

П.Н. Лишаев, В.В. Кныш

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь***СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ РЕАНАЛИЗА  
ERA – 40 И MM5 И РЕЗУЛЬТАТОВ ИХ ВЛИЯНИЯ НА ЦИРКУЛЯЦИЮ  
ЧЕРНОГО МОРЯ**

В работе обсуждаются результаты сравнения параметров атмосферы, полученных в реанализе ERA – 40 и MM5. Основное внимание уделяется общему периоду реанализа – 1 января 2000 г. – 31 декабря 2001 г. Отмечаются особенности различий в сезонной и межгодовой изменчивости средних по поверхности моря: суммарного потока тепла, осадков, испарения, модуля вектора касательного напряжения трения ветра и его завихренности. Анализируются результаты сопоставления пространственных распределений параметров атмосферы. Приводятся результаты сравнения особенностей циркуляции Черного моря, восстановленной для общего периода реанализа ERA – 40 и MM5. Оценивается влияние параметров атмосферы на формирование холодного промежуточного слоя моря. На основе выполненных оценок можно заключить, что данные атмосферных параметров реанализа MM5 качественно и количественно являются предпочтительными.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *параметры атмосферы, реанализ ERA – 40 и MM5, сравнение, отличия, атмосферное воздействие, циркуляция моря.*

**Введение.** Наличие реалистичных полей атмосферы при расчетах гидрофизических параметров Черного моря, так же как и доступных данных измерений некоторых из параметров по всему бассейну в настоящее время является актуальной задачей. Ее решение особенно важно для воспроизведения непрерывной эволюции гидрофизических полей моря посредством численной модели течений с ассимиляцией в ней архивных данных измерений (ретроспективный анализ). Результаты реанализа должны отображать изменчивость циркуляции и стратификации вод бассейна на различных временных масштабах: сезонном, междугодовичном и декадном.

Ранее был выполнен реанализ крупномасштабных гидрофизических полей моря в период 1971 – 1993 гг. по различным моделям [1], в котором атмосферный форсинг задавался на основе результатов глобального реанализа ERA – 40 (40-ye European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Re-Analysis) Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) [2]. В последующем следует провести реанализ за 1985 – 2011 гг. с учетом синоптической изменчивости гидрофизических полей Черного моря. Это означает, что в модели необходимо использовать более высокое пространственное разрешение. С таким же разрешением следует подготовить поля атмосферного воздействия и данные измерений температуры (контактные и спутниковые на поверхности моря), солёности и альтиметрического динамического уровня.

Методически следует первоначально восстановить гидрофизические поля моря на период 1985 – 2011 гг. посредством гидродинамического рас-

чета по улучшенной  $z$ -координатной модели, разработанной в МГИ НАН Украины, которую в дальнейшем тексте статьи будем называть «модель МГИ» [1, 3], с атмосферным воздействием без ассимиляции измерений. Достоверность воспроизведения и статистику синоптической изменчивости гидрофизических полей можно оценить, сопоставляя результаты расчета с данными альтиметрического динамического уровня моря. Последующее качественное и количественное уточнение расчетных значений параметров возможно посредством выполнения реанализа с ассимиляцией данных измерений. Поля параметров атмосферы, полученные по реанализу *ERA – 40*, а так же реанализу, выполненному в отделе взаимодействия атмосферы и океана МГИ НАН Украины на основе модели *MM5 (Fifth-Generation Penn State /NCAR Mesoscale Model, NCAR – National Centers of Atmospheric Research)* [4], для отмеченного периода являются наиболее подходящими.

В данной работе приводятся результаты сопоставления параметров атмосферы, полученных в реанализе *ERA – 40* и *MM5*. Основное внимание уделяется общему периоду реанализа – 1 января 2000 г. – 31 декабря 2001 г. Обсуждаются особенности различий в сезонной и межгодовой изменчивости средних по поверхности моря: суммарного потока тепла, осадков, испарения, модуля вектора касательного напряжения трения ветра и его завихренности. Анализируются результаты сопоставления пространственных распределений параметров атмосферы. Отмечаются особенности циркуляции Черного моря, восстановленной по данным реанализа *ERA – 40* и *MM5* для общего периода. Оценивается влияние параметров атмосферы на формирование холодного промежуточного слоя моря.

**Подготовка полей атмосферных параметров.** В модели МГИ используется сетка  $238 \times 132$  точек с шагами  $0,06111^\circ$  вдоль параллели и  $0,04444^\circ$  вдоль меридиана. Атмосферные параметры глобального реанализа *ERA – 40* были рассчитаны на сетке с равномерной дискретностью по пространству  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  и по времени 6 часов [2]. Для периода с 1 января 1958 г. по 30 октября 2002 г. ранее эти параметры были подготовлены с той же временной дискретностью на сетке  $141 \times 88$  точек с шагами  $\Delta x = 0,1^\circ$  по долготе и  $\Delta y = 0,0625^\circ$  по широте [5]. Они включают необходимые для расчетов: температуру поверхности моря, потоки явного и скрытого тепла, потоки коротковолновой и длинноволновой радиации, компоненты вектора напряжения трения ветра (рассчитывались по модулю вектора скорости ветра [6, 7]), испарение, конвективные и крупномасштабные осадки. Аналогичные параметры атмосферы реанализа *MM5* имеются для периода 1 января 2000 г. – 31 декабря 2011 г. с разрешением по времени 1 час на сетке  $80 \times 54$  точек. Шаги по пространству равны:  $\Delta y = 0,150002^\circ$  по широте,  $\Delta x = 0,200001^\circ$  по долготе [4]. Отмеченные выше поля реанализов *ERA – 40* и *MM5* были преобразованы на модельную сетку линейной интерполяцией.

Для сопоставления на рис. 1 и рис. 2 приведены кривые сезонной и межгодовой изменчивости среднего по поверхности моря суммарного потока тепла, полученные по исходным данным реанализов *ERA – 40* и *MM5* (см. рис. 1, *a* и рис. 2, *a* соответственно) и интерполированным на сетку модели данным (рис. 1, *б* и рис. 2, *б*). На этих рисунках представлены графики сезонной и межгодовой изменчивости разностей между исходными и интерполированными значениями (рис. 1, *в* и рис. 2, *в*).

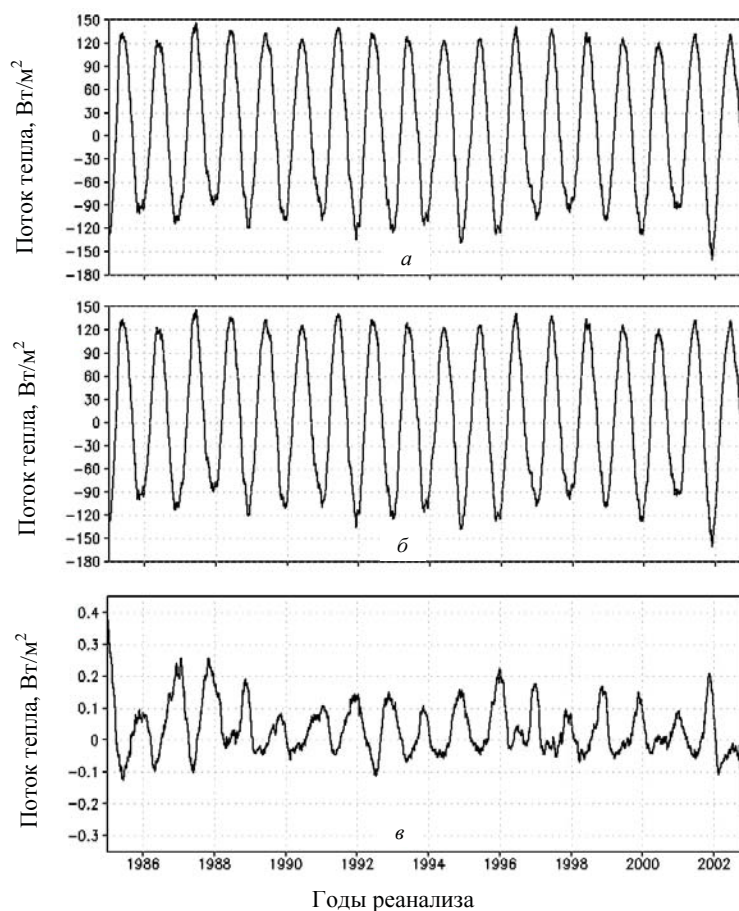


Рис. 1. Сезонная и межгодовая изменчивость среднего по поверхности моря суммарного потока тепла (*a*, *б*) и разностей (*в*): *a* – по исходным данным реанализа ERA – 40; *б* – по интерполированным на сетку модели данным; *в* – между исходными и интерполированными значениями.

Отметим, что кривые, приведенные на рис. 1 и рис. 2, получены скольльзящим осреднением значений суммарного потока тепла. Окно осреднения равнялось 90 суткам, сдвиг – один 6-ти часовой интервал для ERA – 40 и один часовой интервал для MM5. Видно, что качественно и, это важно, количественно кривые (см. рис. 1, *a*, *б* и рис. 2, *a*, *б*) во все годы и сезоны весьма близки между собою. Значение разностей составляет порядка нескольких десятых процента. Повышенные значения разностей, полученные за первые и последние 45 суток, обусловлены выбранным периодом осреднения. Их не следует принимать во внимание.

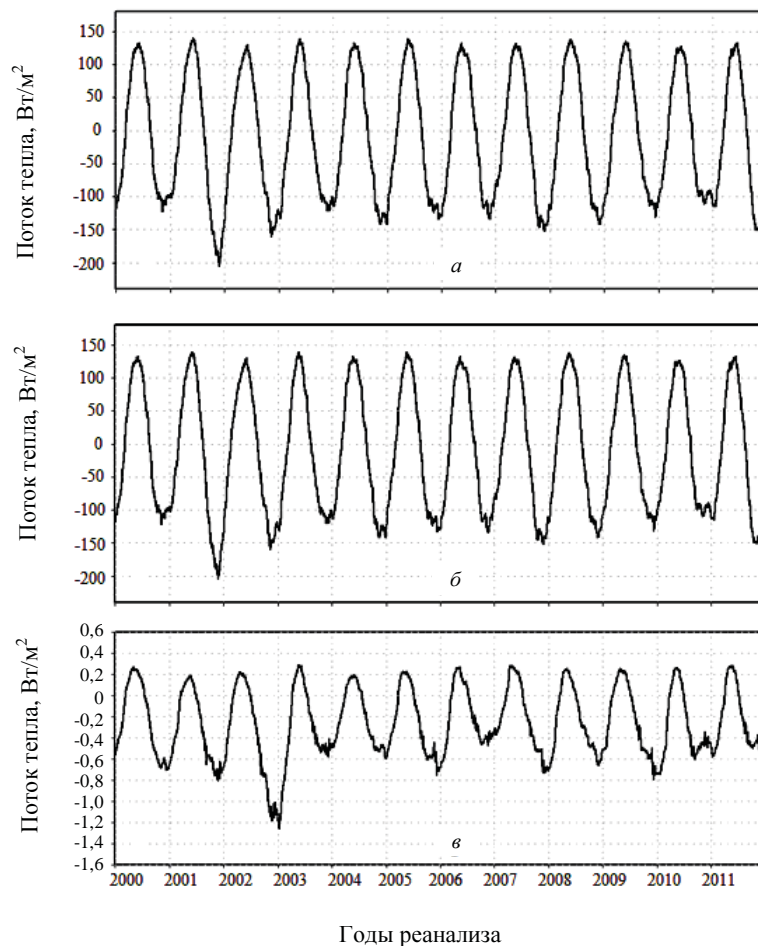


Рис. 2. То же что на рис. 1 по данным реанализа *MM5*.

Такие же кривые сезонной и межгодовой изменчивости и графики разностей между значениями исходных и интерполированных значений построены отдельно для остальных параметров атмосферы реанализов *ERA – 40* и *MM5*, которые будут использоваться для расчетов. Сопоставление кривых свидетельствует о весьма хорошем преобразовании полей с одной сетки на другую.

**Сравнение атмосферных параметров для общего периода реанализов *ERA – 40* и *MM5*.** Для сравнения параметров атмосферы выбран общий период реанализов *ERA – 40* и *MM5* с 1 января 2000 г. по 31 декабря 2001 г. Хотя этот период составляет всего два года, представляет интерес сопоставление интегральных характеристик и пространственных распределений различных параметров атмосферы.

*Сопоставление кривых сезонной и межгодовой изменчивости параметров.* Проанализируем кривые сезонной и межгодовой изменчивости интерполированных на сетку модели МГИ осредненных по поверхности моря атмосферных параметров отмеченных реанализов, полученных скользящим осреднением. Для примера на рис. 3 приведены графики временной измен-

чивости осредненных по морю сглаженных значений суммарного потока тепла, испарения и осадков. Не трудно видеть, что качественно и количественно в периоды поступления тепла изменчивость кривых суммарного потока тепла довольно близка (см. рис. 3, *a*). Количественные отличия между кривыми более значимы в осенне-зимний период, в который происходит отдача тепла морем.

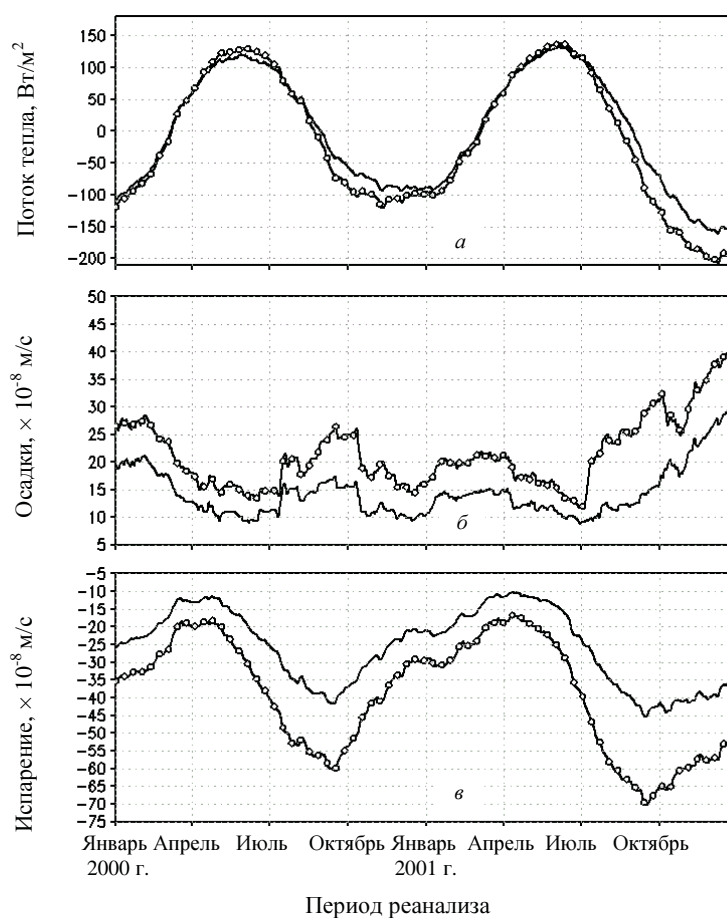


Рис. 3. Сезонная и межгодовая изменчивость суммарного потока тепла (*a*), осадков (*б*) и испарения (*в*) по данным *ERA – 40* (сплошные кривые) и *MM5* (кривые с маркерами).

Осадки, как следует из графиков сезонной и межгодовой изменчивости (см. рис. 3, *б*), больше по данным реанализа *MM5*, причем, разность максимальна в октябре 2001 г. и составляет ~ 60% от значения осадков, полученного по данным реанализа *ERA – 40*. Минимальные осадки в обоих случаях прослеживаются в июне – июле, максимальные – в сентябре – октябре. Испарение больше также по данным реанализа *MM5* (см. рис. 3, *в*). Разность минимальна в апреле – мае, когда минимально в обоих реанализах испарение. Разность максимальна в середине сентября 2001 г. и составляет ~ 50% испарения, полученного по реанализу *ERA – 40*.

Важными параметрами атмосферы, формирующими интенсивность циркуляции вод моря и ее структуру, являются компоненты вектора касательного напряжения трения ветра и его завихренности [8]. Компоненты вектора напряжения трения ветра при подготовке данных атмосферных реанализов рассчитывались по-разному.

Для данных *ERA – 40*

$$\tau_x = \rho_a C_d u_{10} \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2}, \quad \tau_y = \rho_a C_d v_{10} \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2}, \quad (1)$$

коэффициенты трения  $C_d$  заимствованы из работ [6, 7]:

$$C_d = \begin{cases} (0,934 + 0,0788V - 0,0616V^2) \times 10^{-3}, & \text{при } V < 4 \text{ м/с;} \\ 1,2 \times 10^{-3}, & \text{при } 4 \leq V < 11 \text{ м/с;} \\ (0,49 + 0,65V) \times 10^{-3}, & \text{при } V \geq 11 \text{ м/с,} \end{cases} \quad (2)$$

где  $\rho_a$  – плотность воздуха,  $u_{10}, v_{10}$  – компоненты вектора скорости ветра на высоте 10 м, а  $V$  – его модуль.

Для данных *MM5*

$$\tau_x = \rho_a C_d u_{10} / \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2}, \quad \tau_y = \rho_a C_d v_{10} / \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2}, \quad (3)$$

коэффициент трения равен квадрату скорости трения

$$C_d = u_{st}^2, \quad (4)$$

которая рассчитывается в реанализе *MM5*.

Из графиков, приведенных на рис. 4, а, видно, что временная изменчивость интерполированных на сетку модели осредненных по поверхности моря сглаженных значений модуля вектора напряжения трения ветра по данным *ERA – 40* и *MM5* близка. Однако модуль вектора напряжения трения ветра по данным *MM5* выше, чем по данным *ERA – 40*: в случае расчета компонент вектора по формулам (1), (2) – в 1,2 – 1,7 раз, а по формулам (3), (4) – в 2,3 – 2,6 раз. Увеличение модуля вектора скорости ветра по данным реанализа *MM5* на 15 – 25 % приводит к увеличению модуля вектора напряжения трения ветра в 1,7 раз. Примерно 50 % от этого значения приходится на увеличение модуля вектора напряжения трения ветра за счет уточнения расчетов по формулам (3), (4). Особенности сезонной изменчивости состоят в том, что значения среднего модуля вектора максимальны зимой и минимальны летом.

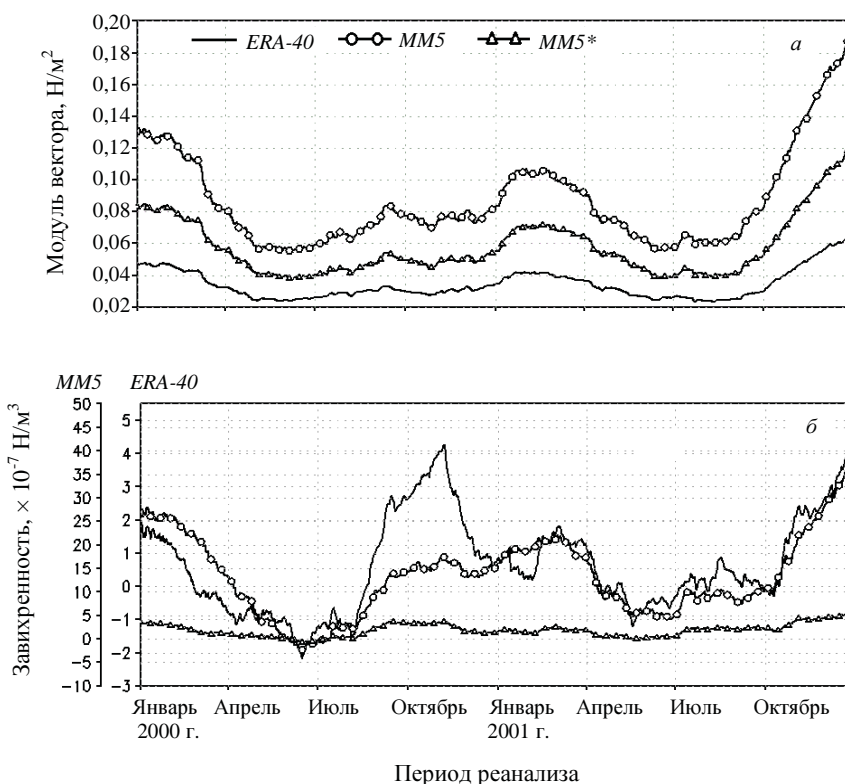


Рис. 4. Сезонная и межгодовая изменчивость модуля вектора касательного напряжения трения ветра (а) и завихренности (б) по данным ERA – 40 (сплошные кривые) и MM5 (кривые с кружками – расчет по формулам (3), (4); кривые с треугольниками – расчет по формулам (1), (2)).

Рис. 4, б свидетельствует о том, что кривые сезонной и межгодовой изменчивости средней по поверхности моря завихренности касательного трения ветра реанализов ERA – 40 и MM5 качественно и количественно различаются между собой. Тенденции межгодовой изменчивости в обоих реанализах качественно одинаковы. Видно также, что кривые, построенные по данным MM5, сглаженные. Значения завихренности по данным MM5 существенно (на порядок и меньше) выше значений, рассчитанных по данным ERA – 40.

*Сопоставление пространственных распределений параметров атмосферы.* Сравнение пространственных распределений параметров атмосферы целесообразно проводить, используя среднемесячные карты, построенные по данным обоих реанализов за 2000 и 2001 гг. Суммарный поток тепла состоит из четырех составляющих – скрытый поток тепла, явный поток тепла, коротковолновая радиация и длинноволновая радиация. Анализируя сезонную изменчивость суммарного потока тепла, следует заметить, что поля реанализа MM5 имеют более высокие амплитуды (летом море сильнее нагревается, зимой – сильнее охлаждается).

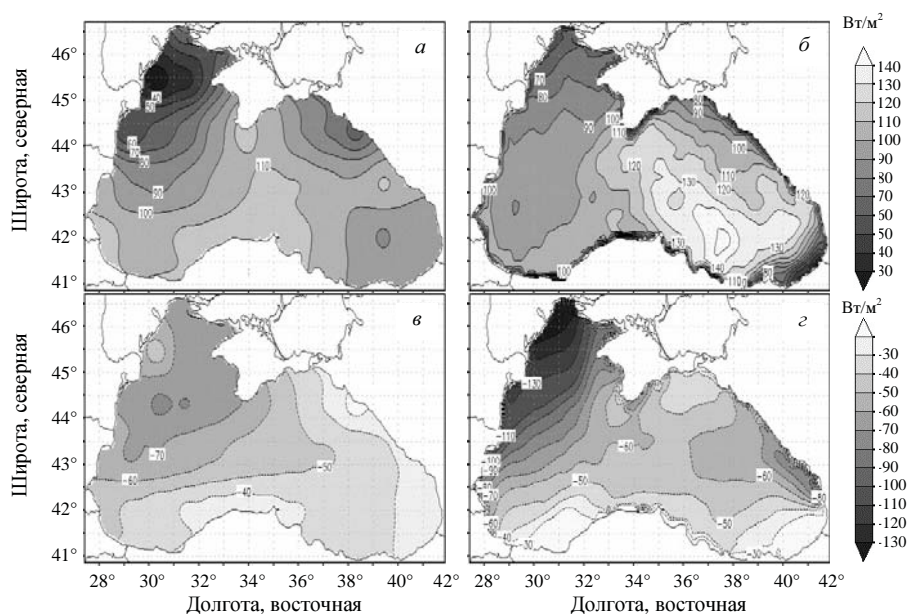


Рис. 5. Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячного суммарного потока тепла: *а, б* – июнь 2000 г.; *в, з* – февраль 2001 г.; *а, в* – по данным ERA – 40; *б, з* – по данным MM5.

Максимальные положительные значения суммарного потока тепла в обоих реанализах (летний период, см. рис. 5, *а, б*) характерны для преимущественно южно-центральной и восточной акватории моря, максимальные отрицательные значения потока тепла (зимний период, см. рис. 5, *в, з*) – для северной и северо-западной области моря. Отрицательные значения потоков тепла в обоих реанализах наблюдаются с августа по февраль следующего года, положительные – с апреля по июль включительно. Отмеченные особенности распределения по пространству суммарного потока тепла наблюдаются в каждом году. Поля потоков тепла реанализа ERA – 40 имеют сглаженный характер, что обуславливается более низким разрешением начальных полей данного реанализа по сравнению с полями потоков тепла реанализа MM5, в которых отмечается большее количество мезомасштабных структур. Отметим, что значения потоков тепла реанализа MM5 вдоль побережья моря обладают повышенной изменчивостью вследствие резких контрастов между морем и сушей. В конкретные даты некоторых месяцев (15.08, 15.11.2000 г.; 15.02, 15.05, 15.08, 15.11.2001 г.) для данных MM5 характерны фронты в распределении суммарного потока тепла. В полях ERA – 40 данная особенность отсутствует вследствие низкого разрешения по пространству и времени. Рассматривая межгодовую изменчивость потока тепла, можно выделить конец 2001 г. – начало 2002 г., когда в обоих реанализах зимний период характеризуется наибольшей отдачей тепла морем (см. рис. б).



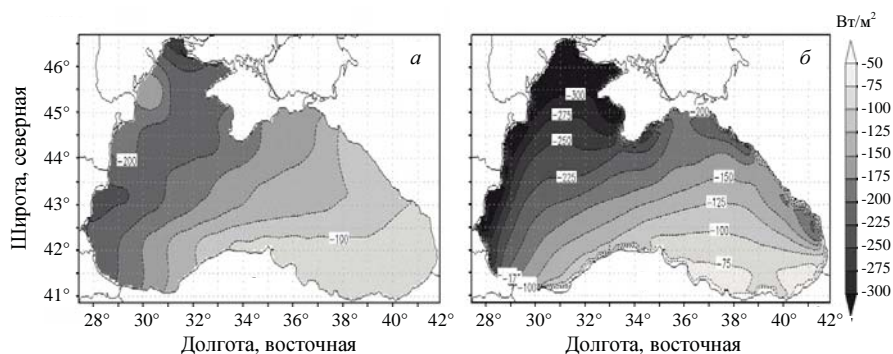


Рис. 6. Распределение среднемесячного суммарного потока тепла в декабре 2001 г.: *а* – по данным *ERA – 40* ; *б* – по данным *MM5*.

За исключением небольшой юго-восточной области, ограниченной параллелями  $41,0^\circ$  с.ш. и  $42,3^\circ$  с.ш. и меридианами  $34,0^\circ$  в.д. и  $41,8^\circ$  в.д., в которой значения потока меняются от  $-50$  до  $-100$  Вт/м<sup>2</sup>, на остальной акватории моря значения потока меняются от  $-110$  до  $-350$  Вт/м<sup>2</sup>, причем максимальные отрицательные значения наблюдаются на северо-западном шельфе, западном материковом склоне и южнее Крымского полуострова.

Интересным вопросом является оценка степени сбалансированности потоков тепла за выбранный период времени по данным реанализов *ERA – 40* и *MM5*. Значение суммарного потока тепла, рассчитанное посредством суммирования данных *ERA – 40* за 5 лет (1995 – 1999 гг.) и последующего осреднения по поверхности моря, равно  $4$  Вт/м<sup>2</sup>. Аналогичное значение суммарного потока тепла по данным *MM5* за период 2005 – 2009 гг. равно  $-12$  Вт/м<sup>2</sup>. В указанные периоды сумма поступлений тепла через поверхность моря по данным *ERA – 40* превалирует над суммой потерь тепла, а по данным *MM5*, наоборот, сумма потерь тепла превышает сумму его поступлений.

Осадки представляют сумму двух составляющих – крупномасштабные осадки и конвективные. Месячные значения суммарных осадков по данным реанализа *MM5* превосходят аналогичные значения, полученные по реанализу *ERA – 40* (см. рис. 3, *б*, и рис. 7). Поля последних имеют сглаженный характер. На северо-востоке и, особенно, в юго-восточной области они качественно близки к распределениям климатических осадков [9, стр. 78, 79]. Пространственные распределения осадков по данным реанализа *MM5* характеризуются наличием многих мезомасштабных структур (эта особенность ярко выражена во все сезоны, кроме некоторых месяцев зимнего периода).

Рассмотрим внутригодичную изменчивость распределения сумм осадков. Повышенные значения осадков прослеживаются в январе-марте и июле-сентябре, а пониженные – в апреле-июне (см. рис. 3). Зимой (январь, февраль 2000 и 2001 гг.) структуры с пониженными значениями осадков наблюдаются на северо-западе и в центральной области моря как по данным *ERA – 40* (см. рис. 7, *а*), так и по реанализу *MM5* (см. рис. 7, *б*). Повышенные суммы осадков видны в областях, примыкающих к Анатолийскому побережью. Они особенно выделяются по данным реанализа *MM5* в восточной и юго-восточной зонах, в которых прослеживаются большие перепады между значениями осадков.

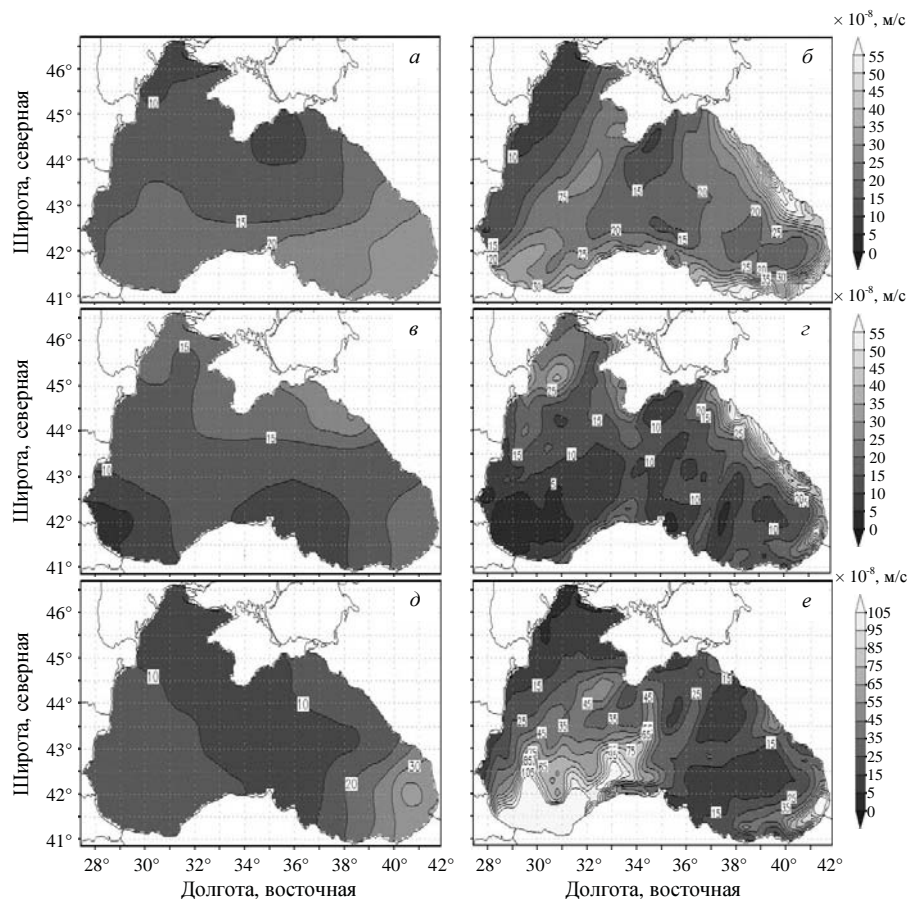


Рис. 7. Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячных суммарных осадков: *а, б* – февраль 2000 г.; *в, з* – июнь 2001 г.; *д, е* – август 2001 г.; *а, в, д* – по данным ERA – 40; *б, з, е* – по данным MM5.

Весной различия между структурами распределения сумм осадков по данным ERA – 40 и MM5 (по годам и от года к году) более заметны. Отметим, что в полях осадков реанализа MM5 прослеживаются фронтальные зоны, чего нет в полях по данным ERA – 40.

Характерной чертой распределений сумм осадков летом 2000 и 2001 гг. является качественное совпадение областей выпадающих на поверхность Черного моря осадков, полученных по обоим реанализам (см. рис. 7, *в, з*). Август и сентябрь в 2000 и 2001 гг. выделяются высокими значениями осадков. Так, по данным MM5, в 2001 г. особенно интенсивные осадки сосредоточены в юго-западной и центральной областях западной половины Черного моря и возле Кавказского побережья (см. рис. 7, *д, е*). Осенью крупномасштабные пространственные распределения осадков по данным реанализа ERA – 40 и MM5 повторяют друг друга качественно, но имеют количественное различие.

Следует отметить, что воспроизведение осадков посредством реанализа с использованием атмосферных моделей высокого пространственного разрешения [4] существенно уточняет важные для восстановления циркуля-

ции моря параметры атмосферы – трудно рассчитываемые и прогнозируемые составляющие сумм осадков над Черным морем.

Испарение с поверхности моря зависит от величины коэффициента трения  $C_d$ , скорости ветра на высоте 10 м ( $u_{10}$ ), влажности на высоте 2 м и непосредственно над поверхностью моря ( $q_{2m}$  и  $q_s^*$  соответственно):

$$LE = L \times C_d \times u_{10} \times (q_s^* - q_{2m}) , \quad (5)$$

где  $L$  – удельная теплоемкость испарения.

Величины  $u_{10}$  реанализа *MM5* на 15 – 25 % больше по сравнению со значениями этого параметра реанализа *ERA – 40*. Отметим также, что коэффициент трения в реанализе *MM5* представляет собой рассчитанную в модели атмосферы скорость трения ( $u_{st}$ ). В реанализе *ERA – 40* коэффициент трения рассчитывается по модулю вектора скорости ветра по более простой зависимости. Существенный вклад при расчете испарения по формуле (5) вносит последний множитель. Влажность на высоте 2 м и непосредственно над поверхностью моря в модели *MM5* рассчитывается по другому алгоритму по сравнению с *ERA – 40*. Поэтому значения испарения реанализа *MM5* на 25 – 40 % превосходят величины испарения, полученные в реанализе *ERA – 40*.

Рассмотрим пространственные распределения испарения, обладающие (в отличие от осадков) четко выраженной внутригодовой изменчивостью (см. рис. 3). Следует заметить, что между полями испарения и полями модуля вектора касательного трения ветра существует хорошо выраженная корреляция (см. зависимость (5) и рис. 8). На рис. 8 видно, что по данным обоих реанализов области повышенных и пониженных значений испарения и модуля вектора напряжения трения ветра близки в пространственном расположении. Крупномасштабные особенности пространственного распределения испарения по обоим реанализам качественно совпадают как в 2000 г., так и в 2001 г. Имеются количественные различия.

Качественное совпадение характерных областей испарений с поверхности моря прослеживается также в период, когда испарения максимальны (август-октябрь) (см. рис. 3 и рис. 9). Большие количества испарений в обоих реанализах занимают северные и северо-западные области моря. Меньшие количества испарений – южные и юго-восточные области. Максимальные значения испарений по данным *MM5* в 1,5 – 1,7 раза выше, чем по реанализу *ERA – 40*. Зимние и весенние месяцы 2001 г. по данным *MM5* характеризуются квазизональным распределением испарений.

Компоненты вектора касательного трения ветра при подготовке данных атмосферных реанализов для последующих расчетов по модели и анализа пространственных распределений модуля вектора касательного напряжения трения ветра и завихренности рассчитывались по формулам (3) – (4).

Представление о различиях между распределениями модуля вектора касательного трения ветра в мае 2000 г. и 2001 г. (низкие значения модуля по результатам *ERA – 40* в весенний сезон) дает рис. 8, *в, е*.

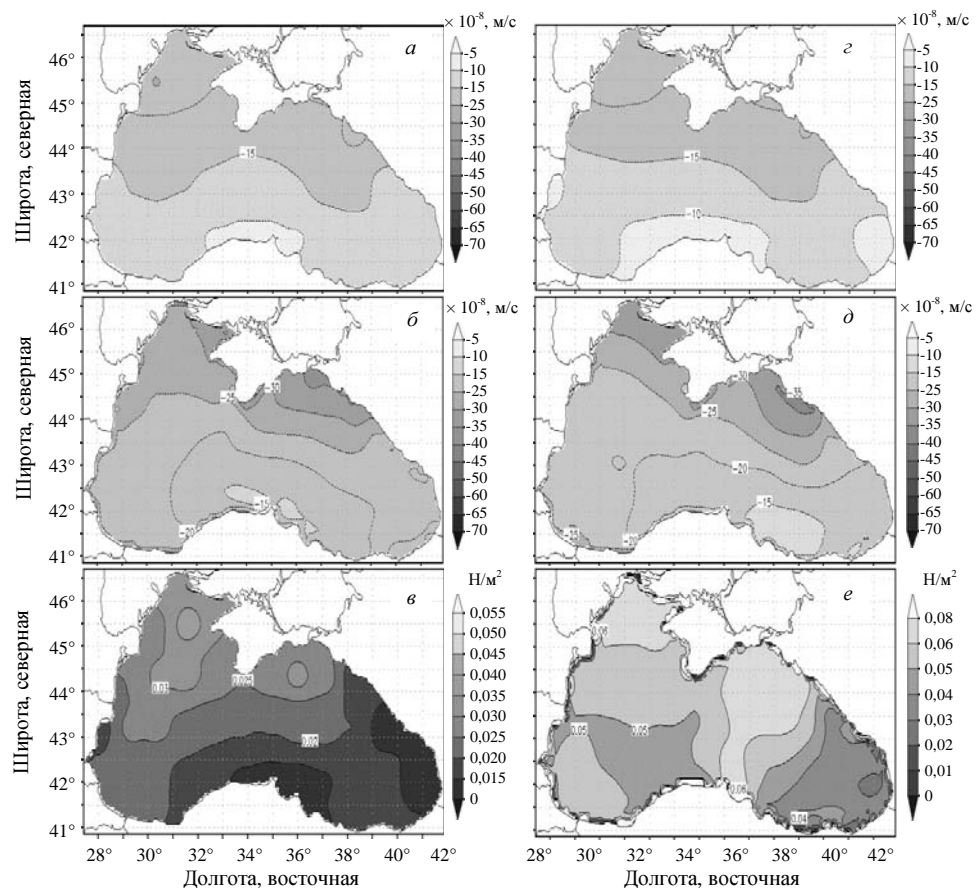


Рис. 8. Распределение среднемесячного испарения (*a, б, z, д*) и модуля вектора касательного напряжения трения ветра (*в, e*): *a, б* – май 2000 г. *ERA – 40* и *MM5* соответственно; *z, д* – май 2001 г. *ERA – 40* и *MM5* соответственно; *в* – май 2000 г. (*ERA – 40*); *e* – май 2001 г. (*MM5*).

Видно, что области повышенных и пониженных величин модуля качественно не сильно отличаются между годами.

Примерно такая же картина наблюдается в мае и по данным *MM5*. Как показал анализ, большие различия, в качественном и количественном отношении, прослеживаются между распределениями модуля в выбранный период времени по данным *ERA – 40* и *MM5*.

В этом смысле показателен рис. 10, на котором приведены карты, относящиеся к зимнему месяцу 2000 г. и 2001 г. (высокие значения модуля по результатам *ERA – 40* и *MM5* (см. рис. 4, *a*)).

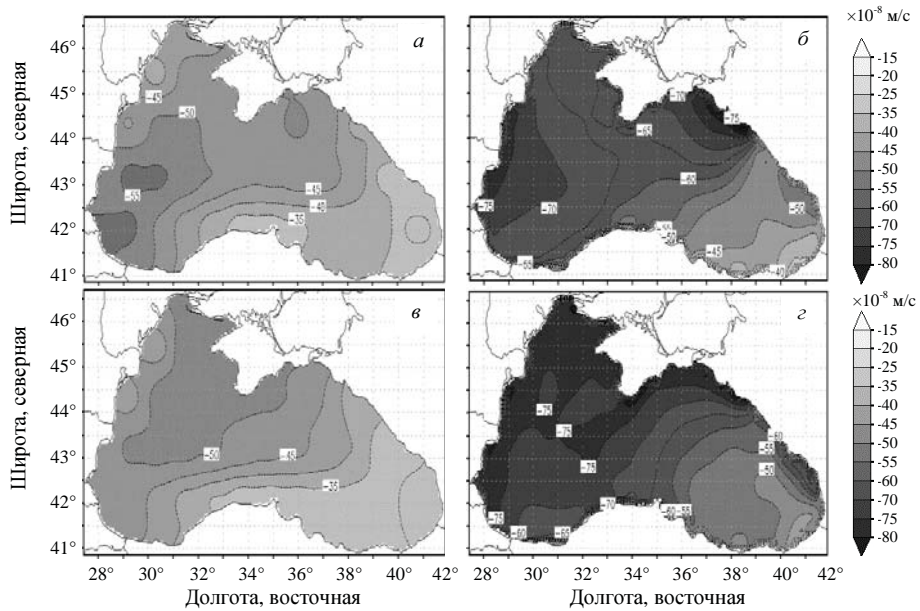


Рис. 9. Распределение среднемесячного испарения в сентябре: *а, б* – 2000 г.; *в, з* – 2001 г.; *а, в* – по данным ERA – 40 ; *б, з* – по данным MM5.

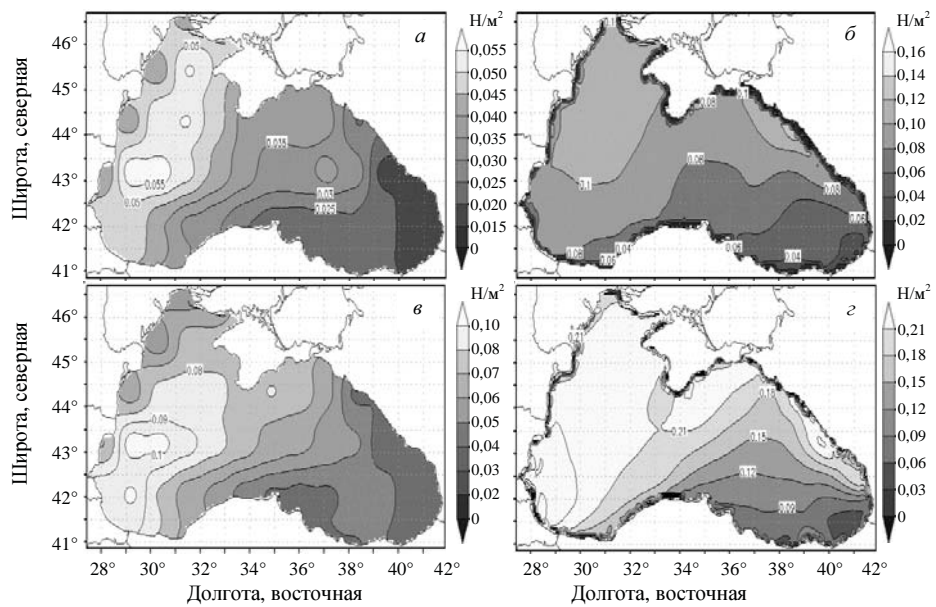


Рис. 10. Распределение среднемесячного модуля вектора касательного трения ветра в декабре 2000 г. (*а, б*) и в декабре 2001 г. (*в, з*): *а, в* – по данным ERA – 40 ; *б, з* – по данным по данным MM5.

Рис. 10 показывает, что повышенные значения модуля вектора трения ветра по данным обоих реанализов располагаются в центральной и северо-западной акваториях моря, а пониженные значения – в южной и юго-восточной областях. Различия в распределениях модуля вектора между годами каждого из реанализов отдельно (см. рис. 10, *a, в; б, г*) меньше, чем между результатами реанализов в каждом году (см. рис. 10, *a, б; в, г*). Примерно такие же различия между рассматриваемыми полями наблюдаются и в летние месяцы. Рис. 10 свидетельствует также, что величины модуля по данным *ММ5* в 2 – 3 раза больше, чем по данным *ERA – 40*. Следует ожидать, что интенсивность восстановленной по данным *ММ5* циркуляции моря будет существенно выше.

Примечательной особенностью рассматриваемого периода времени является увеличение значений модуля вектора трения ветра по обоим реанализам почти в два раза в ноябре-декабре 2001 г. по сравнению с 2000 г., что отразилось в количествах испарений и результатах воспроизведения гидрофизических полей моря посредством модели.

Представляет интерес сопоставление пространственных распределений и вариаций завихренности касательного трения ветра, рассчитанной по данным реанализов *ERA – 40* и *ММ5*. Циклоническая (положительная) и антициклоническая (отрицательная) завихренность формирует и интенсифицирует, соответственно, циклонические и антициклонические структуры вод Черного моря.

Отличия между полями завихренности характеризуются следующим (см. рис. 11). Величины завихренности по данным *ММ5* на порядок выше значений, полученных по реанализу *ERA – 40*. Количественные и качественные отличия обусловлены влиянием на расчетные значения составляющих вектора касательного трения ветра данных о скорости трения [(см. формулу (3) и соотношение (4)], грубым разрешением данных реанализа *ERA – 40* и наличием высоких значений завихренности в реанализе *ММ5* у берегов. В частности, в областях Кавказских и Понтийских гор, где отмечается наличие различных циклонических и антициклонических структур, а также струйных течений ветра, имеющих высокие значения завихренности. На рис. 11, *a, в* видны мезомасштабные ячеистые структуры в полях, которые проявились вследствие кусочно-линейной интерполяции с начальной крупной сетки на сетку с более высоким разрешением. Данной проблемы удалось избежать в случае с реанализом *ММ5*, поля получились более сглаженными. Пространственная структура имеет сложный вид. Можно отметить наличие мезомасштабных и крупномасштабных структур (см. рис. 11, *б, г, д*).

Характерной особенностью завихренности является сезонный ход (см. рис. 4, *б*). По данным реанализа *ММ5* зимняя циклоническая завихренность сменяется летней антициклонической. Рассматривая межгодовую изменчивость, можно отметить тот факт, что в некоторые месяцы крупномасштабные образования качественно достаточно хорошо повторяют друг друга. Например, в апреле, июне, августе и сентябре (по данным *ERA – 40*); в мае, августе, сентябре и октябре (по реанализу *ММ5*).

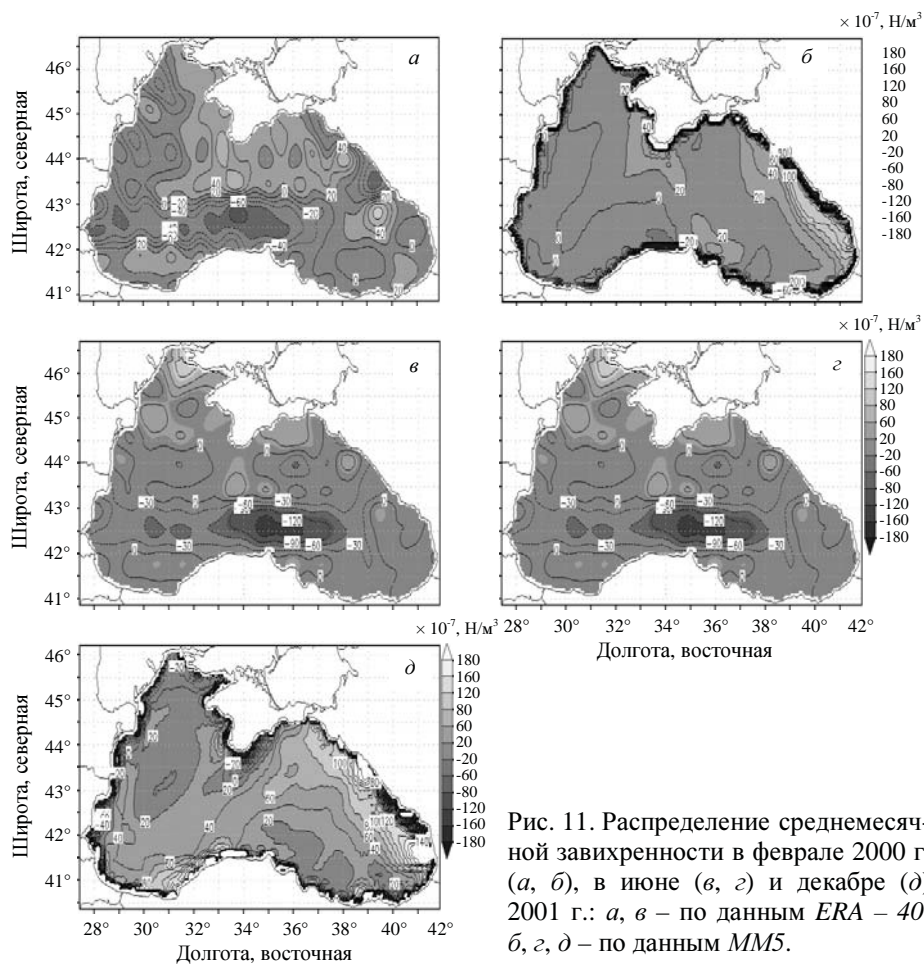


Рис. 11. Распределение среднемесячной завихренности в феврале 2000 г. (а, б), в июне (в, з) и декабре (д) 2001 г.: а, в – по данным ERA – 40; б, з, д – по данным MM5.

**Сопоставление особенностей циркуляции моря, восстановленной для общего периода реанализов ERA – 40 и MM5.** Ретроспективный анализ гидрофизических полей Черного моря проведен на 20 лет за период 1985 – 2004 гг. посредством расчета по усовершенствованной  $z$ -координатной численной модели МГИ с атмосферным воздействием ERA – 40 и MM5 (без ассимиляции измерений). Описание особенностей исходных уравнений модели и их конечно-разностной аппроксимации, а также граничных условий приведено в работе [1]. Отметим, что усовершенствование модели состояло во включении в нее модели турбулентности Меллора и Ямады [10]. В модели учитывался сток рек в бассейн моря, а также обмен водами с Азовским морем через Керченский пролив и с Мраморным морем через пролив Босфор. Использовались климатические среднемесячные значения расходов воды. Начальными полями служили результаты реанализа гидрофизических полей [11]. При расчете температуры и солёности в примыкающих к рекам боксах задавались климатические значения этих параметров. Расчеты проводились на сетке с равномерным шагом по горизонтали равном 4,93 км. Ис-

пользовалось 38 горизонтов по вертикали: 2,5; 5; 10; ... 30; 40; 50; 63; 75; 88; 100; 113; 125; 150; ... 200; 250; 300 400; ... 2 100 м. Шаг по времени полагался равным 10 мин. Значения остальных параметров модели приведены в [1].

По результатам расчетов были подготовлены среднесуточные поля температуры, солености, горизонтальной и вертикальной скорости течений и уровня моря для изучения особенностей сезонной и межгодовой изменчивости указанных параметров. Основное внимание уделим некоторым из параметров на временном интервале 2000 – 2001 гг., не останавливаясь на детальном анализе эволюции гидрофизических полей за весь период 1985 – 2004 гг. До 31.12.2000 г. расчет проводился по данным *ERA – 40*. С 1.01.2001 г. использовались данные реанализа *MM5*.

Важной функцией при анализе сезонной и межгодовой изменчивости циркуляции вод Черного моря является его уровень, поскольку градиенты уровня характеризуют поверхностные геострофические течения (см. рис. 12).

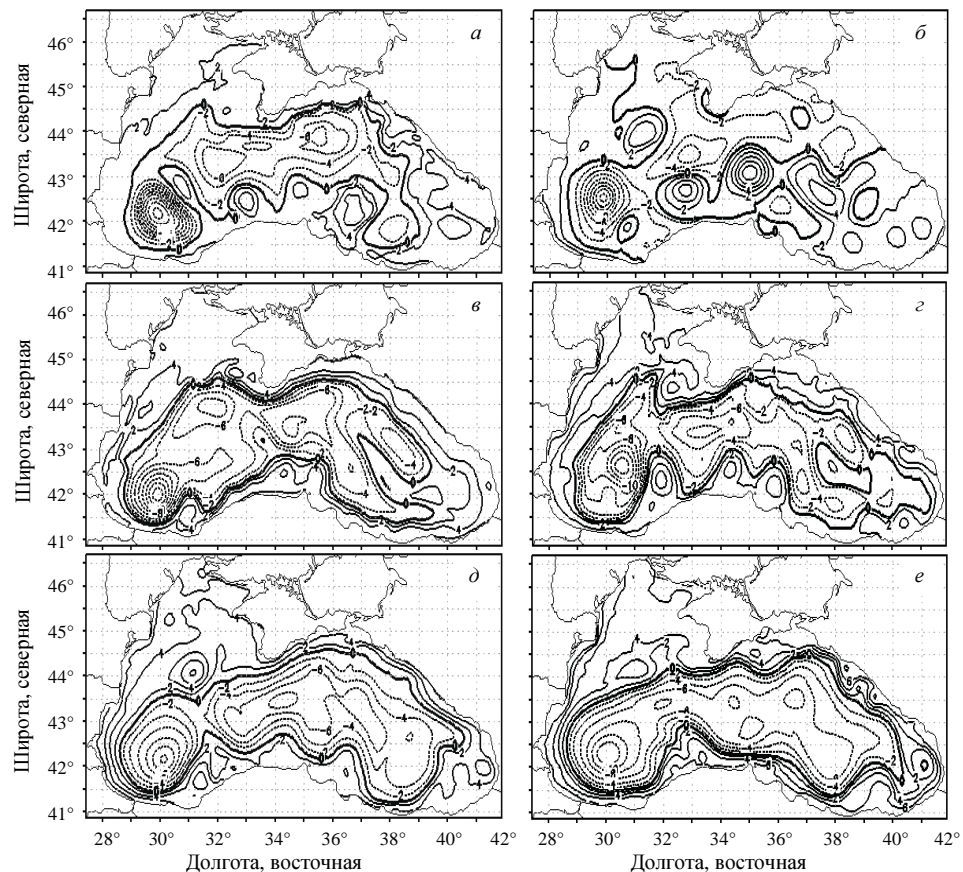


Рис. 12. Топография уровня Черного моря (в см):  
 – по данным *ERA – 40*: *a* – в феврале; *б* – в августе; *в* – в декабре 2000 г.;  
 – по данным *MM5*: *г* – в феврале; *д* – в августе; *е* – в декабре 2001 г.



Уровеньная поверхность и течения (структура течений на глубине 100 м показана на рис. 13) в главном пикноклине характеризуются следующими особенностями. В феврале 2000 г. ОЧТ не прослеживается. На картах уровня и течений (см. рис. 12, *a* и рис. 13, *a*) видны интенсивный циклонический вихрь в юго-западной области, крупный циклонический круговорот в центре бассейна и мезомасштабные циклонические и антициклонические вихри преимущественно на юге моря. Летом 2000 г. ОЧТ отсутствует (см. рис. 12, *б* и рис. 13, *б*). В поле уровня и на горизонте 100 м прослеживаются вихревые образования разного знака вращения, причем, преобладают антициклонические вихри. Основное черноморское течение лучше проявляется в декабре 2000 г. (по сравнению с февралем 2000 г.) – см. рис. 12, *в* и рис. 13, *в*.

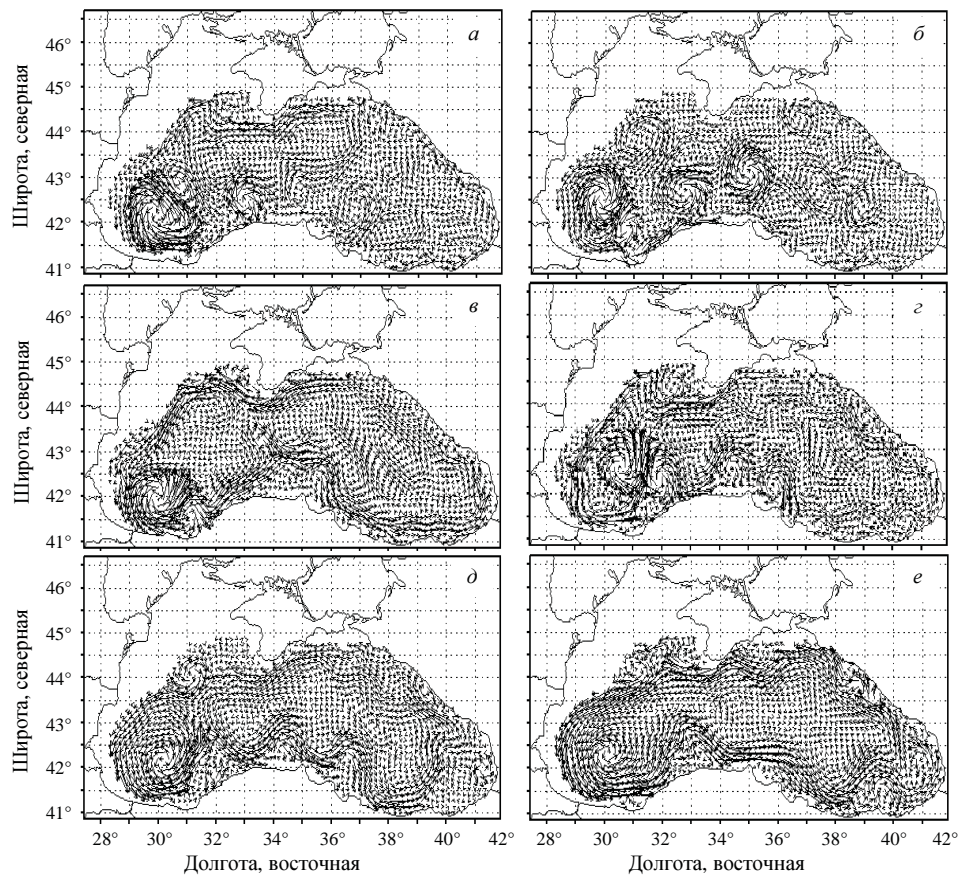


Рис. 13. Течения Черного моря на глубине 100 м (в см/с):  
 – по данным ERA – 40 : *a* – в феврале; *б* – в августе; *в* – в декабре 2000 г.;  
 – по данным MM5: *г* – в феврале; *д* – августе; *е* – декабре 2001 г.

Западный и восточный циклонические круговороты состоят из двух вихрей. В восточный круговорот с юго-востока вклинивается мезомасштабный антициклонический вихрь (см. рис. 13, *в*). Справа от ОЧТ наблюдаются интенсивный Сакаръякский и слабо выраженные Синопский, Кавказский и Севастопольский антициклоны.

В начале 2001 г. резкого изменения в структурах циркуляции моря не произошло (см. рис. 12, *з* и рис. 13, *з*). В феврале 2001 г. интенсивность ОЧТ слабая. Обращает на себя внимание присутствие известных вихрей и круговоротов как справа от ОЧТ, так и внутри бассейна, что, по-видимому, свидетельствует о влиянии данных реанализа *MM5* в переходный период. Летом 2001 г. поля уровенной поверхности моря и течений более гладкие (см. рис. 12, *д* и рис. 13, *д*). ОЧТ заметно меандрирует вдоль берегов Анатолии, его интенсивность сопоставима с таковой, восстановленной зимой по данным *ERA – 40*. В декабре 2001 г. (см. рис. 12, *е* и рис. 13, *е*) интенсивность ОЧТ и течений в целом существенно выше, чем в августе. Ярче выделяются восточный и западный циклонические круговороты. ОЧТ меандрирует на всем протяжении движения, исключая западную область. Важно отметить, что летом 2001 г. положительная завихренность касательного трения ветра характерна почти для всего бассейна моря, кроме области возле восточной Анатолии (см. рис. 11, *з*). Зимой 2001 г. положительная завихренность наблюдается над всей акваторией моря (см. рис. 11, *д*). Отмеченные структуры в распределениях положительной завихренности вызывают соответствующую интенсификацию восточного циклонического круговорота летом и ОЧТ зимой 2001 г. Сказанное выше позволяет заключить, что данные атмосферных параметров реанализа *MM5* предпочтительнее. Не понятно, почему основное ядро западного циклонического круговорота моря в рассматриваемый период прижимается к юго-западу как с использованием данных *ERA – 40*, так и данных *MM5*.

Гидрологическая структура вод деятельного слоя Черного моря характеризуется наличием в нем холодного промежуточного слоя (ХПС). Анализ диаграммы межгодовой и сезонной изменчивости средней по горизонтам температуры в слое 0 – 250 м, представленной на рис. 14, показал следующее.

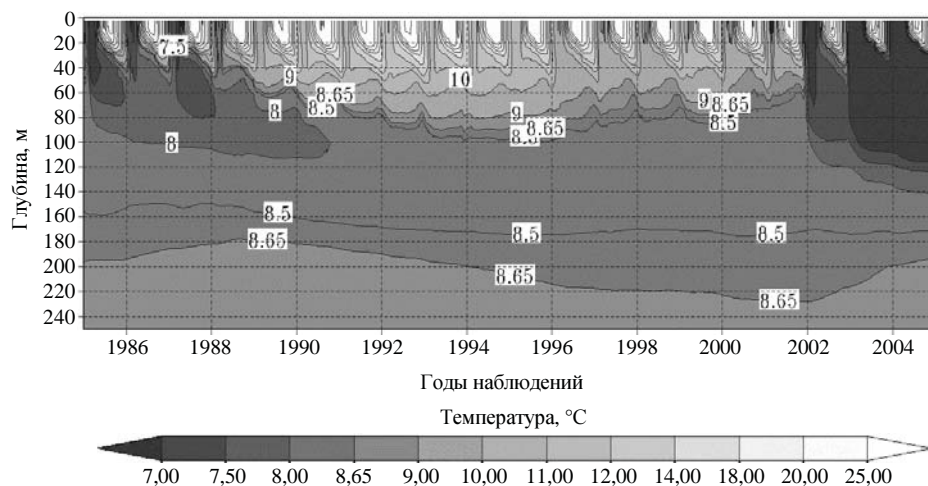


Рис. 14. Диаграмма межгодовой и сезонной изменчивости средней по горизонтам температуры в слое 0 – 250 м.

Осенне-зимнее охлаждение вод, образование верхнего квазиоднородного слоя, весенне-летний прогрев вод, образование сезонного термоклина и формирование нового ХПС по данным *ERA – 40* продолжалось в течение

1985 – 1987 гг. В последующие три года на данном разрезе образование нового ХПС не наблюдается. Холодная вода, имеющая температуру менее  $8^{\circ}\text{C}$ , постепенно заглубляется и нагревается. С конца 1990 г. и до конца ноября 2001 г. средняя по горизонтам температура в слое 0 – 200 м превышает  $8^{\circ}\text{C}$ . Отмеченное, однако, не означает, что в период с 1988 г. по декабрь 2001 г. ХПС не формировался. Изменчивость топографии уровня Черного моря (см. рис. 12, *a*), структура поля течения в акватории Черного моря (см. рис. 13, *a*) и структура поля температуры морской воды (см. рис. 15) свидетельствуют об адвективном формировании ХПС (см. распределение температуры на западном материковом склоне, рис. 15) и конвективном формировании вод холодного слоя в середине западного циклонического круговорота (пятно воды с температурой меньше  $8^{\circ}\text{C}$  на  $30^{\circ}$  в.д.) [12, стр. 83-93].

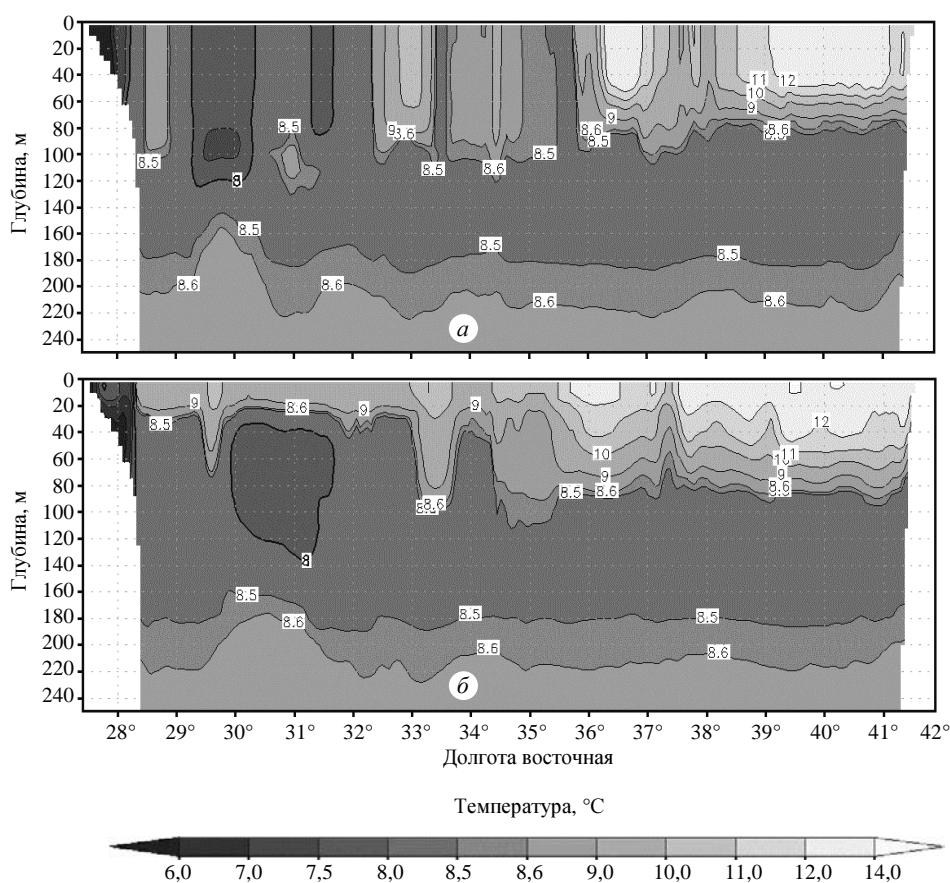


Рис. 15. Распределение температуры на разрезе по параллели  $42,5^{\circ}$  с.ш.: *a* – 15.02.2000 г.; *b* – 9.04.2000 г.

Поскольку значения модуля вектора касательного напряжения трения ветра и его завихренности по данным реанализа *ERA – 40* почти в 2,3 – 2,5 раза и на порядок, соответственно, меньше, чем по данным *MM5*, то слабая интенсивность течений и конвекции не способствовали эффективному формированию ХПС. Холодный промежуточный слой состоял из отдельных пятен, а

в конце ноября и в декабре 2000 г. температура воды во всем слое 0 – 150 м, за исключением области юго-западного циклонического круговорота, превышала 8 °С. По этой причине в период ноябрь 1990-ноябрь 2001 гг. средняя по горизонтам температура в слое 0 – 250 м на рис. 14 оказалась выше 8 °С.

Из поля температуры, показанного на рис. 14, видно, что в осенне-зимние периоды 2001 – 2004 г. интенсивность формирования и глубина залегания ХПС особенно возросли. Причин этому несколько.

Во-первых, модуль вектора напряжения трения ветра в зимний период 2002 – 2004 гг. существенно увеличился. В конце декабря 2001 (данные *ММ5*) по сравнению с декабрем 2000 г. (данные *ERA – 40*) увеличение составило в 4 раза (см. рис. 4, *a*). В эти годы увеличение модуля по данным *ММ5* было в 1,5 раза.

Во-вторых, модуль амплитуды отрицательного среднего по поверхности моря суммарного потока тепла зимой 2002 г. и 2003 г. по данным *ММ5* по сравнению с зимой 2001 г. увеличился в 1,6 и 1,3 раза соответственно, а по сравнению с зимой 2001 г. (данные *ERA – 40*) – в 2 и 1,6 раза (см. рис. 1, *б* и рис. 2, *б*).

Анализ тенденций межгодовой изменчивости средней по горизонтам солености (см. рис. 16, *a*) позволяет заключить, что в верхнем слое 0 – 160 м наблюдается отрицательный линейный тренд солености. Глубже виден положительный линейный тренд. В поведении средней по объему солености выражен слабый положительный тренд (увеличение солености составило 0,012 ‰ за 20 лет). Чтобы выяснить причины выявленных тенденций в межгодовой изменчивости солености, необходимы дополнительные исследования, направленные на достижение в модели баланса соли.

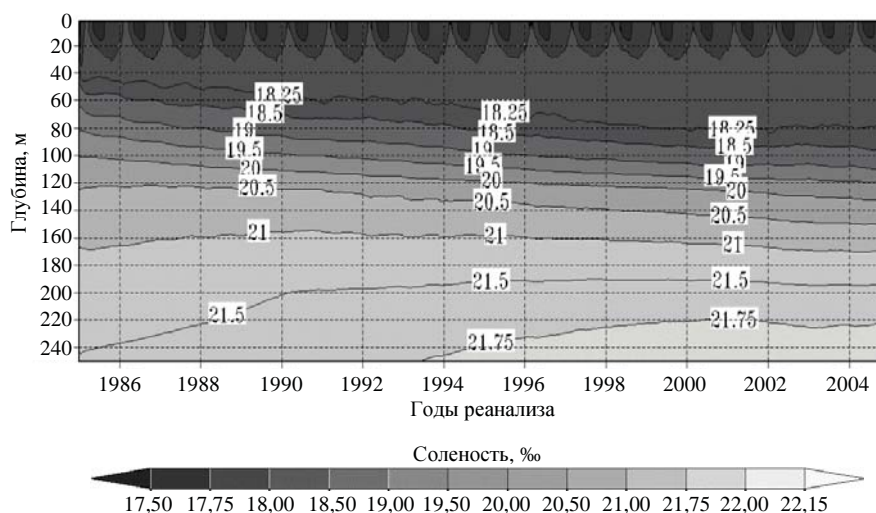


Рис. 16. Диаграмма межгодовой и сезонной изменчивости средней по горизонтам солености в слое 0 – 250 м.

**Заключение.** В работе обсуждаются результаты сопоставления подготовленных для расчетов циркуляции Черного моря полей атмосферных параметров реанализа *ERA – 40* (1.01.1985 – 30.10.2002 гг.) и реанализа *ММ5*

(1.01.2000 – 31.12.2002 г.). Поля атмосферных параметров реанализов были преобразованы линейной интерполяцией с крупных сеток на сетку  $238 \times 132$  точек с шагом по горизонтали  $4,93$  км  $z$ -координатной модели МГИ НАН Украины. Они включают необходимые для расчетов: температуру поверхности моря, потоки явного и скрытого тепла, потоки коротковолновой и длинноволновой радиации, компоненты вектора касательного трения ветра, испарение, конвективные и крупномасштабные осадки.

Основное внимание при сопоставлении атмосферных параметров уделяется общему периоду реанализа: с 1 января 2000 г. по 31 декабря 2001 г. Качественно и количественно графики временной изменчивости осредненных по морю сглаженных значений суммарного потока тепла в периоды поступления тепла по данным обоих реанализов довольно близки. Количественные отличия между кривыми более значимы в осенне-зимний период.

Среднемесячные поля суммарного потока тепла реанализа *MM5* имеют более высокие амплитуды (летом море сильнее нагревается, зимой – сильнее охлаждается). Пространственные распределения потоков тепла *ERA – 40*, в отличие от полей потоков тепла реанализа *MM5*, имеют сглаженный характер. Зимний период конца 2001 – начала 2002 гг. характеризуется наибольшей отдачей тепла морем.

Осредненные по морю суммарные осадки больше по данным реанализа *MM5*. Среднемесячные поля сумм осадков по данным реанализа *MM5* характеризуются наличием мезомасштабных структур. Летом 2000 и 2001 гг. области выпадающих на поверхность моря осадков, полученных по обоим реанализам, качественно совпадают. Использование атмосферной модели *MM5* высокого пространственного разрешения уточняет трудно рассчитываемые составляющие сумм осадков над Черным морем.

При расчете испарения в реанализе *MM5* используются уточненные значения коэффициента трения и влажности. Осредненное по морю испарение больше по данным реанализа *MM5*. Крупномасштабные особенности пространственного распределения испарения по обоим реанализам качественно совпадают как в 2000 г., так и в 2001 г. Максимальные значения испарений по данным реанализа *MM5* в  $1,5 – 1,7$  раза выше, чем по реанализу *ERA – 40*.

Компоненты вектора касательного напряжения трения ветра в реанализе *MM5* рассчитывались по уточненным формулам. Временная изменчивость осредненных по поверхности моря значений модуля вектора по данным *ERA – 40* и *MM5* близка. Значения среднего модуля вектора максимальны зимой и минимальны летом. Однако модуль вектора по данным *MM5* в  $2,3 – 2,5$  раза выше, чем по данным *ERA – 40*. Повышенные значения модуля вектора зимой 2000 и 2001 гг. по данным обоих реанализов располагаются в центральной и северо-западной акваториях моря, а пониженные значения – в южной и юго-восточной областях. Значения модуля вектора напряжения трения ветра по обоим реанализам в ноябре-декабре 2001 г. по сравнению с 2000 г. увеличились почти в два раза.

Значения средней по морю завихренности по данным *MM5* выше (на порядок и немногим меньше) значений, рассчитанных по данным *ERA – 40*. Ячеистые структуры в полях завихренности по данным *ERA – 40* проявились вследствие кусочно-линейной интерполяции с крупной сетки на сетку с более высоким разрешением. В случае с реанализом *MM5* поля получи-

лись более сглаженными, зимняя циклоническая завихренность сменяется летней антициклонической.

Сопоставление особенностей структур гидрофизических полей Черного моря, восстановленных для общего периода реанализа *ERA – 40* и *MM5*, позволяет сделать следующие выводы. Заниженные величины модуля вектора касательного напряжения трения ветра и его вихря в реанализе *ERA – 40* по сравнению с данными реанализа *MM5* являются причиной слабо выраженного ОЧТ моря в зимний период 2000 г. и его отсутствия летом этого года. При использовании в модели данных реанализа *MM5* (с 1.01.2001 г.) резких изменений структур циркуляции моря не произошло. Влияние данных *MM5* привело к усилению ОЧТ во все сезоны года. Площадь моря, охваченная ОЧТ, летом меньше, чем зимой. В летние и осенние месяцы вихревых образований по акватории моря больше.

Слабая интенсивность течений и конвекции, полученная по данным *ERA – 40*, не способствовала эффективному формированию ХПС. Холодный промежуточный слой состоял из отдельных пятен, а в конце ноября и в декабре 2000 г. температура воды во всем слое 0 – 150 м, за исключением области юго-западного циклонического круговорота, была более 8 °С. В осенне-зимние периоды 2001 – 2004 г. интенсивность формирования ХПС значительно возросла. Глубина залегания ХПС оказалась завышенной по следующим причинам. Модуль вектора напряжения трения ветра в эти периоды по данным *MM5* существенно увеличился. Амплитуды отрицательного среднего по поверхности моря суммарного потока тепла зимой 2002 г. и 2003 г. по сравнению с зимой 2001 г. увеличились в 1,6 и 1,3 раза соответственно.

Выяснить причины выявленных тенденций в межгодовой изменчивости солености не представляется возможным. Необходимы дополнительные исследования, направленные на достижение в модели баланса соли.

Сказанное выше позволяет заключить, что данные по атмосферным параметрам реанализа *MM5* предпочтительнее.

В дальнейшем необходимо проведение численных экспериментов по восстановлению гидрофизических полей Черного моря с использованием доступных атмосферных параметров иных реанализов.

Авторы выражают благодарность М.В. Шокурову, чьи консультации по реанализу *MM5* помогли глубже понять особенности расчета атмосферных параметров, а также А.И. Кубрякову и А.И. Мизюку за помощь при использовании данных реанализов *ERA – 40* и *MM5* в численной модели течений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кныш В. В., Демьшев С. Г., Кубряков А. И. и др. Сопоставление результатов реанализа гидрофизических полей Черного моря, выполненного по моделям в  $\sigma$ - и  $z$ -координатах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2011. – Вып. 24. – С. 19-37.
2. Uppala S.M., Kallberg P.W., Simmons A.J. et al. The ERA – 40 re-analysis // Quart. Journ. Royal. Meteorol. Soc. – 2005. – Vol. 131, № 612. – P. 2961-3012.
3. Демьшев С.Г., Коротяев 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. Шокуров М.В. «Численное моделирование атмосферной циркуляции над Черным морем» // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2011. – Вып. 25, том 2. – С. 91-117.
  5. Кныш В. В., Кортаев Г. К., Моисеенко В. А. и др. Сезонная и межгодовая изменчивость гидрофизических полей Черного моря, восстановленных на основе реанализа за период 1971 – 1993 гг // Изв. РАН: Физика атмосферы и океана. – 2011. – Том 47, № 3. – С. 433-446.
  6. Hellerman S., Rosenstein M. Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates // Journ. Phys. Oceanogr. – 1983. – Vol. 13. – P. 1093-1104.
  7. Large W.G., Pond S. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds // Journ. Phys. Oceanogr. – 1981. – Vol. 11. – P. 324-481.
  8. Ефимов В.В., Шокуров М.В., Барабанов В.С. Физические механизмы возбуждения ветровой циркуляции внутренних морей // Изв. РАН: Физика атмосферы и океана. – 2002. – Том 38, № 2. – С. 247-258.
  9. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Ред. Симонов А.И., Альтман Э.Н. – СПб.: Гидрометеоздат, 1991. – 430 с.
  10. Mellor G.L. and Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem // Rev. Geophys. and Space Physics. – 1982. – № 20. – P. 851-875.
  11. Кныш В.В., Кортаев Г.К., Мизюк А.И., Саркисян А.С. Усвоение гидрологических наблюдений для расчета течений в морях и океанах // Изв. РАН: Физика атмосферы и океана. – 2012. – Том 48, № 1. – С. 67 – 85.
  12. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. – 212 с.

Материал поступил в редакцию 25.12.2012 г.

**АНОТАЦІЯ** У роботі обговорюються результати порівняння параметрів атмосфери, отриманих в реаналізі ERA – 40 і MM5. Основна увага приділяється спільному періоду реаналізу – 1 січня 2000 р. – 31 грудня 2001 р. Відзначаються особливості відмінностей в сезонній і міжрічній мінливості середніх по поверхні моря: сумарного потоку тепла, опадів, випаровування, модуля вектора дотичного напруження тертя вітру і його завихоренності. Аналізуються результати зіставлення просторових розподілів параметрів атмосфери. Наводяться результати порівняння особливостей циркуляції Чорного моря, відновленої для загального періоду реаналізу ERA – 40 і MM5. Оцінюється вплив параметрів атмосфери на формування холодного проміжного шару моря. На основі виконаних оцінок можна зробити висновок, що дані атмосферних параметрів реаналізу MM5 якісно і кількісно є кращими.

**ABSTRACT** The results of a comparison of atmospheric parameters derived from reanalysis ERA – 40 and MM5 are discussed in the paper. The focus is on the period of reanalysis – January 1, 2000 – December 31, 2001. The features of differences in seasonal and interannual variability of average sea surface (the total heat flux, precipitation, evaporation, shear modulus of the wind stress and vorticity) are marked. The results of comparing of the spatial distributions of atmospheric parameters are analyzed. The results of comparing of the features of the Black Sea circulation, restored to the total period of reanalysis ERA – 40 and MM5 are given. The influence of atmospheric parameters on the formation of the cold intermediate layer of the sea is estimated. According to evaluation the data of atmospheric parameters of reanalysis MM5 is quantitatively and qualitatively preferable.