

Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана

УДК 551.465

В.Л. Дорофеев, В.В. Кныш, Г.К. Коротаев

Оценка долговременной изменчивости гидрофизических характеристик Черного моря на основе ассимиляции климатических гидрологических и альтиметрических полей

Для оценки долговременной изменчивости термохалинных и динамических характеристик Черного моря использовались три версии климатических полей — восстановленные в модели по старым (1903 – 1982 гг.), новым (1903 – 2003 гг.) гидрологическим климатическим массивам температуры и солёности и по спутниковым альтиметрическим измерениям. Анализ альтиметрических климатических полей подтвердил выявленные ранее по новым и старым массивам различия в сезонной изменчивости интегральных характеристик температуры и солёности, а также структур гидрофизических полей моря.

Выявлено, что в зимне-весенний сезон реконструированные по новым и альтиметрическим массивам термохалинные поля характеризуются небольшим подъемом галоклина (пикноклина) и верхней границы холодного промежуточного слоя. В альтиметрических поверхностных геострофических течениях во все сезоны года присутствует большее количество мезомасштабных вихрей разного знака вращения. Во все сезоны года Основное Черноморское течение, восстановленное по данным альтиметрии, характеризуется более узкой струей почти на всем его протяжении. Эта струя особенно интенсивна у берегов Западной Анатолии.

Введение. Изучение долговременных изменений термохалинной структуры и динамических характеристик вод Черного моря в последнее время становится все более актуальным. Это связано с наблюдаемыми глобальными изменениями климата системы атмосфера — океан и необходимостью анализа регионального отклика на эти процессы.

Ранее в работе [1] проведено сопоставление термохалинных и динамических характеристик моря, восстановленных (путем ассимиляции в модели) по двум климатическим массивам температуры и солёности: старому [2] ($T_{\text{кл}}^c$, $S_{\text{кл}}^c$; 1903 – 1982 гг.) и новому, подготовленному В.Н. Белокопытовым [3] ($T_{\text{кл}}^n$, $S_{\text{кл}}^n$; 1903 – 2003 гг.). В этой работе было показано, что климатические массивы, построенные по наблюдениям за длительные, но различные периоды времени, содержат ценную информацию о характере многолетних тенденций в изменениях термохалинных и динамических характеристик моря. Были выявлены и проанализированы полученные по старым и новым массивам различия в сезонном ходе интегральных характеристик температуры, солёности, горизонтальных и вертикальных течений на различных горизонтах по глубине, а также в эволюции структур гидрофизических полей моря.

Для дальнейшей оценки многолетней трансформации структур гидрофизических полей представляется естественным провести анализ климатических массивов, рассчитанных посредством осреднения полей температуры, солености и скорости течений, полученных на базе ассимиляции в модели общей циркуляции Черного моря данных спутниковых альтиметрических измерений [4]. Такие массивы обладают следующей важной особенностью: они получены по новым не зависящим от гидрологических измерений альтиметрическим данным, которые являются регулярными по времени и имеют высокое пространственное разрешение вдоль треков [4].

В настоящей работе проведено сопоставление различных характеристик, рассчитанных с использованием старых и новых климатических полей температуры и солености, а также альтиметрических климатических массивов температуры, солености, уровня моря и скорости течения.

Выявлено, что в зимне-весенний сезон реконструированные по новым и альтиметрическим массивам термохалинные поля характеризуются небольшим подъемом галоклина (пикноклина) и верхней границы холодного промежуточного слоя (ХПС). Альтиметрические климатические массивы поверхностных геострофических течений (топография уровня моря) во все сезоны года характеризуются присутствием большего количества мезомасштабных вихрей разного знака вращения. Основное Черноморское течение (ОЧТ), восстановленное по данным альтиметрии, во все сезоны года представлено более узкой струей почти на всем его протяжении.

Характеристика климатических массивов гидрофизических полей.

Климатические поля гидрофизических параметров (температура, соленость, уровень моря, скорость течений), на основе которых выполнялось сопоставление различных характеристик моря, были реконструированы посредством ассимиляции в численной модели упомянутых выше старых и новых гидрологических массивов. Используемые данные наблюдений, методика расчета этих массивов и их описание приведены в работах [2, 3]. Здесь отметим лишь следующее.

Среднемесячные значения температуры $T_{\text{кл}}$ и солености $S_{\text{кл}}$ старого климатического массива получены в узлах сетки с шагом 40' по широте и 60' по долготе на 11 стандартных горизонтах от поверхности до дна. Как показали численные расчеты [5], качество термохалинных полей из [2] глубже 450 м оказалось неудовлетворительным. Поэтому при реконструкции сезонных климатических полей течений, выполненной в работе [1], глубже 450 м использовались средние по горизонтам климатические среднегодовые значения температуры и солености.

Новая версия климатического термохалинного массива Черного моря создана на основе более полной базы данных, включая результаты экспедиционных работ за последние 20 лет. Общее количество данных в два раза превышает используемый в [2] массив, существенно увеличилось количество данных, полученных на акватории экономической зоны Турции. Результирующий массив был рассчитан в узлах сетки с разрешением 20' по широте и 30' по долготе на 19 стандартных горизонтах. На горизонтах от 0 до 300 м поля $T_{\text{кл}}$, $S_{\text{кл}}$ являются среднемесячными, глубже они представлены среднего-

довыми значениями. Как старые, так и новые массивы $T_{\text{кл}}$, $S_{\text{кл}}$ были проинтерполированы на сетку модели (8' по широте и 11' по долготе на 44 горизонтах). По среднемесячным данным были рассчитаны коэффициенты Фурье и восстановлены на каждые сутки года поля $T_{\text{кл}}$, $S_{\text{кл}}$ пригодные для ассимиляции в модели.

Численные расчеты по воспроизведению сезонной циркуляции Черного моря с использованием отмеченных выше климатических массивов проводились по трехмерной модели, основанной на полных уравнениях движения и переноса — диффузии тепла и соли [6] и учитывающей колебания свободной поверхности моря [1]. Особенности численной модели, граничные условия на поверхности моря и на боковых границах представлены в [7]. Здесь приведем некоторые ее параметры и особенности.

Сеточная область представляла собою боксы с горизонтальными размерами $14,8 \times 14,8$ км. По вертикали расчет температуры, солёности, уровня моря и горизонтальной скорости течений проводился на 44 основных горизонтах: 2,5, 5, 10,..., 30, 40,..., 60, 75,..., 120, 145, 170, 200, 250,..., 700, 800,..., 1900, 1950, 1975, 1985, 1995, 2000 м.

Турбулентный обмен импульсом по горизонтали параметризован в виде бигармонического оператора [1]. Коэффициент турбулентного обмена теплом и солью по горизонтали принимался равным $10^6 \text{ см}^2/\text{с}$. Коэффициенты турбулентного обмена по вертикали вычислялись по формулам Покановского — Филандера [1]. Данные о потоках импульса, суммарном потоке тепла, осадках и испарениях, изменяющихся от месяца к месяцу, взяты из работы [8]. При проведении расчетов учитывалось влияние рек побережья северо-западной части моря, Кавказа и Турции. В устьях рек задавались значения температуры и солёности. Солёность в устьях рек полагалась равной нулю, а температура — равной ее климатическому значению. Годовой ход климатической температуры воды в устьях рек задавался в соответствии с данными работы [9].

Методика ассимиляции климатических массивов $T_{\text{кл}}$, $S_{\text{кл}}$ описана в [5] и здесь не приводится.

Восстановление гидрофизических полей Черного моря с ассимиляцией альтиметрических данных было выполнено ранее за период с 1992 по 2003 гг. [4]. Для этого использовалась та же численная модель течений, что при ассимиляции климатических гидрологических массивов. Отличие заключалось в следующем. Конечно-разностная аппроксимация уравнений модели, с целью корректного описания синоптических процессов в море, выполнена на сетке с горизонтальным шагом, равным 5 км [10] (внутренний радиус деформации Россби в открытой части моря равен 25 км). По вертикали бралось 35 горизонтов: 2,5, 5, 10,..., 30, 40, 50, 62,5,..., 125, 150,..., 200, 250, 300, 400,..., 1200, 1500, 1700, 1800, 1900, 2000 и 2100 м. Использовались поля тангенциального напряжения трения ветра, подготовленные в Морском отделении УкрНИГМИ на каждые 6 ч (1992 – 1998 гг.) и полученные с помощью реанализа (NCEP) (1998 – 2003 гг.). Сведения о суммарном потоке тепла, осадках и испарениях, изменяющихся от месяца к месяцу, взяты из работы [8]. Коэффициент вертикальной турбулентной диффузии зависел от вертикальной координаты и обеспечивал близкую к климатической сезонную изменчивость

ХПС [11]. Соленость в устьях рек рассчитывалась по упрощенным уравнениям диффузии соли с заданием составляющих вектора скорости течений, которые оценивались по данным о расходах рек.

Исходные альтиметрические данные представляли собой аномалии уровня моря вдоль стандартных треков спутников *ERS-1-2*, *TOPEX/Poseidon*, *Jason*, *EnviSat* и *GFO*. Повторяемость циклов для спутников *ERS-1-2* и *EnviSat* составляет 35 сут, для спутников *TOPEX/Poseidon* и *Jason* — 10 сут, а для спутника *GFO* — 17 сут. Алгоритм восстановления динамической топографии поверхности моря по данным альтиметра и ассимиляции альтиметрических данных изложен в работах [4, 12].

Среднемесячные альтиметрические климатические массивы были получены осреднением за 12 лет полей солености ($S_{\text{кл}}^a$), температуры ($T_{\text{кл}}^a$), уровня моря и горизонтальных течений, рассчитанных в результате непрерывной ассимиляции данных альтиметров.

Таким образом, для оценки долговременной изменчивости термохалинных и динамических характеристик Черного моря использовались три версии климатических полей — восстановленные по одной и той же модели по старым [1, 2] и новым [1, 3] гидрологическим климатическим полям температуры и солености (обозначим их СКП и НКП соответственно) и по спутниковым альтиметрическим измерениям (АКП). Кроме этого, в отдельных случаях для анализа использовались непосредственно сами среднемесячные климатические массивы температуры и солености ($T_{\text{кл}}^c$, $S_{\text{кл}}^c$, $T_{\text{кл}}^n$, $S_{\text{кл}}^n$).

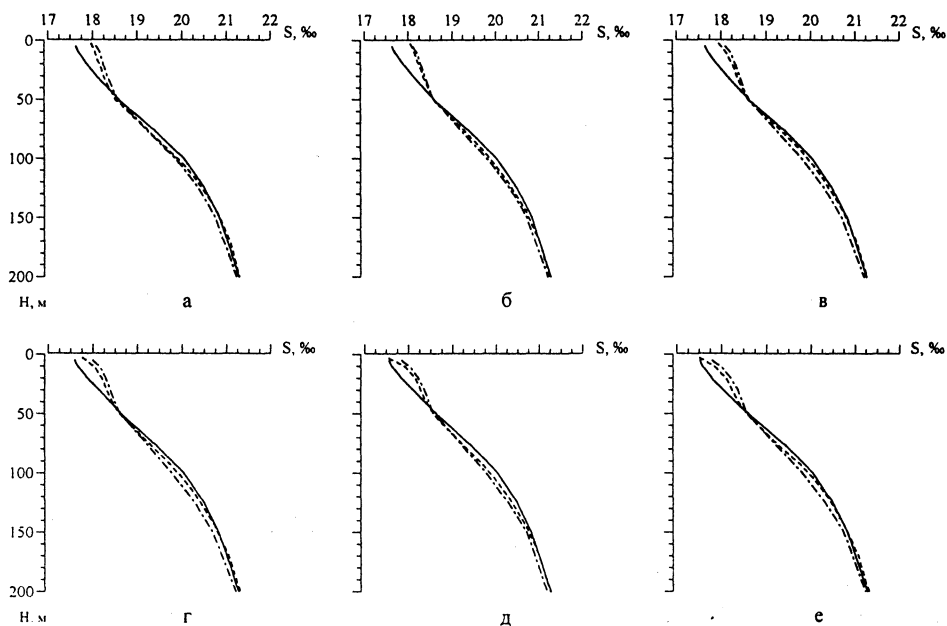
Отметим, что процедуры ассимиляции в модели климатических полей температуры и солености, а также данных по альтиметрическому динамическому уровню отличались между собою. Имелись различия при практическом использовании численной модели. Тем не менее выявление и анализ различий между термохалинными и динамическими характеристиками Черного моря по СКП, НКП и АКП представляют определенный научный интерес. Этому вопросу посвящен следующий раздел статьи.

Результаты сопоставления термохалинных и динамических характеристик моря. Для каждого месяца были построены средние по акватории моря профили солености (рис. 1) и температуры (рис. 2) по данным $S_{\text{кл}}^c$, $T_{\text{кл}}^c$, $S_{\text{кл}}^n$, $T_{\text{кл}}^n$ и $S_{\text{кл}}^a$, $T_{\text{кл}}^a$. Сравнение профилей солености в зимне-весенний период показывает, что выявленный ранее по данным $S_{\text{кл}}^n$ небольшой подъем основного галоклина (пикноклина) виден также и по данным альтиметрических климатических массивов (рис. 1). Причем в январе — мае подъем несколько больше, чем полученный по данным $S_{\text{кл}}^a$. В остальные месяцы этот подъем является весьма незначительным или не наблюдается совсем.

По данным АКП в январе — апреле в слое постоянного галоклина наблюдается подъем профиля температуры (рис. 2, а — г). Приподнятость основного галоклина (пикноклина) и увеличение в нем температуры за последние почти 12 лет можно объяснить отмеченным в работе [13] и подтвержденным в устном сообщении В.Н. Белокопытова усилением завихренности тангенциального напряжения трения ветра в 1990 — 2000 гг.

Представляет интерес сезонная изменчивость средней по акватории моря температуры на различных горизонтах, вычисленной по данным НКП и АКП

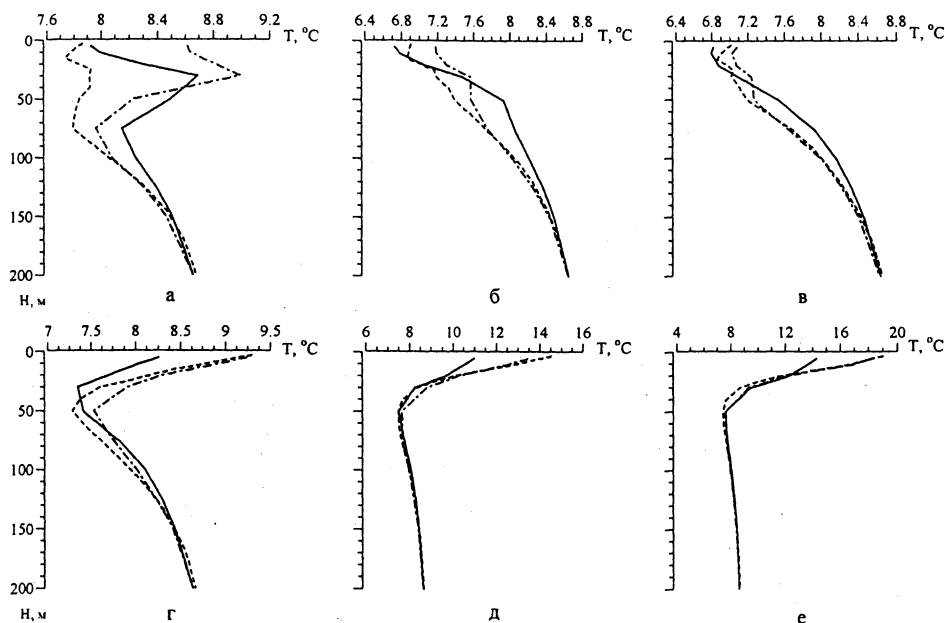
(рис. 3, а, б). На этих рисунках видно, что достижение максимума температуры по альтиметрическим климатическим полям в слое $\sim 20 - 50$ м происходит раньше, чем по новым климатическим полям. В слое $\sim 20 - 120$ м максимумы средней по горизонтам температуры по АКП выше, чем по НКП. Это связано, вероятнее всего, с отмеченной выше особенностью вихря скорости ветра. Максимальные значения средней по горизонтам температуры в слое $\sim 0 - 10$ м по новым климатическим полям существенно выше (на $\sim 4^\circ\text{C}$), чем по АКП. Последнее обусловлено тем, что в модели ассимиляции данных альтиметрических измерений сезонная изменчивость верхнего изотермического слоя моделировалась приближенно.



Р и с. 1. Графики изменения с глубиной средней по акватории моря солёности: а – январь; б – февраль; в – март; г – апрель; д – май; е – июнь (сплошные линии соответствуют альтиметрическим климатическим полям, штриховые — новым гидрологическим, штрихпунктирные — старым гидрологическим)

Минимальные средние по горизонтам значения температуры в слое $0 - 30$ м в зимний сезон по НКП и АКП мало отличаются между собой. Отличия также малы глубже 200 м (рис. 3, б).

В слое $0 - 30$ м средние по горизонтам значения солёности, соответствующие данным АКП, являются значительно меньшими, чем полученные по данным НКП. Последние, как отмечено в [1], оказались меньшими рассчитанных по данным СКП. Заметим, что эти отличия максимальны зимой (рис. 3, в). Вывод о том, что, вероятнее всего, уменьшение средней солёности поверхностного слоя моря связано с тенденцией изменения стока рек сделан в работе [14]. В этой работе отмечается, что в период с 1947 по 2001 гг. суммарный расход рек возрос.



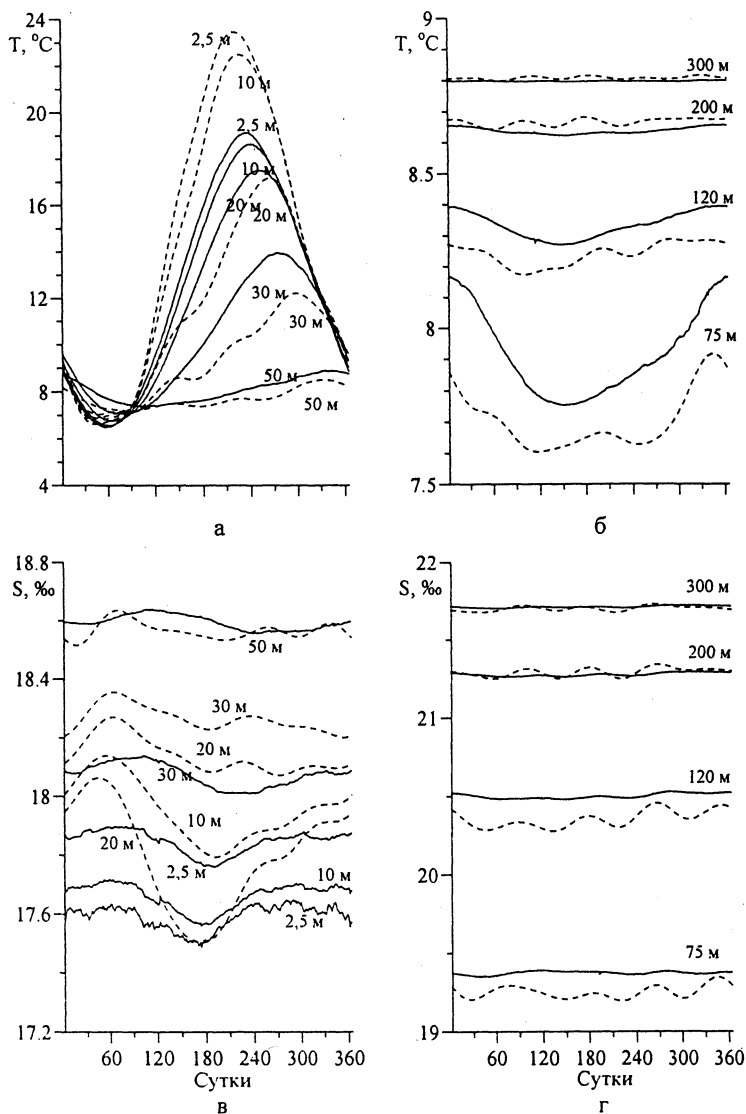
Р и с. 2. Графики изменения с глубиной средней по морю температуры (обозначения такие же, как на рис. 1)

Средняя соленость на горизонтах в слое 75 – 120 м по данным АКП несколько выше, чем по данным НКП. Глубже отличия незначительные (рис. 3, г и рис. 1).

Представление о распределении солености по глубине в слое 0 – 200 м дает рис. 4. Отмеченный выше подъем основного галоклина (пикноклина) в зимне-весенний период (рис. 1), обнаруженный в профилях солености по данным НКП и АКП при сопоставлении их с профилями старых климатических полей, просматривается в распределениях солености на разрезе по 43,7 °с.ш. Изохалина 19,0‰ на картах рис. 4, б, в, д, е располагается выше по сравнению с ее положением на картах рис. 4, а, г.

Минимальная соленость на разрезе по 43,7 °с.ш. получена на поверхности по данным АКП в северо-западном районе, т.е. в области, близкой к устью Дуная. По климатическим гидрологическим данным соленость в этой области — существенно больше. Помимо отмеченного выше, это различие может быть обусловлено также методикой учета влияния рек в численной модели циркуляции с ассимиляцией альтиметрических данных.

Различия в структуре ХПС в обсуждаемых вариантах климатических массивов температуры видны на рис. 5. Распределение температуры зимой на разрезе вдоль 43,7 °с.ш. (рис. 5, а, б) обусловлено зимней конвекцией и адвекцией холодных вод из мелководной северо-западной области моря в другие его районы [15]. Отметим, что положение изотермы 8 °C на карте, построенной по альтиметрическому климатическому полю температуры, мало отличается от положения этой же изотермы на карте, соответствующей новому климатическому полю температуры.

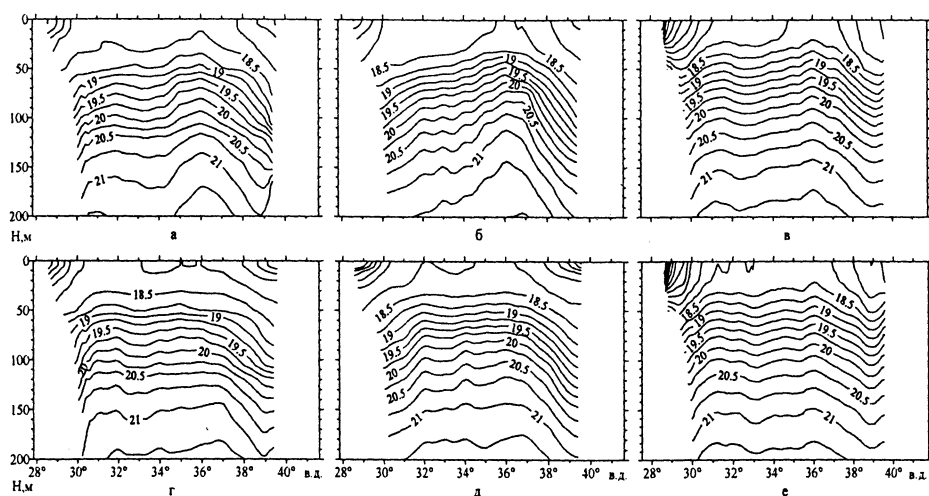


Р и с. 3. Годовой ход средних по акватории моря температуры (а, б) и солёности (в, г) на различных горизонтах: сплошные линии — по альтиметрическим климатическим данным; штриховые — по новым климатическим данным

Весной картина другая. Обнаруженный по данным НКП подъем к поверхности верхней границы ХПС (изотерма 8°C) хорошо виден на рис. 5, в, г. Важно, что по данным АКП он также четко выражен (рис. 5, д). Летом и осенью эта особенность в положении верхней границы ХПС на рассматриваемых разрезах температуры не наблюдается.

На рис. 5, д видно также, что весной холодозапас ХПС, восстановленного по альтиметрии, выше, чем полученного по данным СКП и НКП. Вероятная причина поднятия к поверхности верхней границы ХПС и увеличения его

холодозапаса, как отмечено в работе [16], заключается в том, что за последние ~20 лет преобладают годы с умеренным и интенсивным формированием и обновлением холодного промежуточного слоя.



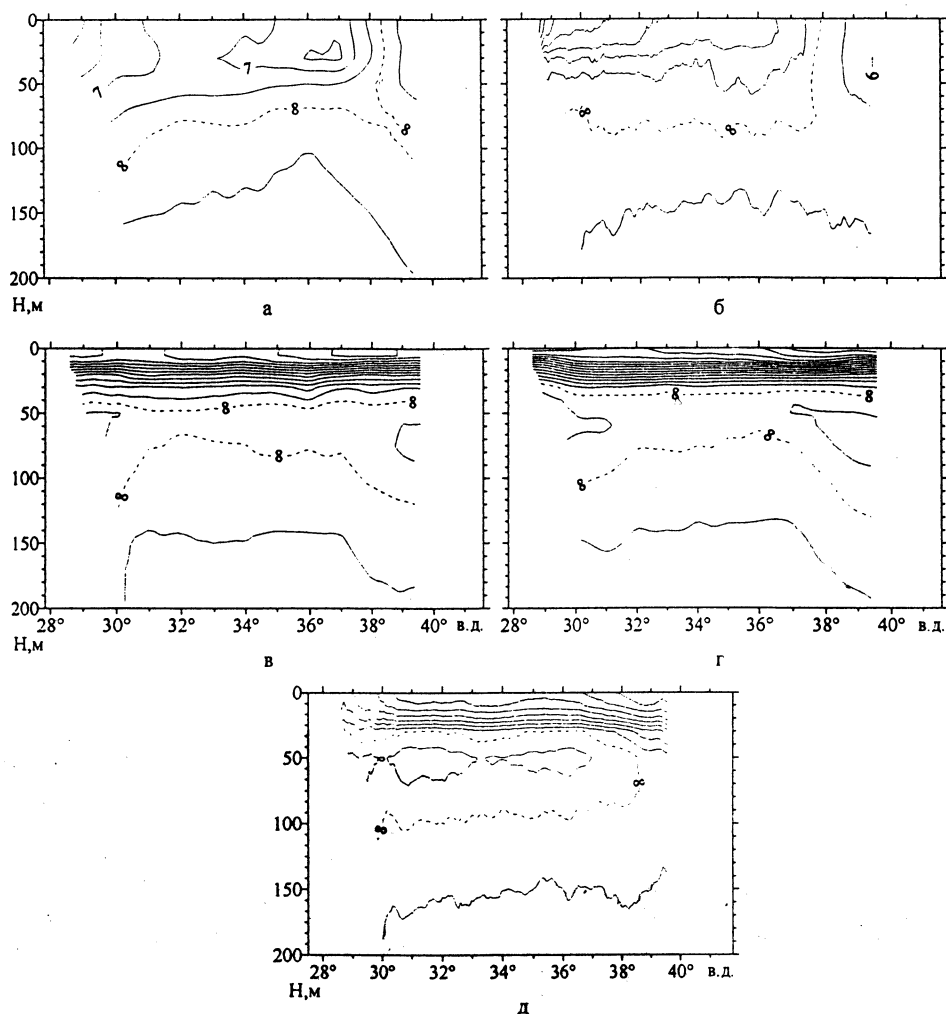
Р и с. 4. Распределение климатической солености (‰) на вертикальном разрезе вдоль 43,7° с. ш. в феврале (а – в) и мае (г – е): а, г — по старым климатическим данным; б, д — по новым; в, е — по альтиметрическим климатическими данным

Нижняя граница ХПС, соответствующая АКП, весной и осенью расположена глубже, чем по данным НКП (рис. 5, з, д). Это видно также на картах распределения температуры в различные сезоны на горизонте 75 м (рис. 6, в, з). В структурах полей температуры, построенных по данным АКП, выделяется Прибосфорский район. Температура воды здесь сравнительно высокая из-за задания в проливе Босфор относительно высокой температуры, характерной для мраморноморской воды. Моделирование пролива Босфор нуждается, по-видимому, в корректировке.

Весьма важную информацию о климатических поверхностных геострофических течениях содержат карты возвышения свободной поверхности, восстановленные по новым климатическим полям температуры и солености и по спутниковым альтиметрическим измерениям (рис. 7). Как и следовало ожидать, в силу большего промежутка осреднения поля уровня моря по данным НКП во все сезоны являются более гладкими (рис. 7, а, в, д, ж). На картах уровня, построенных по данным АКП, хорошо видна синоптическая изменчивость. Она выражается в присутствии в структуре этих полей уровня большего количества вихревых образований, чем на картах, соответствующих данным НКП. Все же в полях возвышений свободной поверхности в обоих вариантах присутствуют следующие характерные для Черного моря элементы циркуляции.

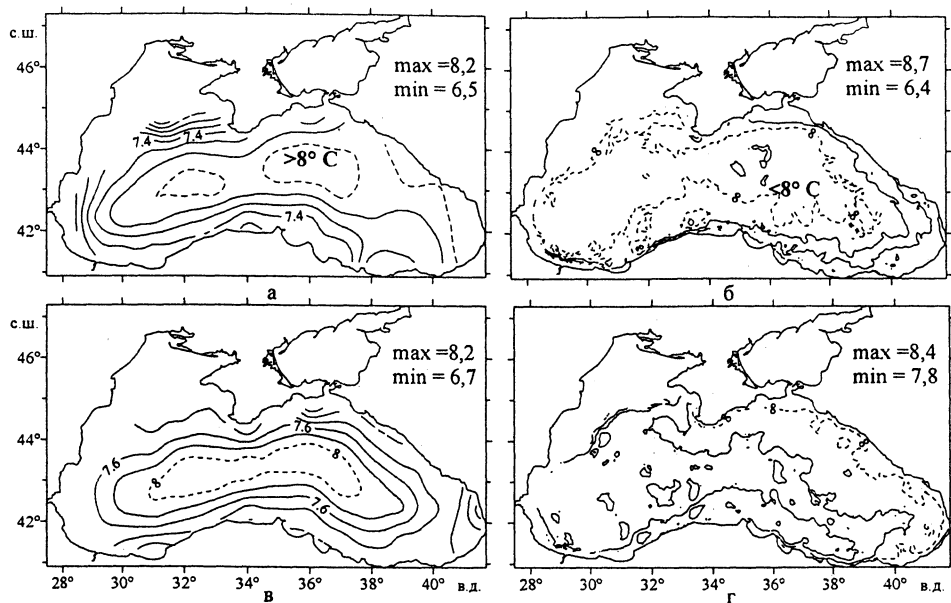
Во-первых, это — Основное Черноморское течение. Реконструированное по данным альтиметрии, оно характеризуется во все сезоны года более узкой струей почти на всем его протяжении, исключая западный район моря. Особенно выделяется узкая струя ОЧТ у Западной Анатолии, где наблюдается

весьма крутой береговой склон. В западном районе струя ОЧТ по ширине почти такая же, как и по данным НКП.



Р и с. 5. Распределение климатической температуры (°C) на вертикальном разрезе вдоль 43,7° ш. в феврале (а, б) и мае (в – д): а, г — по новым климатическим данным; в — по старым; б, д — по альтиметрическим климатическим данным

Во-вторых, это — западный и восточный циклонические круговороты. В альтиметрических полях возвышений свободной поверхности эти круговороты присутствуют во все сезоны (рис. 7, б, г, е, з). В то же время по данным НКП зимой выделяется только восточный циклонический круговорот, а весной — западный. Летом как по данным НКП, так и по данным АКП оба циклонических круговорота являются как бы автономными (рис. 7, д, е). Этот факт подтверждает то, что в зимнее время геострофическая поверхностная циркуляция моря характеризуется максимальной интенсивностью. Летом течения ослабевают (циклонические круговороты обособливаются).



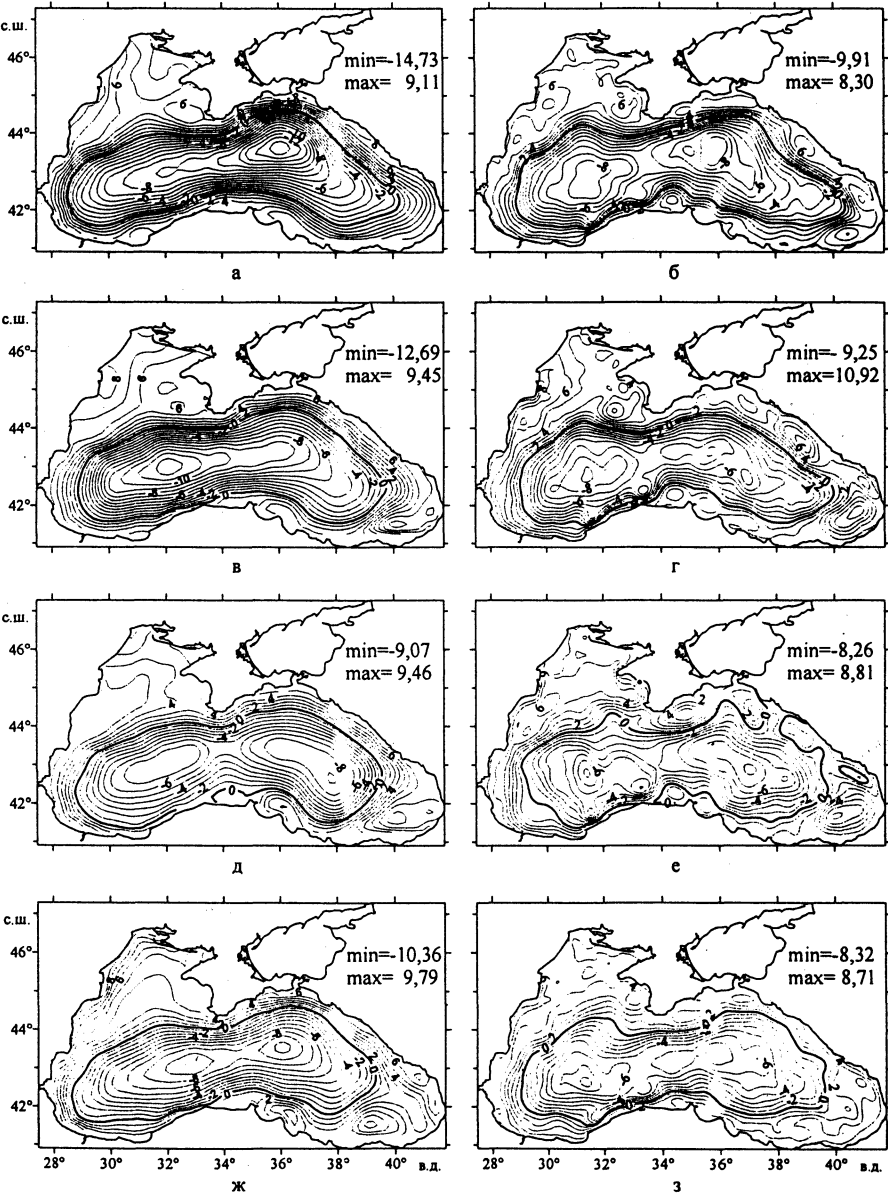
Р и с. 6. Распределение климатической температуры (°C) на горизонте 75 м в феврале (а, б) и мае (в, г): а, в — по новым климатическим данным; б, г — по альтиметрическим климатическим данным

В-третьих, это — характерные для Черного моря антициклонические вихревые образования справа от ОЧТ. На рис. 7 в обоих вариантах климатических полей уровня четко выделяется Батумский антициклон: по данным АКП — во все сезоны, по данным НКП — весной, летом и осенью. Кизилір-макский антициклонический вихрь также виден почти на всех представленных картах уровня (кроме ноября по данным альтиметрии). На альтиметрических картах уровня моря четко видны следующие антициклонические вихри: Севастопольский, Синопский, кавказские (в районах Анапы, Сухуми) и северо-западный (во все сезоны); Калиакрский и кавказский (в зоне Сочи) (зимой, весной и летом). В структуре полей уровня моря по данным НКП некоторые из указанных вихреобразований отсутствуют. Это — Ялтинский, Калиакрский и кавказские (в районах Сочи, Анапы) антициклонические вихри.

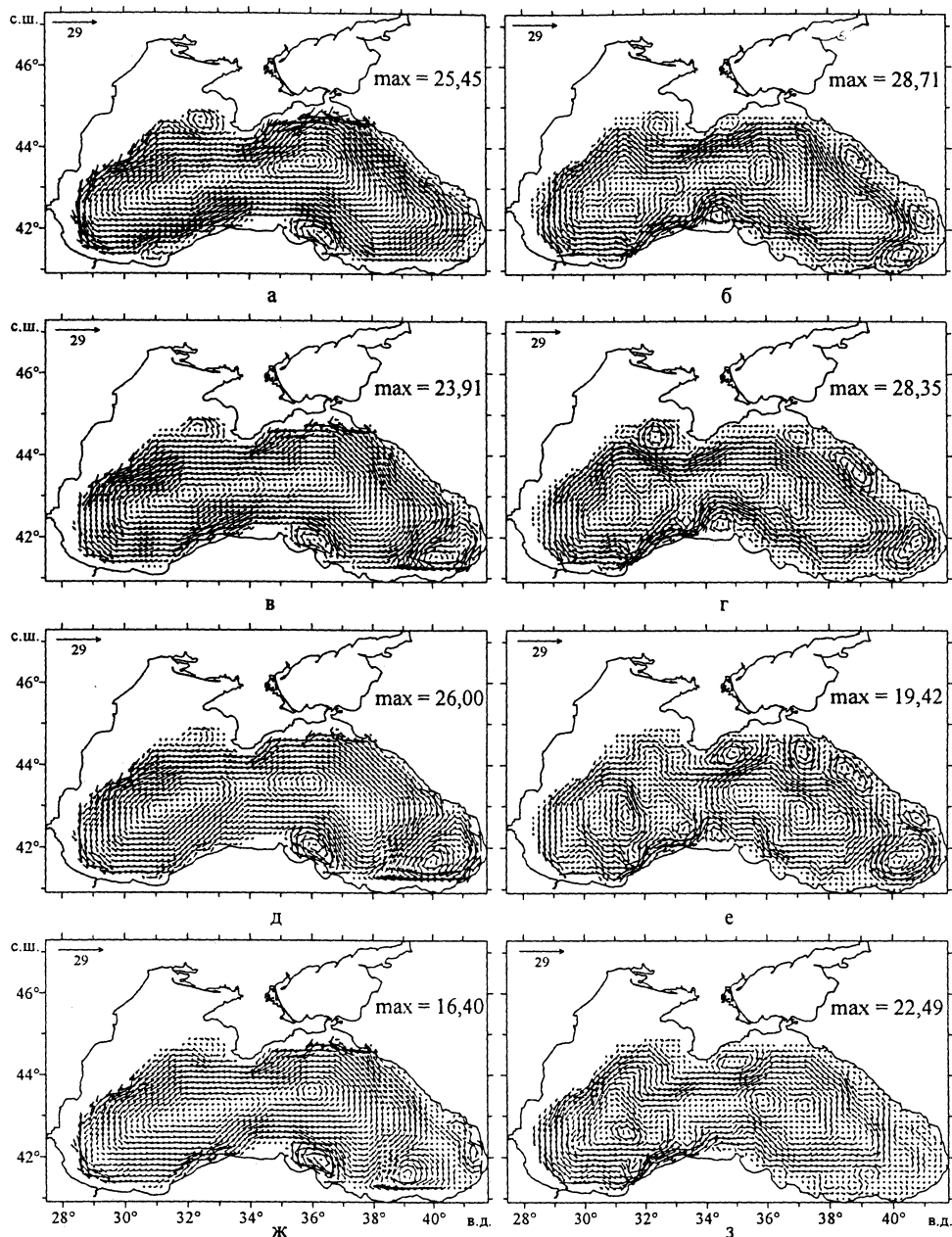
Общий перепад уровня по данным АКП меньше, чем по данным НКП. Однако градиенты уровня в зоне ОЧТ, характеризующие интенсивность геострофических поверхностных течений, по данным АКП больше.

Сравнение горизонтальных и вертикальных течений в годовом цикле изменчивости по всей глубине моря (на 44 и 35 горизонтах по НКП и АКП соответственно) представляет собой отдельную задачу. Представим здесь поля течений для обоих вариантов климатических массивов, характерные для основного галоклина (пикноклина) моря (рис.8). На этом рисунке видно, что во все сезоны в полях течений, восстановленных по альтиметрии, присутствует большее количество циклонических и антициклонических вихреобразований. Это объясняется более высоким горизонтальным разрешением, принятым в модели ассимиляции спутниковых альтиметрических данных, а также большим сглаживанием НКП. Статистика периферийных антициклонических си-

ноптических вихрей Черного моря и циклонический перенос антициклонической завихренности вдоль побережья описаны в [17] по результатам ассимиляции альтиметрических измерений с ИСЗ в течение семи лет в простейшей полутораслойной модели. В обсуждаемых климатических альтиметрических полях течений (рис. 8, б, г, е, з) хорошо прослеживаются цепочки антициклонических вихрей вдоль Анатолийского и Кавказского побережий. Отметим, что на картах уровня некоторые из них не проявились.



Р и с. 7. Топография климатического уровня Черного моря (см) в феврале (а, б), мае (в, г), августе (д, е) и ноябре (ж, з): а, в, д, ж — по новым климатическим данным; б, г, е, з — по альтиметрическим климатическим данным



Р и с. 8. Климатические течения (см/с) Черного моря на глубинах 105 м (а, в, д, ж) и 100 м (б, г, е, з) в феврале (а, б), мае (в, г), августе (д, е) и ноябре (ж, з): а, в, д, ж — по новым климатическим данным; б, г, е, з — по альтиметрическим климатическим данным

Максимальные значения модуля вектора скорости альтиметрических течений зимой, весной и осенью больше, чем аналогичные значения, полученные по новым климатическим полям температуры и солености. В обоих вариантах расчетов летом на горизонтах 105 и 100 м интенсивность течений

меньше, чем зимой (рис. 8, б, д, е). Как следствие, западный и восточный циклонические круговороты представляют собой обособленные образования. При этом число вихрей разных знаков вращения летом и осенью по данным АКП увеличивается (рис. 8, е, з). Рис. 8 свидетельствует также о том, что в основном галоклине по данным АКП интенсивность циркуляции в ОЧТ выше, а струя ОЧТ уже, чем по данным НКП.

Отметим, что восстановление течений по данным альтиметрии было выполнено при задании на поверхности моря «реальных» полей составляющих касательного напряжения трения ветра. При реконструкции течений по гидрологическим климатическим данным использовались климатические сезонно меняющиеся поля касательного напряжения трения ветра, подготовленные в [8].

Сравнительный анализ сезонной изменчивости полей моря по данным НКП и АКП следует считать предварительным, поскольку климатические альтиметрические поля получены по относительно малому временному ряду. Для получения более достоверных результатов сравнения обсуждаемых климатических массивов временной ряд гидрофизических полей, восстановленных по альтиметрическим измерениям с ИСЗ, необходимо пополнять.

Выводы. Анализ альтиметрических климатических полей подтвердил выявленные ранее по старым и новым массивам (см. [1]) различия в сезонной изменчивости интегральных характеристик температуры и солёности, а также структур гидрофизических полей моря.

По данным АКП в первом полугодии в профилях солёности наблюдается небольшой подъём основного галоклина (пикноклина). Вероятная причина этого явления — увеличение в 1990 – 2000 гг. завихренности ветра над акваторией моря [13].

В слое 0 – 30 м средние по горизонтам значения солёности, соответствующие данным АКП, являются значительно меньшими, чем полученные по данным НКП. Особенно это заметно в зимний период. Это может быть следствием положительного тренда в изменении величин стока рек за ~ 55 лет (1947 – 2001 гг.) [14].

Обнаруженный весной по данным НКП подъём к поверхности верхней границы ХПС (изотерма 8 °C) хорошо виден также по данным АКП. В этот период холодозапас ХПС, восстановленного по альтиметрии, выше, чем полученного по данным СКП и НКП. Вероятная причина поднятия к поверхности верхней границы ХПС и увеличения холодозаписа ХПС состоит в том, что за последние ~20 лет превалируют годы с умеренным и интенсивным формированием и обновлением холодного промежуточного слоя [16].

В отличие от НКП в альтиметрических полях возвышений свободной поверхности Основное Черноморское течение характеризуется во все сезоны года более узкой струей. Эта струя особенно интенсивна у берегов Западной Анатолии. Западный и восточный циклонические круговороты присутствуют во все сезоны.

В зимнее время геострофическая поверхностная циркуляция характеризуется максимальной интенсивностью. Летом течения ослабевают (циклонические круговороты обособливаются).

Общий перепад уровня по данным АКП меньше, чем по данным НКП. Однако градиенты уровня в зоне ОЧТ, характеризующие интенсивность геострофических поверхностных течений, по данным АКП больше.

Во все сезоны в полях течений, восстановленных по альтиметрии, присутствует большее количество циклонических и антициклонических вихреобразований. Это объясняется более высоким горизонтальным разрешением, принятым в модели ассимиляции спутниковых альтиметрических данных, и заданием на поверхности моря более реальных полей составляющих касательного напряжения трения ветра.

В климатических альтиметрических полях течений хорошо прослеживаются цепочки антициклонических вихрей вдоль Анатолийского и Кавказского побережий. Количество вихрей разных знаков вращения летом и осенью по данным АКП увеличивается. В основном галоклине по данным АКП интенсивность циркуляции в ОЧТ выше, а струя ОЧТ уже, чем по данным НКП.

С целью получения более достоверных результатов сравнения обсуждаемых климатических массивов временной ряд гидрофизических полей, восстановленных по альтиметрическим измерениям с ИСЗ, необходимо пополнять.

Авторы выражают благодарность В.Н. Белокопытову за предоставленную информацию о завихренности ветра над акваторией моря и А.Б. Полонскому за конструктивные замечания по статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кныш В.В., Коротаев Г.К., Демьшев С.Г., Белокопытов В.Н. Долговременные изменения термохалинных и динамических характеристик Черного моря по климатическим данным температуры и солености и их ассимиляции в модели // Морской гидрофизический журнал. — 2005. — № 3. — С. 11 – 30.
2. Альтман Э.Н., Гертман И.Ф., Голубева З.А. Климатические поля солености и температуры воды Черного моря. — Севастополь: СО ГОИН, 1987. — 108 с.
3. Белокопытов В.Н. Термохалинная и гидролого-акустическая структура вод Черного моря. — Дис.... канд. геогр. наук. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. — 160 с.
4. Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К. Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихреразрешающей модели циркуляции Черного моря // Морской гидрофизический журнал. — 2004. — № 1. — С. 52 – 68.
5. Кныш В.В., Демьшев С.Г., Коротаев Г.К. Методика реконструкции климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе ассимиляции гидрологических данных в модели // Там же. — 2002. — № 2. — С. 36 – 52.
6. 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.
7. Демьшев С.Г., Кныш В.В., Коротаев Г.К. Численное моделирование сезонной изменчивости гидрофизических полей Черного моря // Морской гидрофизический журнал. — 2002. — № 3. — С. 12 – 25.
8. Staneva J.V., Stanev E.V. Oceanic response to atmospheric forcing derived from different climatic data sets. Intercomparison study for the Black Sea // Oceanolog. Acta. — 1998. — 21(3). — P. 383 – 417.
9. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.IV. Черное море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. — С.-Пб.: Гидрометеониздат, 1991. — С. 103 – 262.

10. *Дорофеев В. Л., Демышев С. Г., Коротаев Г. К.* Вихреразрешающая модель циркуляции Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2001. — С. 71 – 82.
11. *Кныш В.В.* Чувствительность поля температуры деятельного слоя к вариациям коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в численной модели циркуляции Черного моря // Там же. — С. 83–95.
12. *Коротаев Г.К., Саенко О.А., Коблински Ч. Дж. и др.* Оценка точности, методика и некоторые результаты усвоения альтиметрических данных TOPEX/POSEIDON в модели общей циркуляции Черного моря // Исследование Земли из космоса. — 1998. — № 3. — С. 3 – 17.
13. *Belokopytov V.* Decadal variability of the Black Sea pycnocline // Scientific and policy challenges towards an effective management of the marine environment. Emphasis on the Black Sea and the Mediterranean regions. Abstracts. — Varna, Bulgaria. — 2003. — P. 277.
14. *Полонский А.Б., Воскресенская Е.Н.* О причине понижения температуры поверхностного слоя Черного моря // Доп. НАН України. — 2003. — № 12. — С. 108 – 111.
15. *Кныш В.В., Инюшина Н.В.* Адвекционный механизм пополнения и обновления холодного промежуточного слоя по результатам численного моделирования течений в Черном море // Морской гидрофизический журнал. — 2004. — № 6. — С. 17 – 31.
16. *Титов В.Б.* Влияние многолетней изменчивости климатических условий на гидрологическую структуру и межгодовое обновление холодного промежуточного слоя в Черном море. — Океанология. — 2003. — 43, № 2. — С. 176 – 184.
17. *Коротаев Г.К., Огуз Т., Никифоров А.А. и др.* Динамика антициклонов в Черном море по данным спутниковых альтиметрических измерений // Исследование Земли из космоса. — 2002. — № 6. — С. 60 – 69.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 15.03.05
После доработки 15.04.05

ABSTRACT To estimate long-term variability of thermohaline and dynamic characteristics of the Black Sea, three versions of climatic fields reconstructed in the model based on old (1903 – 1982) and new (1903–2003) hydrological climatic temperature and salinity fields, and also on satellite altimetry measurements are used. Analysis of altimetry climatic fields confirms the revealed before differences in seasonal variability of temperature and salinity integrated characteristics as well as in the structures of the sea hydrophysical fields.

It is found out that during a winter-spring season the thermohaline fields reconstructed using new climatic data and satellite altimetry are characterized by a small rise of halocline (pycnocline) and the top boundary of cold intermediate layer (CIL). In all the seasons a lot of different-sign mesoscale eddies are present in the altimetry-derived surface geostrophic currents. The Rim current reconstructed based on altimetry data is characterized by a narrower jet along almost its whole length during all the seasons. This jet is especially intensive near the western Anatolian coast.