

# Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана

УДК 551.584

Д.А. Яровая, В.В. Ефимов, М.В. Шокуров, С.В. Станичный,  
В.С. Барабанов

## Квазитропический циклон над Черным морем: наблюдение и численное моделирование

В сентябре 2005 г. над Черным морем наблюдался долгоживущий мезомасштабный циклон, который характеризовался большой скоростью ветра 25 м/с и вызвал аномальное понижение температуры поверхности моря более чем на 10 °С. Выполнено численное моделирование этого циклона с использованием модели *MMS* и данных глобального оперативного анализа. Воспроизведены эволюция циклона и его структура, сходная со структурой тропического циклона. Отчетливо выражены первичная азимутальная и вторичная радиальная циркуляции, безоблачный глаз с теплым ядром на средних уровнях, стена глаза с сильным подъемом воздуха и интенсивными конвекцией и осадками. Потоки явного и скрытого тепла на поверхности моря сыграли определяющую роль в возникновении и развитии этого циклона.

**Введение.** До недавнего времени мезомасштабная структура атмосферной циркуляции в Черноморском регионе оставалась малоизученной. В то же время ее исследование необходимо для развития современных численных методов диагноза и прогноза изменчивости морской среды. Наиболее полные массивы данных многолетнего реанализа *NCEP/NCAR* и *ECMWF* имеют пространственное разрешение более 1° по широте и долготе, что недостаточно для адекватного воспроизведения мезомасштабных особенностей, связанных с региональными неоднородностями рельефа, температуры и шероховатости подстилающей поверхности. Лишь с развитием новых подходов, таких как динамический даунскейлинг (*downscaling* – регионализация, перерасчет с более высоким разрешением по пространству) [1], и появлением современных спутниковых датчиков, таких как скаттерометр *QuikScat*, стало возможно получать данные о полях приводного ветра с высоким пространственным разрешением. В данной статье мы рассмотрим квазитропический циклон, образовавшийся над Черным морем в конце сентября 2005 г. Развитие этого вихря и его воздействие на морскую среду представляют собой уникальную возможность для тестирования атмосферных и морских моделей.

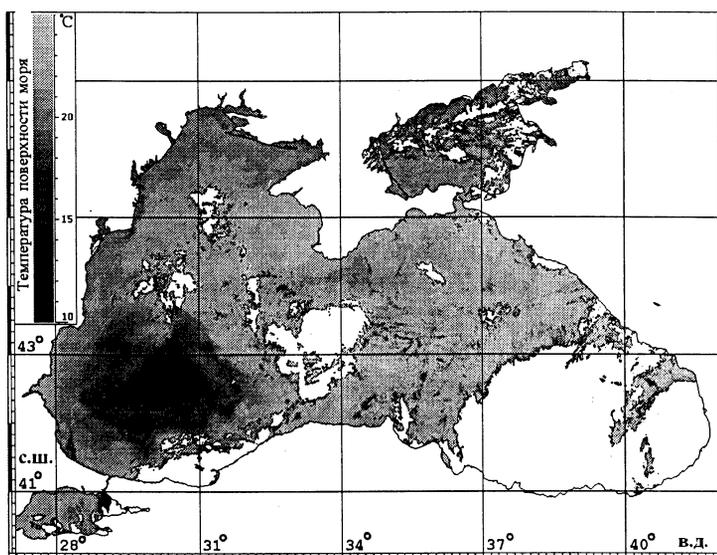
В конце сентября 2005 г. в атмосфере над юго-западной частью Черного моря развился аномальный интенсивный мезомасштабный циклон, напоминавший своим видом тропический ураган. Этот циклон имел так называемый глаз и в диаметре не превышал 300 км. На спутниковых снимках за 25 – 27 сентября четко прослеживаются спиралевидные полосы облаков (см. далее рис. 4, а). По температуре верхней границы облаков –33 — –50 °С удалось определить, что циклон по вертикали доходил до тропопаузы. Скорость ветра

© Д.А. Яровая, В.В. Ефимов, М.В. Шокуров, С.В. Станичный, В.С. Барабанов, 2008

в зоне, охваченной циклоном, достигала 20 – 25 м/с. Хотя этот циклон не приобрел разрушительных характеристик своего тропического сородича, но тем не менее погодные условия привели к задержке рейсов судов из Крыма и Одессы в Стамбул. Циклон стоял над Черным морем с 25 по 29 сентября, слабо блуждая, 29 сентября он начал перемещаться на юг и к 30 сентября полностью покинул акваторию Черного моря.

Этот атмосферный циклон оказал заметное воздействие на термическую структуру верхнего слоя Черного моря. Циклоническая завихренность поля скорости приводного ветра и экмановская дивергенция в верхнем перемешанном слое моря вызвали подъем термоклина и даже выход его на поверхность, понижение температуры поверхности и понижение уровня моря. Экмановская дивергенция привела также к возникновению геострофически сбалансированного циклонического вихря в самом море, который, в отличие от атмосферного, был более долгоживущим.

Рассчитанная по данным со спутника *QuikScat* скорость подъема термоклина составила  $2 \cdot 10^{-4}$  м/с, в то время как типичное среднесезонное значение вертикальной скорости в верхнем слое для Черного моря равняется по разным оценкам  $(1 - 2) \cdot 10^{-6}$  м/с. Согласно спутниковым данным, 29 сентября температура поверхности моря под атмосферным циклоном понизилась на значительную величину – более чем на 10 °С (рис. 1), что свидетельствует о выходе холодных вод с глубины около 30 м на поверхность. Это пятно холодной воды прослеживалось до 23 октября: 29 сентября перепад температуры составлял 14 °С, 13 октября — (3 – 4) °С и 23 октября — (1 – 2) °С. Альтиметрические спутниковые измерения показали также понижение уровня моря на 30 см в области, над которой стоял циклон. Характерная скорость течения воды в циклоническом вихре, оцененная из условия геострофического баланса по перепаду температуры или перепаду уровня между центром и периферией циклона, при ширине течения, равной 50 км, составила около 60 см/с (рис. 1).



Р и с. 1. Температура поверхности Черного моря (°С) по спутниковым данным за 29 сентября 2005 г.

Для того чтобы определить причины зарождения и роста аномального циклона над Черным морем, необходимы отдельные детальные исследования. Однако предварительно можно отметить полученные по данным оперативного анализа крупномасштабные характерные особенности синоптической ситуации, которые, по-видимому, способствовали его возникновению.

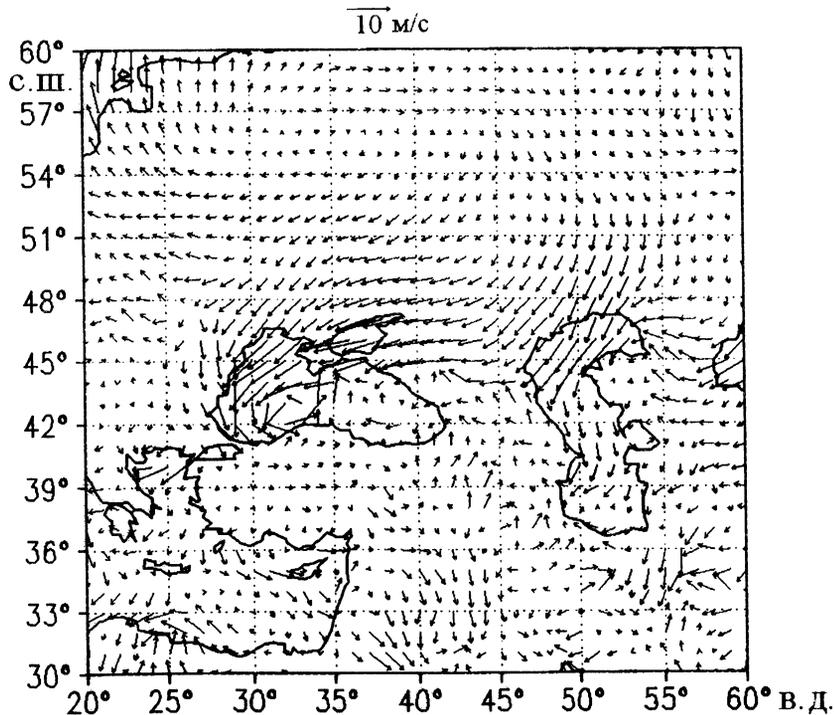
Во-первых, наблюдался большой перегрев поверхности моря по сравнению с окружающей сушей, что привело к увеличению влагосодержания в атмосфере над морем. 18 сентября температурный контраст море – суша составлял 7 °С (24 °С – море и 17 °С – суша), к 24 сентября он достиг 12 °С (23 °С – море и 11 °С – суша).

Во-вторых, конвергенция поля скорости ветра на нижних уровнях в атмосфере (рис. 2) способствовала развитию конвекции.

В-третьих, наблюдалось уменьшение устойчивости атмосферы, связанное с вторжением холодного воздуха в Черноморский регион.

В-четвертых, с 19 по 30 сентября над европейской территорией России находился блокирующий антициклон (рис. 2). Он способствовал конвергенции на нижних уровнях и в то же время блокировал над Балканами обычный синоптический циклон, вызвавший сильные осадки.

В-пятых, из-за блокирующего антициклона не было сильного фонового ветра, который мог бы в результате адвективного переноса развивающегося циклона с моря на сушу препятствовать его развитию.



Р и с. 2. Скорость ветра (м/с) на уровне давления 1000 гПа в 0 ч 25 сентября 2005 г. по данным оперативного анализа (направление и скорость ветра показаны стрелками)

Как известно, тропические циклоны (тайфуны) выделяют в отдельную группу, так как они отличаются от среднеширотных циклонов причинами возникновения, характером развития и некоторыми особенностями структуры. Обычно тропические циклоны имеют сравнительно небольшой размер около 200 – 300 км в диаметре, в то же время давление в центре циклона опускается до 960 гПа, иногда до 910 гПа. Скорость ветра в спиральных рукавах достигает 70 – 90 м/с. В центре тропического циклона есть область шириной 20 – 30 км с ясным или почти ясным небом и слабым ветром – глаз тропического циклона. Ограничивающая глаз кольцевая область (стена глаза) характеризуется мощной проникающей кучевой конвекцией, ливневыми осадками и грозами, штормовыми ветрами и сильными ветровыми волнами. Отсутствие облаков в глазе связано с оседанием воздуха в центре тропического циклона [2].

Почти все тайфуны формируются в тропиках в пределах 30° широты к северу и югу от экватора. Оказалось, однако, что циклоны, схожие по своей структуре с тропическими, образуются время от времени и во внетропических областях, в частности над Средиземным морем. Благоприятные условия для этого создаются, как правило, при вторжении североатлантических воздушных масс и последующем переносе холодного воздуха над теплым морем. Это, в свою очередь, вызывает сильные потоки тепла от поверхности моря и глубокую конвекцию.

Основной областью, где происходит циклогенез, считается Западное Средиземноморье [3,4]; но интенсивные циклоны диаметром несколько десятков километров там случаются редко. Однако в 1982 г. над Южной Италией в заполнявшейся синоптической депрессии образовался небольшой циклон, вызвавший ветры ураганной силы [5]. В 1993 г. неглубокий циклон образовался над заливом Анталья в восточной части Средиземного моря [6]. Возникновение этого циклона объясняется в основном влиянием рельефа, но поддерживали циклон потоки скрытого тепла от поверхности моря. В 1995 г. квазитропический циклон возник над юго-восточной частью Италии [7]. Исследователи установили наличие теплого ядра у циклона и показали, что важную роль в вихреобразовании играли потоки тепла и влаги от поверхности; при этом влияние потоков явного и скрытого тепла было примерно одинаковым. В работе [8] отмечены необычные характеристики двух мезомасштабных циклонов, образовавшихся над Средиземным морем в 1996 г. Исследователи описали квазитропические свойства этих циклонов, а также показали, что большое значение для приповерхностного вихреобразования имели ранее сформировавшиеся высотные ложбины.

Похожие мезомасштабные циклоны, называемые полярными, наблюдаются над высокоширотными частями океанов. Полярный циклон имеет небольшие размеры от нескольких десятков до нескольких сотен километров, время его жизни не превышает полутора суток. Эти мощные циклоны со скоростью ветра более 15 м/с образуются над Атлантическим и Тихим океанами между 50 и 70° широты в обоих полушариях при вторжении холодного воздуха с суши. За год в этой области возникают сотни полярных мезомасштабных циклонов. Характерным признаком полярного циклона на спутниковых

снимках является закрученная спиралеобразная область высоких конвективных облаков в форме запятой с выраженным безоблачным глазом в центре. Полярные циклоны иногда имеют некоторые признаки классических среднеширотных циклонов – начальный рост за счет бароклинной неустойчивости, приземные фронты. В то же время часто значительную роль в их развитии играют потоки явного и скрытого тепла от поверхности океана и конвергенция потока влаги на нижних уровнях, приводящая к вынужденной конвекции и выделению тепла при конденсации влаги на верхних уровнях. В этом отношении полярные циклоны похожи на тропические.

В данной статье будет показано, что уникальный для Черноморского региона мезомасштабный циклон, развившийся над юго-западной частью моря 25 – 29 сентября 2005 г., по основным признакам можно отнести к квазитропическим циклонам.

**Описание модели.** Мезомасштабные атмосферные процессы обычно имеют низкую обеспеченность измерениями. Это относится и к рассматриваемому циклону над Черным морем. Кроме данных со спутника *QuikScat* о скорости ветра и облачности, других данных измерений в атмосфере с высоким пространственным разрешением фактически нет. Поэтому главным методом при изучении этого мезомасштабного циклона является численное моделирование.

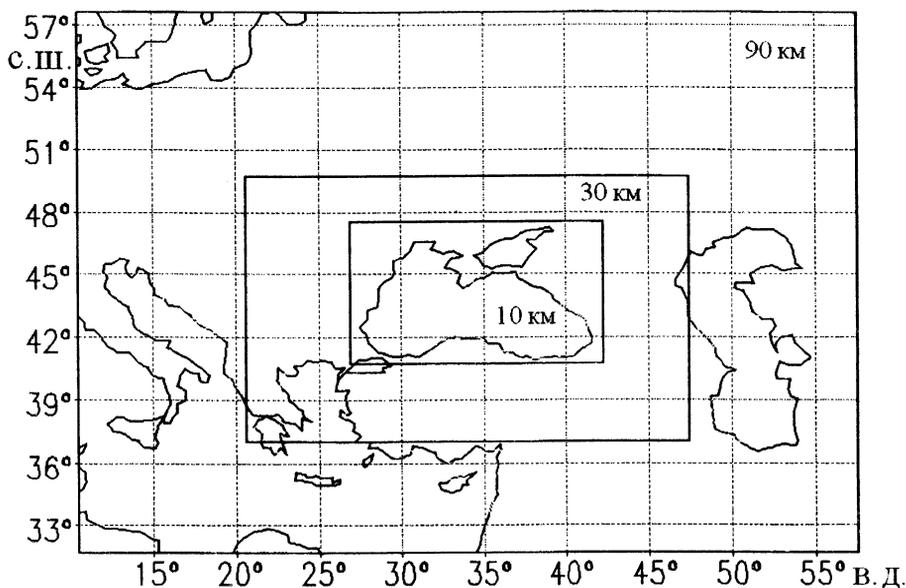
Для моделирования использовалась мезомасштабная негидростатическая модель пятого поколения *MM5* версии 3.6.2, разработанная в университете штата Пенсильвания [9,10]. Эта модель, предназначенная для воспроизведения и прогноза мезомасштабной атмосферной циркуляции, была адаптирована для условий Черноморского региона. Не останавливаясь на подробном описании модели *MM5*, укажем лишь ее основные возможности:

- моделирование на вложенных сетках с двусторонним обменом данными между доменами соседних уровней;
- негидростатические уравнения, что позволяет использовать модель для воспроизведения явлений с горизонтальным масштабом порядка нескольких километров;
- четырехмерное усвоение данных измерений;
- многочисленные схемы параметризации физических процессов. Подсечные процессы горизонтальной диффузии, вертикальных потоков импульса, тепла и влаги, облачность и осадки параметризуются в нескольких вариантах в зависимости от выбранного пространственного разрешения.

Модель основана на системе полных уравнений гидродинамики без использования приближения гидростатики. Для интегрирования по времени используется схема «чехарда» в сочетании со сглаживающим временным фильтром Робера – Асселина. Усвоение граничных условий (выходных данных оперативного анализа) организовано в модели *MM5* по методу релаксации: при переходе от границы домена внутрь переменная релаксирует к внутреннему значению.

В данной работе кратко представлены результаты моделирования, которое проводилось на трех вложенных сетках с разрешениями  $90 \times 90$ ,  $30 \times 30$  и

10×10 км и количеством ячеек 34×31, 64×46, 124×73 соответственно (рис. 3). Центр основного домена расположен на Крымском п-ове; координаты центра домена – 35° с.ш., 45° в.д. По вертикали использовались 23 неравномерно расположенных по высоте сигма-уровня с увеличенным разрешением в нижней тропосфере. Для задания начальных и граничных условий использовались данные оперативного глобального анализа, предоставленные *NCEP*, с пространственным разрешением 1° и временной дискретностью 6 ч. Начальные условия для всех доменов задавались по данным оперативного анализа, а боковые граничные условия обновлялись каждые 6 ч.



Р и с. 3. Расположение доменов модели

В ходе моделирования применялись следующие схемы параметризации.

*MRF (Medium Range Forecast)* – схема параметризации планетарного пограничного слоя. Эта схема имеет четыре режима устойчивости: устойчивый (ночной) режим, затухающая динамическая турбулентность, вынужденная конвекция и свободная конвекция. Приземный пограничный слой рассчитывается на базе теории подобия Монина – Обухова. Схема конечно-разностной аппроксимации обеспечивает сохранение массы и энергии, а также потенциальной энтропии.

*RRTM (Rapid Radiative Transfer Model)* – схема переноса длинноволнового излучения для расчета радиационного баланса. В схеме параметризации переноса излучения учитывается взаимодействие коротковолновой и длинноволновой радиации с атмосферой как при отсутствии, так и при наличии облачности.

*Simple Ice (Dudhia)* – схема расчета микрофизических процессов фазовых превращений воды в атмосфере.

*Kain – Fritsch* — схема параметризации кучевой конвекции для доменов с разрешением 90 и 30 км.

*Grell* — схема для домена с разрешением 10 км, больше всего подходит для доменов с высоким разрешением.

Температура поверхности суши моделировалась с использованием уравнения теплопроводности для почвы, а температура поверхности моря задавалась как внешний параметр и не изменялась во время моделирования.

Более подробное описание схем параметризации приведено в работах [9,10].

Первоначально предназначенная для расчета региональной погоды с высоким разрешением в последнее время модель *MM5* все чаще используется для моделирования тропических и квазитропических средиземноморских и полярных циклонов [11,12]. Результаты такого моделирования с высоким пространственным разрешением (до 3 км) хорошо согласуются с имеющимися данными измерений, например радарных измерений осадков и влажности. Наиболее впечатляющим является воспроизведение тонкой пространственной структуры конвекции в тропическом циклоне: конвективных облачных башен с масштабом несколько километров. Эти башни объединяются в скопления, которые закручиваются в спиральные рукава с масштабом порядка сотен километров. Причина такого успеха модели *MM5* состоит, по-видимому, в правильной детальной параметризации физических подсеточных процессов. Именно это позволило использовать *MM5* для моделирования аномального циклона над Черным морем и таким образом подтвердить достоверность полученных результатов.

**Результаты моделирования.** Поскольку рассматриваемый циклон является быстро растущим неустойчивым возмущением, небольшие изменения в начальных условиях могут привести к значительным расхождениям в дальнейшей эволюции. Мы провели серию численных экспериментов, стартовавших в разное время от 0 ч 20 сентября до 0 ч 25 сентября с шагом в 12 ч (здесь и далее время гринвичское). Как и ожидалось, результат моделирования сильно зависит от задания начальных условий. Не вдаваясь в подробности, скажем, что наиболее подходящее время для начала моделирования этого циклона 0 ч 25 сентября 2005 г.

По-видимому, важным обстоятельством является наличие к этому сроку в данных оперативного анализа «затравки», или «зародыша» (слабого почти круглого вихря со скоростью ветра около 10 м/с (рис. 2), из которого впоследствии развился квазитропический циклон). При моделировании тропических циклонов подобные «зародыши» обычно искусственно вводятся в крупномасштабное синоптическое окружение, потому что без них тропический циклон не возникает [12]. В нашем случае этого делать не потребовалось, так как «зародыш» уже содержался в начальных условиях, полученных по данным оперативного анализа, а с помощью модели *MM5* из «зародыша» удалось воспроизвести формирование зрелого циклона.

В подтверждение вышесказанного следует отметить, что когда для задания начальных и граничных условий использовался массив данных реанализа *NCEP/NCAR* с более грубым пространственным разрешением, воспроизвести квазитропический циклон не удалось. Это объясняется отсутствием «затравки» в начальных условиях.

Далее рассматривается вариант с начальными условиями для 0 ч 25 сентября (начальные и граничные условия взяты из данных оперативного анализа). Моделирование проводилось на 6 сут: с 25 до 30 сентября.

В модели были успешно воспроизведены все стадии эволюции циклона – рост, зрелая стадия и затухание после выхода на территорию Турции. Согласно результатам моделирования к 10 ч 27 сентября приповерхностная скорость ветра в циклоне превысила 20 м/с. К 22 ч 28 сентября глубина циклона достигла наибольшего значения 992 гПа. После этого циклон начал ослабевать, перемещаться на юг и к 29 сентября вышел на сушу.

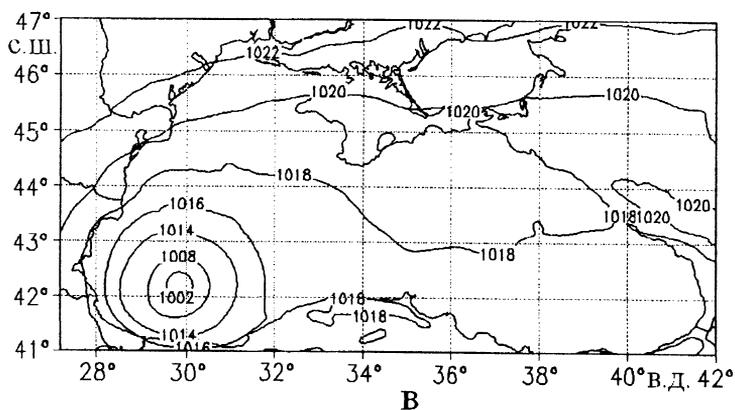
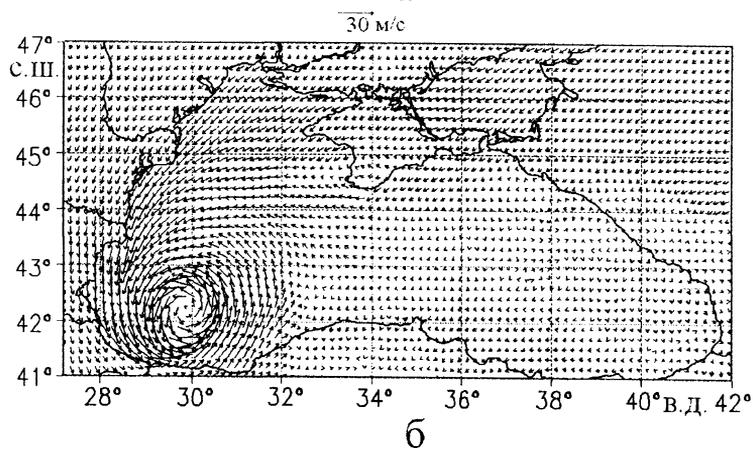
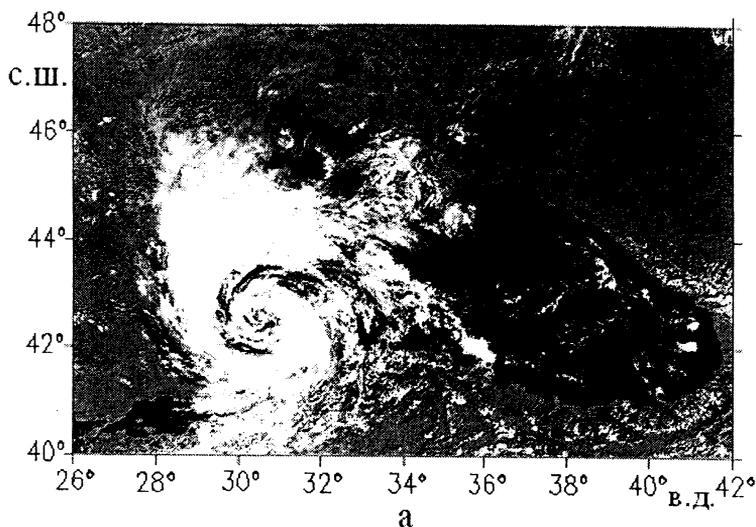
Тропический циклон со скоростью ветра от 17,5 до 33 м/с переходит в категорию тропического шторма по шкале Саффир – Симсона. Обычно давление в центре классического тропического циклона составляет 950 – 960 гПа, довольно часто оно падает до 890 гПа, рекордно низкое давление в центре тропического циклона – 875 гПа.

Для детального исследования стадий роста и затухания циклона необходим анализ источников, стоков и скоростей роста кинетической, потенциальной и тепловой энергий, импульса, момента импульса, завихренности, потенциальной завихренности. Это будет сделано в следующих статьях, а здесь рассмотрим установившуюся зрелую стадию развития, когда скорости изменения указанных переменных малы и в уравнениях для них выполняются условия баланса. Зрелая стадия наступила в 12 ч 27 сентября.

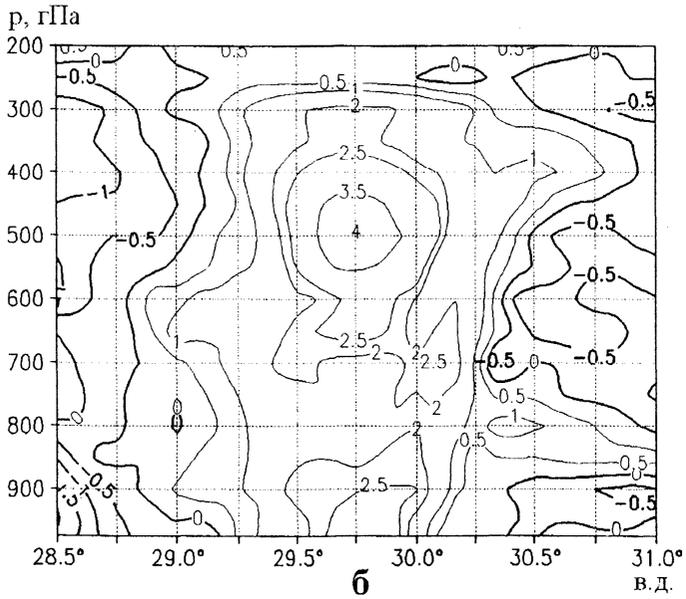
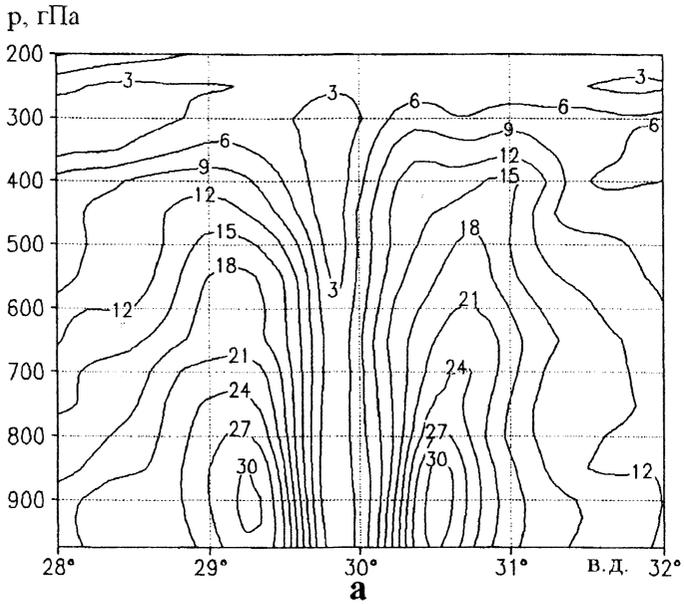
На рис. 4 показаны облачность над Черным морем по спутниковым данным, а также скорость ветра на высоте 10 м и давление на уровне моря для 12 ч 27 сентября по результатам моделирования. Видно, что в модели успешно воспроизведены размеры и положение циклона. Подобное совпадение имеет место и для других сроков (не показано); небольшие блуждания, которые циклон совершал за время своей жизни в юго-западной части Черного моря, хорошо воспроизводятся моделью.

Для демонстрации вертикальной структуры циклона на рис. 5, а показан вертикальный разрез модуля горизонтальной скорости ветра, проведенный через поверхностный центр циклона. Разрез сделан на уровнях давления от 975 до 200 гПа; широта 42,3°, долгота менялась от 28 до 32°. На этом разрезе хорошо различим почти безветренный вертикальный столб воздуха, т.е. глаз. Видно, что циклон достигал уровня давления 350 – 400 гПа; высота его, таким образом, составляла около 8 км. Высотная ось циклона была близка к вертикали, и, значит, центр вихревой структуры его облачной системы совпадал с приземным центром циклона.

Обычно тропический циклон, в отличие от среднеширотного, имеет теплое ядро. Для мощных тропических ураганов аномалия температуры в центре циклона относительно окружающей атмосферы достигает 16 °С с максимальным значением на уровне 200 – 400 гПа. Мы проверили наличие теплового ядра у рассматриваемого квазитропического циклона. Для этого на каждом уровне давления были вычислены средняя по домену температура воздуха и отклонение от средней температуры  $\Delta T$ . На рис. 5, б на вертикальном разрезе  $\Delta T$  для 12 ч 27 сентября видно теплое ядро циклона с максимумом прогрева 3 °С на уровне 550 гПа.



**Р и с. 4.** Сравнение спутниковых данных и результатов моделирования: *а* – облачность по спутниковым данным, *б* – скорость ветра (м/с) на высоте 10 м над поверхностью, *в* – давление (гПа) на уровне моря по результатам моделирования для 12 ч 27 сентября



**Р и с. 5.** Вертикальная структура циклона: *а* – разрез модуля горизонтальной скорости ветра (м/с), *б* – разрез отклонения от средней температуры (°С) для 12 ч 27 сентября (широта 42,3° с.ш., на рис. *б* тонкие сплошные линии соответствуют положительным значениям, а жирные — отрицательным)

Максимальный за все время жизни прогрев ядра циклона составлял 4 °С и был достигнут в 16 ч 28 сентября на уровне давления 750 гПа. Вертикальные скорость и ускорение в глазу циклона в зрелой стадии развития малы,

поэтому выполняется приближение гидростатики. Аномалию давления на уровне моря можно определить, зная распределение температуры из уравнения гидростатики. Из уравнения гидростатики и уравнения состояния легко показать, что разница  $\Delta p$  между давлением на уровне моря в центре циклона и на его периферии следующая:

$$\Delta p \approx p_0 \frac{gH\Delta T}{RT^2},$$

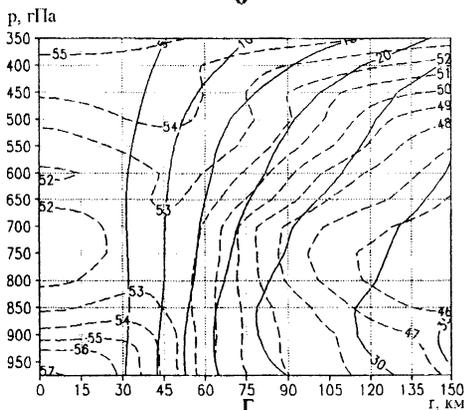
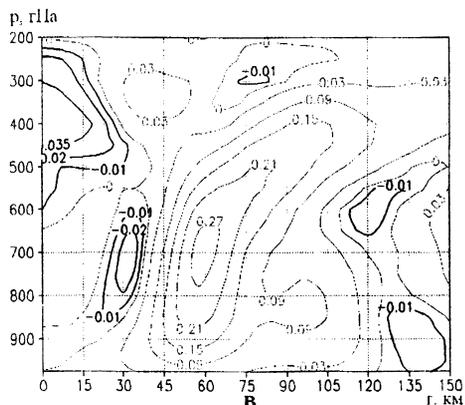
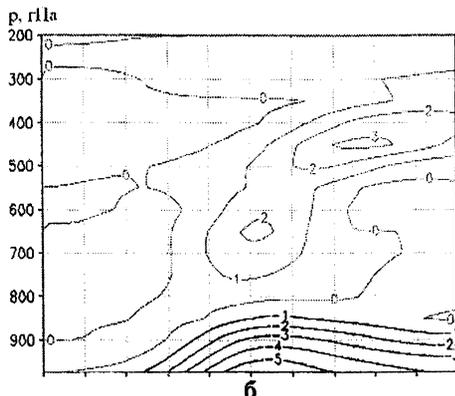
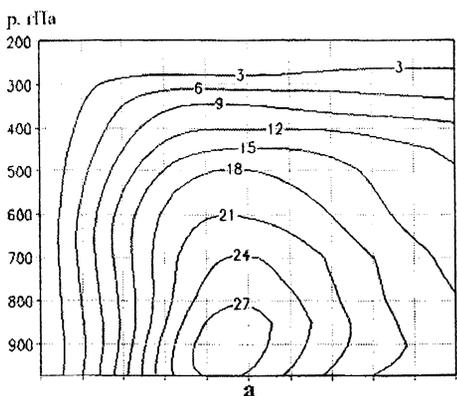
здесь  $p_0$  – давление на уровне моря;  $g$  – ускорение свободного падения;  $H$  – высота циклона;  $R$  – газовая постоянная для сухого воздуха;  $\Delta T$  – аномалия абсолютной температуры (К) в центре циклона, осредненная по высоте;  $T$  – абсолютная температура воздуха (К) на периферии циклона, также осредненная по высоте. Примем  $p_0$  равным 1000 гПа. По результатам моделирования известны значения следующих величин:  $H = 9500$  м,  $\Delta T = 3$  К,  $T = 265$  К. Подставив эти значения в уравнение, получим  $\Delta p \approx 14$  гПа. Рассчитанное по формуле значение  $\Delta p$  (14 гПа) близко к полученному по результатам моделирования (16 гПа).

Тропический циклон в первом приближении осесимметричный. Первые модели тропических циклонов, как аналитические, так и численные, были осесимметричными. Отклонения от осевой симметрии в последнее время интенсивно исследуются и описаны в литературе. Они связаны с поступательным перемещением циклона, а также с образованием спиральных рукавов и так называемых вихревых волн Россби, бегущих в азимутальном направлении вокруг центра циклона [13]. Эти отклонения будут рассмотрены отдельно в других статьях, а здесь исследуем более важную осесимметричную структуру циклона.

Для этого используем цилиндрическую систему координат  $(r, \varphi, p)$ , начало которой совпадает с приземным центром циклона и перемещается вместе с ним. Все переменные осредняются по азимутальному углу  $\varphi$ , полученные азимутальные средние зависят только от расстояния от центра циклона  $r$  и давления  $p$ . Вектор скорости в цилиндрических координатах имеет три компоненты: азимутальную  $v_\varphi$ , радиальную  $v_r$  и вертикальную  $w$ . Для описания структуры циклона также вводится понятие радиуса максимальной скорости ветра  $r_{\max}$  – расстояния от центра циклона, на котором осредненная по азимуту (азимутальная) скорость ветра достигает наибольшего значения.

Еще одна важная величина, которая была вычислена и необходима для описания динамики циклона – абсолютный момент импульса на единицу массы:  $M = v_\varphi r + fr^2/2$  – сумма относительного момента импульса  $v_\varphi r$  и момента импульса, связанного с планетарным вращением,  $fr^2/2$ . При отсутствии трения абсолютный момент импульса является лагранжевским инвариантом, т.е. сохраняется для движущейся частицы воздуха.

На рис. 6 показана осесимметричная структура циклона: азимутальная  $v_\varphi$ , радиальная  $v_r$  и вертикальная  $w$  компоненты скорости ветра, осредненные по азимутальному углу, для 12 ч 27 сентября.



**Р и с. 6.** Вертикальные разрезы усредненных по азимуту полей для 12 ч 27 сентября: *а* – азимутальная скорость ветра (м/с), *б* – радиальная скорость ветра (м/с), *в* – вертикальная скорость ветра (м/с), *г* – абсолютный момент импульса ( $10^5 \text{ м}^2/\text{с}$ ) (сплошные линии) и эквивалентная потенциальная температура ( $^{\circ}\text{C}$ ) (штриховые) (на рис. *б*, *в* тонкие сплошные линии соответствуют положительным значениям, а жирные – отрицательным)

Основная особенность зрелого урагана – кольцевая область экстремально сильного азимутального ветра. Эту циклоническую азимутальную циркуляцию обычно называют первичной. Первичная циркуляция максимальна на поверхности и убывает с высотой. Азимутальная скорость в тропических циклонах может достигать максимального значения 70 м/с при  $r_{\text{max}} = 20 - 40 \text{ км}$ .

Показанное на рис. 6 распределение азимутальной скорости  $v_{\phi}(r, p)$  для черноморского циклона очень похоже на распределение для стандартного тропического циклона. При фиксированном давлении  $v_{\phi}$  приблизительно линейно растет с увеличением  $r$  от 0 до  $r_{\text{max}} = 60 \text{ км}$ , что соответствует твердотельному вращению или постоянной завихренности, а затем с увеличением  $r$  уменьшается. Максимального значения 27 м/с  $v_{\phi}$  достигает на уровне давления 925 гПа, выше этого уровня  $v_{\phi}$  с высотой уменьшается.

Другая важная особенность тропического циклона – конвергенция поля скорости в нижних слоях атмосферы, подъем воздуха в стене глаза, совпадающей по положению с областью максимального азимутального ветра, и

дивергенция на верхних уровнях. Эта тороидальная циркуляция называется вторичной. Для сильного тропического циклона радиальная скорость  $v_r$  может достигать величины 25 м/с внизу в области притока воздуха и 12 м/с наверху в области оттока. Вертикальная скорость подъема воздуха в стене глаза достигает величины 2 м/с.

На рис. 6, б, в приведены распределения радиальной  $v_r(r, p)$  и вертикальной  $w(r, p)$  скоростей для черноморского циклона. Они похожи на соответствующие распределения для тропического циклона. Сильный приток воздуха к центру циклона (конвергенция) происходит в пограничном слое на уровнях давления ниже 800 гПа, а сильный отток (дивергенция) – на верхних уровнях выше 500 гПа (рис. 6, б). Наибольшее значение скорости притока 5 м/с достигается на высоте 300 м, а наибольшее значение скорости оттока 3 м/с – на высоте 7400 м. На рис. 6, в видны сильный вертикальный подъем воздуха в стене глаза на расстоянии 60 км от центра циклона во всей толще тропосферы с максимальной скоростью 0,3 м/с на уровне 700 гПа и слабое оседание в глазу циклона с максимальной скоростью 0,06 м/с.

Главный механизм формирования первичной циркуляции – сохранение абсолютного момента импульса при конвергенции в нижних слоях. Кольцо вращающегося воздуха при конвергенции сжимается, и поэтому азимутальная скорость увеличивается. Если на периферии циклона на расстоянии  $r_0$  от центра  $v_\varphi = 0$ , то закон сохранения абсолютного момента импульса дает  $M = v_\varphi r + fr^2/2 = fr_0^2/2 = \text{const}$ . В центре циклона при  $r = 0$  азимутальная скорость  $v_\varphi$  должна обратиться в бесконечность. На самом деле, начиная с радиуса  $r_{\text{max}}$ , конвергенция и радиальная скорость резко уменьшаются, а азимутальная скорость при  $r = r_{\text{max}}$  достигает максимума. Согласно уравнению неразрывности кольцо воздуха сначала поднимается вверх и затем на верхних уровнях за счет дивергенции растягивается, при этом уменьшается скорость вращения  $v_\varphi$ . На нижних уровнях абсолютный момент импульса не сохраняется из-за трения, поэтому  $M$  уменьшается при уменьшении  $r$ , как это видно на рис. 6, г. На верхних же уровнях абсолютный момент импульса сохраняется, и там изолинии  $M$  совпадают с линиями тока вторичной циркуляции (рис. 6, г).

Существует два основных механизма развития и поддержания вторичной циркуляции. Первый связан с выделением скрытого тепла при конденсации влаги в стене глаза в условиях глубокой конвекции, с прогреванием воздуха и увеличением его плавучести. Повышенная по сравнению с периферией циклона плавучесть усиливает подъем воздуха в стене глаза и, следовательно, конвергенцию на нижних уровнях. Этот механизм работает на ранней стадии развития вихря и достаточно хорошо воспроизводится почти всеми существующими схемами параметризации конвекции. Второй механизм связан с поверхностным трением. Циклоническая завихренность первичной циркуляции приводит к экмановской конвергенции за счет трения в пограничном слое и положительной вертикальной скорости на его верхней границе. В зрелом циклоне преобладает второй механизм.

В настоящее время существует две общепризнанные теории тропического циклогенеза – теория конвективной неустойчивости второго рода

(*CISK*) и теория вызванного ветром поверхностного потока тепла (*WISHE*). Теории *CISK* и *WISHE* подробно обсуждаются в работе [14]. Более правдоподобным сейчас считается механизм *WISHE*, в котором решающую роль играет положительная обратная связь между скоростью ветра (первичной азимутальной циркуляцией) и потоками явного и скрытого тепла от поверхности океана. Увеличение скорости ветра приводит к увеличению поверхностных потоков тепла. Это тепло за счет конвекции распространяется в стене глаза вверх, увеличивает плавучесть воздуха, усиливает конвергенцию на нижних уровнях и за счет сохранения момента импульса усиливает первичную циркуляцию.

По-видимому, механизм *WISHE* имел место в данном случае. Чтобы точно ответить на этот вопрос, нужен детальный анализ моделирования. Пока предварительно можно сказать, что поверхностные потоки явного и скрытого тепла в области стены глаза, где ветер максимален, достигали очень больших величин: 300 и 700 Вт/м<sup>2</sup> соответственно.

Конвекция была хорошо выражена на всех стадиях развития циклона. Во-первых, это конвективная облачность и конвективные осадки, сосредоточенные в спиральных рукавах, закрученных вокруг глаза. Характерные пространственные масштабы конвективной облачности получились такие же, как и на спутниковых снимках. Радиус стены глаза с максимальной конвекцией равен 60 км, а радиус всей облачной системы – 150 км. Величина осадков составляет 10 см/сут. Во-вторых, признаком глубокой конвекции являются большие значения эквивалентной потенциальной температуры  $\theta_e$ . На рис. 6, *г* показано распределение осредненной по азимуту эквивалентной потенциальной температуры. В стене глаза, где сосредоточена конвекция,  $\theta_e$  достигает величины 53 °С. Для сильного тропического циклона эквивалентная потенциальная температура в стене глаза достигает 90 °С.

**Заключение.** В статье представлены результаты исследования аномального квазитропического циклона, зародившегося над Черным морем в конце сентября 2005 г. Для исследования циклона использовалась негидростатическая численная модель *MM5* с начальными и граничными условиями, взятыми из данных оперативного глобального анализа.

По модели рассчитаны основные характеристики циклона, согласующиеся с имеющимися спутниковыми данными о скорости ветра (скаттерометр *QuikScat*) и облачности.

Во-первых, воспроизведена эволюция циклона за 25 – 29 сентября — рост, зрелая стадия и затухание. Во-вторых, смоделирована траектория центра циклона: в течение 5 сут вихрь совершал незначительные блуждания в юго-западной части Черного моря. В-третьих, получена близкая к осесимметричной форма вихря со спиральными рукавами. В-четвертых, рассчитаны размер циклона, радиус максимальной скорости ветра 60 км и радиус облачной системы 150 км, а также максимальная скорость ветра на поверхности, превышающая 20 м/с.

Кроме того, с помощью модели воспроизведены другие параметры циклона, которые не были измерены: в частности, первичная циркуляция с при-

поверхностным максимумом азимутальной скорости и постепенным затуханием до уровня 300 гПа, а также вторичная циркуляция с конвергенцией на нижних уровнях, подъемом в стене глаза и дивергенцией на верхних уровнях. Циклон обладает безоблачным глазом, где оседает воздух, и теплым ядром с максимумом прогрева 3 °С. Облачность и осадки сосредоточены в стене глаза, состоящей из нескольких спиральных рукавов. Суммарный поток явного и скрытого тепла достигает величины 1000 Вт/м<sup>2</sup>. Максимальные значения эквивалентной потенциальной температуры составляют около 77 °С.

Таким образом, по всем этим характеристикам аномальный черноморский циклон имеет основные свойства тропических циклонов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wigley T.W.L.* Input needs for downscaling of climate data // Discuss. Paper. – 2004. – 36 p.
2. *Emanuel K.A.* Tropical Cyclones // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. – 2003. – 31. – P. 75 – 104.
3. *Homar V., Romero R., Stensrud D.J. et al.* Numerical diagnosis of a small, quasi-tropical cyclone over the western Mediterranean: Dynamical vs. boundary factors // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. – 2003. – 129, № 590. – P. 1469 – 1490.
4. *Meneguzzo F., Pasqui M., Messeri G. et al.* High-resolution Simulation of a Deep Mediterranean Cyclone Using RAMS Model // Unpubl. manusc. – 2000. – 21 p.
5. *Ernst J.A., Matson M.* A Mediterranean tropical storm? // Weather. – 1983. – 38. – P. 332 – 337.
6. *Alpert P., Tzidulko M., Izigsohn D.* A shallow short-lived meso-beta cyclone over the Gulf of Antalya, Eastern Mediterranean // Tellus. – 1999. – 51A, № 2. – P. 249 – 262.
7. *Pytharoulis L., Craig G.C., Ballard S.P.* The hurricane-like Mediterranean cyclone of January 1995 // Meteorol. Applications. – 2000. – 7, № 3. – P. 261 – 279.
8. *Reale O., Atlas R.* Tropical cyclone-like vortices in the extratropics: Observational evidence and synoptic analysis // Wea. Forecas. – 2001. – 16, № 1. – P. 7 – 34.
9. *Grell G.A., Dudhia J., Stauffer D.R.* A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5) // NCAR Tech. Note. – 1995. – 131 p.
10. *Dudhia J., Gill D., Guo Y.-R. et al.* PSU/NCAR Mesoscale Modeling System. Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3 // NCAR Tutor. Notes. – 2005. – 225 p.
11. *Reed R.J., Kuo Y.-H., Albrigh M.D. et al.* Analysis and modeling of a tropical-like cyclone in the Mediterranean Sea // Meteorol. Atmos. Physics. – 2001. – 76, № 3 – 4. – P. 183 – 202.
12. *Liu Y., Zhang D.-L., Yau M.* A multiscale numerical study of hurricane Andrew (1992). Part I: Explicit simulation and verification // Mon. Wea. Rev. – 1997. – 125, № 12. – P. 3073 – 3093.
13. *Enagonio J., Montgomery M.T.* Tropical cyclogenesis via convectively forced vortex Rossby waves in a shallow water primitive equation model // J. Atmos. Sci. – 2001. – 58, № 7. – P. 685 – 705.
14. *Craig G.C., Gray S.L.* CISK or WISHE as the mechanism for tropical cyclone intensification // Ibid. – 1996. – 53, № 23. – P. 3528 – 3540.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь

Материал поступил  
в редакцию 26.07.06  
После доработки 16.11.06

**ABSTRACT** Long-lived meso-scale cyclone observed above the Black Sea in September, 2005 was characterized by strong winds (25 m/s) and induced unusual sea surface temperature drop (more than 10°C). The cyclone is simulated using the model MM5 and the global operational analysis data. The model simulates the cyclone evolution and the structure similar to a tropical cyclone. The primary azimuthal and secondary radial circulations, the clear sky eye with the warm core on the midlevels, the eyewall with strong updrafts and intensive convection and precipitation are well pronounced. Latent and sensible heat fluxes on the sea surface play a dominant role in genesis and development of the cyclone.