

Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана

УДК 551.464.4

С.Г. Демьшев, В.А. Иванов, Н.В. Маркова

Анализ климатических полей Черного моря ниже основного пикноклина, полученных на основе усвоения архивных данных по температуре и солености в численной гидродинамической модели

В работе проводится анализ модельных климатических полей температуры, солености и поля течений в слое от 350 до 1000 м. Получены следующие особенности. В областях с антициклонической завихренностью наблюдаются более холодные воды, в циклонических – более теплые. Такой температурный эффект может быть объяснен увеличением температуры с глубиной ниже основного пикноклина. В области Севастопольского антициклона на глубинах ниже 500 м имеет место зона циклонического вращения вод. У Кавказского побережья в районе Геленджика на глубине 350 м обнаружено узкое струйное течение, существующее с марта по июль.

Введение. В связи с необходимостью промышленной разработки ресурсов Черного моря и прибрежных территорий необходима информация о вероятной гидродинамической ситуации в различных его частях. Использование только архивных массивов данных измерений, без привлечения трехмерных моделей динамики, не позволяет описать непрерывную по времени и пространству эволюцию основных гидрофизических полей. Построенные на основе только архивных данных среднемесячные климатические поля температуры и солености не дают представления об их мезомасштабной структуре и изменчивости на этих масштабах.

В работах [1, 2] была предложена процедура построения непрерывных по времени и пространству климатических гидрофизических полей Черного моря. Она основана на ассимиляции архивных среднемесячных климатических полей температуры и солености в трехмерной нелинейной модели [3]. На ее базе в статье [4] получен модельный климат Черного моря с высоким горизонтальным пространственным разрешением (5×5 км), что позволило проанализировать ряд крупномасштабных и мезомасштабных особенностей климатической циркуляции в верхнем деятельном слое моря [4]. В настоящей работе продолжено изучение результатов численного эксперимента. Проводится анализ модельных климатических поля температуры и поля течений в слое от 350 до 1000 м.

Параметры модели. Напомним основные параметры, при которых был проведен численный эксперимент. По горизонтали использовалось разрешение 5×5 км, по вертикали расчет проводился на 45 горизонтах с глубинами от 2,5 до 2100 м. Шаг по времени равнялся 5 мин.

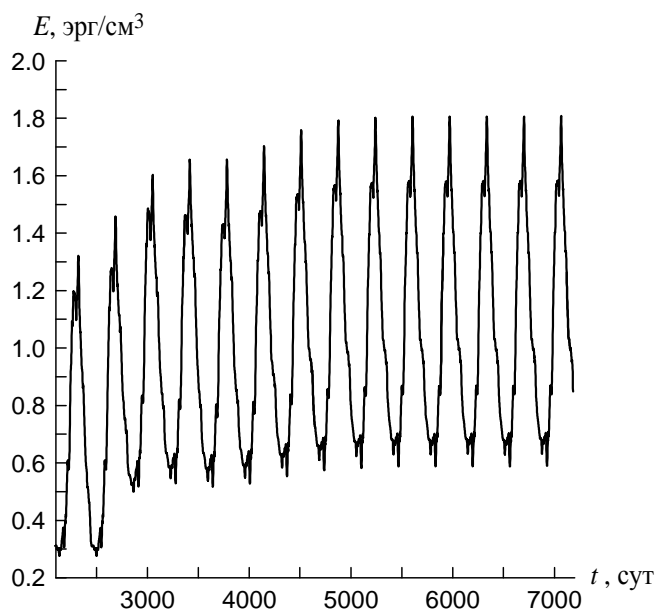
© С.Г. Демьшев, В.А. Иванов, Н.В. Маркова, 2009

Для задания краевых условий на поверхности моря использовались данные из следующих работ. Потоки влаги и тепла на поверхности моря взяты из работы [5], ветер был выбран таким же, как в статье [6]. Атлас [7] послужил источником данных о параметрах рек и проливов.

Турбулентная вязкость и диффузия по горизонтали задавались в виде би-гармонического оператора. Значение коэффициента горизонтального обмена импульсом менялось от 10^{17} см⁴/с на верхних горизонтах до $5 \cdot 10^{17}$ см⁴/с на нижних, коэффициент горизонтальной диффузии в уравнениях адвекции – диффузии тепла и соли был равен константе: $k_H = 10^{17}$ см⁴/с.

Коэффициенты турбулентного обмена импульсом и турбулентной диффузии тепла и соли по вертикали имели значения, полученные в результате специальных численных экспериментов [8, 9]. В нашем численном эксперименте использовались среднемесячные климатические массивы данных по температуре и солености [10]. Эти данные были проинтерполированы на пространственную сетку модели. По ним были рассчитаны коэффициенты Фурье и восстановлены климатические поля температуры и солености на каждые сутки года. Ежесуточные климатические поля температуры и солености затем линейно интерполировались по времени с интервалом 3 ч. Таким образом, климатическая температура и соленость усваивались в модели периодически [11].

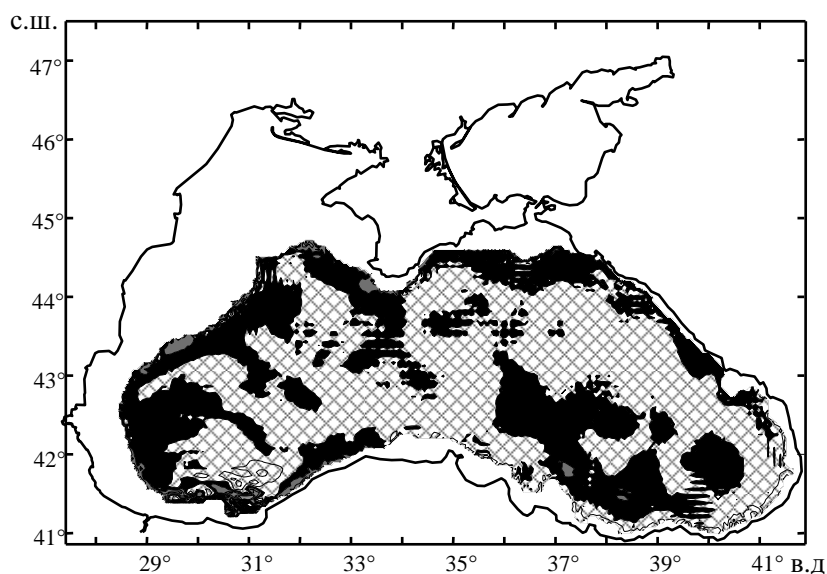
Время интегрирования уравнений модели определялось в соответствии с поведением интегральных характеристик. Время достижения квазипериодического режима составляет приблизительно 5100 дней и согласуется со временем выхода на указанный режим всех медленно устанавливаемых характеристик, например плотности кинетической энергии E на нижнем горизонте 2100 м (рис.1). Этот период соответствует времени затухания первой бароклинной квазигеострофической моды собственных колебаний в Черном море. Общее время интегрирования составило 7200 сут.



Р и с. 1. Средняя кинетическая энергия на нижнем горизонте 2100 м

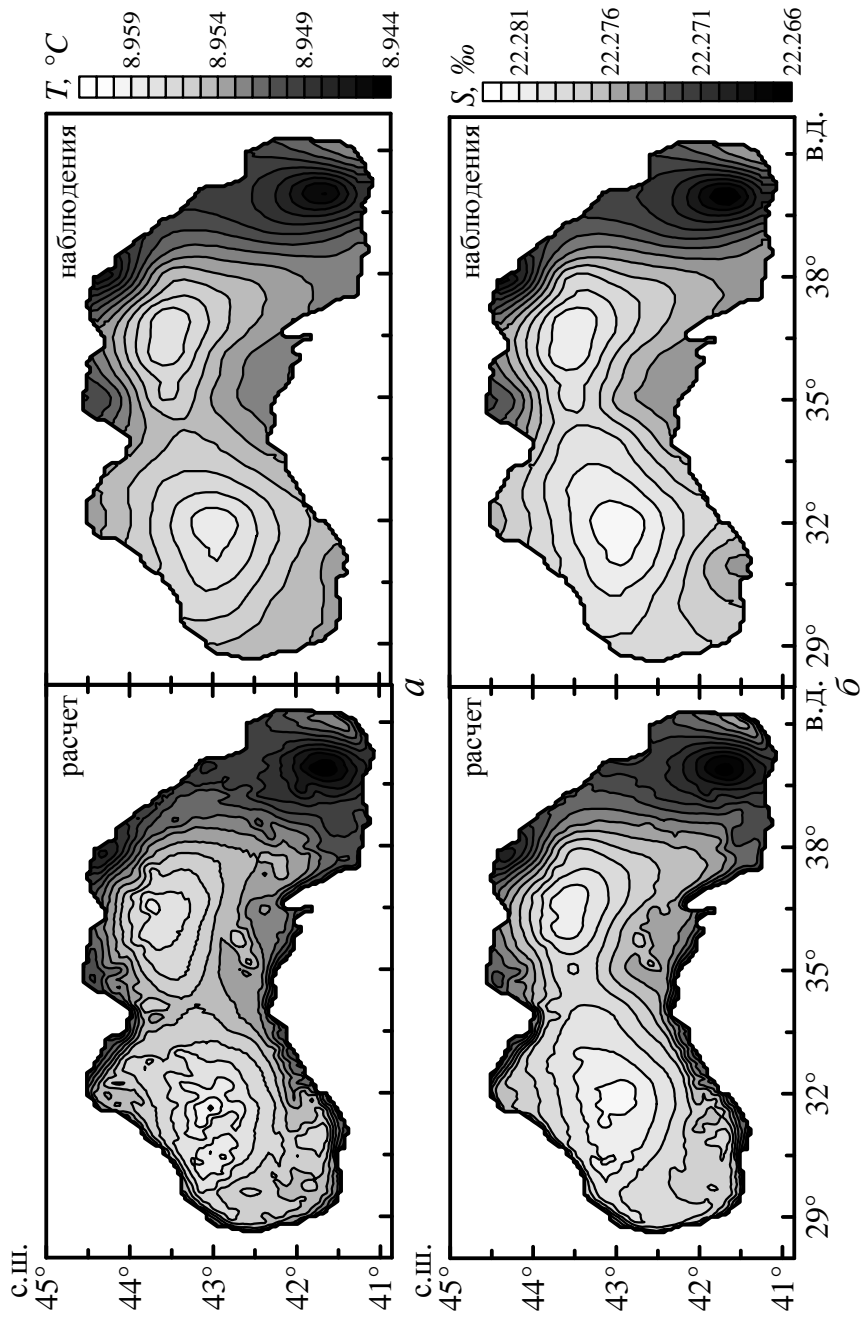
Результаты эксперимента. Рассмотрим горизонты 350, 500 и 1000 м. Основная особенность полученных результатов – воспроизведение мезомасштабной структуры климатических полей. В основном мезомасштабные вихри и струи наблюдаются в прибрежных районах, в областях впадения крупных рек и проливов. Здесь в различные периоды года выявляются отдельные теплые и холодные мезомасштабные вихри (группы вихрей). Рассмотрим сезонную эволюцию климатических полей на указанных горизонтах.

Температура на горизонтах 350, 500 и 1000 м. В январе – феврале по периферии моря прослеживается несколько особенностей в поле температуры. В слое 350 – 500 м это Сочинский холодный вихрь, три-четыре холодных вихря в области Батумского антициклона и Севастопольский антициклон. На глубине 500 м в районе Новороссийска – Геленджика в это время появляется холодное вихревое образование, которое сохраняется всю весну. Как будет показано далее, все эти вихревые структуры имеют антициклоническую направленность и в их центральной части наблюдается опускание вод. Вместе с тем на рассматриваемых горизонтах температура воды увеличивается с глубиной. Поэтому в зонах с антициклонической завихренностью более холодные воды вышележащих горизонтов, опускаясь (рис. 2), приводят к образованию областей с более низкой температурой. Соответственно в областях циклонических вихрей наблюдается подъем более теплых глубинных вод.



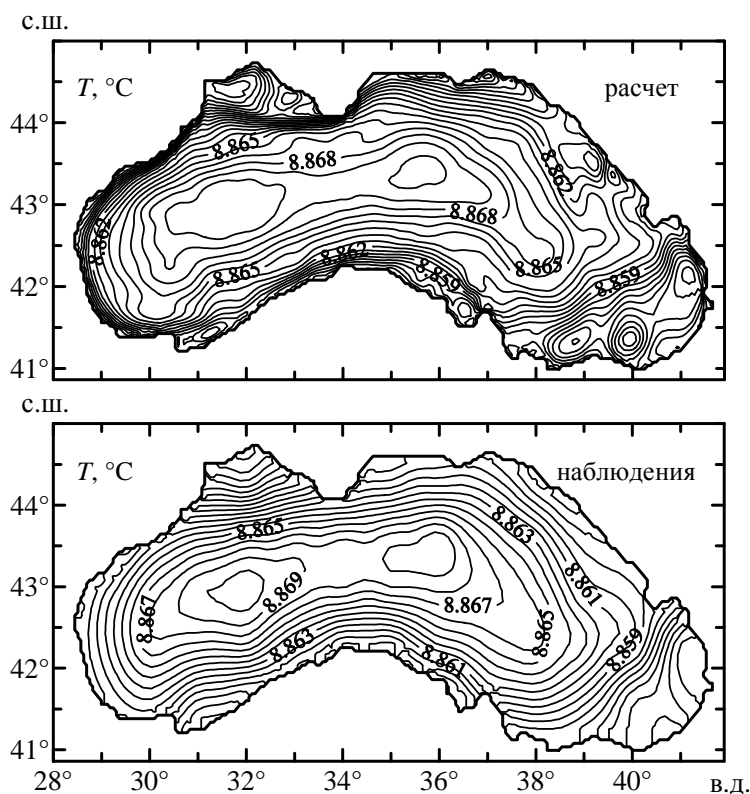
Р и с. 2. Поле вертикальной скорости на горизонте 350 м (январь; темная заливка соответствует областям опускания вод, штриховка – областям подъема)

Так, на горизонте 1000 м в январе в центрах восточного и западного круговоротов находится более теплая (рис. 3, *a*) и соленая (рис. 3, *б*) вода по сравнению с окружающими водами. Холодные и более пресные воды находятся в районах Батумского антициклона и Геленджика, к юго-востоку от Крыма.



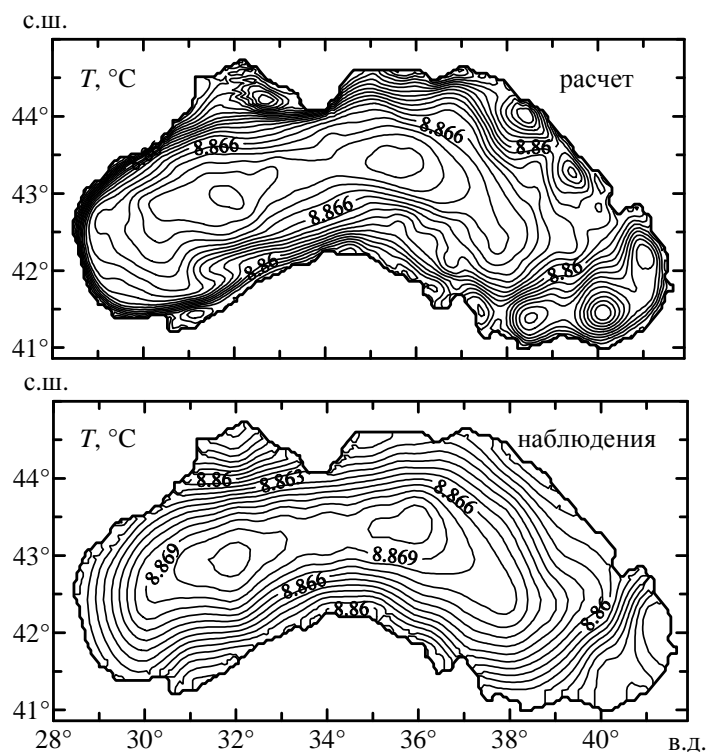
Р и с. 3. Температура (а) и соленость (б) на горизонте 1000 м 15 января

К концу зимы на глубине 1000 м сформированы холодные вихри Батумского антициклона и в районе Новороссийска – Геленджика. В юго-восточной области моря в этот период достигается минимум температуры (и солености). Теплый вихрь у юго-восточной части Крымского побережья, существующий зимой, к середине марта исчезает. В марте в поле температуры на глубинах от 350 до 500 м обнаруживаются два мезомасштабных вихря к западу от Севастополя. Батумский антициклон в поле температуры представлен тремя холодными вихревыми образованиями. Также в это время возникает холодный вихрь в устье р. Сакарья (Турция), который просуществует вплоть до середины декабря (рис. 4).



Р и с. 4. Температура на горизонте 350 м 15 марта

В апреле в слое 350 – 500 м (рис. 5) три вихревых образования с более низкой температурой располагаются вдоль Кавказского побережья (первое – в районе побережья между Новороссийском и Геленджиком, второе – между Туапсе и Сочи, третье – между Сухуми и Поти). Еще более холодные воды находятся в районе действия Батумского антициклона, который в это время имеет трехъядерную структуру. Воды в районе действия Севастопольского антициклона с температурой ядра $8,853^{\circ}\text{C}$ холоднее вод северной ветви Основного Черноморского течения на $0,007^{\circ}\text{C}$. Холодный вихрь расположен также в районе впадения в море Сакарьи. Ниже, на горизонте 1000 м, в апреле в полях температуры и солености по сравнению с началом года значительных качественных изменений не происходит.



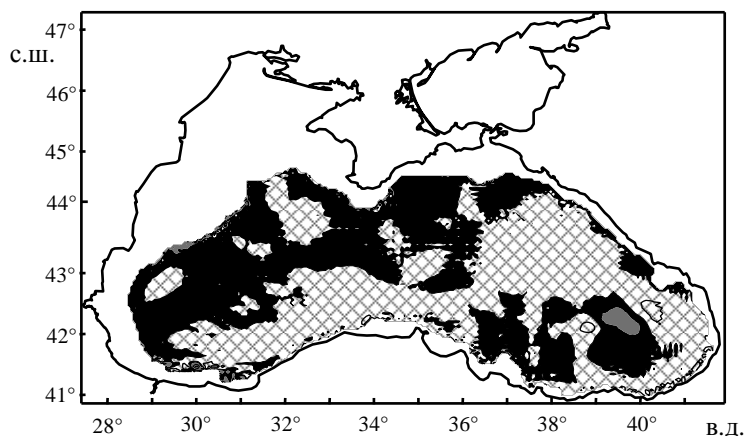
Р и с. 5. Температура на горизонте 350 м 15 апреля

К маю на горизонте 350 м исчезают самый северный антициклонический вихрь у кавказского берега и вихрь в устье Сакарьи, а в июне – холодная вихревая структура в прибрежной части между Сухуми и Потти. На горизонте 1000 м в мае и в июне в полях температуры и солёности отражены два основных классических циклонических круговорота, западный и восточный, причем западный – более теплый и солёный. Холодные вихри сохраняются в районах Новороссийска – Геленджика, Батуми и к западу от Севастополя, появляется вихрь и в восточной части Южного берега Крыма.

В июле – августе на горизонтах 350 и 500 м в районе Сухуми наблюдается зона теплых вод. Структура поля температуры в районе Батумского антициклона носит сложный характер, который заключается в наличии областей теплых и холодных вод. Поле вертикальной скорости для середины июля представлено на рис. 6.

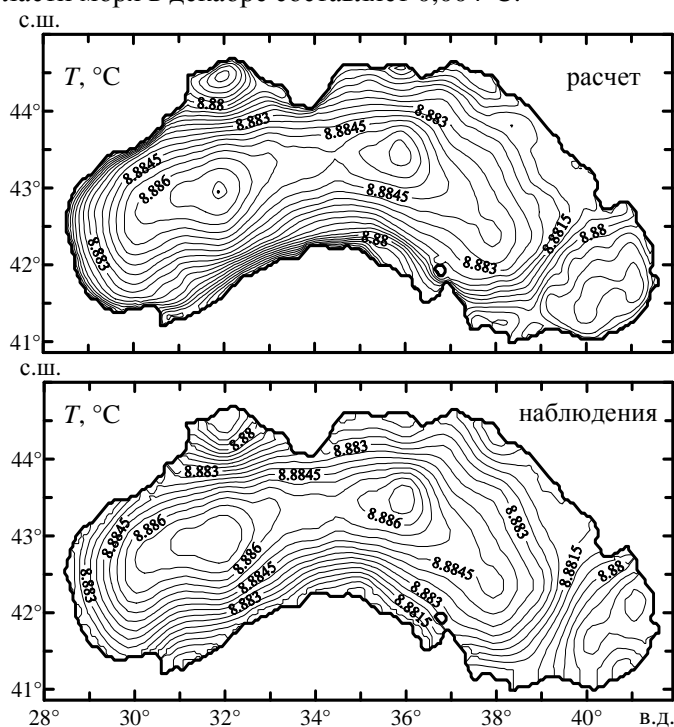
Согласно расчетным данным, к концу лета на глубине 1000 м внутри западного и восточного циклонических круговоротов по-прежнему находятся более теплые и солёные, по сравнению с окружающими, воды. В июле – августе более теплые и солёные воды располагаются также в районах к северу от устья Сакарьи и г. Трабзон (Турция). Эти особенности исчезают к середине сентября.

В середине августа более низкую температуру, по сравнению с фоновыми значениями, имеют воды, находящиеся в центральной части Анатолийского побережья (район к северо-востоку от г. Синоп, Турция), у кавказского берега (район Геленджика), к юго-востоку от Крыма, а также в зоне действия Батумского антициклона.



Р и с. 6. Поле вертикальной скорости на горизонте 350 м (июль; темная заливка соответствует областям опускания вод, штриховка – областям подъема)

Осенью и зимой поле температуры более гладкое, исчезает большинство особенностей, имевших место в летний период года. На горизонте 350 м в поле температуры нет явных границ, определяющих Батумский антициклон, но на 500 м (рис. 7) он четко прослеживается в виде области холодных вод. В центрах основных циклонических круговоротов температура воды по-прежнему выше, чем на их периферии. Максимальное различие между модельными и исходными климатическими значениями температуры для центральной области моря в декабре составляет $0,004^{\circ}\text{C}$.



Р и с. 7. Температура на горизонте 500 м 15 ноября

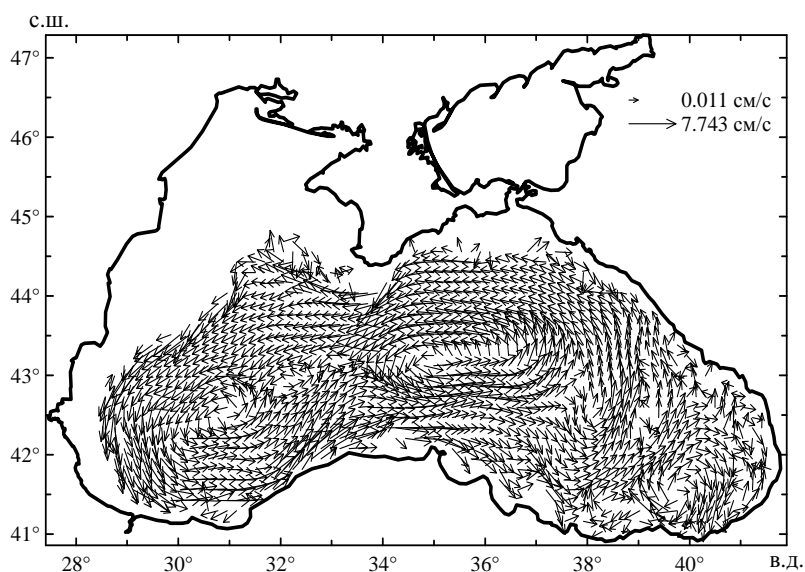
Воды Севастопольского антициклона остаются более холодными относительно окружающих вод в течение всего года.

Течения на горизонтах 350, 500 и 1000 м. При анализе результатов эксперимента была рассмотрена сезонная изменчивость течений на указанных горизонтах.

На горизонте 350 м в начале года находятся несколько вихревых образований разного знака завихренности. Так, в январе – феврале на свале глубин юго-западнее Севастополя определяется глубинная часть Севастопольского антициклона диаметром около 115 – 125 км. Горизонтальные скорости внутри вихря достигают 3 см/с. Весной (середина апреля – май) и летом (июнь – июль) горизонтальный размер антициклонического вихря больше относительно конца зимы примерно в полтора раза. Величины скоростей сохраняются прежними.

С середины августа активность Севастопольского антициклона на данной глубине ослабевает и возобновляется только во второй половине сентября. Значения скоростей от 0,5 до 2 см/с. К декабрю диаметр антициклона уменьшается до 75 – 80 км, а скорости внутри него – до 0,5 см/с. Активность данного вихря вновь возрастает к середине января.

Основное Черноморское течение на глубине 350 м наблюдается от Южного берега Крыма вдоль всей западной части моря до середины Анатолийского побережья (рис. 8). Течение распространяется до Синопа с сентября по май. Скорости в нем достигают 8 см/с, наибольшая его интенсивность приходится на период с января по апрель (юго-западная часть моря, прибосфорский район).



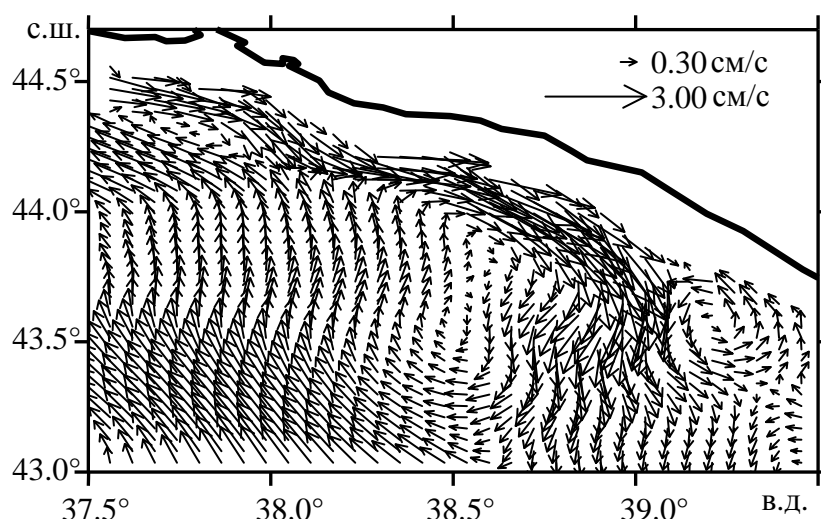
Р и с. 8. Поле течений на горизонте 350 м 15 февраля

В центральной части моря в разное время наблюдаются одно или несколько вихревых образований. Так, зимой в восточной части моря формируется циклон с горизонтальными размерами около 110 – 115 км в зональном направлении и 330 – 335 км — в меридиональном. К апрелю он смещается в

центральную часть моря, а в мае преобразуется в диполь. В июне диполь смещается на запад, антициклоническая его часть значительно увеличивается, а циклоническая – уменьшается. К середине августа активность данных вихрей угасает, величины скоростей составляют менее 1,5 см/с. В это время в центральной части моря формируется новое циклоническое образование с максимальными скоростями около 6 см/с в сентябре. В дальнейшем данный циклон, имеющий максимальный размер около 180 км, ослабевает и к декабрю, когда начинается формирование циклона в восточной части моря, его размер и скорости вдвое меньше максимальных. Сформированные в центральной и восточной частях моря вихри, трансформируясь и ослабевая, постепенно смещаются на запад. Результатом такого движения является наличие в западной части моря не одного, а нескольких мезомасштабных вихрей преимущественно циклонического направления завихренности.

Летом усиливается деятельность Батумского антициклона, скорости внутри которого на данном горизонте в течение зимы не превышают 3 см/с. В апреле – мае они увеличиваются до 4 см/с, а к июлю достигают 5 см/с. Заметим, что в июне – июле к юго-западу от основного вихря Батумского антициклона формируется меньший по масштабу циклон, который исчезает к сентябрю.

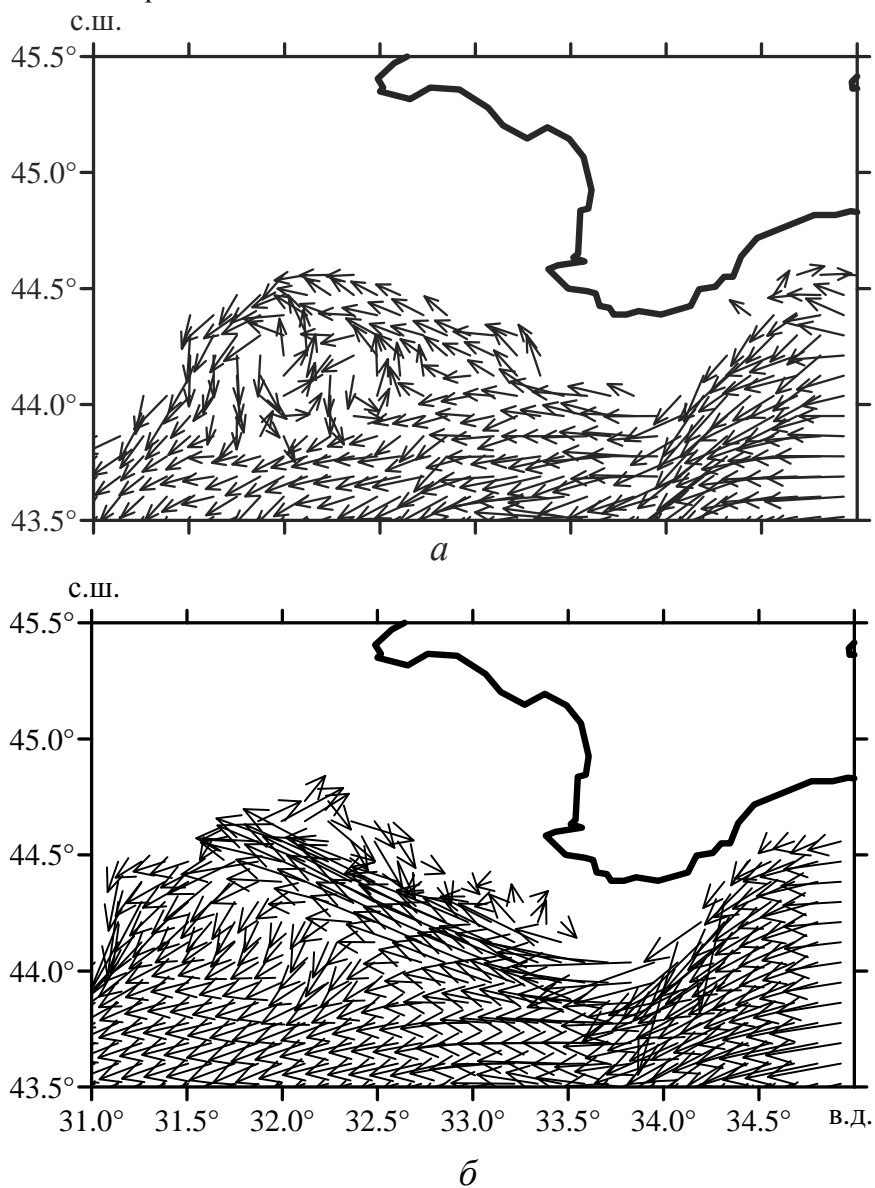
С марта по июль у Кавказского побережья в районе Геленджика существует течение со скоростями от 2,5 до 4 см/с, направленное на юго-восток. Указанное течение (рис. 9) имеет протяженность около 70 км с северо-запада на юго-восток и ширину от 10 до 20 км.



Р и с. 9. Течение на горизонте 350 м 15 июня в районе Геленджика

На горизонтах 500 и 1000 м в январе в поле течений выделяются несколько особенностей. В центральной части моря наблюдается достаточно развитый восточный круговорот. Западный круговорот в качестве единого целого отсутствует, на его месте располагаются три циклонических образования. Батумский антициклон также состоит из двух-трех антициклонических

вихрей. На этих глубинах необходимо отметить наличие двух циклонов (рис. 10, *а*) в той области моря, где на более высоких горизонтах находится Севастопольский антициклон (рис. 10, *б*). Динамика моря в данном районе ранее уже изучалась в ряде работ, в частности в [12]. Однако эффект смены знака завихренности на глубинах 400 – 550 м (в зависимости от сезона) обнаруживается впервые.



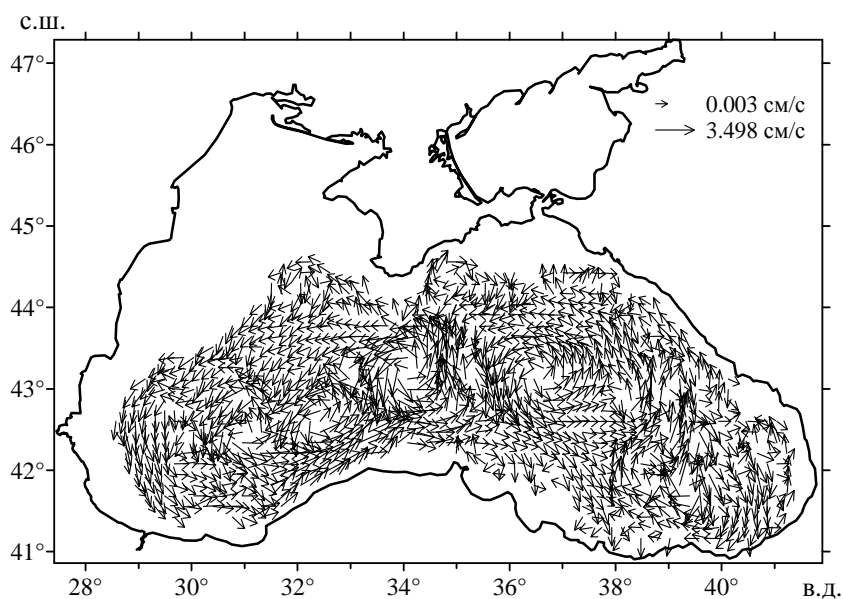
Р и с. 10. Циклонические вихри в январе на горизонте 1000 м (*а*) и антициклонические вихри в январе на горизонте 350 м (*б*) к юго-западу от Севастополя

В феврале – марте вихрь восточного циклонического круговорота смещается к центру моря. Батумский антициклон несколько ослабевает и представляет собой двухъядерное антициклоническое образование. В районе к западу от Севастополя находятся один-два циклона и антициклон меньшей мощности.

В апреле циклон в центре моря эволюционирует, образуя систему из двух циклонов. Батумский антициклон и восточный круговорот слабы. К западу от Севастополя находится циклонический вихрь. В мае восточный круговорот представляет собой совокупность двух антициклонов и одного циклона. Западный круговорот состоит из двух циклонических образований.

В июне – июле восточный круговорот на данной глубине объединяется с Батумским антициклоном и представляет собой систему пяти антициклонических образований. В западной части моря находятся циклон и антициклон, переместившийся сюда из центрального района моря. В юго-западной области сформирован циклонический вихрь.

К августу образуется единый восточный циклонический круговорот. В начале осени в центре моря находится циклон с горизонтальным масштабом около 100 км (рис. 11), к декабрю его размер уменьшается вдвое.



Р и с. 11. Поле течений на горизонте 1000 м в сентябре

В зимнее время активность восточного круговорота усиливается, а Батумского антициклона – снижается, максимальные скорости внутри него не выше 2 см/с. Скорости течений на горизонте 1000 м не превышают 3 – 3,5 см/с.

Заключение. Модельные климатические поля значительно более полно описывают термохалинную структуру вод Черного моря в сравнении с исходными архивными климатическими полями температуры и солености. Получена непрерывная по времени и пространству (с точностью до шага сетки) картина изменчивости основных гидрофизических полей ниже 300 м с высоким пространственным разрешением.

В климатическом поле температуры на глубинах от 350 до 1000 м обнаружены мезомасштабные особенности (более низкая относительно окружающих вод температура) в районах Геленджика (с января по май), Сочи

(с января по август) и к западу от Севастополя (весь год на горизонтах 350 и 500 м и в зимне-весенний период на глубине 1000 м). К юго-востоку от Крыма на горизонте 1000 м в феврале и марте находится область теплой воды, а с августа по ноябрь значения температуры здесь ниже фоновых. Батумский антициклон в течение года представлен набором нескольких отдельных вихревых образований (преимущественно холодных), осенью неоднородности поля температуры в этом районе проявляются ниже 400 м.

Так как ниже сезонного термоклина температура в Черном море увеличивается с глубиной, то на этих глубинах в областях с разным знаком завихренности наблюдается следующая структура поля температуры. По сравнению с окружающими водами в антициклонических вихрях формируются области более холодной, в циклонических – более теплой воды.

В поле течений в слое 350 – 1000 м получены следующие особенности. На глубинах ниже 500 м в поле течений наблюдается зона циклонического вращения вод к западу от Севастополя. На более высоких горизонтах здесь располагается Севастопольский антициклон. Смена знака вращения происходит на горизонтах 400 – 550 м.

В западной и восточной частях моря на более высоких горизонтах преобладают циклонические круговороты, ниже 300 м они преобразуются в вихри более мелкого масштаба. В течение года их пространственная структура заметно эволюционирует, величины скоростей здесь на порядок ниже, чем на поверхности.

У Кавказского побережья в районе Геленджика в модельном климатическом поле скоростей на глубине 350 м обнаружено течение со скоростями от 2,5 до 4 см/с, направленное вдоль побережья на юго-восток. Течение имеет длину около 70 км, ширину от 10 до 20 км и существует с марта по июль.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Korotaev G.K., Demyshev S.G., Knysh V.V. Three-dimensional climate of the Black Sea // Black Sea Ecosystem Processes and Forecasting. – Operational Workshop and Project Evaluation Meeting. – METU, IMS, Erdemli, 2000. – P. 1 – 10.
2. Knysh V.V., Demyshev S.G., Korotaev G.K., Sarkisyan A.S. Four-dimensional climate of seasonal Black Sea circulation // Rus. J. Numer. Anal. Math. Model. – 2001. – 16, №5. – P. 409 – 426.
3. Демьшев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке C // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М.: ИВМ РАН, 1992. – С. 163 – 231.
4. Демьшев С.Г., Иванов В.А., Маркова Н.В. и др. Построение поля течений в Черном море на основе вихререзающей модели с ассимиляцией климатических полей температуры и солености // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2007. – Вып. 15. – С. 215 – 226.
5. Staneva J.V., Stanev E.V. Oceanic response to atmospheric forcing derived from different climatic data sets. Intercomparison study for the Black sea // Oceanologia. – 1998. – 21(3). – P. 383 – 417.
6. Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К. Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихререзающей модели циркуляции Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – №1. – С. 52 – 68.
7. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.IV. Черное море. Вып.1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеиздат, 1991. – С. 103 – 262.

8. *Pacanowski R.C., Philander S.G.H.* Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans // *J. Phys. Oceanogr.* – 1981.– 11, №11. – P. 1443 – 1451.
9. *Демьшев С.Г., Кныш В.В., Коротаяев Г.К.* Моделирование сезонной изменчивости температурного режима верхнего деятельного слоя Черного моря // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2004. – 40, №2. – С. 259 – 270.
10. *Белокопытов В.Н.* Термохалинная и гидролого-акустическая структура вод Черного моря // Дис. ... канд. геогр. наук. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – 160 с.
11. *Демьшев С. Г., Кныш В. В., Коротаяев Г. К.* Результаты расчета адаптированных полей Черного моря на основе ассимиляции в модели данных по климатической температуре и солёности // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2006.– 42, №5. – С. 604 – 617.
12. *Иванов В.А., Коснырев В.К., Михайлова Э.Н. и др.* Численное моделирование апвеллингов на северо-западном шельфе и в районе материкового склона в Черном море // *Диагноз состояния среды прибрежных и шельфовых зон Черного моря.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 1996. – С. 17 – 30.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 19.05.07
После доработки 25.10.07

ABSTRACT Model climatic fields of temperature, salinity and currents in the 350 – 1000 m layer are analyzed. The following features of the fields are obtained: cold water is observed in the anticyclonic vorticity areas and warm water – in the cyclonic vorticity ones. Such temperature effect can be explained by temperature increase with depth below the main pycnocline. In the region of Sevastopol anticyclone, below 500 m, a cyclonic rotation is observed. Near Gelendzhik (the Caucasian coast) on the 350 m depth, a narrow stream current existing in March – July is found.