

# БАТУМСКИЙ АНТИЦИКЛОНИЧЕСКИЙ КРУГОВОРОТ В ЛЕТНЕ-ОСЕННИЙ СЕЗОН: ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА, ИЗМЕНЧИВОСТЬ

А.А. Ерошко

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

*Исследуется пространственная структура Батумского антициклонического круговорота в летне-осенний сезон 1990, 1992 гг. по результатам расчетов геострофических течений в Черном море. Приводятся подробные характеристики гидрологических и динамических параметров в пространстве круговорота, оценивается их изменчивость.*

**Введение.** Плотностные съёмки, выполненные на всей акватории Черного моря в рамках научных проектов COMSBLACK (1990, 1992, 1993 г) дают представление о крупномасштабной пространственной гидрологической структуре вод и ее многолетней изменчивости. Эти же данные, взятые за основу в расчетах горизонтальной и вертикальной структуры геострофических течений в глубоководной части моря, позволяют представить общую динамическую картину и получить оценки ее изменчивости во времени и в пространстве.

В работе [3] был рассмотрен способ расчета пространственной структуры геострофических течений в Черном море по базам экспериментальных данных. Для съёмки COMSBLACK-92 было показано, что разработанный метод отчетливо выявляет основные элементы крупномасштабной циркуляции вод Черного моря. В первую очередь - это циклонический круговорот по всему периметру моря или Основное черноморское течение (ОЧТ). Другим характерным элементом крупномасштабной циркуляции черноморских вод является антициклонический круговорот в юго-восточной части Черного моря - Батумский антициклонический круговорот (БАК).

Столь же отчетливо в результате расчетов выявляются более мелкие динамические образования, присущие Черному морю - синоптические циклонические и антициклонические вихри. Как правило, они зарождаются в вершинах меандров ОЧТ или в окрестностях геоморфологических неоднородностей свала глубин и затем продолжают автономное существование в общей системе круговоротов ОЧТ. Еще более мелкими динамиче-

скими образованиями являются прибрежные циклонические и антициклонические вихри, также отчетливо проявляющиеся в геострофических расчетах. Они подробно рассмотрены в работах [5,7].

Созданная методика и программно-математическое обеспечение позволяют, наряду с общими представлениями, получить детальные распределения гидрологических и динамических характеристик в пространствах этих круговоротов. Тем самым дополнить существующие в научной литературе сведения о них.

**Исходные данные и методика.** Для изучения пространственной структуры круговорота, на общей расчетной схеме, приведенной в [3], была выбрана акватория, ограниченная меридианами 39° в.д., 42° в.д. и параллелями 41° с.ш., 43° с.ш. На рис. 1 показано положение на ней Батумского антициклонического круговорота осенью 1990 г.

Акватория круговорота покрыта сетью из 130 гидрологических станций, обозначенных на рисунке черными кружками.

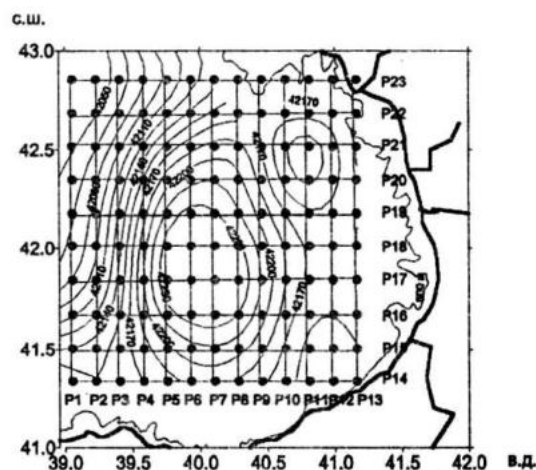


Рис.1 Положение Батумского антициклонического круговорота осенью 1990 г. (горизонт 1м) и схема вертикальных разрезов.

Станции (13 по долготы и 10 по широты) образуют регулярную сеть со сторонами ячейки примерно равными 14x20 км соответственно. Каждая станция имеет 100 горизонтов, расположенных через 5 м в слое от 0 до 500 м. Горизонтальная плоскость на глубине 500 м принята в геострофических расчетах за "нулевую" поверхность. Все станции расположены в глубоководной части моря, ограниченной 500 м изобатой, также показанной на рис. 1.

Информационные файлы станций хранятся во вспомогательной базе данных. Они организованы в виде файлов прямого доступа и представляют собой двумерные массивы, по столбцам которых размещены:

номер станции, долгота, широта, температура, солсность, плотность, меридиональная компонента геострофического течения, направление меридиональной компоненты, широтная компонента геострофического течения, направление широтной компоненты, модуль скорости геострофического течения, направление геострофического течения. Строки массивов представляют собой горизонты: 1, 5, 10, 15, 20, ..., 490, 495 м.

Для вывода на экран дисплея и печать горизонтальных распределений гидрологических параметров на выбранных горизонтах с помощью управляющих программ осуществляется выборка из соответствующих разделов вспомогательной базы данных, где хранятся все горизонтальные сечения глубоководной части моря, разнесенные по годам съемок.

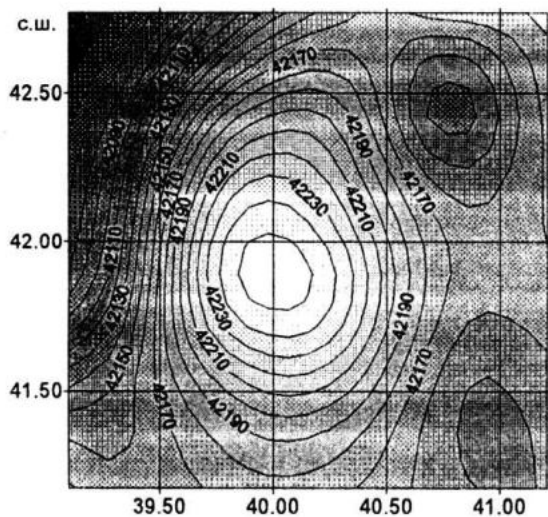
При построении горизонтальных распределений динамических параметров - скорости и направления геострофического течения учитывается тот факт, что изолинии динамических высот - динамические горизонталы - являются линиями тока и определяют направление геострофического течения (более высокий рельеф справа по течению в северном полушарии). Густота изодинам пропорциональна скорости. Вместо динамических горизонталей на карту могут наноситься векторы, длина которых пропорциональна модулю скорости, а положение их на плоскости определяет направление течения.

Для вывода на экран дисплея и печать вертикальных разрезов также программным путем формируются наборы станций, составляющих эти разрезы в соответствии со

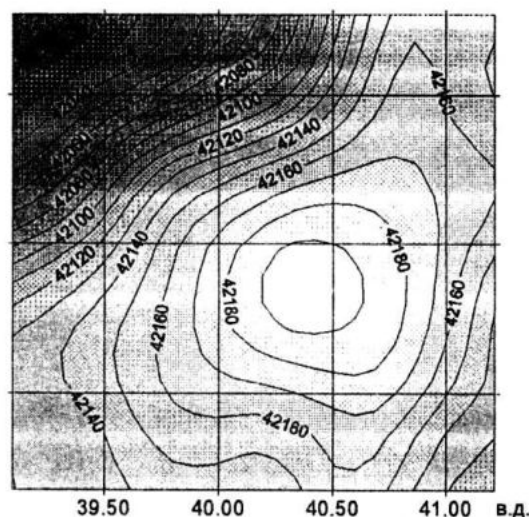
схемой, показанной на рис 1. Разрезы обозначены символами P1, P2, P3, ..., P23. Протяженность меридиональных разрезов, направленных с юга на север, составляет 176 км, а протяженность широтных, направленных с запада на восток - 174 км. Разрезы P1-P13 - меридиональные, а P14-P23 - зональные. При исследовании вертикальной структуры компонент скорости геострофического течения используются разрезы к плоскостям которых эти компоненты расположены по нормали.

**Горизонтальная структура Батумского антициклонического круговорота.** Акватория антициклона (без очертания берегов) может быть условно ограничена меридианами  $39.10 \div 41.21$  град. в.д. и параллелями  $41.19 \div 42.77$  град. с.ш. Размеры области соответствуют протяженности разрезов: 174 км по долготе и 176 км по широте. Площадь акватории, занятой собственно антициклоном, составляет примерно 22 тыс. км<sup>2</sup>. По горизонтальным сечениям гидрологических и динамических параметров антициклон отчетливо прослеживается на максимальной расчетной глубине 495 м. Можно предположить, что выбор более глубокой "нулевой" поверхности позволит наблюдать круговорот гораздо ниже 500 м.

На рис.2 показан динамический рельеф Батумского антициклона на горизонте 1 м осенью 1990 г. - а) и летом 1992 г. - б). Горизонтальные сечения круговорота на рис 2 а и 2 б существенно отличаются друг от друга. На рис. 2а присутствуют три динамических объекта: на



а)



б)

Рис.2 Динамический рельеф (H, дин.см.) Батумского антициклона на горизонте 1 м осенью 1990 г. - а) и летом 1992 г. - б).

западе - ОЧТ, направленное на север-северо-восток, в центре - БАК и на востоке - два прибрежных циклонических вихря (ПЦВ). Антициклон "сжат" в меридиональном направлении, поэтому изодинамы могут быть аппроксимированы эллипсами, большие оси которых расположены параллельно потоку ОЧТ. Длина большой оси последней замкнутой изодинамы - 180 км, а малой - 94 км. Вершина купола динамического рельефа свободной поверхности расположена в точке с координатами 41°54' с.ш., 40°00' в.д. Шаг изолиний равен 10 дин.см. Разность динамической высоты между вершиной купола и последней замкнутой изодинойой равна 80 дин.см., что свидетельствует о высокой интенсивности круговорота.

На рис.2б присутствуют только два динамических объекта: на северо-западе - ОЧТ, направленное на северо-восток и БАК, занимающий всю остальную акваторию. Прибрежных вихрей не наблюдается. Если аппроксимировать изодинамы эллипсами, то направление больших осей вновь будет параллельным потоку ОЧТ, а длины осей последней замкнутой изодинамы составят 150 км и 89 км. Центр круговорота расположен в точке с координатами 41°51' с.ш.,

40°22' в.д. Шаг изодинам также равен 10 дин. см. Разность динамической высоты между вершиной купола и последней замкнутой изодинойой составляет 30 дин. см. Это свидетельствует о том, что интенсивность вихря в верхнем слое в 1990г. была существенно выше, чем в 1992 г.

Рисунок 3 иллюстрирует структуру Батумского антициклона на горизонте 100 м. На рис. 3а по-прежнему наблюдается три динамических объекта: ОЧТ - на западе, БАК - в центре и два ПЦВ в восточной части акватории. Все они существенно ослаблены (шаг между изодинамами по-прежнему равен 10 дин. см), хотя пространственная ориентация сохраняется.

Большая ось эллипса имеет длину 147 км, а малая - 92 км. Несколько смещенным оказался центр круговорота. Теперь он расположен в точке с координатами 41°50' с.ш., 40°10' в.д. Разность динамических высот между вершиной купола и последней замкнутой изодинойой составляет 40 дин. см. Съемка 1992 г., показанная на рис. 3б, свидетельствует об увеличении интенсивности антициклона с глубиной при сохранении ориентации большой и малой осей эллипса.

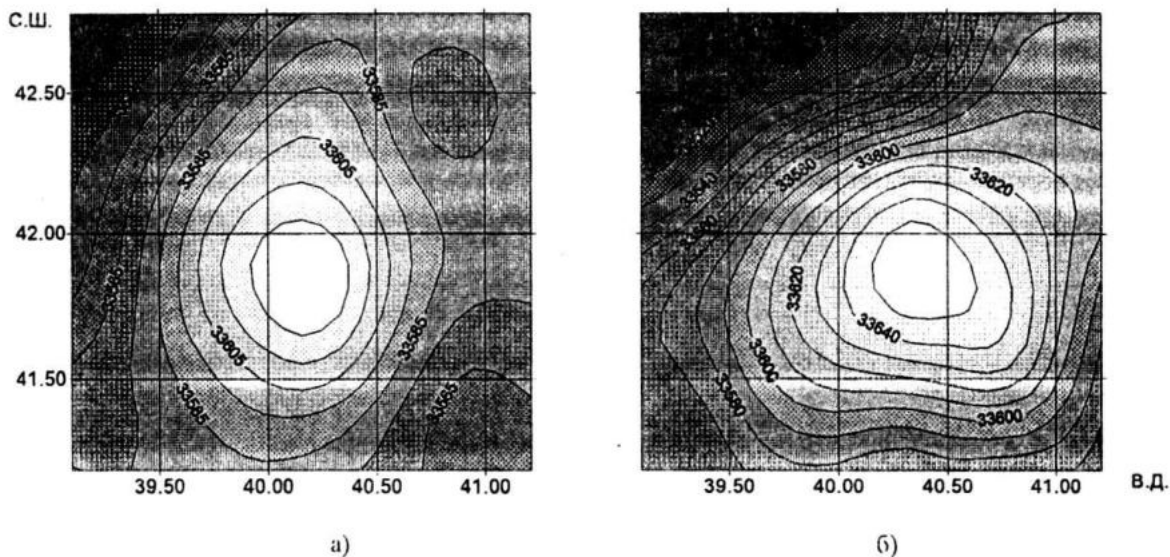


Рис.3 Динамический рельеф (Н,дин. см.) Батумского антициклона на горизонте 100 м осенью 1990 г. - а) и летом 1992 г. - б)

Длина большой оси теперь составляет 164 км, а малой - 114 км. Разность динамических высот между вершиной и последней замкнутой изодинойой составляет 50 дин. см.

Известно, что вихревые образования в Черном море отчетливо проявляются не только в поле динамического рельефа но и в полях гидрологических элементов - температуре, солености, плотности [2,6]. Особенно наглядно это видно на глубинных горизонтах, где пере-

мешивание ослаблено или отсутствует вовсе [1,4].

На рис.4 показано распределение температуры воды в Батумском антициклоне на горизонте 100 м. для осени 1990 г. - а) и лета 1992 г. - б). Изотермы рис.4а повторяют ход изодинам рис. 3а. По рельефу поля температуры также можно оценить размеры антициклона и его интенсивность. Центр круго-



ворота заняты холодными водами промежуточного слоя с температурой в центре 7.00 °С. Разность температур между центром и периферией антициклона составляет 0.5 °С. Прибрежные циклонические вихри, расположенные на северо-востоке и юго-востоке, имеют контраст температуры, около 0.2 °С.

Температурное поле на рис. 4б отличается большей контрастностью в струе ОЧТ. Водами ХПС занята значительно большая акватория. Минимальная температура в центре антициклона составляет 6.60 °С. Разность температур между центром и периферией антициклона равна 0.5 °С.

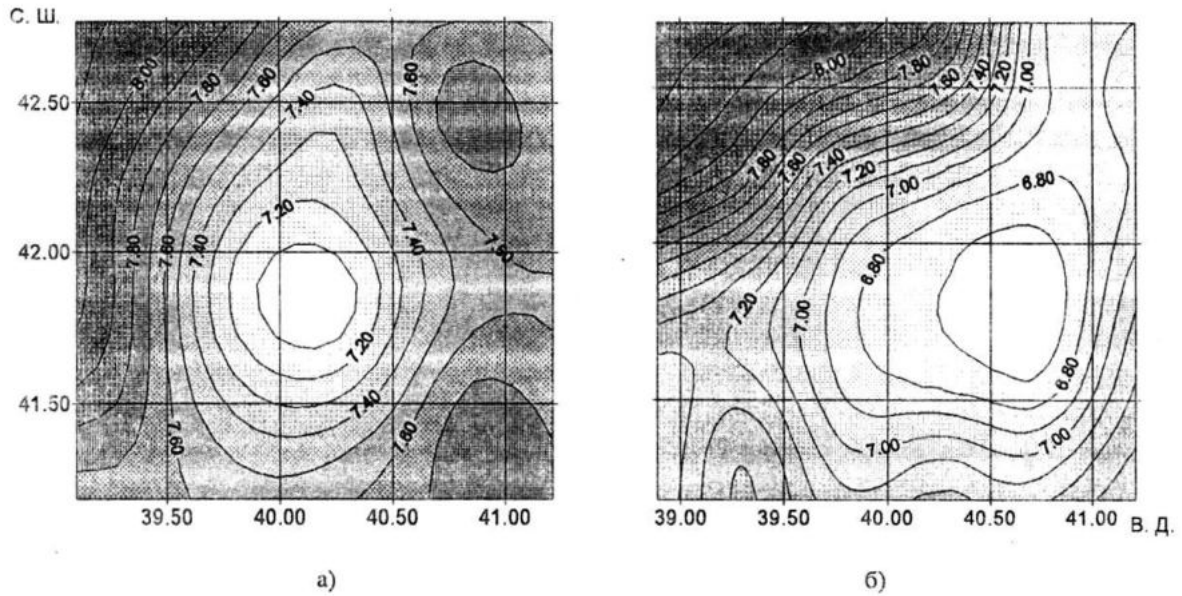


Рис.4 Температура воды (Т, °С) в Батумском антициклоне на горизонте 100 м осенью 1990 г. - а) и летом 1992 г. - б)

Соленость воды в Батумском антициклоне на горизонте 100 м показана на рис.5 для осени 1990 г. - а) и для лета 1992 г. - б). Характер изменчивости поля солености на этом горизонте повторяет поля температуры и динамических высот, что также позволяет использо-

вать поле солености для идентификации антициклонических и циклонических круговоротов. Центральная часть круговорота на рис.5а занята водами с меньшей соленостью по отношению к его периферии.

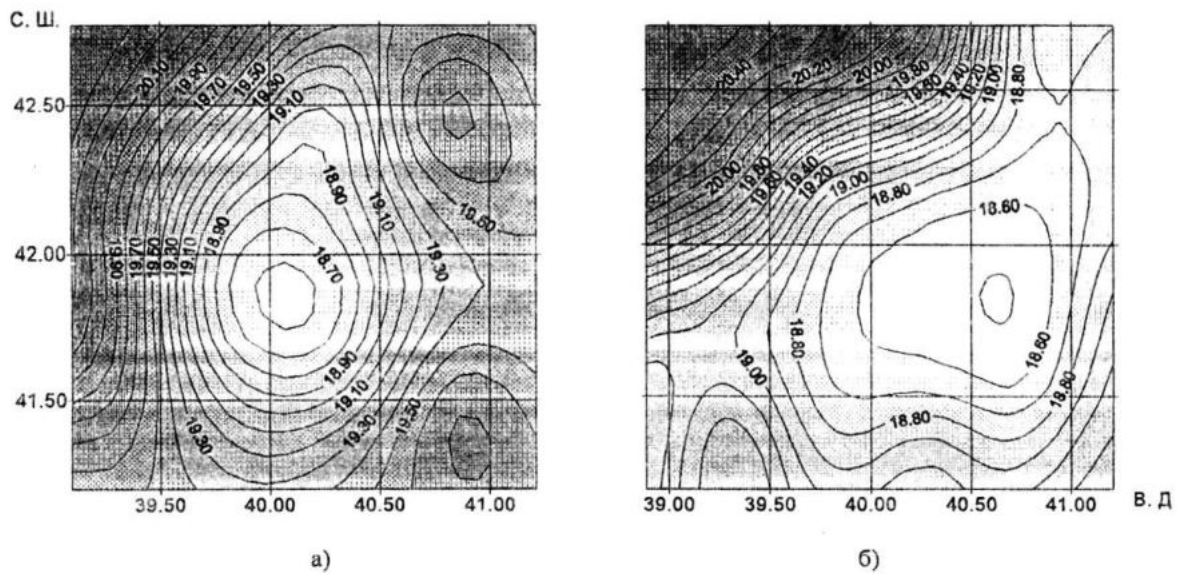


Рис.5 Соленость воды (S, ‰) в Батумском антициклоне на горизонте 100 м осенью 1990 г. - а) и летом 1992 г. - б)

Соленость воды в центре равна 18.50 ‰, а на периферии 19.40 ‰. Разность составляет 0.90 ‰. В обоих ПЦВ контраст имеет обратный знак и не превышает 0.30 ‰.

На рис. 5б водами с пониженной соленостью занята значительно большая акватория, простирающаяся в виде ложбины в северо-восточном направлении. Соленость в центре

равна 18.40 ‰, на периферии - 18.70 ‰. Контраст по солености составляет 0.30 ‰.

Горизонтальное распределение плотности воды в Батумском антициклоне на глубине 100 м. приведено на рис. 6 для осени 1990 г. - а) и для лета 1992 г. - б). Характер изменчивости изопикн повторяет ход изогалин на рис. 5. По полю плотности также легко идентифицировать антициклонические и

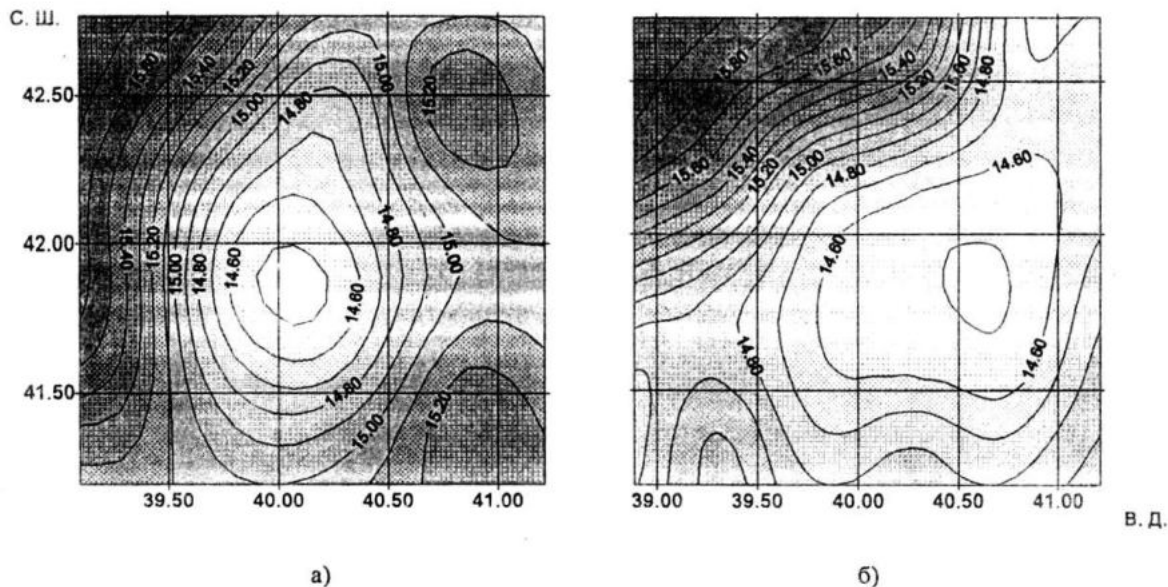


Рис.6 Плотность воды (P, усл. ед.) в Батумском антициклоне на горизонте 100 м осенью 1990 г. - а) и летом 1992 г. - б)

циклонические круговороты. Центр антициклона занят водами с меньшей плотностью. В нем с момента зарождения формируется впадина пикноклина, куда устремляются воды с периферии. Плотность воды в центре круговорота (рис. 5а) равна 14.40 усл. ед., а на периферии - 15.00 усл. ед. Разность плотности

между центром и периферией составляет 0.60 усл. ед.

На рис. 6б водами с пониженной плотностью занята существенно большая акватория, вытянутая в северо-западном направлении. Плотность воды в центре 14.40 усл. ед., а на периферии - 14.80 усл. ед. Контраст плотности равен 0.40 усл. ед.

**Вертикальная структура Батумского антициклонического круговорота.** В процессе подготовки работы выполнены и проанализированы все вертикальные разрезы, схема которых приведена на рис. 1. Ниже приводятся результаты, полученные на зональном разрезе N17 по 41°50' с.ш., Разрез проходит через центр антициклона в направлении с запада на восток.

**Температура воды.** На рис. 7 показано изменение температуры воды на разрезе для съемки 1990 г. 8 °С изотерма, ограничивающая холодный промежуточный слой, имеет прогиб сверху и снизу. Нижняя 8 °С изотерма в начале разреза залегает на глубине 95 м. В 80-и км от начала разреза она заглубляется до 150 м., а в конце разреза оказывается на глу-

бине 120 м. Величина прогиба изотерм на горизонте 100 м достигает 35 м. Толщина слоя холодной воды в центре антициклона ~100 м, температура ее в ядре ХПС 6.90 °С. Начиная с горизонта 75 м замечен общий наклон изотерм в направлении с запада на восток, составляющий примерно 25 м на длину разреза.

На рис. 7б показано изменение температуры воды на этом же разрезе для съемки 1992 г. В верхнем 50-и метровом слое изотермы образуют купол в центре антициклона, а в нижнем слое, начиная с 75 м - прогиб изотерм. Отчетливо просматривается ядро ХПС. Толщина слоя холодных вод равна 145 м. Минимальная температура в ядре 6.39 °С. Наклон изотерм в восточном направлении незначителен.

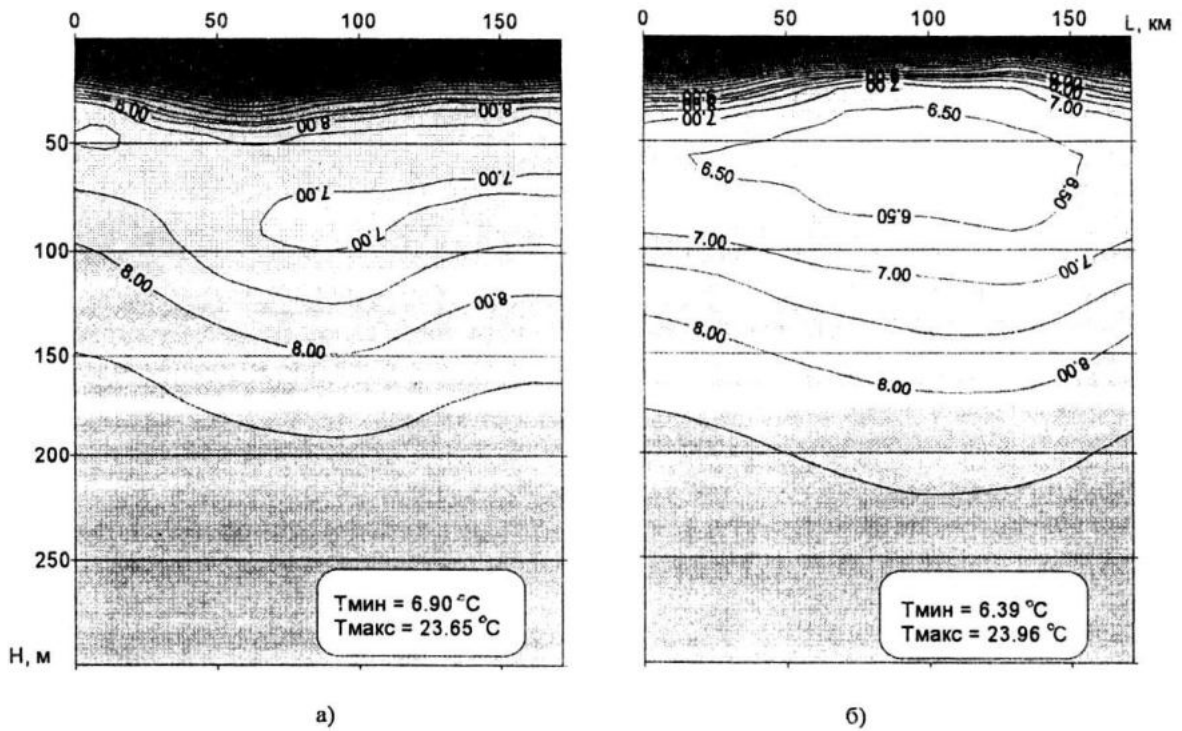


Рис. 7 Температура воды ( $T$ , °C) на зональном разрезе по  $41^{\circ}50'$  с.ш., через центр Батумского антициклона осенью 1990 г. - а) и летом 1992 г. - б).

**Соленость.** На рис. 8а показано распределение солёности воды на том же вертикальном разрезе для съёмки 1990 г. Прогиб изохалин начинается от поверхности. Минимумы изохалин ниже 50 м сдвигаются в восточном направлении, а ниже 200 м - в западном, что свидетельствует о криволинейности вертикальной оси антициклона. Отчетливо

просматривается общий наклон изохалин в направлении разреза, достигающий 35 м на 170 км.

На рис. 8б тренд практически отсутствует. Для обеих съёмок минимум солёности на разрезе составляет 17.60 ‰, а максимум на разрезе 1990 г. равен 22.03 ‰, а на разрезе 1992г - 22.02 ‰.

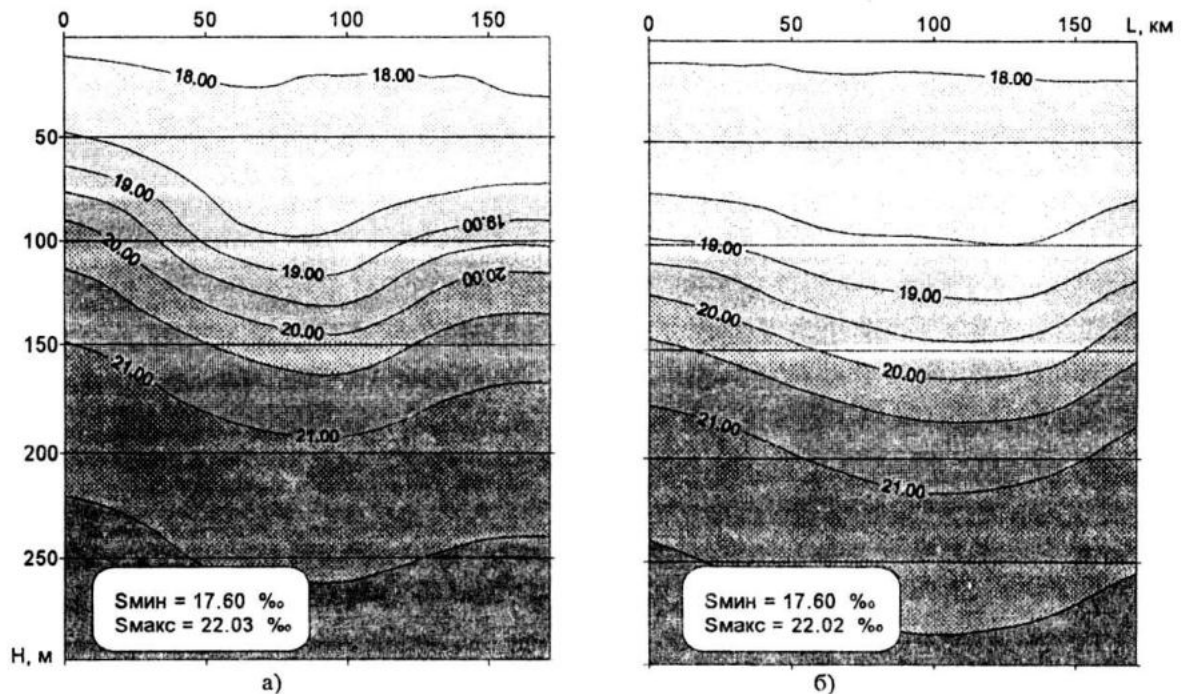
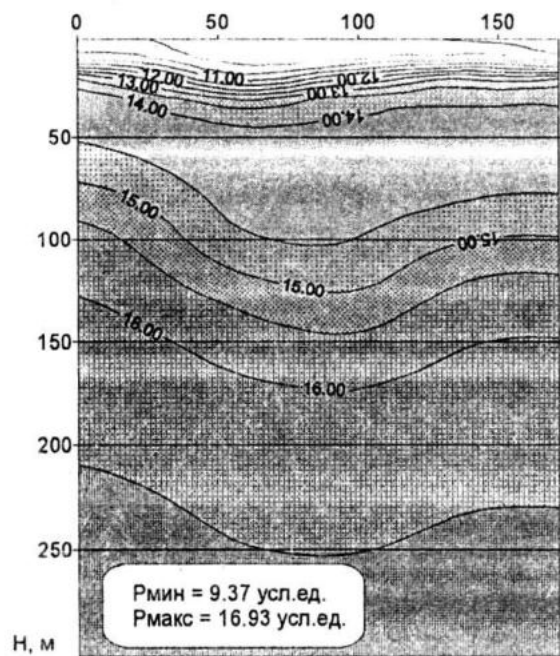


Рис. 8 Соленость воды ( $S$ , ‰) на зональном разрезе по  $41^{\circ}50'$  с.ш., через центр Батумского антициклона осенью 1990 г. - а) и летом 1992 г. - б).

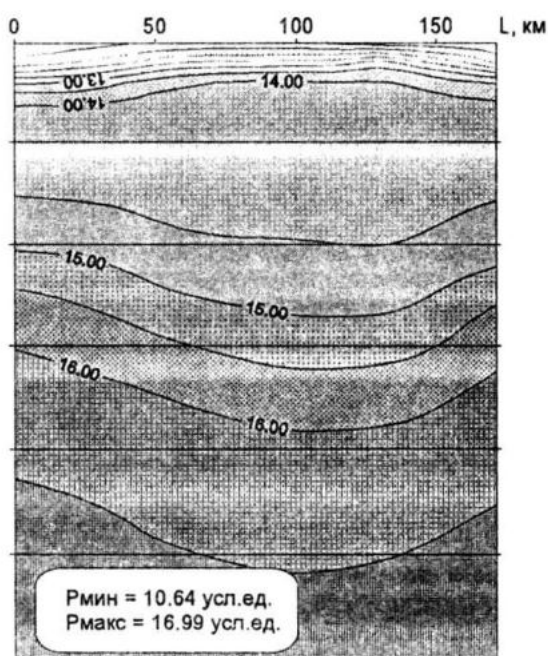
**Плотность.** Распределение условной плотности на том же вертикальном разрезе показано на рис. 9. Изопикническая впадина на рис. 9а наблюдается, начиная с поверхности. До 50-и метровой глубины изопикны сдвигаются в западном направлении, затем до 150 метровой - в восточном, а ниже снова наблюдается сдвиг в западном направлении. Начиная с горизонта 50 м наблюдается общий наклон изопикн в направлении разреза, достигающий 35 м на длину разреза. Мини-

мум плотности на разрезе 1990 г. равен 9.37 усл. ед., максимум - 16.93 усл. ед.

На рис. 9б характер изменчивости плотности иной. Выше 50-и метровой слоя наблюдается купол изопикнических поверхностей, что характерно для циклонических круговоротов. Ниже 50-и метров изопикны образуют впадину, заполненную водами ХПС. Тренда изопикн в данной съемке практически нет. Минимум плотности равен 10.64 усл. ед., а максимум - 16.99 усл. ед.



а)



б)

Рис.9 Плотность воды ( $\rho$ , усл. ед.) на зональном разрезе по  $41^{\circ}50'$  с.ш., через центр Батумского антициклона осенью 1990 г. - а) и летом 1992 г. - б).

Меридиональная компонента скорости геострофического течения. Эта компонента имеет две составляющие:  $V_{\text{пн}}$  - направленную на север и  $V_{\text{пс}}$  - направленную на юг и условно имеющей знак минус на карте рис.10. Рис.10а показывает, что максимум  $V_{\text{пн}}$  равен 0.287 м/с, а максимум  $V_{\text{пс}}$  равен 0.165 м/с., т.е. интенсивность струи северного направления существенно выше интенсивности южной струи. По изотахе 0.02 м/с меридиональная компонента прослеживается до глубины 230 м. Как видно из рис. 10а, стрежень БАК осенью 1990 г. располагался в поверхностном 15 и метровом слое моря. Модуль скорости геострофического течения в нем составлял 0.286 м/с.

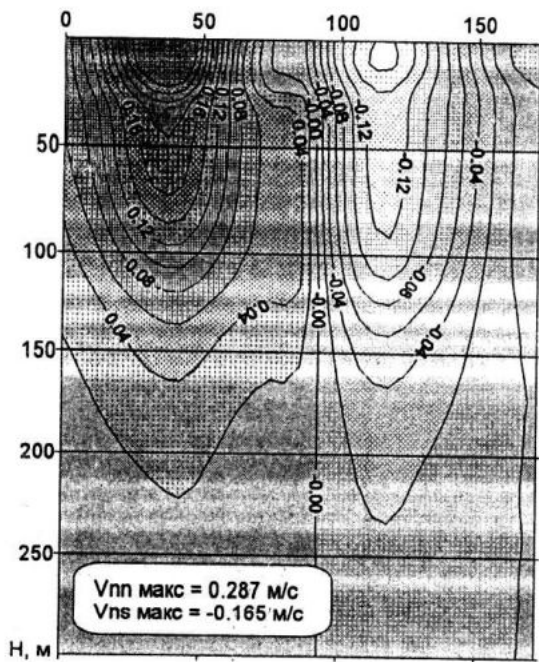
В центре переходной зоны, где направление компоненты изменяется с северного на южное расположена нулевая изотаха. Ширина этой зоны порядка 10 - 15 км. В восточной части разреза имеется еще одна переходная зона, которая разделяет антициклон и при-

брежные циклонические вихри, показанные на рис. 2а и 3а.

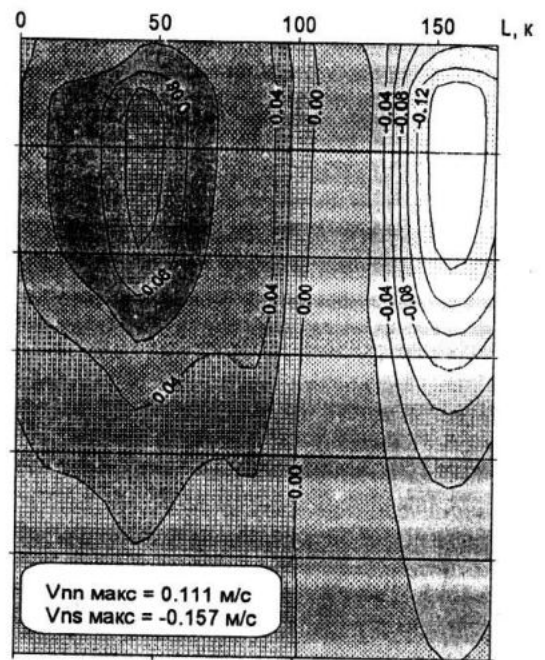
Рис.10б показывает распределение меридиональной компоненты на вертикальном разрезе для лета 1992 г. Ширина северного потока  $V_{\text{пн}} \sim 95$  км, а южного  $\sim 45$  км. Максимум  $V_{\text{пн}}$  равен 0.287 м/с, а максимум  $V_{\text{пс}} - 0.157$  м/с. По изотахе 0.02 м/с южной струи круговорот прослеживается до глубины 300 м. Основное отличие от съемки 1990 г. заключается в том, что антициклон заглублен, стрежень орбитального потока располагается на глубине 60 м и модуль скорости в нем составляет 0.161 м/с.

Переходные зоны меридиональной компоненты хорошо иллюстрируются рис. 11. На рис. 11а видны две переходные зоны, шириной 10 - 15 км. Заштрихованные области определяют ширину потока северного направления, прозрачные - южного.



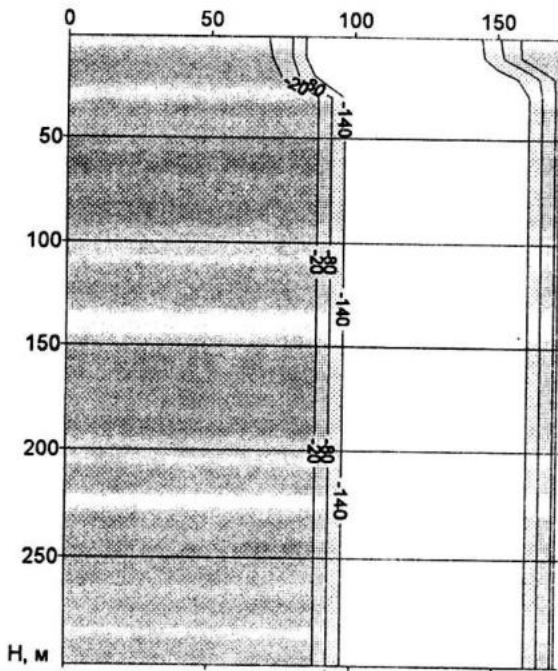


а)

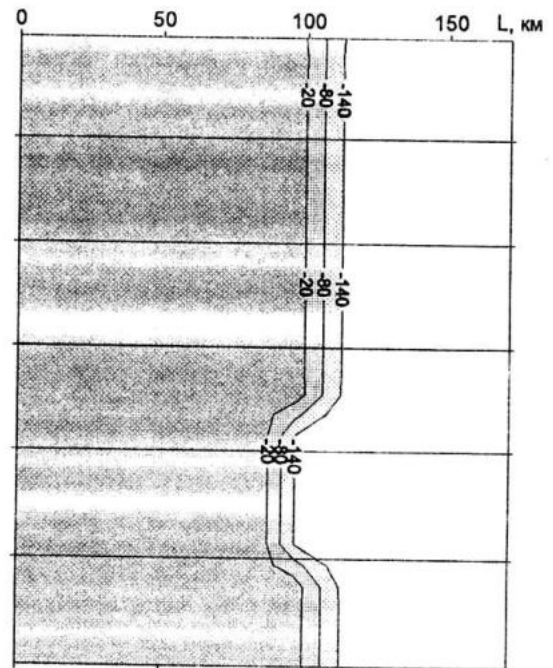


б)

Рис. 10 Меридиональная компонента скорости геострофического течения ( $V_n$ , м/с) на зональном разрезе по  $41^{\circ}50'$  с.ш. через центр Батумского антициклона осенью 1990 г. - а) и летом 1992 г. - б).



а)



б)

Рис. 11 Направление меридиональной компоненты скорости геострофического течения ( $F_n$ , град.) на зональном разрезе по  $41^{\circ}50'$  с.ш. через центр Батумского антициклона осенью 1990 г. - а) и летом 1992 г. - б).



**Выводы.** Основные результаты исследований Батумского антициклонического круговорота, выполненные по гидрологическим съемкам осенью 1990 г. и летом 1992 г. заключаются в следующем.

1. Батумский антициклон расположен в юго-восточной части Черного моря и занимает акваторию, площадь которой равна примерно 22 тыс. км<sup>2</sup>. По полю динамических высот антициклон прослеживается до максимальной расчетной глубины 495 м.

2. Динамические горизонталы антициклона имеют эллипсоидную форму. Большая ось располагается параллельно потоку ОЧТ, ее длина достигает 180 км. Длина малой оси составляет 90 ÷ 110 км.

3. Стрежень орбитального потока испытывает существенные перемещения по глубине. Осенью 1990 г. он располагался в верхнем 15-ти метровом слое моря, а летом 1992 г. был заглублен на 60 м, что по видимому объясняется характером динамических процессов, протекающих в системе атмосфера - Черное море. Максимум кольцевой скорости геострофического течения в стрежне антициклона составил для осени 1990 г. - 0.286 м/с, а для лета 1992 г. - 0.161 м/с.

4. Под сезонным термоклином центральная область Батумского антициклонического круговорота заполнена холодными водами промежуточного слоя, температурой в ядре 6.39 ÷ 6.90 °С. Толщина слоя холодных вод на оси антициклона достигает 145 м.

5. Центр круговорота меняет свое горизонтальное положение преимущественно в западном или восточном направлении на 15 - 20 миль.

6. Глубина воронок антициклона в полях гидрологических элементов: температуры, солености, плотности достигает 35 м на горизонте 100м.

7. В пространстве антициклона осенью 1990 г. наблюдался наклон изотерм, изохалин, изопикн в восточном направлении, что

можно объяснить тепловыми процессами в системе атмосфера - Черное море. Величина наклона составляла 35 м на длину разреза

8. Для уточнения полученных результатов и ответа на многие вопросы, оставшиеся невыясненными, требуются исследования по гидрологическим съемкам других сезонов и лет.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Латун В.С. Антициклонические вихри в Черном море летом 1984 года. // Морской гидрофизический журнал. - Севастополь, МГИ АН УССР, 1989. N3 - с.27-34.

2. Латун В.С. Энергоснабжение глубоких антициклонических вихрей Черного моря. //Комплексные океанографические исследования Черного моря. - Севастополь, МГИ АН УССР. - с.10-21.

3. Ерошко А.А. Об одном способе расчета горизонтальной и вертикальной структуры геострофических течений в Черном море по базам экспериментальных данных. //Системы контроля окружающей среды 2000. - Севастополь, 2001. - с.212-222.

4. Богатко О.Н., Богуславский С.Г., Беляков Ю.М., Иванов Р.И. Поверхностные течения Черного моря. //Комплексные исследования Черного моря. - Севастополь, МГИ АН УССР, 1979. - с.26-33.

5. Титов В.Б. Структура геострофических течений в северо-восточной части Черного моря. //Океанология, 1999. T39 N1 - с.46-50.

6. Блатов А.С., Иванов В.А. О вихреобразовании в Черном море. //Комплексные исследования Черного моря. - Севастополь, МГИ АН УССР, 1979. - с.43-51.

7. Бибик В.А. Особенности динамики вод в юго-восточной части Черного моря и распределение океанографических элементов. // Труды АзчерНиро. 1964, вып. 23. - с.23-31.