областям всплеск фитопланктона.

Рассмотрены многочисленные профили пространственных изменений хлорофилла-а на квазиперпендикулярных направлениях генеральному фронту его местоположения. Пример выбора данных по разрезам представлен на врезке рис.3, примеры пространственных изменений концентраций хлорофилла на пяти галсах СЗШ – на основном рисунке. Все результаты однозначно указывают на то, что концентрация хлорофилла в 1,3 мг/м³ хорошо отсекает однородные воды открытого моря от изменчивых вод шельфовой области.



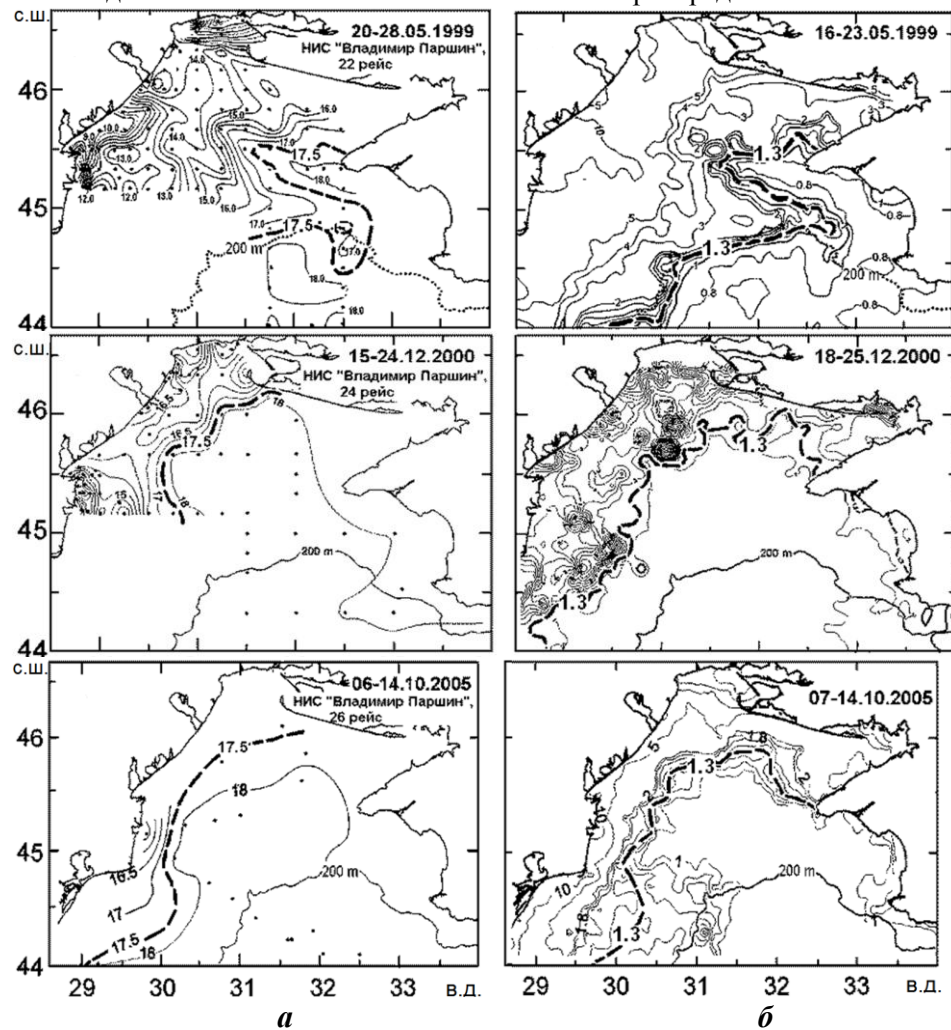
Р и с . 3 . Распределения хлорофилла-а на галсах, квазиперпендикулярных фронтальному разделу.



Р и с . 2 . Поле корреляции между соленостью и хлорофиллом-а в области внешнего фронта распространения шельфовых вод на СЗШ.

Для определения согласованности пространственных полей солености и хлорофилла-а из всего массива наблюдений были выбраны три съемки НИС «Владимир Паршин» разных лет, в период выполнения которых есть спутниковые наблюдения над хлорофиллом-а. Соответственные распределения этих элементов представлены на рис.4. Слева даны распреде-

ления солёности, справа – соответствующие распределения хлорофилла-а. Хорошо согласуются крупные и даже мезомасштабные особенности обеих распределений.



Р и с . 4 . Пространственные распределения концентраций хлорофилла-а (а) и солёности (б) в поверхностном слое воды по трем периодам синхронных наблюдений.

Площади распространения ШВ дают пространственную оценку эвтрофированности шельфовой области, а численные значения хлорофилла и наличие областей вспышек характеризуют ее интенсивность. Расчет площадей распространения ШВ со значениями хлорофилла-а большим величины $1,3 \text{ мг/м}^3$ производилось по программе, адаптированной к береговой линии СЗШ.

Определение вышеуказанных площадей не вызывает больших трудностей в период теплого полугодия. В этот период, воды открытого моря и восточных областей шельфа характеризуются минимальной пространственной изменчивостью содержания хлорофилла на уровне $0,5 - 0,8 \text{ мг/м}^3$ и граница ШВ четко выражена.

В холодное полугодие, из-за активизации конвективного перемешивания в поверхностный слой происходит поступление питательных веществ с глубинных (для шельфовой зоны) или подповерхностных (для открытого моря) горизонтов и, как следствие, активное развитие фитопланктона. В тех районах шельфа, где конвекция достигает дна, поступление биогенных элементов наиболее выражено и граница эвтрофированной зоны сдвигается к востоку или свалу глубин. Имевшее место летом соответствие между соленостью и хлорофиллом в рассматриваемой пограничной зоне, в данный период года нарушается. В открытом море, с началом развития конвекции происходит появление локальных и интенсивных очагов развития фитопланктона и генерации хлорофилла. В зимний период года содержание хлорофилла-а в открытом море повсеместно увеличивается до значений $1,5 - 2,0 \text{ мг/м}^3$ и более. При этом площадь вод на шельфе с высоким содержанием хлорофилла-а может охватывать весь шельф или даже выходить за его пределы.

Зимнее увеличение площадей эвтрофированных вод уже не связано с распространением питательных веществ трансформированными речными водами. Биогенные элементы поднимаются с глубинных и придонных горизонтов шельфа. Это другой механизм эвтрофикации вод.

На рис.5 дано графическое представление результатов. На осредненном за 12 лет графике площадей минимумы отмечаются в апреле и октябре, летом – два максимума, летний и летне-осенний и локальный минимум в июле. В межгодовом плане отмечаются высокие значения летних площадей в 1998, 1999 и 2000 гг., низкие в 2002 и 2003 гг. и средние в 2001 и в последние шесть лет (в 2008 г. – мало данных).

Очень важно знать основные причины, которые вызывают изменения площадей ШВ. Важной причиной может быть приводный ветровой режим. Для определения этого фактора влияния рассчитывались средние векторные направления ветров для конкретной площади за предшествующий месячный период по трем метеорологическим станциям: Одесса-порт, Евпатория и о.Змеиный. Расчет произведен как для полных площадей ШВ на СЗШ, определенных по хлорофиллу (рис.6, а), так и по солености поверхностного слоя, для площадей ШВ севернее 45°с.ш. (рис.6, б).

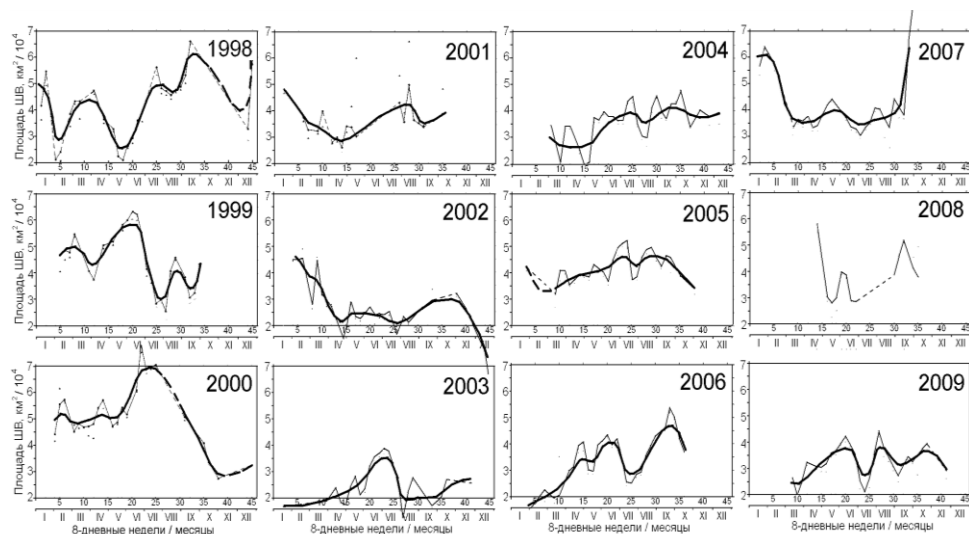
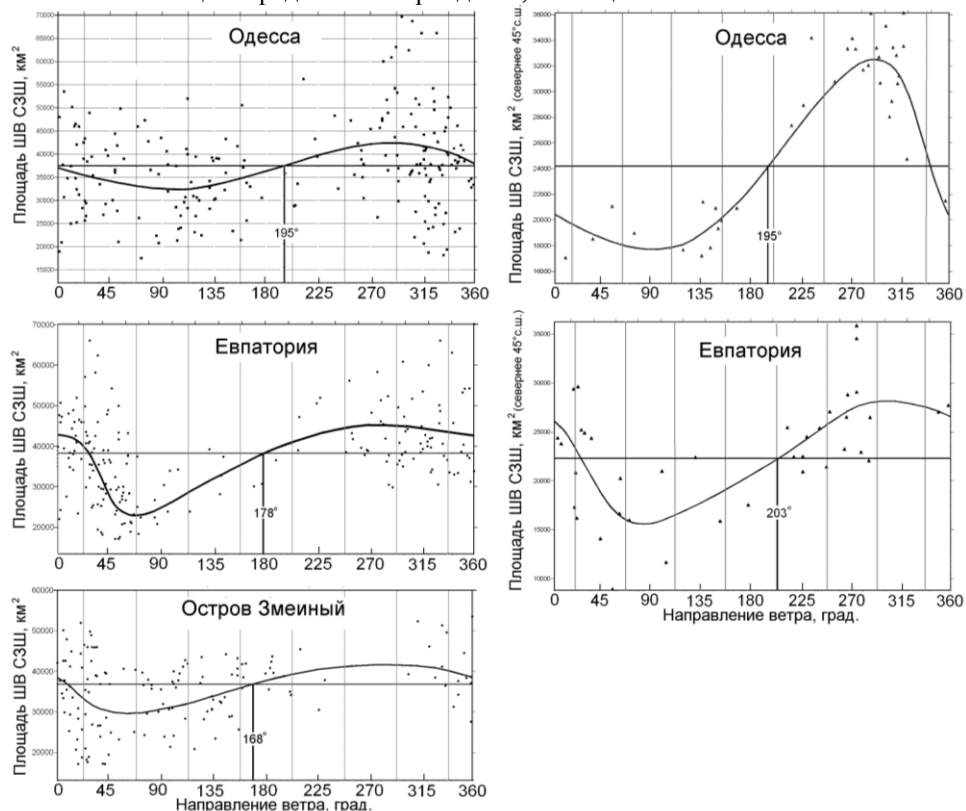


Рис. 5. Графики временных изменений площадей эвтрофированных вод на СЗШ, рассчитанных по хлорофиллу-а за период с 1998 по 2009 гг. Жирные линии – скользящее осреднение с периодом 1,5 месяца.



a

б

Рис. 6. Связь направленности ветров месячной заблаговременности и величин полных средних недельных площадей ШВ, рассчитанных по распределе-

ниям хлорофилла-а (*a*) и площадей ШВ, рассчитанных севернее 45°с.ш., рассчитанных по судовым данным наблюдений над соленостью воды (*b*).

Как и следовало ожидать, ветры с западной составляющей приводят к расширению ареала распространения ШВ и наоборот. Ветровые данные по Евпатории имеют наименьший разброс данных (при расчете по хлорофиллу) и проявляют некоторую несинусоидальность процесса – сектор направлений ветров, уменьшающих площадь распространения ШВ несколько меньше (от северо – северо-восточного до южного, 150°), чем сектор ветров, увеличивающих площади ШВ (210°). Для полных площадей ШВ (рис.6, *a*) данные метеостанции Одесса-порт не представительны, но для северной части шельфа (рис.6, *b*) плотность расположения точек соответствия лучше по данным Одессы.

Продолжительные ветры с южной составляющей над западной половиной Черного моря заслуживают особого внимания, так как они нарушают как циклоническую циркуляцию в бассейне, так и в его северо-западной части. Их повторяемость и сила определяют степень нарушения обмена вод между СЗШ и открытым морем. Особенно велика повторяемость этих ветров в западной половине шельфа. Под их воздействием может полностью прекратиться вдольбереговой поверхностный перенос речных вод в южном направлении и их накопление в центральных и северных районах шельфа. Наиболее характерной картиной такого состояния был летний период 2007 г. В июле – августе 2007 г. устойчивые ветры юго – юго-восточного и юго – юго-западного направлений (по данным наблюдений на метеостанции о.Змеиный) на длительное время практически полностью исключили перенос на юг (южнее м.Сфынтул-Георге) эвтрофированных речных вод. Об этом свидетельствовали спутниковые данные о распределении хлорофилла-а и визуальные спутниковые данные о перераспределении потоков мутных вод в придунайском районе. При этом площади ШВ в течение всего лета оставались стабильно на невысоком среднем уровне (рис.5). Основная трансформация ШВ в этот период происходила внутри шельфа и в процессе их активного вовлечения в вихревые структуры СЗС.

Относительно большой разброс данных на рис.6 свидетельствует о том, что существуют и другие факторы, способствующие распространению ШВ. К ним можно отнести ветро-волновое перемешивание вод, внутреннюю термогалинную циркуляцию бассейна и взаимодействие в приграничных районах шельфа с вдольсклоновыми потоками и вихревыми системами.

Выходя к районам свала глубин, ШВ подвергаются массовой трансформации и переработке, поскольку активно участвуют в развитии, а возможно и генерации вдольсклоновых шельфовых вихревых образований. И наоборот, крупные и квазистационарные вихри СЗС играют большую роль в развитии циркуляции и крупномасштабных процессов (в границах шельфа) перемешивания вод в южной половине шельфовой области.

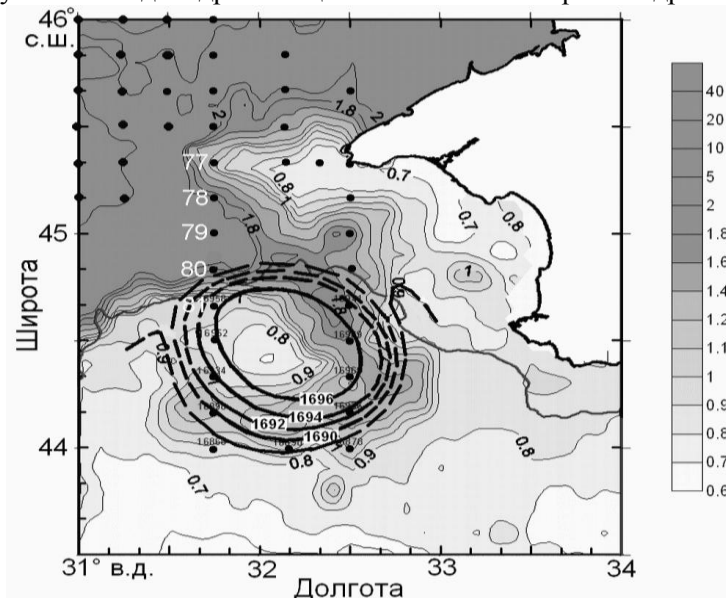
Роль вихревых структур СЗС Черного моря в вовлечении и трансформации ШВ хорошо известна [3, 4]. Однако до сих пор, из-за отсутствия глубоководных гидрофизических наблюдений нет достаточных данных о механизме участия вод шельфа в вихреобразовании, немного знаний о том, яв-

ляются ли они только вовлекаемой субстанцией, или источники активной генерации вихревых структур.

В 90-е гг. прошлого столетия на судах Украинского научного центра экологии моря было выполнено около 20 съемок СЗШ и района материкового склона. Три съемки можно проанализировать на предмет участия ШВ в вихреобразовании.

22-й рейс НИС «Владимир Паршин», выполненный в конце мая 1999 г., был одним из наиболее удачных рейсов в плане фиксации гидрофизическими наблюдениями вихревого образования. Двумя меридиональными галсами были рассечены фронтальная и тыловая части крупного Севастопольского вихря. Наличие на это период времени спутниковых недельных данных о содержании хлорофилла-а позволили представить синтезированную картину динамической топографии и распределения хлорофилла (рис.7). Можно отметить хорошую согласованность полей.

Данные ст.77 – 81, рассекающие входную струю ШВ, позволили получить оценку расхода внедряемого в вихрь потока ШВ, а в дальнейшем проследить характер их взаимодействия с динамической структурой. Из области входящего потока ШВ хорошо прослеживается перенос, поверхностных на начальном этапе внедрения, распресненных (соленость меньше 18,0 ‰), а поэтому легких вод в ядро антициклонического вихря. Внедрение вод про-



Р и с . 7 . Карта динамической топографии свободной поверхности, рассчитанная от поверхности 200 дб (дин.см) на фоне распределения хлорофилла-а (24 – 31 мая 1999 г.) в области Севастопольского вихря.

исходит по конусообразной спирали с постепенным заглублением и сжатием в ядро вихря на верхней границе основного галоклина.

Расчет горизонтального переноса ШВ в пределы вихря производился традиционным динамическим методом от придонных горизонтов. Расход восточной струи ШВ от устья Дуная, распространяющейся в слое 0 – 12 м,

составил $29 \text{ км}^3/\text{месяц}$. Расход вод шельфа с соленостью менее $18,0 \text{ ‰}$ (в том числе и внедряемых в ядро вихря) составляет $129 \text{ км}^3/\text{месяц}$.

Таким образом, объем ежемесячно внедряемых в вихрь ШВ составляет примерно десятую часть расхода всех рек северо-западной части Черного моря, а поступление вод шельфа с соленостью менее $18,0 \text{ ‰}$, за аналогичный период, равно половине среднего месячного расхода самой крупной реки Черного моря – Дуная.

Если предположить, что в теплое полугодие было сформировано три синоптических вихря (за полный год может генерироваться до восьмидесяти вихрей) со временем жизни 2 месяца у каждого, то объем ШВ внедряемых в вихри составляет 174 км^3 . Это примерно $1/5$ часть среднего текущего объема шельфовых вод ($V_{\text{ШВ}} = 40000 \text{ км}^2 \cdot 0,02 \text{ км} = 800 \text{ км}^3$). А если за границу вод шельфа, внедряемых в вихрь, взять величину 18 ‰ , то объем утилизируемых вихрями вод составит 774 км^3 .

Значительная часть загрязненных речных вод уходит за пределы СЗШ на юг вдоль западного побережья Черного моря и трансформируется в многочисленных мезомасштабных вихрях южного побережья, или в плохо управляемой и сложной динамической системе восточной части Черного моря. Часть вод выносятся в южные моря через систему южных проливов. В пределах СЗШ трансформация вод происходит повсеместно на нижней границе ШВ и на переднем внутришельфовом фронте их горизонтального распространения.

Осенью 1994 г. гидрофизическими наблюдениями в 58-й рейсе НИС «Виктор Бугаев» была зафиксирована исключительная активность антициклонической завихренности в области южно-крымского и Севастопольского вихрей. Ассиметрично расположенное ядро Севастопольского вихря было прижато к западному склону донного амфитеатра, а восточный гребень простирался вплоть до меридиана м.Херсонес. Радиальный перепад динамических высот в вихре составлял более 14 дин. см. Южнее вихря, слегка изогнутой дугой располагалась интенсивная фронтальная зона ОЧТ.

Вовлечение шельфовых вод в вихревую систему происходило с севера. Струя днепро-бугских и днестровских вод, вычленялась из общей массы шельфовых вод в 30-ти милях западнее м.Тарханкут. На широте 45° поверхностная струя разделялась на два потока и вовлекалась в Севастопольский вихрь в северо-западном и северо-восточном его секторах.

В сентябре 1996 г. (20-й рейс НИС «Владимир Паршин») вихревая система СЗС активно подпитывалась легкими шельфовыми водами из придунайского района. Удельный объем увлекаемых вихрем ШВ в слое 0 – 20 м в северо-западный сектор вихревого образования в сентябре 1996 г. составлял $27,2 \text{ км}^3/\text{месяц}$, что практически идентично оценке расхода, полученной нами по результатам работ в мае 1999 г. ($29 \text{ км}^3/\text{месяц}$).

Размеры и области влияния склоновых вихрей. До недавнего времени максимальным размером Севастопольского вихря считался диаметр 120 км. В мае 2009 г. размеры вихря были экстремальными – более чем $130 \times 150 \text{ км}$ (рис.8). В вихрь втягивались воды с содержанием хлорофилла менее $1,3 \text{ мг/м}^3$. Если за наиболее отдаленную точку, где прослеживается отрыв струи эвтрофированных шельфовых вод, взять северную периферию

выраженного принудительного отделения от основной массы, то это расстояние составит 110 км, что на 34 км (45 %) больше максимального радиуса вихревого образования. К северу от потока втягиваемых вод можно наблюдать обратный процесс – компенсационный западный перенос относительно чистых вод из центральных и восточных областей шельфа (темный цвет). Т.о. склоновые вихревые образования вызывают значительные крупномасштабные переносы и перемешивание вод в 30 – 50 мильной зоне шельфа, выше верхней кромки материкового склона.

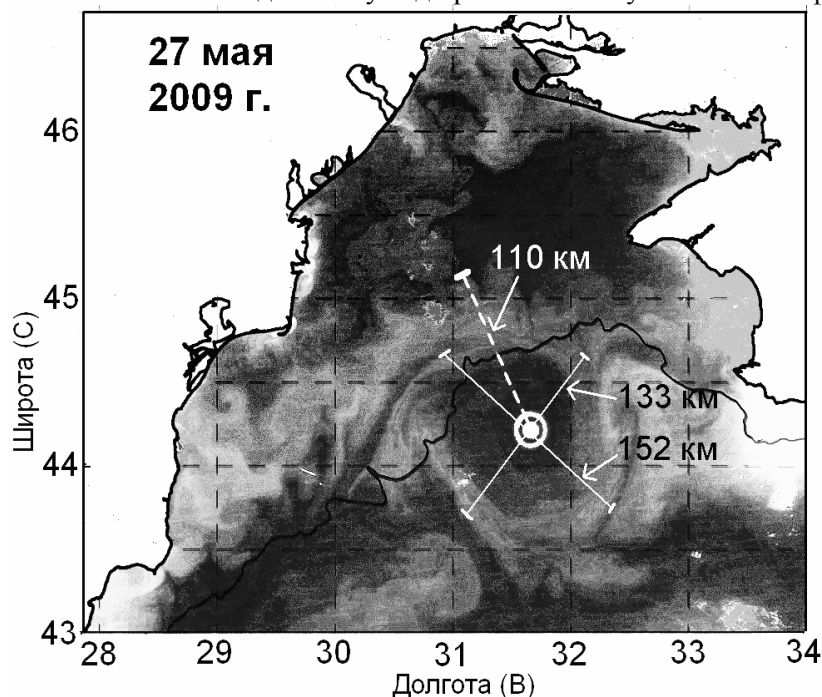
Выводы.

1. Передний фронт распространения ШВ в период теплого полугодия может быть определен по величине хлорофилла-а, равной 1,3 мкг/л.

2. Распространение и трансформация ШВ на СЗШ определяется ветровым режимом, системой плотностных течений и интенсивным обменом с водами открытого моря в склоновых антициклонических вихрях.

3. Расход струи ШВ, внедряемой в вихрь СЗС в мае 1999 г., составил $29 \text{ км}^3/\text{месяц}$, в сентябре 1996 г. $27,2 \text{ км}^3/\text{месяц}$, что примерно соответствует расходу паводочного стока реки Дунай.

4. В связи с изменениями климатических условий предполагается увеличение размеров вихрей северо-западного склона Черного моря, увеличения зоны их влияния на динамику вод присклоновых участков шельфа.



Р и с . 8 . Размеры синоптического антициклонического вихря 27 мая 2009 г. и зона его влияния на циркуляционные процессы южной части СЗШ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большаков В.С.* Трансформация речных вод в Черном море.— Киев: Наукова думка, 1970.— 328 с.
2. *Блатов А.С., Иванов В.А.* Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря.— Киев: Наукова думка, 1992.— 242 с.
3. *Каминский С.Т., Ковешников Л.А., Чигогидзе Ю.Ш.* Квазистационарный вихрь в северо-западной части Черного моря // Процессы формирования и внутригодовой изменчивости гидрофизических и гидрохимических полей Черного моря.— Севастополь: МГИ АН УССР, 1988.— С.29-35.
4. *Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В.* Эволюция антициклонических вихрей в северо-западной части Черного моря // Исследование Земли из космоса.— 1996.— № 4.— С.67-75.

Материал поступил в редакцию 10.10.2010 г.