

# ГРИБОВИДНЫЕ ТЕЧЕНИЯ НАД СВАЛОМ ГЛУБИН СЕВЕРО- ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ: ДИСТАНЦИОННЫЕ И КОНТАКТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В.А. Блинков, В.А. Дулов,  
С.В. Станичный

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины,  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: odmi@alpha.mhi.iuf.net

*Описано пространственное распределение характеристик верхнего квазигомогенного слоя, а также скорости и дивергенции течения в области системы грибовидных образований в западной части Черного моря. Выявлена закономерность в структуре вертикальных потоков в грибовидном течении. Показано, что картина движения воды, наблюдаемая на спутниковых ИК-изображениях, соответствует контактному измерению.*

Спутниковые изображения Северо-западной части Черного моря в видимом и ИК диапазонах свидетельствуют о существовании в приповерхностном слое моря разнообразных и разномасштабных вихревых образований со временем жизни от нескольких суток до месяца [1-3]. Наблюдения динамики моря по спутниковым изображениям позволяют заключить, что дипольные и мультипольные вихревые структуры, связанные с ОЧТ, во многом определяют интенсивность кросс-шельфового обмена. Эти выводы сделаны путем интуитивной интерпретации пространственной и временной изменчивости дистанционных изображений морской поверхности, т. е. на основе аналогии наблюдаемых картин с эволюцией окрашенных струй в турбулентном потоке жидкости. Между тем прямые инструментальные измерения, подтверждающие дистанционно наблюдаемые схемы горизонтальных движений воды в вихревых и грибовидных образованиях, практически отсутствуют.

С грибовидными образованиями также связаны конвергентно-дивергентные фронтальные зоны [4], играющие важную роль в процессах вертикального перемешивания физических и биологических компонент морской экосистемы. В дивергентных областях возможен подъем биогенных веществ в зону фотосинтеза и увеличение массы фитопланктона, являющегося нижним звеном в пищевой цепи. Это в свою очередь может привести к концентрации там рыбы. Таким образом, возникает заманчивая задача о предсказании положения зон подъема и опускания вод по наблюдениям за грибовидными образованиями, которая представляет практический интерес. Однако инструменталь-

ные исследования картины вертикальных движений в грибовидных образованиях, по-видимому, не выполнялись из-за очевидных технических трудностей.

Цель данного сообщения – сопоставить выводы из дистанционных наблюдений грибовидных образований в ИК диапазоне с горизонтальной структурой полей параметров верхнего квазигомогенного слоя, полученных синхронно контактными методами, а также оценить пространственное распределение вертикальных движений в грибовидном образовании. В статье представлены результаты совместного анализа судовых данных, полученных в августе-сентябре 1988 года [5], и данных сканера AVHRR из архива SAA NOAA.

## Описание данных

В период 20.08.88-02.09.88 на полигоне в западной части Черного моря, охватывающем глубоководную часть моря, свал глубин и часть шельфа, с НИС "Профессор Колесников" была выполнена подробная съемка температуры, солености и показателя ослабления направленного света (прозрачности) в верхнем квазигомогенном слое с одновременной регистрацией скорости поверхностного течения [5]. На рис.1 приведена трасса судна. Измерения выполнялись непрерывно на ходу судна, что позволило исследовать большую акваторию за достаточно короткий промежуток времени, и таким образом, получить данные, пригодные для сопоставления с синхронными спутниковыми изображениями.

Спутниковые данные. Для периода измерений из архива SAA NOAA были получены 4 пригодные для анализа съемки сканером AVHRR в формате GAC (за 22, 23, 24 и 30 августа 1988 г.). Анализ рассчитанных по ним полям SST выявил наличие над свалом глубин северо-западного шельфа мезомасштабных фронтов различной ориентации. Границы этих фронтальных областей были выделены визуально. Они представлены на рис.2 в виде схемы. Общая конфигурация положений фронтов на схеме образует упорядоченную картину из нескольких вихревых диполей и струй, причем соседние диполи имеют по одному общему вихрю. На рис.2 стрелками указаны интуитивно предполагаемые направления потоков в этой "упаковке" грибовидных структур. Центральным элементом образования является антициклонический вихрь диаметром около 60-ти миль и три присоединенных к нему циклонических вихря примерно таких же размеров.

Температура, соленость и прозрачность верхнего слоя. Измерения горизонтальной структуры полей температуры, солености и показателя ослабления направленного света были выполнены буксируемым комплексом "Галс-3" (МГИ 9201), глубина которого пило-

Рис. 1. Район судовой экспедиции. Показана трасса судна в период 21.08-01.09.88. Крупным планом дана схема структурных элементов трассы, длина прямолинейных галсов - 10 миль.

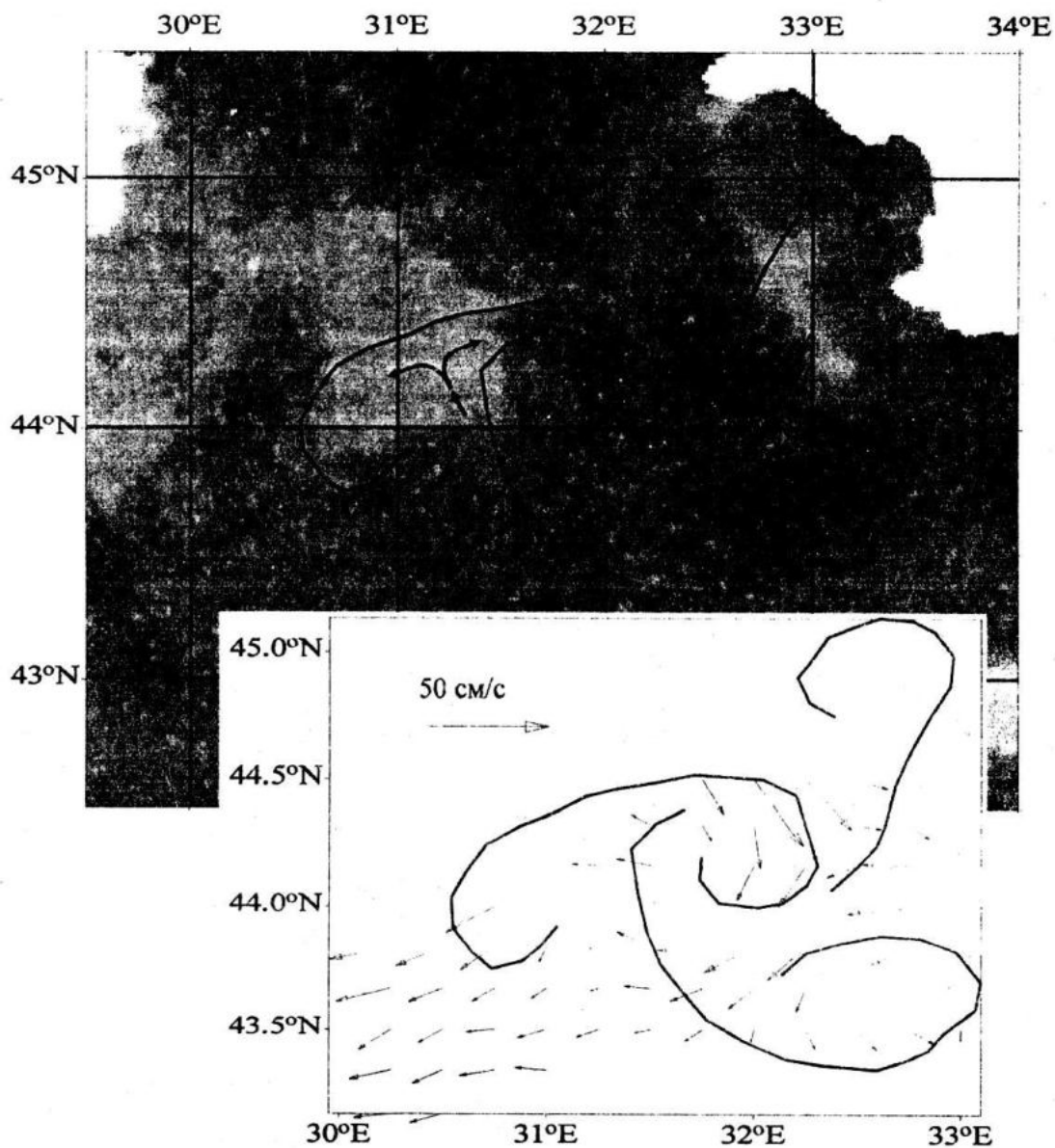
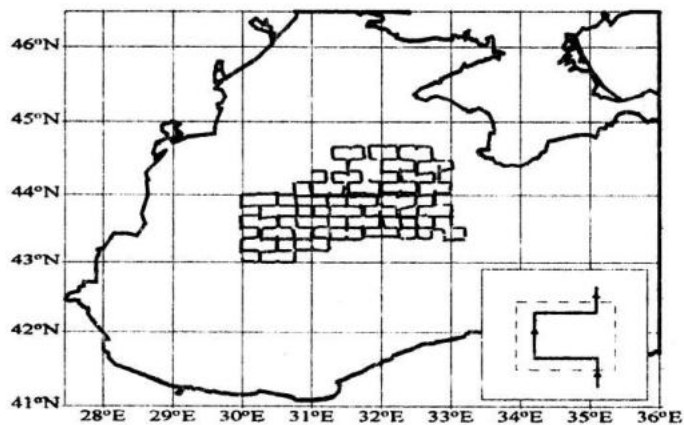


Рис. 2. Изображение района работ со спутника NOAA (AVHRR) за 23.08.88 (сверху) и измеренная во время съемки 20.08-02.09.88 скорость течения. Схематически показаны "шляпки" грибовидных течений, выявленные при анализе спутниковых изображений за период съемки

тировалась с судна и удерживалась в верхнем квазиоднородном слое (ВКС) ниже слоя дневного прогрева (обычно на уровне ~5м).

Измерения в южной части полигона до 44° с.ш. проведены при слабом или умеренном ветре с востока, северо-востока. Съемка северной части полигона была выполнена после суточного перерыва, вызванного штормовым ветром 12-14 м/с северо-западного направления. Разрез по 44° с.ш. был выполнен дважды: до и после шторма, и сравнение данных показало, что температура воды после усиления ветра понизилась в среднем на 2.45°С, тогда как различия по солености и прозрачности незначительны (по солености 0.05‰, по прозрачности 0.1 м<sup>-1</sup>). Поэтому ниже мы проанализируем пространственную изменчивость температурного поля на полигоне по синтезированной карте отклонений температуры, которая была получена путем добавления 2.45°С к значениям температуры в северной части полигона. Результаты измерений пространственных неоднородностей полей температуры, солености и прозрачности в ВКС показаны на рис. 3. Приведенные поля анализировались в работе [5], где была отмечена сложность и многофронтальность исследуемой зоны ОЧТ, но не была рассмотрена возможность их связи с проходящими вихревыми образованиями.

**Скорость, дивергенция и завихренность течения.** Вдоль трассы судна стандартным электромагнитным измерителем течений ГМ-15М (ЭМИТ) [6] регистрировалась составляющая вектора скорости поверхностного течения, перпендикулярная курсу судна. Для получения надежных оценок векторов, дивергенции и завихренности горизонтальной скорости течений схема движения судна была спланирована в виде «змейки», каждый элемент которой огибал квадрат размером 10x10 миль (см. рис. 1), кроме того, данные были специально обработаны, чтобы исключить естественную временную изменчивость течений. Если скорость течения представить в комплексном виде  $V = V_x + iV_y$ , где  $V_x$  и  $V_y$  - соответствующие зональная и меридиональная составляющие, то временной ряд  $u(t)$ , получаемый измерителем ЭМИТ при движении судна, дает составляющую скорости течения, перпендикулярную трассе судна, в момент  $t$ :

$$v = u \exp(-iK) \quad (1)$$

где  $K(t)$  - курс судна. Такое представление данных удобно для разложения скорости по вращающимся модам, период которых превышает время прохождения судном элемента «змейки» (2-4 часа). На рис. 4а показаны частотные спектры составляющих скоростей течения, вращающихся вправо и влево (для удобства спектры построены в зависимости от периода). В

окрестности инерционного периода (~17 часов) явно выражен пик спектра скоростей, вращающихся вправо. Таким образом, временная изменчивость измеряемого поля скорости была обусловлена, главным образом, инерционными колебаниями [7, 8].

Подставив в левую часть формулы (1) скорость для инерционного колебания с произвольной комплексной амплитудой и, решив уравнение относительно  $u$ , получим базис из двух векторов, разложение по которому измеренного сигнала  $u$  позволяет оценить комплексную амплитуду инерционного колебания. Скользящие вдоль трассы амплитуды были оценены методом наименьших квадратов по данным, полученным на трех смежных элементах «змейки», и отнесены к центральному элементу. Поле амплитуд инерционных колебаний на полигоне приведено на рис. 4б. Измерения для области полигона южнее 44° с.ш. были проведены в условиях слабого ветра. Амплитуды инерционных колебаний в этой области составили 5-10 см·с<sup>-1</sup>. Измерения в области севернее 44° с.ш. проведены после шторма, длившегося около суток. Амплитуды инерционных колебаний для этой части полигона были выше 20 см·с<sup>-1</sup> с максимумом 40 см·с<sup>-1</sup>. Эти результаты соответствуют имеющимся представлениям об инерционных колебаниях в районе исследований [7, 8].

После исключения из данных инерционных колебаний, градиенты скорости течения были рассчитаны следующим образом. Представим зональную и меридиональную компоненты скорости так ( $i=x, y$ )

$$V_i = V_{0i} + \frac{\partial V_i}{\partial x}(x - x_0) + \frac{\partial V_i}{\partial y}(y - y_0)$$

Значения  $V_i$  подставим в формулу (1), найдем шесть ее коэффициентов (две компоненты скорости и четыре компоненты тензора ее градиента) и методом наименьших квадратов сделаем измерения, относящиеся к одному элементу «змейки» (квадрату, показанному штриховой линией на рис. 1). Эти величины отнесем к координатам центра квадрата ( $x_0, y_0$ ). Поле полученных таким образом скоростей течения приведено на вставке рис. 2., а на рис. 5 показаны поля дивергенции и ротора скорости течения.

Эти результаты (но без исключения инерционных колебаний) были представлены в работе [5], где было отмечено, что областям конвергенции соответствуют области максимальных градиентов температуры, солености и прозрачности, оцененных в направлении вдоль трассы судна. Некоторым обоснованием правильности полученного поля дивергенции может служить тот факт, что в областях конвер-

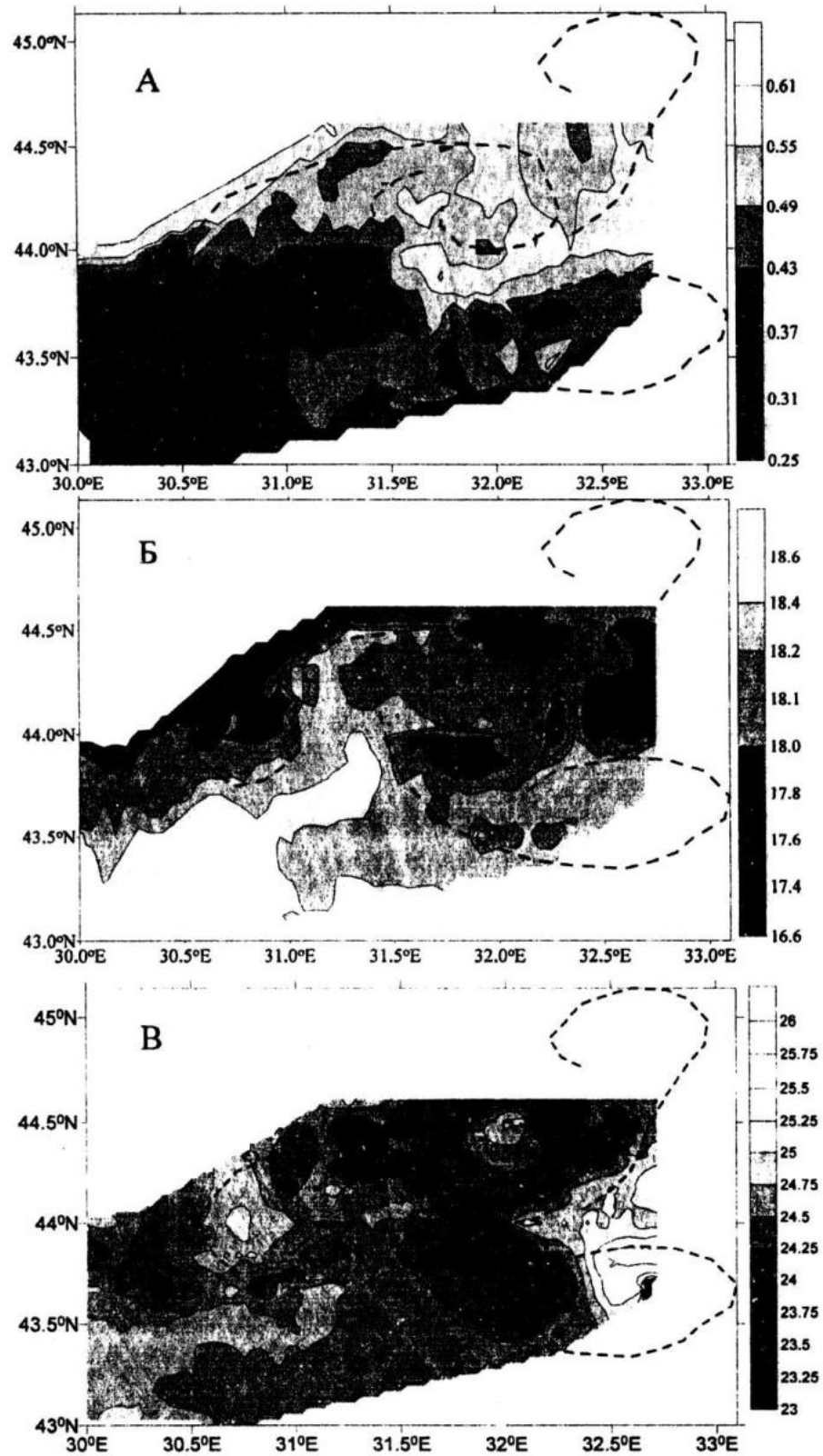


Рис.3. Пространственное распределение коэффициента ослабления направленного света,  $m^{-1}$  (А), солёности, ‰ (Б) и температуры,  $^{\circ}C$  (В).

генции в северной части полигона с самолета были зарегистрированы скопления поверхностно активных веществ [9].

#### Совместный анализ данных

Согласно анализу, проведенному в работе [5], крупномасштабные особенности полей скоростей течения, температуры, солёности и прозрачности (рис. 2 и 3) соответствуют традиционным представлениям о гидрологии района (см. напр. [7,8]), а именно:

- Течение осуществляет зональный перенос, его струя локализована примерно вдоль 44° с.ш.

- Поля параметров ВКС изменяются главным образом в направлениях примерно перпендикулярных изобатам, причем средние для полигона значения пространственных градиентов температуры, солёности и прозрачности составляют соответственно  $0.039^{\circ}\text{C}\cdot\text{км}^{-1}$ ,  $0.022\text{‰}\cdot\text{км}^{-1}$  и  $0.09\text{ м}^{-1}\cdot\text{км}^{-1}$ . Максимальные их перепады (температура  $0.055^{\circ}\text{C}$ , солёность  $2.5\text{‰}$  и прозрачность  $0.3\text{ м}^{-1}$ ) наблюдались на северо-западной и северной границах полигона, где располагается поверхностный шельфовый фронт, ориентированный примерно по изобате 100м. Горизонтальные градиенты на этом фронте превышают средние по полигону значения в 8-10 раз.

Кроме отмеченных особенностей рис. 3 содержит также вытянутые фронтальные зоны меньшего масштаба. Например, в средней части полигона в области, пересекающей его с запада на восток примерно вдоль 44° с.ш., величины градиентов превышают средние по полигону значения в 5-7 раз, а перепады составляют для температуры -  $0.5^{\circ}\text{C}$ , солёности -  $0.4\text{‰}$  и прозрачности -  $0.15\text{ м}^{-1}$ . Эти мезомасштабные особенности, как и структура полей дивергенции и завихренности течения (рис. 5), не получившие объяснения в работе [5], являются предметом нашего анализа. Чтобы выполнить их сопоставление со спутниковыми данными, на рис. 2, 3 и 5 наложена схема шляпок грибовидных течений, полученная из ИК-изображений.

Как видно из рис.2, предположения о характере циркуляции воды в грибовидном образовании согласуются с полем измеренных векторов скорости течения, хотя это согласие не выглядит вполне ясным из-за того, что векторное поле является суммой крупномасштабного движения, соответствующего общему переносу с востока на запад, и движений, связанных с вихрями. Однако полученной из дистанционных данных схеме циркуляции соответствует вполне определенная картина завихренности течения. Именно такое пространственное распределение завихренности было получено контактным методом - см. рис. 5. В области центрального антициклона вихревой системы за-

фиксирована сильная отрицательная завихренность ( $\text{rot}V \sim -4\cdot 10^{-6}\text{ с}^{-1}$ ), в то время как в областях двух попавших в пределы полигона присоединенных циклонов обнаружены максимумы положительной завихренности.

В пределы полигона попадают две шляпки грибовидной структуры. Северная шляпка расположена в области шельфового фронта (см. рис. 3), поэтому разумно предположить, что орбитальная циркуляция связанных с ней вихрей будет приводить к вовлечению в вихри шельфовых вод. Именно такую картину дают контактные измерения температуры солёности и прозрачности - зоны вихрей верхней шляпки выделяются как области теплых, распресненных и менее прозрачных вод. Вторая вихревая пара, которая имеет один общий элемент с первой - антициклонический вихрь над свалом глубин, располагается в зоне фронта, разделяющего воды центральной части от потока шельфовых вод с северо-восточной части полигона, что отчетливо видно по распределению солёности и прозрачности на рис. 3. Мы не можем ожидать полного совпадения положений фронтов, определенным по контактными измерениями и спутниковым данным вследствие неполной синхронности измерений - скорость смещения вихрей в этом районе составляет величину  $\sim 2\text{ см/с}$  [2]. Однако явное соответствие схемы циркуляции в системе грибовидных течений с общей ориентации изолиний температуры, солёности и прозрачности, совместно с ее соответствием измеренному полю скорости и завихренности течения, доказывает, что при интуитивной интерпретации ИК-изображений были идентифицированы динамические процессы, действительно протекающие в исследуемом районе моря.

Поскольку на ИК-изображениях наблюдается движение вод, можно ожидать, что спутниковые данные содержат информацию также и о переносе пассивных характеристик воды или примесей, не регистрируемых на изображениях непосредственно. Как видно из рис. 3, в целом по полигону имеется хорошая корреляция между прозрачностью и солёностью. На рис.6 показана взаимосвязь между этими двумя параметрами, полученная по всему массиву данных. Наличие такой взаимосвязи может быть использовано в дистанционных наблюдениях - это дает возможность проследивать распространение распресненных вод по спутниковым изображениям в оптическом диапазоне.

В монографии [4] сделано предположение, что вертикальная циркуляция в грибовидном образовании соответствует циркуляции при растекании жидкости, составляющей шляпку гриба - по всей границе шляпки должна располагаться зона конвергенции, а в центре шляпки - зона дивергенции. Рис. 5 показывает

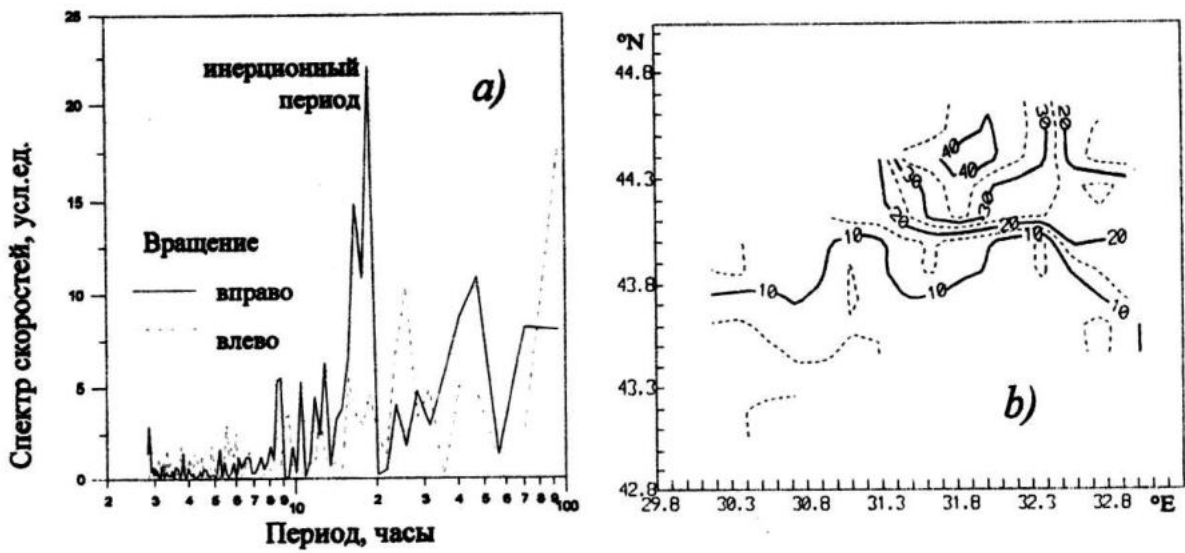


Рис. 4. Разложение скоростей течения по вращающимся модам (а) и амплитуды инерционных колебаний (b) на полигоне 20.08-2.09.88. Изолинии амплитуды проведены через 5 см/с.

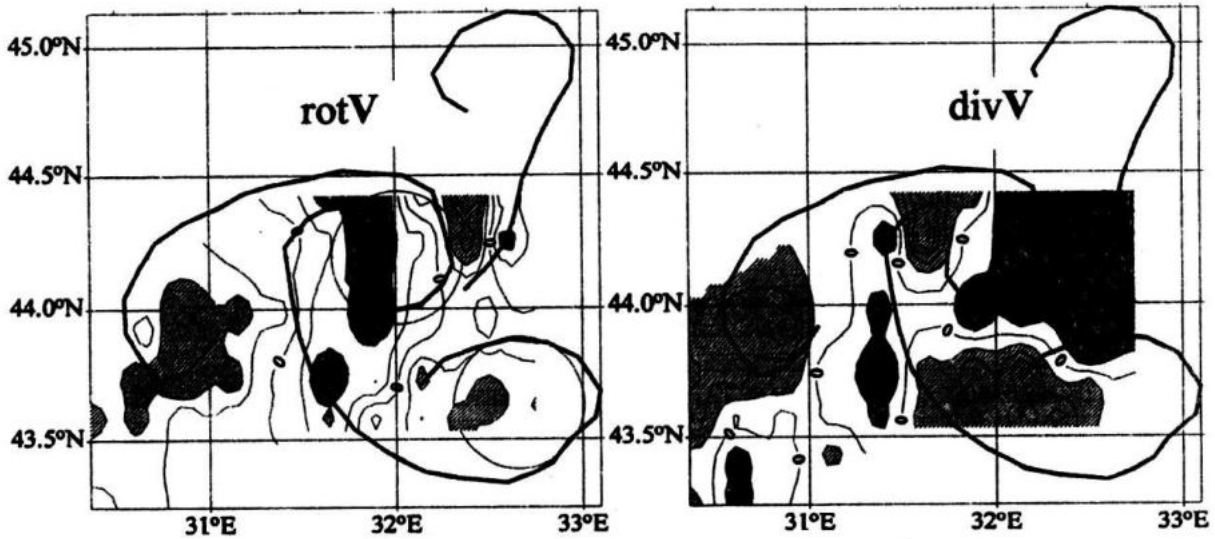


Рис. 5. Ротор и дивергенция скорости течения с наложенными на них схемами "шляпок" грибовидных течений. Изолинии проведены через  $\Delta=10^{-6} \text{ с}^{-1}$ , заштрихованы области с  $|\text{rotV}| > 2\Delta$  и  $|\text{divV}| > \Delta$ , наклонная штриховка соответствует положительным значениям величин.

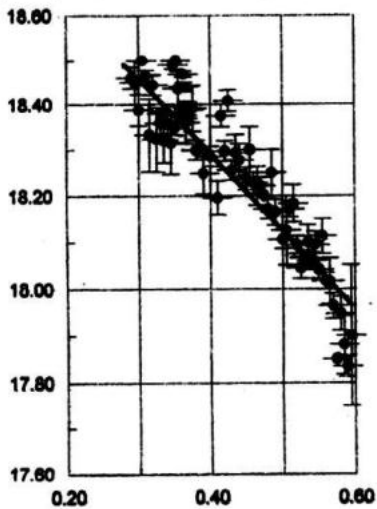


Рис. 6. Взаимосвязь между показателем ослабления направленного света в морской воде (горизонтальная ось,  $\text{м}^{-1}$ ) и соленостью (вертикальная ось, ‰).

инструментально зарегистрированные положения зон конвергенций и дивергенций в грибовидных образованиях и демонстрирует более сложную картину. Зоны конвергенции здесь наблюдаются в основаниях шляпок, в местах соединения их с ножками грибов (струями). Зоны же дивергенции наблюдаются в виде перемежающихся областей на периферии шляпок. Такая картина зарегистрирована для обеих шляпок, попавших в пределы полигона.

**Резюме.** В результате проведенного анализа описаны особенности приповерхностных течений в области возникающих и развивающихся грибовидных структур на фоне квазистационарных элементов крупномасштабной циркуляции Черного моря. Потоки в грибовидных структурах, по-видимому, создают значительные деформационные поля, вызывающие формирование мезомасштабных фронтов, проявляющиеся в ВКС как в поле температуры, так и в полях солености и прозрачности с характерными значениями градиентов этих характеристик, превышающих средние градиенты в 5-7 раз. Размеры грибовидных образований (расстояние между центрами вихрей) составляют 100км, с характерными значениями скоростей 0.25м/с. Число Россби  $Ro=U/(fL)<0.05$  что свидетельствует о геострофическом характере движения вод в структуре. С грибовидными образованиями связаны зоны подъема и опускания вод с характерными величинами конвергенции и дивергенции горизонтальных скоростей в ВКС равными  $(3-5) \cdot 10^{-6} \text{с}^{-1}$ . Поскольку толщина ВКС по данным измерений составляет 20м, для обеспечения таких величин дивергенции нижняя граница ВКС должна смещаться по вертикали со скоростью  $\sim 0.06-0.1 \text{мм/с}$ .

Система вихрей, образующих грибовидную структуру, наблюдалась по ИК-изображениям в течение всего периода судовых измерений, несмотря на существование в приповерхностном слое циклической изменчивости вертикального температурного профиля, которая, как показывают измерения, имеет значительную пространственную неоднородность, вызванную как метеоусловиями, так и наличием в ВКС на полигоне вод с различной оптической проницаемостью.

#### Выводы

1. Схема движения воды, показанная на рис.2, получена только лишь из анализа дистанционных данных. Приведенный обзор натурных данных показал, что эта схема правильна. Она соответствует измеренному полю векторов скорости течений, а мезомасштабные особенности полей солености, прозрачности и температуры допускают интерпретацию в ее рамках.

2. Обнаружена закономерность в направлении вертикальных потоков воды в области гри-

бовидных структур – опускание воды (зона конвергенции) сосредоточено в районе "ножки гриба", а подъем (зона дивергенции) – на периферии "шляпки гриба".

3. Обнаружена явная связь между соленостью приповерхностного слоя и прозрачностью воды, позволяющая по оптическим свойствам воды оценивать распространение распресненных вод в этом районе.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по гранту INTAS/OPEN-97-575.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Эволюция антициклонических вихрей в северо-западной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 1996. N3. С. 67-76.

2. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Незлин Н.П., Соловьев Д.М., Станичный С.В., Станичная Р.Р. Антициклонические вихри над северо-западным материковым склоном Черного моря и их роль в переносе богатых хлорофиллом шельфовых вод в глубоководный бассейн // Исслед. Земли из космоса. 2000. N3. С. 71-81.

3. Гришин Г.А., Субботин А.А. Особенности гидрологической структуры и циркуляции вод северо-западной части Черного моря: судовые и спутниковые наблюдения 1988-1990 гг. // Морской гидрофизический журнал. 1993. N 1. С. 61-68.

4. Федоров К.Н., Гинзбург А.И. Приповерхностный слой океана. Л. Гидрометеоздат, 1988, 303с.

5. Блинков В.А., Дулов В.А., Шульгин О.В. Экспериментальные исследования гидрофизических характеристик и динамики вод в северо-западной части Основного Черномоского течения // МГФЖ, - 1991, - N5, - С. 45-60.

6. Руководство по гидрологическим измерениям в морях и океанах/ Под ред. И.М. Соскина. Л.: Гидрометеоздат, - 1977, - 725с.

7. Богуславский С.Г., Ефимов В.В., Черкесов Л.В. и др. Комплексные океанографические исследования Черного моря. - Киев: Наукова думка, - 1980, - 240с.

8. Блатов А.С., Иванов В.А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря. Киев: Наукова думка, - 1992, - 242с.

9. Гродский С.А., Дулов В.А., Кудрявцев В.Н. Связь зон ослабления РЛ сигнала с конвергенцией поверхностных течений // Исследование Земли из космоса, - 1992, - N3, - С.10-15.