

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ АН УССР

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ "СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ
РАЗВИТИЕМ РЕКРЕАЦИОННЫХ СИСТЕМ"

№ 5804-1387

УДК 551.465.262.5

Латун В.С.

ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ХОЛОДНОГО ПРОМЕЖУТОЧНОГО СЛОЯ
ЧЕРНОГО МОРЯ В ЦЕНТРАХ ЦИКЛОНИЧЕСКИХ КРУГОВОРОТОВ ВОД.

Холодный промежуточный слой (ХПС) — характерная особенность термохалинной структуры вод Черного моря. Границы ХПС, выделяемые по изотермическим поверхностям 8°C , находятся между горизонтами 40 и 120 м, где характерные значения солёности составляют 18,6 и $20,0^{\circ}/_{\text{оо}}$ соответственно. Минимальные значения температуры в ХПС обычно не выходят за пределы $6,0\text{--}7,5^{\circ}\text{C}$.

Термогидродинамика ХПС чрезвычайно сложна, существование этого промежуточного слоя является суммарным результатом многих физических процессов. Локальные характеристики ХПС (глубина залегания и рельеф ограничивающих поверхностей, толщина, температура и солёность) не только содержат информацию об истории вод этого слоя, но и могут служить индикаторами динамических образований синоптического масштаба. Связанная с ХПС структура вод такова, что вертикальный обмен затруднен и содержащиеся в слое примеси могут переноситься на значительные расстояния. Исследования по трем аспектам неблагоприятной обстановки на Черном море (динамика сероводородной зоны, загрязнение, состояние биологических ресурсов) непосредственно связаны с изучением формирования, распространения и трансформации вод ХПС. Поэтому комплексное изучение ХПС имеет большое как теоретическое, так и практическое значение.

В эволюции представлений о физике формирования ХПС можно проследить несколько основных этапов. С конца прошлого столетия в течении полувека формирование ХПС объясняли процессами зимней конвекции на всей акватории моря и последующего летнего прогрева приповерхностных вод. Но накопленный

середине нашего столетия материал натуральных наблюдений показал, что температура поверхности глубоководных акваторий Черного моря в самые холодные месяцы года выше температуры ХПС. Частичный выход из этого противоречия был предложен А.Г. Колесниковым в 1953 г. [1]. Согласно его так называемой "адвекционной" гипотезе воды ХПС формируются зимней конвекцией в мелководной северо-западной части моря и основным Черноморским течением переносятся в другие районы. Но соленость вод северо-западной части моря существенно меньше солености ХПС, и с конца 50-х годов известны попытки дополнить эту гипотезу различными рецептами смешения вод [2]. Стала понятной и необходимость перехода к исследованию термогидродинамики ХПС на основе анализа конкретных гидрологических и метеорологических условий.

Первую попытку проследить процесс формирования и распространения вод ХПС по данным отдельных гидрологических съемок сделал Д.М. Филиппов [3]. На основании анализа распределения температуры верхних слоев Черного моря Д.М. Филиппов пришел к выводу, что в феврале 1957 и 1958 гг в западной части моря происходило обновление вод ХПС. Необходимо обратить внимание на следующие важные детали: 1. Обновление вод ХПС отмечено не в северо-западной, а в западной части моря. 2. Поле солености не анализировалось. 3. Промежуточный слой холодных вод, ограниченный поверхностями 7.5°C имел форму купола, температура уменьшалась от $7.3 - 7.5^{\circ}\text{C}$ у мыса Калиакра и мыса Сарыч до $7.0 - 7.1^{\circ}\text{C}$ в центральных районах западной части моря. Вдоль берегов Болгарии на глубинах до 50 м обнаружена узкая холодная струя ($T_{\text{мин}} = 5.8^{\circ}\text{C}$).

Этим фактам можно дать следующую интерпретацию: в период максимального зимнего охлаждения поверхности Черного моря вынос холодных, но легких, распресненных вод осуществляется из северо-западной акватории поверхностным течением в узкой полосе вдоль западных берегов, тогда как заглубляющийся радиальный поток вод ХПС берет свое начало в центре западного циклонического круговорота.

Как видим, уже материалы зимних квазисинхронных съемок 1957-1958 гг давали основание для пересмотра сложившихся представлений о локализации интересующих нас очагов зимней

конвекции, давали основания для планирования контрольного натурного эксперимента. Но инерция мышления оказалась настолько сильной, что гипотеза о формировании вод ХПС в северо-западной части Черного моря продолжала господствовать [4].

Новый взгляд на формирование ХПС высказали в 1983 году И.М.Овчинников и Ю.М.Попов [5], которые на основании качественного анализа данных зимней гидрологической съемки показали возможность формирования холодных промежуточных вод в центрах восточного циклонического круговорота. В.С.Латун и В.И.Ястреб [6] по данным квазисинхронной гидрологической съемки 1985 года проследили процесс формирования вод ХПС в центре синоптического циклонического круговорота. С учетом конкретных гидрометеорологических условий февраля-марта 1985 года был выполнен количественный анализ процесса вертикальной конвекции в центральной части круговорота и спирального стекания сформировавшихся вод по куполу пикноклина.

Следует подчеркнуть, что роль зимней конвекции как начальной стадии процесса формирования вод ХПС сомнений не вызывала. Противоречивые точки зрения в океанологии существуют по вопросам, где расположены основные очаги конвекции, и как происходит растекание вод ХПС. Новое предположение о формировании холодных промежуточных вод Черного моря в центральных частях циклонических круговоротов различного масштаба лучше других обосновано с физической точки зрения. В циклонических круговоротах пикноклин имеет куполообразную форму, в центре круговорота к поверхности поднимаются слои с более холодными водами повышенной солёности. Это пятно плотных вод зимой при затопе холодного воздуха становится очагом интенсивной конвекции. Над куполом пикноклина формируется невысокий цилиндр однородной воды. Радиальные приповерхностные потоки приносят сюда более теплые воды, которые, охлаждаясь, опускаются до купола пикноклина и в виде спирального промежуточного течения сползают по его склону. Температура и солёность вод этого течения находятся в пределах, характерных для ХПС. Таким образом, зимняя конвекция над куполом пикноклина в центрах циклонических круговоротов приводит к обновлению и пополнению вод ХПС [5,6].

Основная задача настоящей работы — на основании анализа материалов натурных наблюдений дать количественное описание

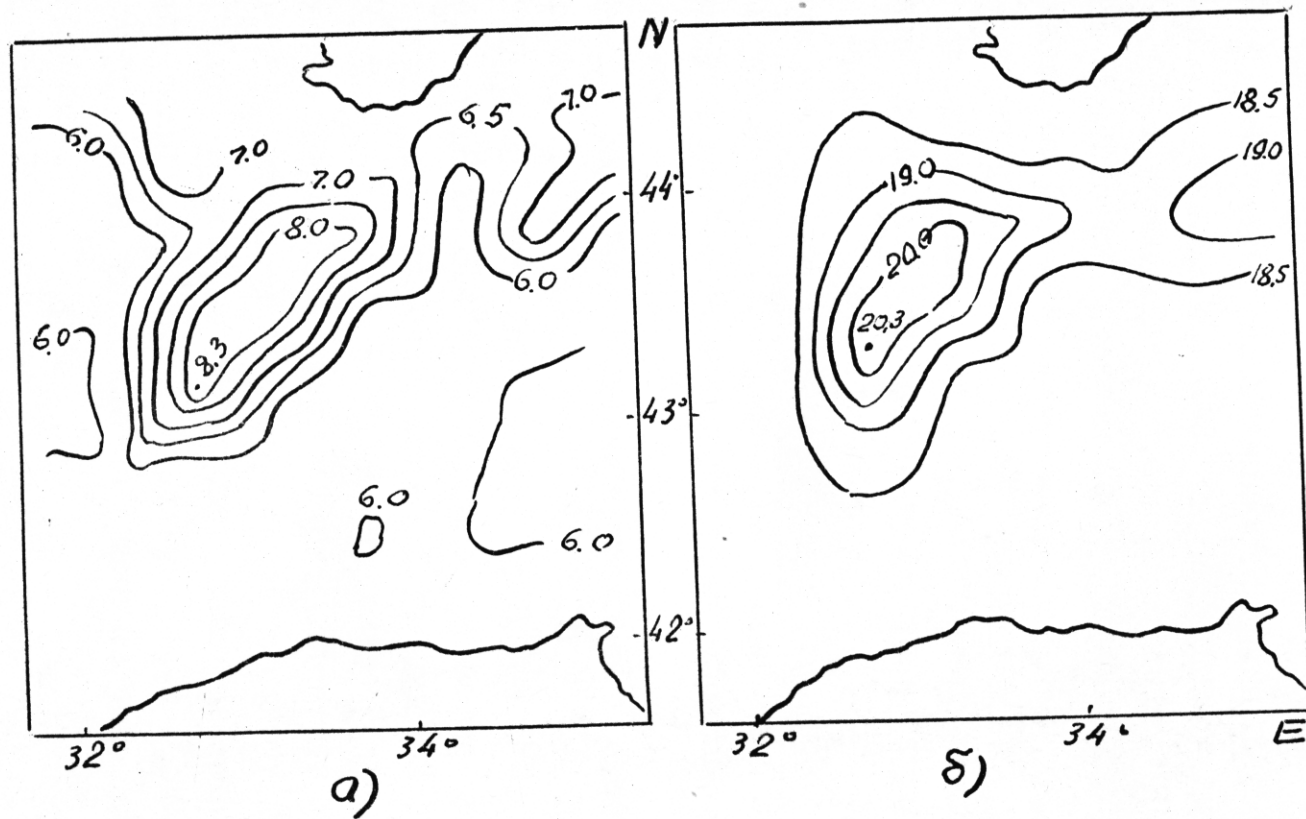


Рис. I. Распределение температуры (а) и солености (б) на горизонте 40 м.

условий формирования вод ХПС в центрах циклонических круговоротов и предложить формализованную схему этого процесса.

В II рейсе НИС "Профессор Колесников" комплексная гидрофизическая съемка центральной части Черного моря ($41^{\circ}40' - 44^{\circ}40'$ с.ш., $31^{\circ}30' - 35^{\circ}30'$ в.д.) выполнена по регулярной сетке из 57 станций с размером ячейки $20'$ широты на $30'$ долготы (20×22 мили) за 8 суток - с 7 по 15 марта 1985 года. Гидрологические измерения на станциях проводились с помощью зондирующего комплекса ИСТОК-3, на переходах между станциями работал буксируемый измерительный комплекс "Сарган" (1200 миль буксировки). Циклонический круговорот синоптического масштаба был обнаружен в квадрате $43^{\circ} - 44^{\circ}$ с.ш., $32^{\circ} - 34^{\circ}$ в.д. и картирован за 3 суток (7-10 марта 1985 г.). В этот период здесь наблюдался холодный северо-восточный ветер, средние значения скорости ветра, температуры воздуха и упругости водяного пара составляли 8 м/с, 1.5°C и 5.0 гПа соответственно. Атмосферное давление в эти трое суток было высоким и устойчивым ($\bar{P}_a = 1038,5$ гПа), средний балл облачности равнялся 6 и обеспечивался, главным образом, облаками нижнего яруса.

В центре круговорота температура воды в слое 10-20 м равнялась $4.9 - 5.2^{\circ}\text{C}$, соленость - $18.6 - 18.9^{\circ}/_{\text{oo}}$. К периферии круговорота температура повышалась до $6.0 - 6.5^{\circ}\text{C}$, соленость понижалась до $18.2 - 18.4^{\circ}/_{\text{oo}}$. Наиболее рельефно круговорот прослеживается по распределению свойств морской воды на горизонте 40 м (рис. 1), который пересекает куполообразное поднятие изоповерхностей температуры, солености и плотности в центре круговорота. Для циклонических круговоротов, как известно, характерно восходящее движение вод. В данном случае апвеллинг сосредоточен под куполом пикноклина, поступление глубинных вод является одним из условий существования пикноклина.

Над куполом пикноклина процессы ветрового и конвективного перемешивания формируют верхний квазиоднородный слой (ВКС) морских вод. Карта распределения ВКС дает представление о топографии купола пикноклина (рис. 2). Над вершиной купола толщина ВКС минимальна (20 м), здесь наблюдаются наиболее холодные (4.9°C) и соленые ($18.9^{\circ}/_{\text{oo}}$) воды. Над скло-

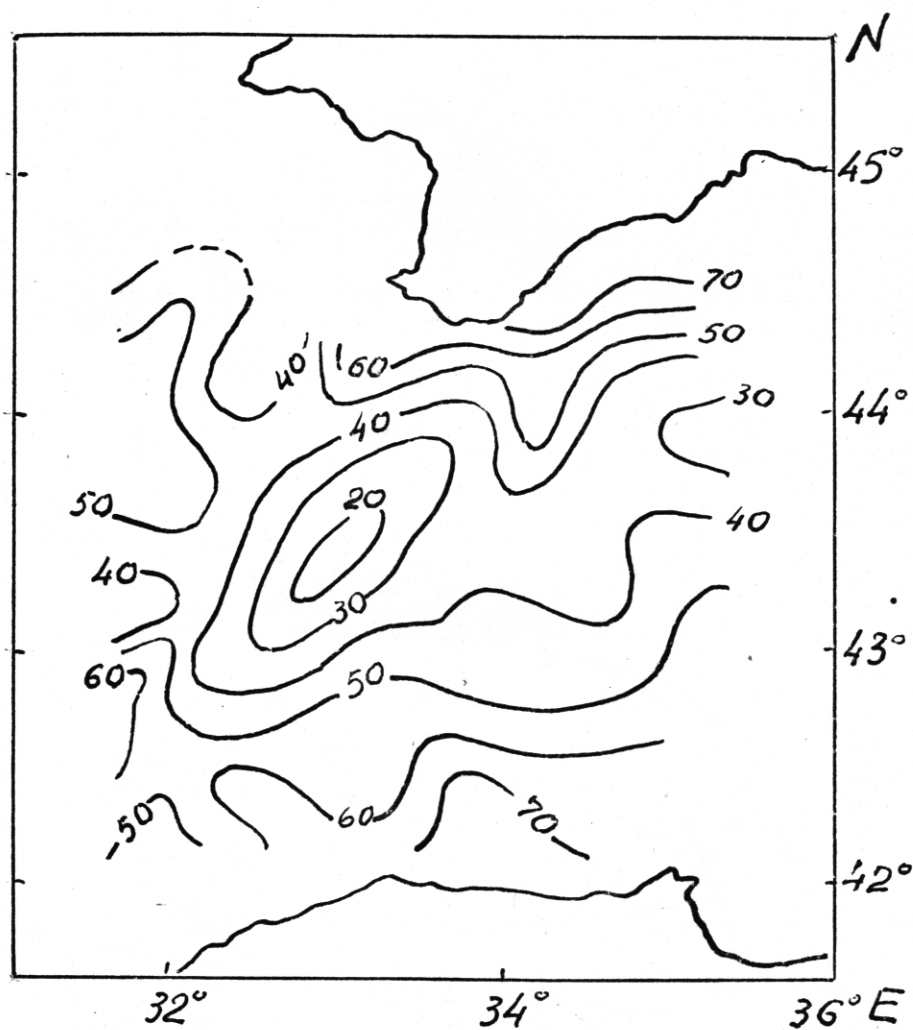


Рис. 2. Толщина верхнего квазиоднородного слоя.

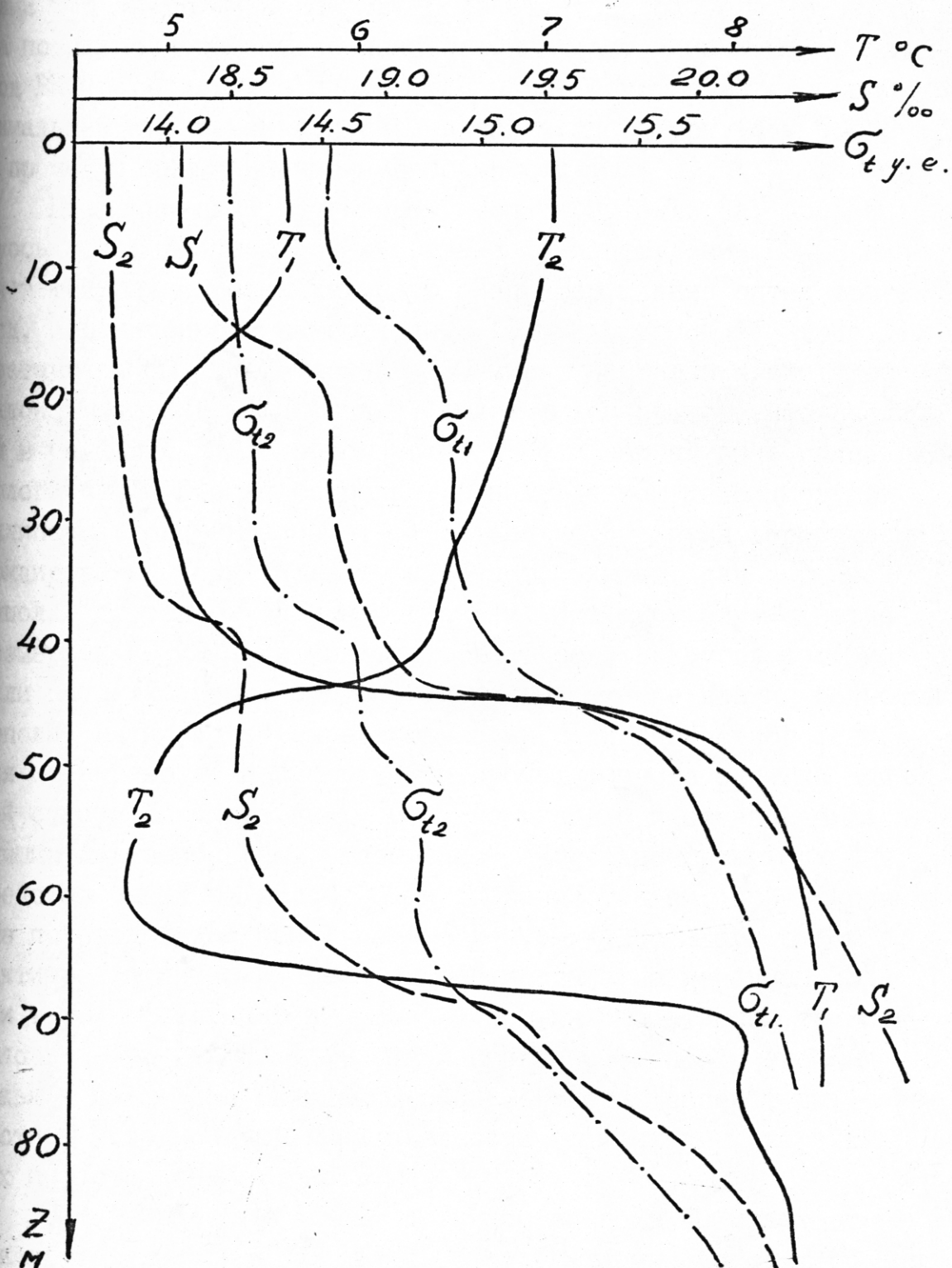


Рис. 3 Распределение температуры, солености и условной плотности на двух вертикалях над склонами купола пикноклина.

нами купола толщина ВКС увеличивается вдвое, его температура повышается на 1°C , соленость уменьшается на $0.5^{\circ}/_{\text{оо}}$, здесь под ВКС располагался промежуточный 5-10-метровый слой с минимальными на вертикали значениями температуры ($4.9-5.0^{\circ}\text{C}$) и промежуточными значениями солености (рис.3).

Циклонический круговорот имел форму эллипса, большая полуось которого была ориентирована в направлении ЮЗ-СВ и почти в три раза превышала малую. Например, длина пятна теплых вод, ограниченного на горизонте 40 м изотермой 7°C (рис.1), составляла 80 миль, ширина - 30 миль. Крутизна и протяженность склонов этого купола теплых, соленых вод существенно различны в разных частях круговорота, и если направление галса гидрологической съемки совпадает с направлением малой полуоси эллипса, весь склон может оказаться между двумя вертикалями зондирования, одна из которых будет, скажем, над вершиной купола, другая - над его подножием. И в этом случае сетка размерами 20×22 мили позволяет картировать круговорот, но если поток холодных промежуточных вод еще не достиг подножия купола, он не будет зарегистрирован. Для адекватного описания пространственной структуры промежуточного слоя на начальной стадии формирования ХПС нужна гидрологическая съемка с лучшим горизонтальным разрешением. Чтобы построить разрез, представленный на рис.4, были выбраны станции, ориентированные по продольной оси купола с учетом рельефа его склонов, фактическая линия разреза спроектирована на меридиан 33°в.д. При такой ориентации разреза из восьми его станций три расположены над вершиной купола пикноклина, три - у его подножия и две - над склонами. Распределение температуры, солености и условной удельной плотности на этих двух вертикалях представлены на рис.3.

Заслуживает внимание факт, что всего в 40 милях от центра круговорота и в 20 милях от воображаемых боковых границ "цилиндра-генератора" вод ХПС, заглубляющийся подповерхностный поток холодной воды не только снизу, но и сверху ограничен слоями с повышенной вертикальной устойчивостью. Причем если в подстилающем слое (слое основного пикноклина) значение частоты плавучести N ($N^2 = g \Delta \rho / \rho \Delta z$) равно $2.20 \cdot 10^{-2} \text{с}^{-1}$, то в прослойке между ВКС и ХПС - $(1.70-1.97) \cdot 10^{-2} \text{с}^{-1}$. На по-

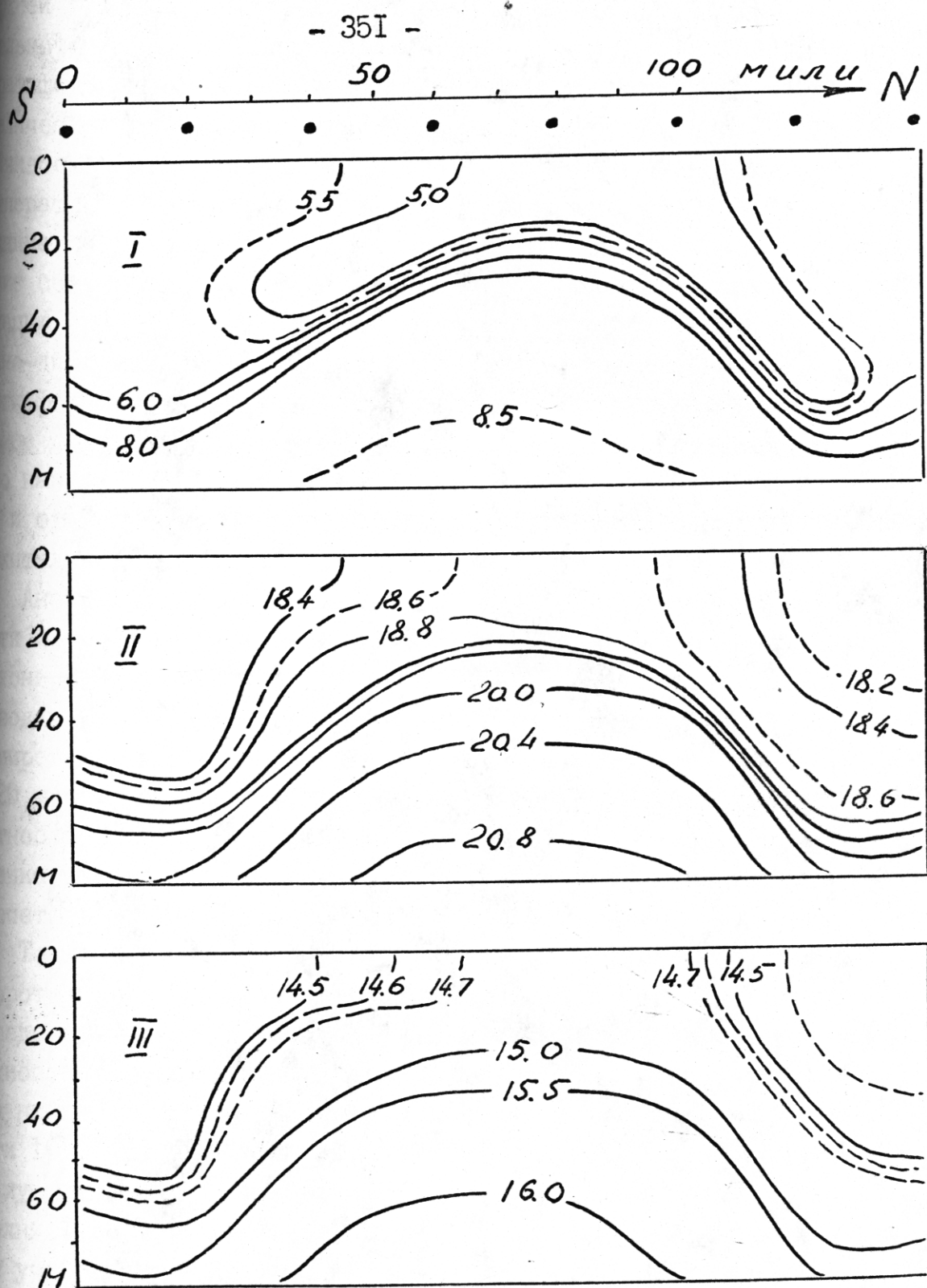


Рис. 4. Распределение температуры (I), солёности (II) и условной плотности (III) на разрезе.

верхней границе ХПС, где вертикальный градиент плотности несколько меньше, чем на нижней, стабилизирующее влияние на стратификацию оказывает как уменьшение температуры, так и увеличение солености с глубиной. На нижней границе ХПС устойчивость максимальна, но здесь с глубиной возрастают как температура, так и соленость. Иными словами, определяющее влияние на устойчивость здесь оказывает вертикальное распределение солености, а влияние температуры на плотностную стратификацию является дестабилизирующим. В этом слое дифференциально-диффузионное осциллирующее движение малых объемов жидкости формирует характерную структуру пикноклина, так называемые диффузионные микрослои. Следовательно, воды ХПС с самого начала оказываются изолированными как от глубинных вод, так и от вод ВКС, что способствует сохранению их свойств продолжительное время.

Анализ пространственного распределения температуры, солености и условной удельной плотности в центре картированного циклонического круговорота и в стекающих по склону пикноклина водах ХПС показал, что глубинные воды также участвуют в формировании ХПС. Плотность вод от поверхности до горизонта 20 м над вершиной купола пикноклина равна 14.7 усл.ед., плотность ХПС над склонами купола - 14.8-14.9 усл.ед. Увеличение плотности в данных условиях может произойти только за счет увеличения солености.

Толщина пикноклина в рассматриваемом циклоническом круговороте равна примерно десяти метрам, его верхняя граница совпадает с изоповерхностью 15.0 усл.ед., нижняя - с изоповерхностью 15.5 усл.ед. Как на склонах, так и на вершине купола нижней границе пикноклина соответствует значение солености 19.9‰ . Но воды верхней границы пикноклина на склонах купола имеют соленость 18.9‰ , на вершине - 19.2‰ . Дополнительное увеличение плотности вод ХПС происходит за счет участия в их формировании соленых вод, поступающих снизу на вершину купола пикноклина. Перемешивание в данном случае является результатом процесса конвекции в приповерхностном слое и подъема вод в нижележащих слоях, соленость при этом - характеристика консервативная, значит по солености можно оценить количественное соотношение смешивающихся вод.

Если над вершиной купола пикноклина воды соленостью 18.6‰ перемешивались с водами соленостью 19.1‰ , а соленость вод промежуточного течения над склонами купола пикноклина равна 18.7‰ , то ядро ХПС на $4/5$ состояло из охлажденных поверхностных вод, и на $1/5$ из соленых глубинных вод. Следовательно, в обмене между глубинными и поверхностными водами ХПС играет роль промежуточного накопителя, причем поступление глубинных вод в ХПС происходит периодически зимой в центрах циклонических круговоротов, медленное перемешивание вод ХПС с вышележащими водами продолжается во все сезоны года на всей акватории моря. Таким путем из глубин моря к его поверхности может поступать значительная часть биогенов.

Таким образом, в конце зимы 1984–1985 гг впервые удалось наблюдать трехмерную картину термохалинной структуры циклонического круговорота в период интенсивного охлаждения верхнего слоя моря. Эта информация дала возможность количественного описания процесса формирования вод ХПС в конкретных гидрометеорологических условиях, дала возможность адекватной идеализации этого процесса.

В пределах допустимой идеализации изучаемого явления будем считать фоновый циклонический круговорот осесимметричным, а движение вод в нем — установившимся. Круговая составляющая вектора скорости в таком круговороте может быть с достаточной точностью определена из баланса силы радиального градиента давления, силы Кориолиса и центробежной силы. Свободная поверхность моря имеет в таком круговороте форму впадины, пикноклин — форму купола, рост с глубиной градиента давления приводит к затуханию движения на горизонтах 300–350 м. Основание купола пикноклина расположено на глубине 80–100 м, где его радиус равен 50 милям; сравнительно плоская вершина купола поднимается на горизонты 20–25 м, ее радиус равен 20 милям. На склонах купола пикноклин имеет толщину около 5 м, на вершине — около 10 м. В центральной части круговорота интенсивная конвективная циркуляция достигает пикноклина. Здесь воды верхнего пятиметрового слоя пикноклина принимают участие в формировании вод ХПС, поступлением вод сверху и снизу, а также их оттоком в радиальном направлении, перемешиванию в этом слое обеспечивается состояние подвижного равновесия

В ВКС начальные условия для процесса конвекции формируются ветровым перемешиванием. Над куполом пикноклина в слой ветрового перемешивания поднимаются более плотные соленые воды, ВКС имеет здесь минимальную толщину. Когда зимой на акваторию моря поступает холодная воздушная масса и внешний тепловой баланс становится отрицательным, происходит дальнейшее увеличение плотности ВКС вследствие понижения температуры. Конвективная циркуляция не разрушает пикноклин, над вершиной купола она сосредоточена в более тонком слое, чем над его склонами, в результате горизонтальная неоднородность температуры и плотности ВКС циклонического круговорота возрастает. В центре круговорота, где толщина ВКС составляет 10-20 м, формируется цилиндр однородной - холодной, соленой и плотной - воды. Увеличение плотности происходит как вследствие потери тепла, так вследствие увеличения солености при перемешивании вод ВКС с водами верхней части пикноклина. Существовавшее ранее динамическое равновесие локально нарушается, изменения радиального градиента давления приводят к возникновению радиальной составляющей потока. Охлаждение продолжается, по температура воды в цилиндре не падает ниже определенного значения, так как в изучаемой системе действует механизм автоматического регулирования.

Радиальный отток вод в подповерхностном слое является началом ХПС, поэтому цилиндр однородной воды в центре циклонического круговорота назван цилиндром-генератором вод ХПС. Движение вод промежуточного слоя происходит на фоне циклонической циркуляции, на которую рассматриваемые процессы существенного влияния не оказывают вследствие относительной малости их вертикального и временного масштабов. Фоновую циркуляцию можно считать известной, так как она поддается расчету диагностическими методами. При этом в круговоротах с горизонтальными размерами 10^4 - 10^5 м влиянием центробежной силы нельзя заранее пренебречь, так как ее отношение к силе Кориолиса может достигать 0.2. Оценки показывают, что радиальная составляющая скорости существенно меньше круговой, поэтому движение вод ХПС над склонами купола пикноклина должно происходить по соответствующей спирали.

Изложенное физическое описание процесса формирования

вод ХПС в центре циклонического круговорота подтверждает, что формализованная схема этого процесса должна включать конвекцию, перемешивание и адвекцию вод ХПС, причем степень возможного упрощения отдельных элементов схемы определяется конкретной задачей нахождения объема сформировавшихся вод, их термохалинных характеристик и пространственного распределения. Оправданы следующие предположения:

1. Фоновый циклонический круговорот стационарен, осесимметричен, его термохалинная и динамическая структуры известны.
2. Метеорологические параметры, обуславливающие охлаждение и перемешивание верхнего слоя моря, пространственно однородны.
3. Большая гидростатическая устойчивость в слое основного пикноклина и описанный механизм автоматического регулирования обеспечивают сохранение купола изоповерхностей океанологических характеристик в центре круговорота.
4. Нелинейным взаимодействием движения вод ХПС с фоновой циркуляцией и влиянием изменений термохалинной структуры верхних слоев моря на фоновую циркуляцию можно пренебречь.

Для количественных оценок процесса формирования вод ХПС на основании натурных измерений выбраны следующие характерные (средние) значения основных величин: радиус изотермы 5°C $r_1 = 10$ миль, изотермы $5,2^{\circ}\text{C}$ — 14 миль, изотермы $5,6^{\circ}\text{C}$ — 20 миль, толщина слоя пятиградусной воды над склонами купола пикноклина $h = 10$ м, средний уклон — $5.0 \cdot 10^{-4}$. В центре круговорота ($r \leq r_1$) над верхней границей пикноклина $T = 6.0^{\circ}\text{C}$, $S = 19.1^{\circ}/_{\text{оо}}$. Метеорологические условия на поверхности моря горизонтально однородны, температура воздуха $T_a = 1.5^{\circ}\text{C}$, влажность $e = 5.0$ гПа, скорость северо-восточного ветра $U_a = 8$ м/с. В зимний сезон холодный северо-восточный ветер удерживается над Черным морем по несколько суток [7], в течении которых процесс образования ХПС проходит стадии развития, стационарирования и затухания. Перечисленные числовые значения характерны для стадии стационарирования. До поступления холодного воздуха температура и соленость верхнего слоя вод в центре круговорота имели более высокие значения ($T \approx 6^{\circ}\text{C}$, $S \approx 18.8^{\circ}/_{\text{оо}}$),

эти воды уходят в ХПС на стадии развития процесса. На стадии стационарирования в центр круговорота радиальными потоками вблизи поверхности приносятся менее соленые воды ($S \approx 18.6^{\circ}/_{\text{oo}}$) но интенсивная конвекция в это время достигает верхней границы пикноклина и в процесс перемешивания вовлекаются воды с термохалинными характеристиками $T=6.0^{\circ}\text{C}$, $S=19.1^{\circ}/_{\text{oo}}$.

На стадии стационарирования, когда в центральной части круговорота теплосодержание вод не изменяется во времени, внешний тепловой баланс B_0 с точностью до малых слагаемых - затрат тепла на прогрев атмосферных осадков и его поступления от диссипации механической энергии - равен адвективному переносу тепла Π_0 :

$$B_0 = R_n - LE - H = \Pi_0,$$

где R_n - радиальный баланс поверхности моря, LE - затраты тепла на испарение, H - турбулентный теплообмен.

Потоки R_n , LE и H зависят от многих факторов. На основании теоретических соображений и большого объема эмпирического материала для условий Черного моря в Морском гидрофизическом институте АН УССР получены надежные зависимости этих потоков от немногих основных параметров: R_n - общей облачности, LE и H - от температуры воды, температуры и влажности воздуха, а также от скорости ветра [8,9]. Существенно, что формулы для вычисления LE и H получены для различных периодов осреднения значений гидрометеорологических параметров с учетом переменных коэффициентов обмена и механизма брызгообразования при штормах.

При перечисленных в работе значениях определяющих параметров составляющие внешнего теплового баланса равны:

$$R_n = 7.3 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^2 \text{сут}}, \quad LE = 13.3 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^2 \text{сут}}, \quad H = (6.7 \div 7.4) \frac{\text{МДж}}{\text{м}^2 \text{сут}},$$

и, следовательно, $\Pi_0 = B_0 = (12.7 \div 13.1) \frac{\text{МДж}}{\text{м}^2 \text{сут}}$.

Если на акватории площадью S известно значение Π_0 , известны температура T_{w1} втекающей воды и температура T_{w2} вытекающей воды, то суммарный за N суток объем этой воды Q в стационарном режиме определяется формулой

$$Q = \frac{\Pi_0 S N}{C_w \rho \Delta T_w},$$

где C_w и ρ - теплоемкость и плотность морской воды, $\Delta T_w = T_{w1} - T_{w2}$.
За сутки через цилиндрическую поверхность $2\pi r h$ (h - глу-

бина приповерхностного потока термически однородных по вертикали вод, $h_1=15$ м) со скоростью $v_1=10.6$ см/с втекает $Q=1.6 \cdot 10^{10}$ пятиградусной воды. В центральной части круговорота потери тепла на теплообмен с атмосферой восполняются поступлением снизу более теплых вод. Чтобы температура ВКС поддерживалась здесь на значении 5°C , снизу в этот слой должно поступать в сутки $3.4 \cdot 10^9$ м³ шестиградусной воды. Среднее значение вертикальной составляющей скорости v_z в круге $r \leq r_1 = 10$ миль на глубине 15-20 м составляет при этом $3.6 \cdot 10^{-3}$ см/с.

Таким образом, из иных балансных соотношений получено подтверждение найденной нами ранее пропорции смешения вод в цилиндре-генераторе: $\sim 4/5$ объема формирующихся в нем вод ядра ХПС поступают через верхнюю часть боковой поверхности цилиндра, $\sim 1/5$ — через его основание. Через нижнюю часть боковой поверхности цилиндра происходит отток вод с термohалинными характеристиками $T=5^\circ\text{C}$, $S=18.7^\circ/\text{oo}$, причем на расстоянии 15 миль от центра круговорота, где к десятиметровому слою пятиградусной воды сверху и снизу примыкают слои с повышенной гидростатической устойчивостью, составляющие скорости течения ядра вод ХПС имеют следующие значения:

$v_1=13$ см/с, $v_0=42$ см/с, $v_z=6 \cdot 10^{-3}$ см/с. Вертикальный обмен здесь затруднен, но при сползании в изопикническом слое воды головной части потока смешиваются со склоновыми водами купола пикноклина и водами его подножья ($T=5.8 \div 7.0^\circ\text{C}$, $S=18.6 \div 18.3^\circ/\text{oo}$). Кроме того, между верхним пикноклином и слоем пятиградусной воды движутся воды с температурой $5.0 \div 5.5^\circ\text{C}$ и соленостью $18.5 \div 18.7^\circ/\text{oo}$. Только процесс над куполом пикноклина может сформировать ядро ХПС с его известными ^{экстремальными} характеристиками. При дальнейшем движении пятиградусной воды происходит вовлечение вод близкой плотности, в результате чего объем ХПС увеличивается. Для надежных оценок отношений объема исходной пятиградусной воды к объемам внутренних слоев, ограниченных другими изотермами, необходимо располагать экспериментальными данными о всех стадиях процесса формирования и эволюции ХПС. Есть основание считать, что в весенний сезон объем вод ХПС между

изотермическими поверхностями 7°C по крайней мере в 5 раз превышает начальный объем пятиградусной воды. Значит, если суммарная продолжительность интенсивного зимнего охлаждения составляет 30 суток, объем сформировавшейся в центре одного циклонического круговорота пятиградусной воды по надежным оценкам равен $6 \cdot 10^{11} \text{ м}^3$, а объем ХПС в пределах изотермических поверхностей 7°C по ориентировочной оценке составляет около $3 \cdot 10^{12} \text{ м}^3$.

Выполненный анализ показывает, что в условиях среднесуровой зимы термогидродинамические процессы в циклонических круговоротах вносят основной вклад в формирование ХПС Черного моря.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Колесников А.Г. Годовой ход температурной устойчивости и вертикального турбулентного обмена тепла в открытой части Черного моря. -Тр. МГИ АН УССР, 1953, вып.3, с.3-13.
2. Богданова А.К. Водообмен через Босфор и его роль в перемешивании вод Черного моря. -Тр.СБС, 1959, т.12, с.401-420.
3. Филиппов Д.М. Циркуляция и структура вод Черного моря. - М., Наука, 1968, 136 с.
4. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. (под ред. академика АН УССР Б.А.Нелепо) -Л., Гидрометеиздат, 1984, 240 с.
5. Овчинников И.М., Попов Ю.И. К вопросу о формировании холодного промежуточного слоя в Черном море. -Докл. АН СССР, 1984, т.279, № 4, с. 986-989.
6. Латун В.С., Ястреб В.П. Формирование вод холодного промежуточного слоя Черного моря в центрах синоптических циклонических круговоротов. -В кн.: Гидрология 2000 года. -Тезисы докл. ИВП АН СССР, М., 1986, с. 182-183.
7. Атлас волнения и ветра Черного моря. -Л., Гидрометеиздат, 1969, с. III.
8. Ефимов В.В., Тимофеев Н.А., Куржеевский И.В., Сычев Е. Н.,

Милованов В.И., Юровский А.В. Оценка методов расчета тепло- водообмена между океаном и атмосферой.-Препринт, Севастополь, ИТИ АН УССР, 1984, С.46.

9. Ефимов В.В., Тимофеев Н.А., Сычев Е.Н., Куржеевский И.В. Оценка коэффициентов тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой.-Изв. АН СССР, ФАО, 1985, т.21, № 7, с. 735-774.