

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В МОРЯХ И ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМАХ: ЧЕРНОЕ И АЗОВСКОЕ МОРЯ

УДК 551.584

М.В. Шокуров

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НАД ЧЕРНЫМ МОРЕМ

Приводится описание мезомасштабных региональных моделей *MM5* и *WRF*. Перечислены задачи, которые решаются с помощью данных моделей в МГИ НАН Украины: региональный оперативный прогноз погоды, региональный атмосферный реанализ, планирование проведения натурных экспериментов, анализ отдельных синоптических ситуаций. Дан обзор мезомасштабных атмосферных явлений, изучаемых с использованием региональных атмосферных моделей. Приведены примеры использования региональных моделей для исследования мезомасштабных атмосферных явлений: квазитропический циклон над Черным морем, образование подветренных вихрей при обтекании Кавказских гор, генерация подветренных вертикально захваченных внутренних волн над Крымскими горами, развитие бризовой циркуляции над Крымским полуостровом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *мезомасштабные атмосферные модели, мезомасштабные атмосферные процессы, Черное море, численное моделирование.*

Введение. В настоящее время современные мезомасштабные модели атмосферной циркуляции достигли высокого уровня развития. Развивается также и компьютерная техника. В связи с этим стало возможным рассчитывать атмосферную циркуляцию в любом регионе земного шара с достаточно высоким разрешением – вплоть до 1 км. В Морском гидрофизическом институте НАН Украины (МГИ НАН Украины) мезомасштабные атмосферные модели за последние пять лет использовались для исследований атмосферной циркуляции в Черноморском регионе. Целью настоящей работы является описание самих моделей и полученных с их помощью результатов.

Описание моделей *MM5* и *WRF*. Мезомасштабные атмосферные модели *MM5* (*Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model*) и более современный вариант *WRF* (*The Weather Research and Forecasting model*) разрабатывались Национальным Центром Атмосферных Исследований США (*NCEP/NCAR – National Center for Environmental Prediction / National Centers of Atmospheric Research*) как для научных исследований мезомасштабных атмосферных явлений, так и для выполнения оперативных прогнозов и региональных реанализов [1, 2]. Диапазон пространственных мас-

© М.В. Шокуров, 2011

штабов, описываемых мезомасштабными моделями и не описываемых глобальными атмосферными моделями – от 1 до 30 км.

Мезомасштабная атмосферная модель состоит из гидродинамического блока, содержащего уравнение Навье-Стокса с учетом силы Кориолиса, уравнение неразрывности, уравнение переноса тепла и уравнение состояния воздуха.

К гидродинамическому блоку добавляются физические блоки, зависящие от гидродинамических переменных, и в свою очередь сами влияющие на них. Можно выделить шесть основных физических процессов, для каждого из которых выписываются дополнительные уравнения.

Это:

- перенос инфракрасного и видимого солнечного излучения;
- процесс формирования облачности и осадков;
- кучевая конвекция;
- турбулентные потоки импульса тепла и влаги в планетарном атмосферном пограничном слое и в приземном слое;
- перенос тепла и влаги в верхнем слое почвы.

Каждая физическая параметризация в моделях *MM5* и *WRF* программно реализована в нескольких вариантах, например параметризация пограничного слоя в модели *MM5* может быть выбрана от наиболее ранней параметризации Блакадара начала 1970-х годов до наиболее современной модели пограничного слоя *Pleim-Xiu*. То же самое относится и к модели *WRF*, и к другим физическим процессам. Детальное описание всех вариантов параметризаций представлено в обширной литературе и в документации моделей [3, 4]. Результатом такого разнообразия является необходимость выбора набора параметризаций, наиболее подходящих для данного региона. Эта задача неоднократно обсуждалась в публикациях, основным критерием для выбора параметризаций является сравнение с измерениями, с натурными данными.

Для оперативного прогноза и реанализа выбраны параметризации физических процессов, используемые и проверенные в течение четырех лет оперативного прогноза для региона Черного моря. Далее приводится перечень схем параметризации и их краткая характеристика:

1. Для параметризации пограничного слоя выбрана схема *MRF (Medium Range Forecast* – среднесрочный прогноз), в которой для случая неустойчивой стратификации пограничного слоя реализована нелокальная схема параметризации турбулентных потоков импульса, тепла и влаги.

2. Для параметризации кучевой конвекции использовалась схема *Grell*, рассчитанная на масштабы меньше 30 км. В третьем и четвертом доменах с разрешением 3 км и 1 км параметризация кучевой конвекции была отключена, кучевая конвекция рассчитывалась явно.

3. Для расчета переноса излучения в атмосфере применялась схема *RRTM (Rapid Radiative Transfer Model)*, в которой перенос инфракрасного излучения рассчитывается с детальным распределением по частотам. При этом расчет выполняется сравнительно быстро за счет специально разработанной схемы интегрирования в схеме *RRTM*.

4. Для расчета фазовых переходов воды и льда и переноса гидрометеоров в облаках использовалась схема *Simple Ice* с одной формой льда и несколькими формами жидкой воды в облаках.

5. Для расчета потоков тепла и влаги на поверхности суши использовалась пятислойная модель почвы с явным расчетом температуры и влажности почвы в верхнем слое толщиной 2 м.

Использование мезомасштабных моделей в МГИ НАН Украины. В отделе взаимодействия атмосферы и океана Морского гидрофизического института НАН Украины с начала 2007 года выполняется оперативный прогноз атмосферной циркуляции для региона Черного моря. Система анализа и прогноза атмосферной циркуляции основана на свободно распространяемой мезомасштабной модели *MM5* версии 3.7, которая была адаптирована для региона Черного моря.

В качестве начальных условий и граничных условий на боковых границах используются результаты прогнозов глобальных моделей. Поскольку Европейский Центр среднесрочных прогнозов погоды (*ECMWF*) проводит очень строгую финансовую политику, его данные практически недоступны, даже для некоммерческого использования в научных целях. В отличие от *ECMWF* полностью доступны архив оперативных анализов *GDAS (Global Data Assimilation System)* и данные оперативных прогнозов *GFS (Global Forecast System)*. Поэтому для оперативного прогноза используются результаты оперативного прогноза *GDAS/GFS* с разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ с 2007 г. по 2011 г.

Очень большую роль для атмосферной циркуляции в Черноморском регионе играет температура поверхности Черного моря. Для оперативного прогноза используются результаты измерений температуры поверхности моря. Граничное условие на подстилающей поверхности для акватории Черного моря берется из оперативно пополняемого архива глобальной температуры поверхности океана *Reynolds SST* – данные имеют пространственное разрешение $1^\circ \times 1^\circ$ и обновляются раз в неделю. Для составления названного архива используются все имеющиеся оперативные измерения, включая спутниковые.

Пространственное разрешение для всего Черноморского региона равно 10 км, с начала 2011 года выполняется также прогноз для Крымского региона с разрешением 3 км. Начиная с середины 2011 года заблаговременность прогноза была увеличена до 5 суток. Результаты прогноза в графическом и цифровом форматах предоставляются пользователям, а также выкладываются в открытом доступе в сети Интернет по адресам <http://vao.hydrophys.org> и <http://vao.hydrophys.org/index3km.html>.

Основным пользователем оперативного прогноза является отдел Морских прогнозов МГИ НАН Украины, поэтому прогнозируемые параметры, представленные на сайте, – это потоки импульса, тепла, излучения и влаги на поверхности моря. Эти параметры необходимы для численного прогноза циркуляции вод в Черном море. Кроме этого представлены стандартные метеорологические параметры, такие как:

- температура и влажность на уровне 2 м;
- скорость и направление ветра на высоте 10 м;
- давление на уровне моря;
- облачность нижнего, среднего и верхнего ярусов;
- геопотенциал и температура на уровне давления 850 гПа.

Дополнительно к атмосферному прогнозу выполняется также прогноз ветрового волнения на всей акватории Черного моря с использованием модели ветрового волнения *WAM (Wave Ocean Model)*.

На рис. 1 и рис. 2 представлены типичные результаты оперативного прогноза для Черноморского региона – распределение скорости ветра и осадков.

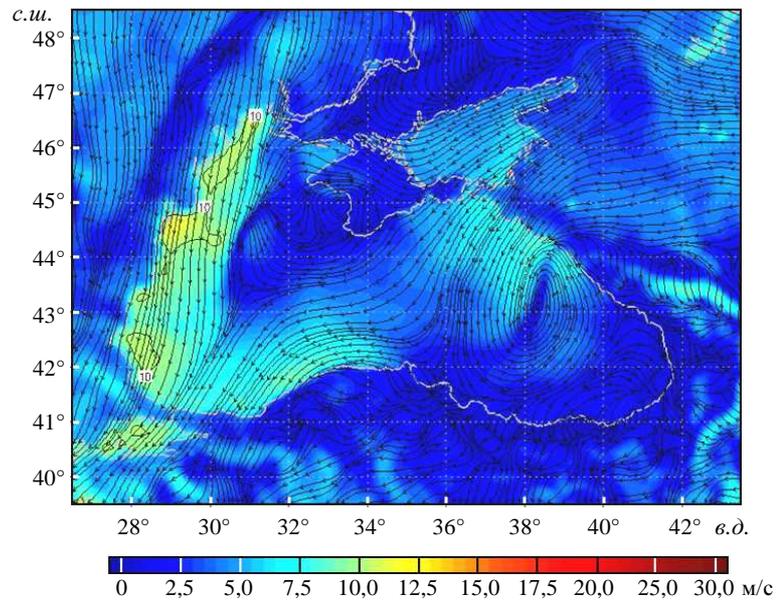


Рис. 1. Результаты оперативного прогноза скорости ветра на высоте 10 м для Черноморского региона с разрешением 10 км.

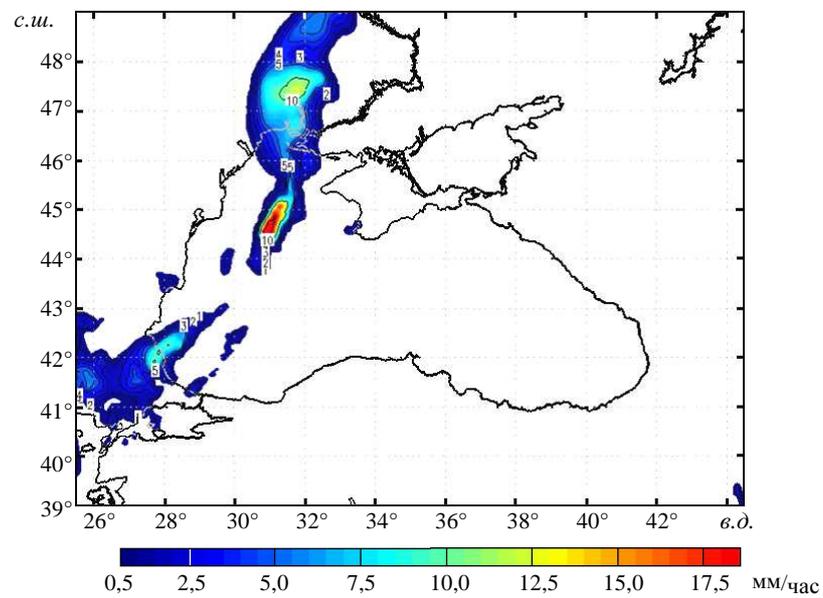


Рис. 2. Результаты оперативного прогноза осадков для Черноморского региона с разрешением 10 км.

На рис. 3 и рис. 4 приведены результаты оперативного прогноза для Крымского региона с разрешением 3 км – распределение скорости ветра и потока скрытого тепла.

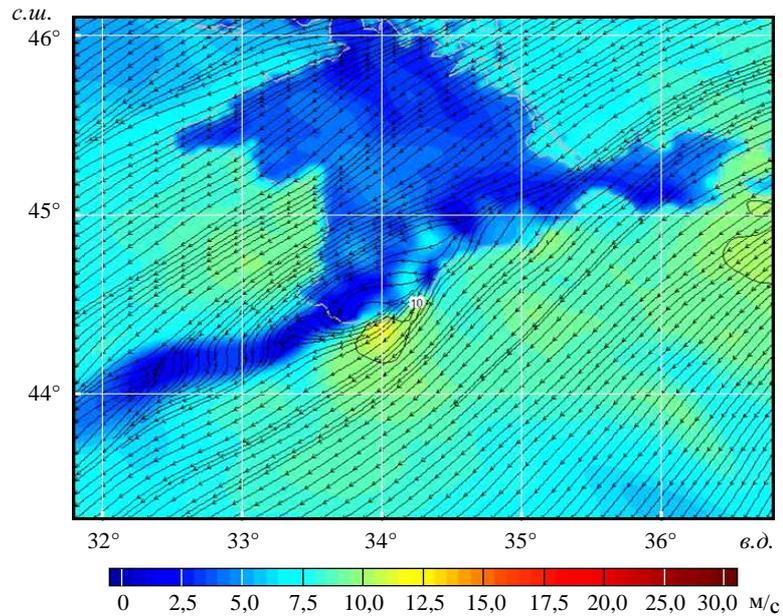


Рис. 3. Результаты оперативного прогноза скорости ветра на высоте 10 м для Крымского региона с разрешением 3 км.

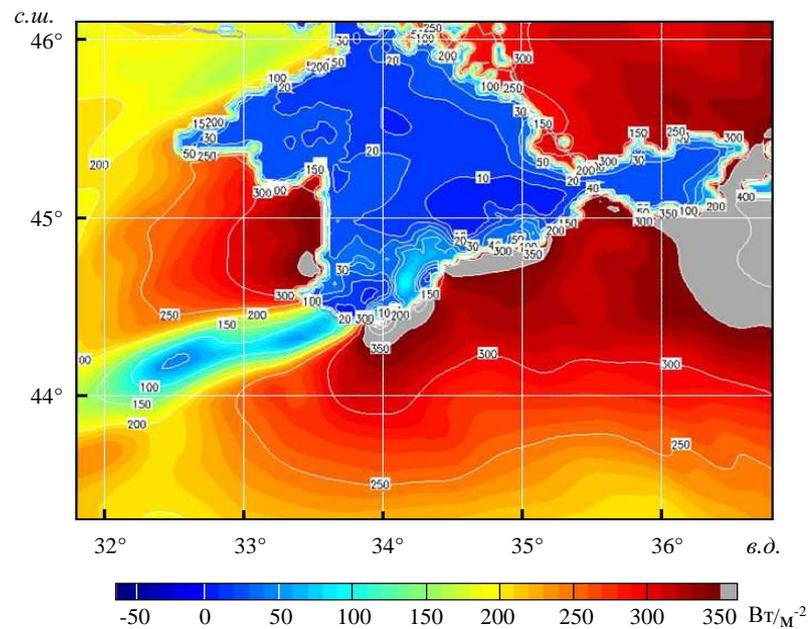


Рис. 4. Результаты оперативного прогноза потока скрытого тепла на поверхности для Крымского региона с разрешением 3 км.

Модель *MM5* хорошо зарекомендовала себя при оперативных прогнозах. Сравнение прогнозируемых параметров с наблюдениями на метеостанциях (валидация) показывает значительную корреляцию для большинства параметров.

Еще одним важным направлением использования мезомасштабных атмосферных моделей является региональный атмосферный реанализ. В настоящее время в отделе взаимодействия атмосферы и океана МГИ НАН Украины выполнено два реанализа для Черноморского региона с использованием разных мезомасштабных моделей.

Первый из них был выполнен с использованием модели *MM5*. В качестве горизонтальных граничных условий использовались результаты глобального оперативного анализа *NCEP/NCAR GDAS* с разрешением $1^\circ \times 1^\circ$. Граничное условие на подстилающей поверхности для акватории Черного моря бралось из архива глобальной температуры поверхности океана *Reynolds SST*. Пространственное разрешение реанализа 18 км, дискретность по времени 1 час, продолжительность по времени 2000-2010 гг.

Второй проект реанализа был выполнен с использованием региональной климатической модели *PRECIS (Regional Climate Modelling System)*. В качестве горизонтальных граничных условий использовались результаты глобального реанализа *ECMWF ERA-40* с разрешением $1,125^\circ \times 1,125^\circ$. Граничное условие на подстилающей поверхности для акватории Черного моря бралось из архива глобальной температуры поверхности океана *Reynolds SST*, а также из архива данных *COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set)*. Пространственное разрешение этого реанализа 25 км, дискретность по времени 1 час, продолжительность по времени 1958-2002 гг.

Результаты этих атмосферных реанализов будут использованы при выполнении реанализа циркуляции вод Черного моря.

Традиционным местом проведения натуральных гидрофизических экспериментов в МГИ НАН Украины является стационарная океанографическая платформа¹ в Кацивели. В настоящее время численные модели атмосферы с высоким пространственным разрешением используются для планирования и интерпретации натуральных экспериментов на платформе в Кацивели [5].

Наконец, важным направлением использования атмосферных моделей является ретроспективный расчет атмосферной циркуляции для конкретных регионов для определенных сроков. Обычно это требуется для обеспечения информацией о состоянии атмосферы при выполнении натуральных научно-исследовательских океанографических разрезов и полигонов. Такие ретроспективные расчеты требуются также для исследования различных редких экстремальных синоптических явлений.

Мезомасштабные атмосферные процессы. Мезомасштабная метеорология в последнее время интенсивно развивается. Предметом ее исследования являются мезомасштабные атмосферные процессы. Классическими примерами мезомасштабных процессов являются бризы, тропические циклоны, фронты.

Взаимодействие воздушного потока с рельефом приводит к различным орографическим явлениям – горные волны, подветренные захваченные волны, обрушение внутренних гравитационных волн над гребнем, сильные

склоновые ветры, блокирование потока горным хребтом, анабатические и кататические ветры, образование подветренных вихрей.

К мезомасштабным явлениям относятся также различные формы влажной кучевой конвекции: одиночные конвективные ячейки, линии шквалов, мультячейковые и суперячейковые конвективные структуры, мезомасштабные конвективные комплексы и мезомасштабные конвективные вихри.

В следующих разделах будут описаны результаты моделирования и сравнения с наблюдениями некоторых мезомасштабных атмосферных процессов в Черноморском регионе.

Квазитропический циклон. Исследование тропических циклонов представляет собой одно из актуальных направлений геофизики. На сегодняшний день известны необходимые (но не достаточные) условия возникновения тропических циклонов, получено представление об основных механизмах, определяющих развитие этих циклонов. В то же время с развитием дистанционных методов изучения атмосферы и океана оказалось, что циклоны, сходные с тропическими, образуются, время от времени, и вне тропиков, в частности над Средиземным морем. Эти циклоны относятся к категории промежуточной между тропическими и среднеширотными и известны как квазитропические. В данном разделе будет описан уникальный квазитропический мезомасштабный циклон, возникший над Черным морем в сентябре 2005 г. [6 – 8]. Уникальность его заключается в том, что в отличие от соседнего Средиземного моря, над Черным морем случаи квазитропического циклогенеза ранее не наблюдались и, соответственно, не изучены.

Рассматриваемый мезомасштабный циклон развился в конце сентября 2005 г. В течение пяти суток вихрь стоял, слабо блуждая, над юго-западной частью Черного моря, затем переместился на юг и над сушей быстро наполнился – серия спутниковых снимков облачности над Черным морем, полученных в описываемый период в видимом диапазоне, приведена на рис. 5.

Черноморский циклон обладал следующими, общими с тропическим циклоном, признаками. Первое, это наличие так называемого глаза бури и спиралевидная структура облачной системы. Второе, большая для Черноморского региона скорость ветра в циклоне. Третье, это малый горизонтальный и большой вертикальный размер циклона. Кроме того, циклон был долгоживущим. Эти признаки были установлены по спутниковым данным и данным оперативного анализа.

Условия формирования черноморского квазитропического циклона были следующие. Прежде всего, это большая область конвективной доступной потенциальной энергии над Черным морем. Конвективная доступная потенциальная энергия является мерой неустойчивости атмосферы. Над морем она достигает больших значений с максимумом 1600 Дж/кг. Основная причина этого – перегрев поверхности моря: температура поверхности моря достигала 23 °С.

Далее, одним из необходимых условий формирования тропического циклона является отсутствие сильного ветра и особенно вертикального сдвига скорости ветра. В данном случае это условие было выполнено. Из-за отсутствия сильного ветра циклон мог долго оставаться на одном месте над теплым морем. Слабой циркуляции атмосферы в регионе Черного моря способствовал блокирующий антициклон над европейской частью России.

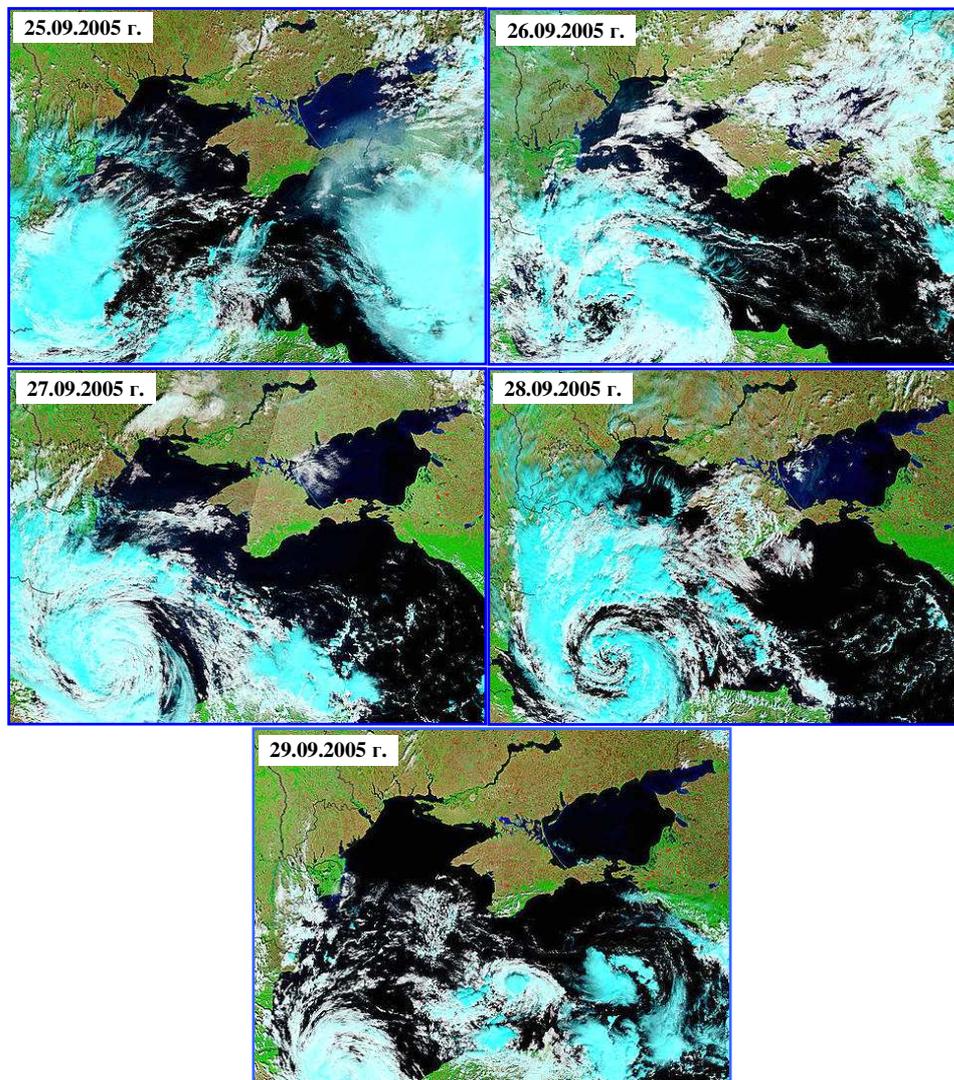


Рис. 5. Серия спутниковых снимков облачности над Черным морем, полученных 25, 26, 27, 28 и 29 сентября 2005 г. (видимый диапазон спектра).

Еще одним благоприятным условием для начала развития этого циклона являлась фоновая конвергенция в нижнем слое атмосферы, собиравшая теплый влажный воздух в одном месте. Эта конвергенция была наиболее велика в юго-западной части моря и послужила своего рода «затравкой» для циклона.

Для моделирования квазитропического циклона использовалась модель *MM5* с пространственным разрешением 10 км. Модель правильно воспроизвела форму, размеры и траекторию циклона, а также его интенсивность. На рис. 6 приведена зависимость от времени интенсивности циклона – давления в центре и максимальной азимутальной скорости, а также зависимость от времени его размера – радиуса максимальной скорости ветра.

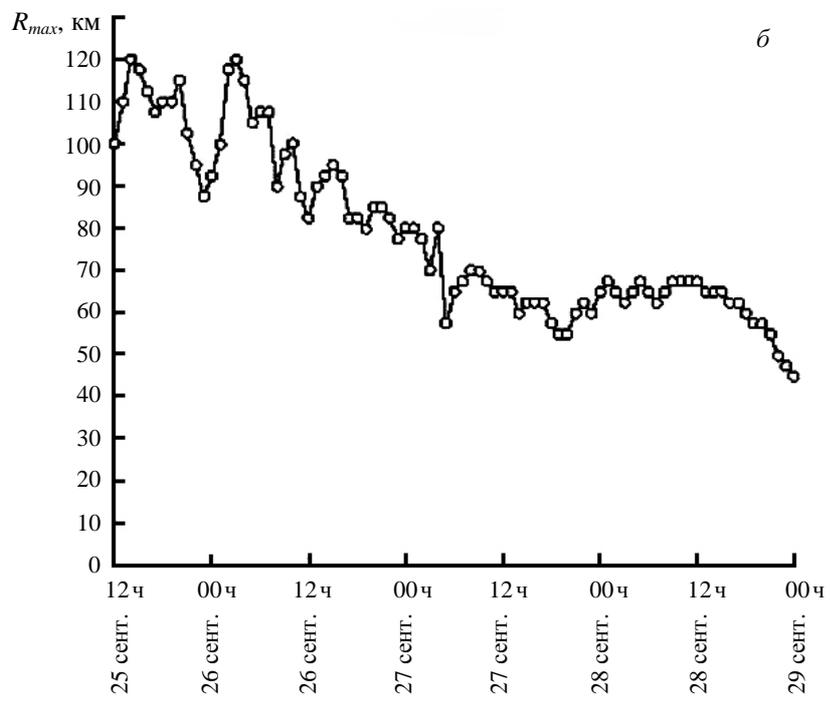
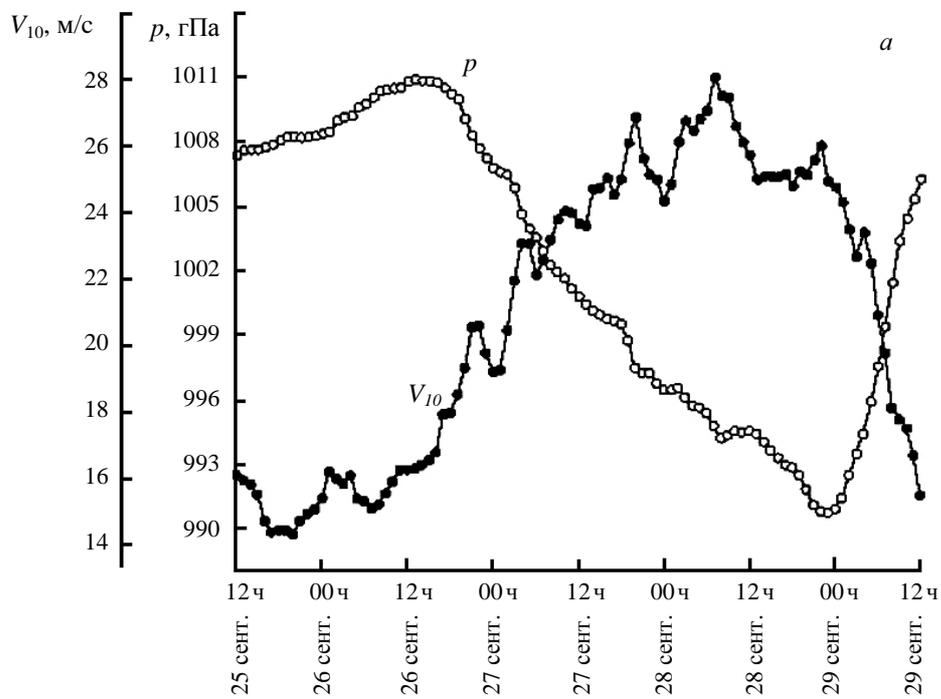


Рис. 6. Зависимость от времени: *a* – давления в центре циклона (p) и максимальной скорости ветра на высоте 10 м над поверхностью (V_{10}); *б* – радиуса максимальной скорости ветра R_{max} .

Далее кратко описана структура циклона на зрелой стадии. На этой стадии циклон имеет осевую симметрию, поэтому будет рассмотрена его осесимметричная структура. На рис. 7. показана осесимметричная структура циклона: азимутальная, радиальная и вертикальная компоненты скорости ветра.

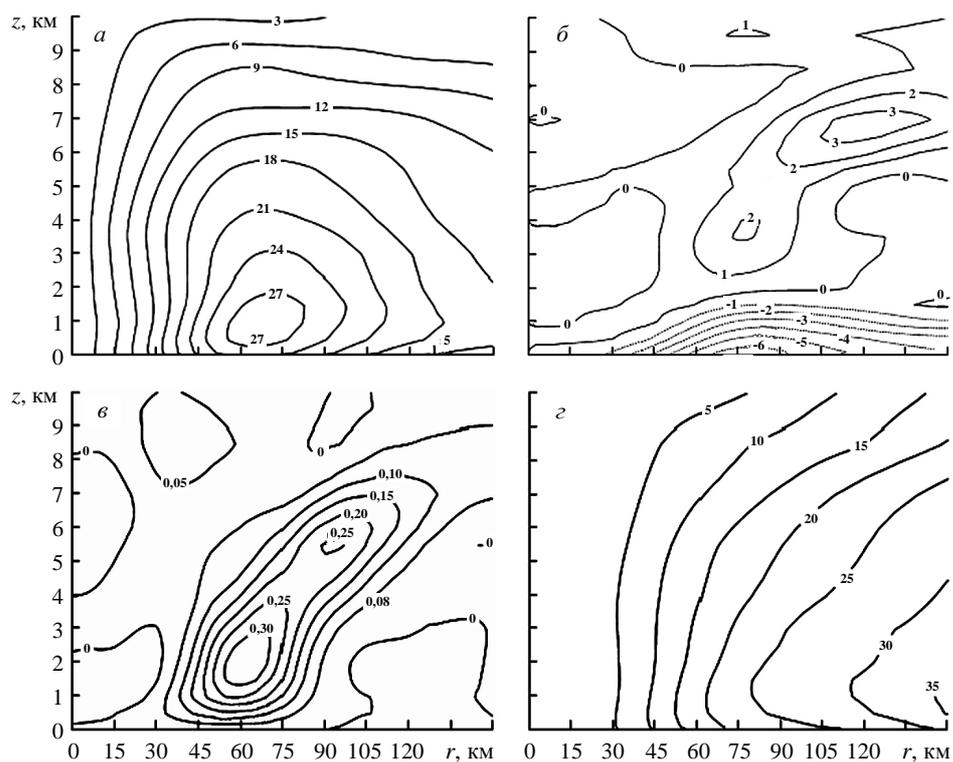


Рис. 7. Радиально-вертикальные разрезы азимутально осредненных: *a* – азимутальной скорости; *б* – радиальной скорости; *в* – вертикальной скорости, *z* – абсолютного момента импульса.

Первичная циркуляция – это основная особенность зрелого урагана. Она связана с движением воздуха вокруг центра циклона, т.е. с азимутальной скоростью. Первичная циркуляция максимальна на поверхности и убывает с высотой. На рис. 7, *a* показано распределение азимутальной скорости для черноморского циклона. На заданной высоте азимутальная скорость сначала приблизительно линейно растет с увеличением радиуса, что соответствует твердотельному вращению, а затем уменьшается с увеличением радиуса. До уровня 1 км азимутальная скорость с высотой увеличивается, а выше этого уровня – уменьшается. Качественно такая картина похожа на распределение для обычного тропического циклона.

Вторая важная особенность тропического циклона это так называемая вторичная циркуляция, т.е. конвергенция поля скорости в нижних слоях атмосферы, подъем воздуха в стене глаза и дивергенция на верхних уровнях. На рис. 7, *б* и рис. 7, *в* приведены распределения радиальной и вертикальной скорости для квазитропического циклона. Они также качественно похожи на соответствующие распределения для тропического циклона.

На рис. 7, z приведен разрез абсолютного момента импульса на единицу массы $M = V_{\theta r} + fr^2/2$ – суммы относительного момента импульса $V_{\theta r}$ и момента импульса, связанного с планетарным вращением $fr^2/2$, где f – параметр Кориолиса.

На зрелой стадии рассматриваемый циклон являлся довольно хорошо сбалансированной системой. На развитой стадии квазитропического циклона выполнялись гидростатический и градиентный балансы.

Определены значения энергетических характеристик черноморского квазитропического циклона – масштаб скорости 25 м/с, горизонтальный размер 60 км, перепад давления между центром и периферией циклона 10 гПа, которые оказались меньшими, чем у типичного тропического циклона.

В типичном тропическом циклоне сильная кучевая конвекция сосредоточена в стене глаза. В этой области очень велика удельная и относительная влажность, больших значений достигает плотность гидрометеоров – облачных капель, дождя, облачного льда, снега и крупы. Интенсивность осадков также достигает максимальной величины в стене глаза. Вне стены глаза облачность и осадки сосредоточены в нескольких спиральных рукавах. В самом глазу облаков как правило нет, а воздух очень сухой из-за оседания.

Аналогичная картина имела место и в черноморском циклоне. Конвекция была хорошо выражена на всех стадиях развития циклона. Конвективная облачность и конвективные осадки были сосредоточены в стене глаза с радиусом около 60 км, что было определено из распределения плотности гидрометеоров и удельной влажности. Удельная влажность максимальна в стене глаза с большими значениями на больших высотах. В глазу же наоборот воздух сухой. Аналогичное распределение для относительной влажности показывает, что в стене глаза относительная влажность больше 95%, а в верхней части глаза меньше 15%. Результаты моделирования показывают, что вне стены глаза облачность и осадки сосредоточены в спиральных рукавах с характерным радиусом всей облачной системы, равным 150 км, что совпадает с данными, показанными на рис. 1. Величина осадков в стене глаза по порядку величины составляет 10 см/сут.

Обычно тропический циклон, в отличие от среднеширотного циклона, имеет теплое ядро. Для мощных тропических ураганов аномалия температуры в центре циклона относительно окружающей атмосферы достигает 16°C с максимальным значением на уровне 200 – 400 гПа. Черноморский циклон также имеет теплое ядро. Аномалия температуры в теплом ядре составляет $\Delta T = 3^\circ\text{C}$ в глазу на высоте 6 км – на уровне 550 гПа. Теплое ядро является причиной пониженного давления на уровне моря в центре циклона по сравнению с периферией и убывания азимутального ветра с высотой.

Обсудим теперь механизмы развития и поддержания вторичной циркуляции. Как уже говорилось, первая причина связана с выделением скрытого тепла при конденсации влаги в стене глаза при глубокой конвекции, результирующим 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. Вторая причина связана с поверхностным трением азимутальной компоненты скорости ветра – первичной циркуляции. Подъем воздуха создает цикло-

ническую завихренность первичной циркуляции, приводит к экмановской конвергенции за счет трения в пограничном слое и дополнительной положительной вертикальной скорости на его верхней границе.

Подветренные вихри. Из всех орографических мезомасштабных явлений наименее исследованным является образование подветренных вихрей. Натурные наблюдения подветренных вихрей проводились в разных географических регионах, было дано описание их структуры, динамики, причин возникновения. Например, достаточно хорошо изучены подветренные каталинские вихри, которые образуются весной и летом вблизи южного побережья Калифорнии, в районе острова Санта-Каталина. Каталинский вихрь имеет горизонтальный масштаб порядка 100 км и вертикальный – порядка 1 – 2 км и обладает отчетливо выраженным суточным циклом. Подветренные вихри в окрестности Кавказских гор ранее не исследовались. Ниже будут описаны результаты моделирования мезомасштабных циклонических вихрей, образующихся над Черным морем при взаимодействии северо-восточного ветра с Кавказскими горами [9 – 11].

Кавказский вихрь начинает формироваться, когда ветер, дующий над морем вдоль Кавказских гор, имеет северо-западное направление, а набегаящий на Кавказские горы, над сушей, – северо-восточное. Там, где северо-восточный поток встречается с северо-западным, формируется вихрь – это начинается во второй половине дня. Постепенно отделяясь от побережья, вихрь перемещается над морем в южном направлении. К ночи вихрь полностью выходит на море и, как правило, приобретает круглую форму, а утром, заметно сместившись на юг от места своего зарождения, распадается.

Результаты детальных статистических исследований большого числа таких вихрей показывают, что:

- начало развития вихрей приходится на вторую половину дня (16 – 22 ч);
- усиление – на ночь (22 – 06 ч);
- затухание – на первую половину следующего дня (08 – 10 ч).

Кроме суточного цикла, кавказские вихри обладают также сезонным циклом. Было показано, что кавказские вихри образуются в основном в июле и августе, а зимой практически не возникают. Более того, в июле и августе, эти вихри, как правило, образуются один за другим: новый вихрь у Кавказского побережья начинается формироваться уже через несколько часов, после того как затухнет предыдущий. Количество вихрей в такой «цепочке» может достигать до шести.

По результатам моделирования была также изучена вертикальная структура вихрей: поля давления на разных сигма-уровнях. Было обнаружено, что все рассмотренные кавказские вихри обладают следующим общим свойством – они располагаются ниже уровня 850 гПа, т.е. являются невысокими и приповерхностными. Кроме того, кавказские вихри довольно слабые с приповерхностной скоростью ветра около 5 м/с.

Таким образом, для кавказских мезомасштабных вихрей в юго-восточной части моря характерен суточный цикл и явно выраженный максимум их возникновения в летне-осенний период.

Подветренные внутренние волны. Различные мезомасштабные процессы возникают над сложным рельефом, в частности, в горных районах. К таким процессам относятся волны горного рельефа. Среди большого разно-

образия волн горного рельефа можно выделить так называемые подветренные захваченные по вертикали волны, поражающие удивительной регулярностью пространственной структуры.

С помощью анализа орографической облачности на спутниковых фотографиях было установлено, что с подветренной стороны горных хребтов возникают системы облачных полос, которые вытянуты параллельно хребтам. Нередко подобные системы облачности за горными препятствиями (Кордильеры, Альпы, Урал, Кавказ, Крым, Сьерра-Невада и др.) распространяются на многие сотни километров и сохраняются в течение длительного времени.

Дополнительным источником информации о подобных процессах являются специально поставленные эксперименты в натуральных условиях. Подобные эксперименты изредка выполняются в Альпах и в горах Сьерра-Невада.

Теоретическая задача о генерации волн горного рельефа сводится к задаче об обтекании препятствия стратифицированным потоком воздуха. Сложность ее определяется тем, что нужно учитывать совместное действие многих различных факторов: пространственную неоднородность и нестационарность натекающего потока, пространственную изменчивость свойств подстилающей поверхности, адвективную нелинейность.

Далее будет рассмотрено возникновение волн в сильно стратифицированной атмосфере над Крымскими горами 20 – 21 января 2006 г. По данным спутниковых наблюдений, эти волны возникли в 12 часов утра 20 января и продолжали существовать до 10 часов утра 21 января.

Согласно данным оперативного анализа *NCEP/NCAR*, результаты которого представлены на рис. 8, 20 – 21 января 2006 г. к северо-востоку от Черного моря располагался интенсивный высотный синоптический циклон с холодным ядром.

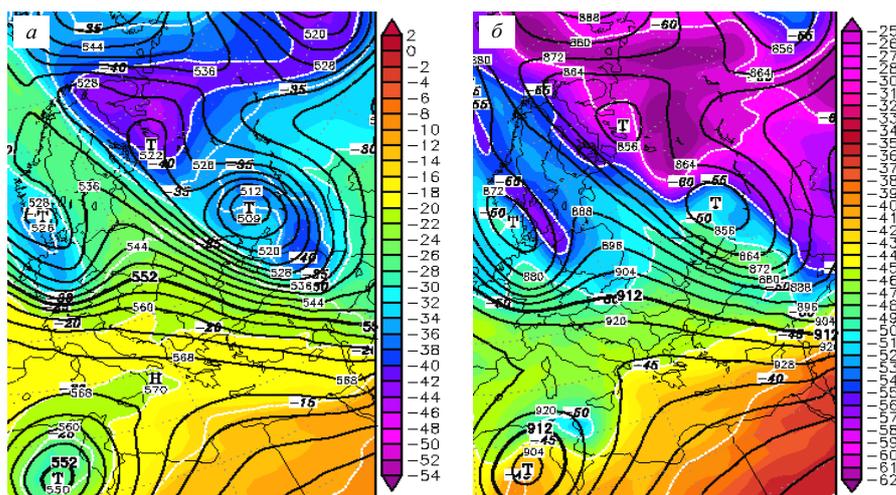


Рис. 8. Распределение геопотенциала (дкм) и температуры воздуха (°C) на двух уровнях 500 гПа (а) и 300 гПа (б) 21 января 2006 г. в 00:00 UTC. Изолинии геопотенциала проведены с шагом 4 и 8 дкм, шкала температуры приведена справа.

Над Крымским полуостровом наблюдался сильный северо-западный струйный поток по всей толще тропосферы. Скорость ветра над Крымскими горами достигала 80 м/с на верхних уровнях. В этот день температура в пограничном слое достигала экстремальных отрицательных значений (-12°C), что свидетельствует о наличии сильной вертикальной стратификации атмосферы.

Совместное действие ветра и стратификации способствовало возникновению стационарных подветренных внутренних гравитационных волн, захваченных по вертикали. Эти волны наблюдались на спутниковых снимках облачности между Крымом и Кавказом, показанных на рис. 9. Длина волны составляла около 30 км. Волны существовали недолго, несколько часов. Судя по температуре верхней границы облаков, эти волны располагались на небольшой высоте порядка полутора километров.

Для моделирования этого явления была использована мезомасштабная модель атмосферной циркуляции *WRF*. На вход модели подавался оперативный анализ *NCEP/NCAR* с горизонтальным разрешением $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. Подветренные волны имеют небольшой пространственный масштаб, поэтому для их воспроизведения были использованы четыре вложенных домена с разрешением по горизонтали 27, 9, 3 и 1 км.

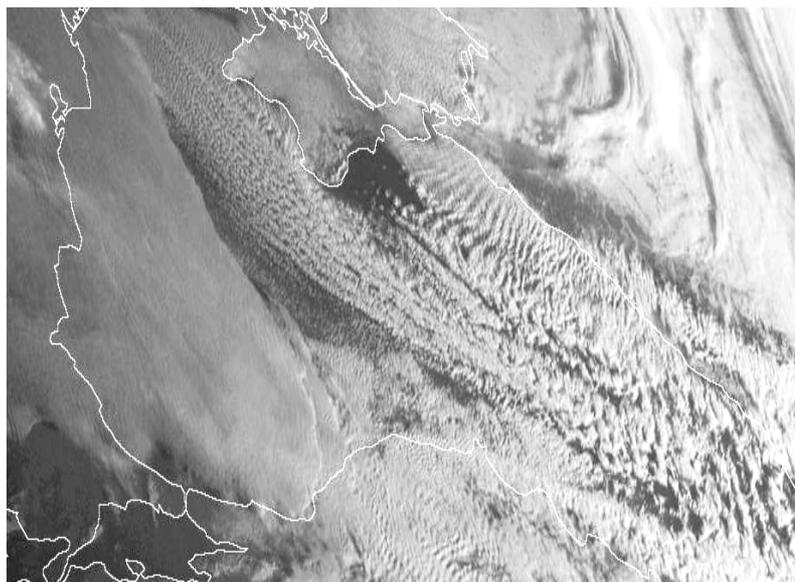


Рис. 9. Спутниковый снимок облачности, полученный 21 января 2006 г. в 06:00 UTC (инфракрасный диапазон).

На рис. 10 показан меридионально-вертикальный разрез температуры, проведенный перпендикулярно к Крымскому горному хребту на долготе $34,6^{\circ}$ в.д. На подветренной стороне видна ярко выраженная волновая структура с большой амплитудой смещения изотерм, достигающей 2 км. Волна сосредоточена по вертикали в слое сильной устойчивости от 850 до 500 гПа, что согласуется с двухслойной линейной теорией [12]. Хотя положение волновой структуры в модели не совпадает с ее положением на спутниковом снимке, но характерная длина волны, определяемая условием резонанса, равна 22 км, что согласуется со спутниковыми наблюдениями.

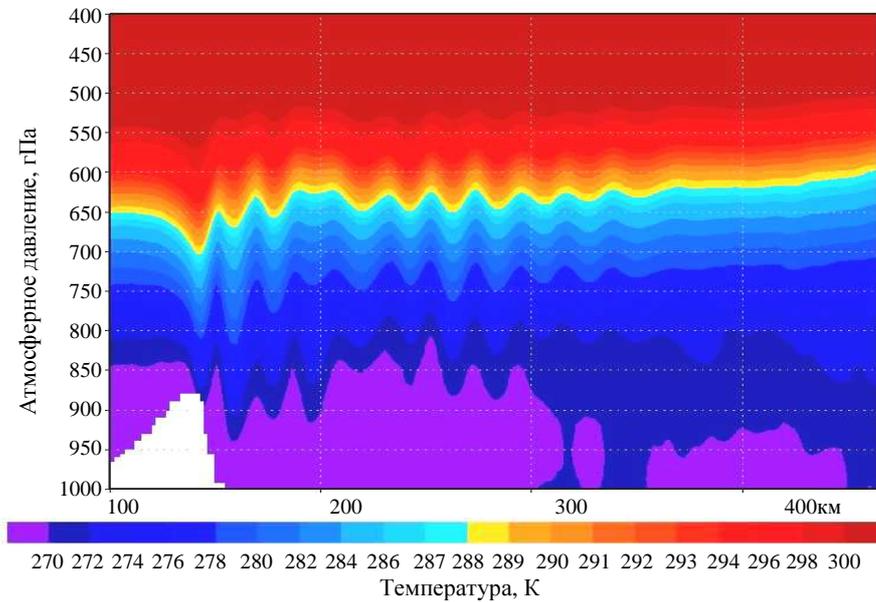


Рис. 10. Распределение потенциальной температуры на ветриальном разрезе, перпендикулярном к хребту Крымских гор.

На рис. 11 приведено горизонтальное распределение вертикальной скорости на уровне 750 гПа, на котором амплитуда волны максимальна. Отчетливо видны гребни и впадины с противоположными знаками вертикальной скорости. Видно, что волна локализована на подветренной стороне Крымских гор, с амплитудой вертикальной скорости, максимальной вблизи хребта и постепенно убывающей с удалением от хребта.

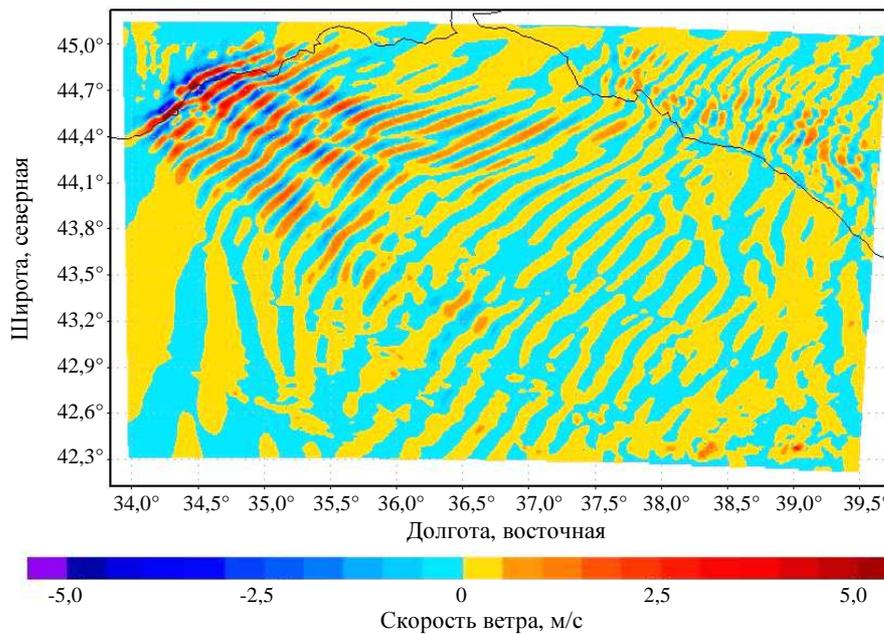


Рис. 11. Распределение вертикальной скорости на уровне 750 гПа.

Наиболее простой постановкой задачи для моделирования вертикально захваченных подветренных волн является двухслойная модель атмосферы без учета вращения Земли. По данным оперативного анализа *NCEP/NCAR* и данных о скорости ветра и температуре на разных высотах, полученных радиозондом на симферопольской метеорологической станции, можно сделать вывод, что в данной ситуации двухслойное приближение применимо. Параметры стратификации и скорость ветра для двухслойной модели были взяты из этих измерений.

В рамках классической задачи о гравитационных волнах на границе раздела двух слоев жидкости с плотностями ρ_1 и ρ_2 , нижний слой толщины H , верхний слой бесконечной толщины, дисперсионное соотношение и фазовая скорость имеют вид

$$\omega^2 = gk \frac{\Delta\rho}{\rho_1 \operatorname{cthf}H + \rho_2}, \quad c^2 = \frac{g}{k} \frac{\Delta\rho}{\rho_1 \operatorname{cthf}H + \rho_2}.$$

Фазовая скорость максимальна для длинных волн и монотонно убывает с увеличением волнового числа k .

Решение задачи о вынужденных рельефом волнах имеет вид

$$\tilde{\zeta}(k) = \tilde{h}(k) \frac{\rho_1}{\rho_1 \operatorname{ch}(kH) + \rho_2 \operatorname{sh}(kH)} \frac{U^2}{U^2 - c^2}$$

где $\tilde{h}(k)$ – амплитуда Фурье рельефа, $\tilde{\zeta}(k)$ – амплитуда Фурье смещения поверхности раздела.

Если скорость ветра меньше максимальной скорости гравитационных волн, то найдется такое «резонансное» волновое число, при котором фазовая скорость равна скорости ветра. Стационарная волна, бегущая навстречу ветру, будет в резонансе с фурье-гармоникой рельефа, и будет иметь большую амплитуду, в рамках данной упрощенной модели бесконечную. Двухслойная модель объясняет как захваченность подветренной волны по вертикали, так и ее монохроматичность, большую амплитуду, и расположение на подветренной стороне горы.

Задача о генерации захваченных подветренных волн в потоке с непрерывной стратификацией сводится к уравнению для вертикальной скорости w , которое является уравнением горизонтальной, поперечной к потоку, компоненты завихренности

$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + l^2 w = 0$, где параметр Скорера $l^2 = \left(\frac{N}{U}\right)^2 - U^{-1} \frac{d^2 U}{dz^2}$ определяется стратификацией и профилем ветра. Согласно теории, захваченные волны генерируются в том случае, если параметр Скорера убывает с высотой.

Бриз над Крымским полуостровом. Согласно современным представлениям, в отличие от ранних линейных теорий [13], морской бриз является гравитационным течением тяжелого холодного воздуха, вторгающегося с моря и распространяющегося на сушу при дневном прогреве атмосферного пограничного слоя над сушей [14, 15]. Передняя часть этого гравитационно-

го течения представляет собой так называемую «голову» с усиленной турбулентностью. Перед головой гравитационного течения формируется восходящий поток воздуха с большой вертикальной скоростью, что может приводить к развитию мелкой кучевой конвекции перед фронтом бриза. Толщина вторгающегося слоя холодного морского воздуха, т. е. глубина гравитационного течения, определяется толщиной неустойчивого хорошо перемешанного пограничного слоя над сушей, которая в течение дня постепенно увеличивается. Скорость распространения бризового фронта определяется толщиной слоя холодного воздуха и разностью плотностей холодного морского воздуха и воздуха над сушей. Типичная величина скорости распространения бризового фронта составляет 5 м/с. В течение светового дня при благоприятных синоптических условиях бризовый фронт может продвигаться на расстояние порядка 50 км от берега. По мере распространения холодный морской воздух над сушей трансформируется за счет потоков тепла с поверхности суши и перемешивания с окружающим воздухом. В результате разность плотностей уменьшается, скорость распространения бриза также уменьшается и к концу светового дня гравитационное течение оттаивается. Обратное к морскому бризу явление – течение ночного холодного воздуха с суши на море, качественно аналогично морскому бризу, но количественно его интенсивность и характерное расстояние распространения над морем значительно меньше.

Над Крымским полуостровом, окруженным со всех сторон водами Черного и Азовского морей, дневная бризовая циркуляция при благоприятных штилевых синоптических условиях имеет крайне своеобразную структуру. В начале светового дня бризовые гравитационные течения начинают распространяться от всех берегов Крымского полуострова к его центру. При этом формы бризовых фронтов повторяют очертания берегов, от которых они распространяются. Развивающаяся перед бризовым фронтом мелкая кучевая конвекция, усиливаясь по мере продвижения фронтов, к моменту столкновения гравитационных течений от разных берегов в центре полуострова, может усилиться и образоваться очаг глубокой кучевой конвекции.

Описанная картина наблюдается относительно редко, даже слабый синоптический ветер порядка 5 м/с существенно искажает распространение бризов, встречный ветер препятствует распространению бриза, а попутный ветер способствует его распространению.

Для моделирования бризовой циркуляции над Крымским полуостровом использовались мезомасштабные модели *MM5* и *WRF* с пространственным разрешением самого внутреннего вложенного домена 3 км. На рис. 12 показано распределение скорости у поверхности земли на самом нижнем уровне модели в два момента времени: 12 и 16 часов по Гринвичу (в 15 и 19 часов по местному времени). На этом рисунке хорошо видно распространение бризовых фронтов от берегов к центру полуострова. На рис. 13 приведено распределение вертикальных скоростей на уровне 500 м в те же два момента времени. Хорошо видны большие вертикальные скорости перед бризовыми фронтами. Наконец, на рис. 14 показано распределение температуры воздуха на высоте 2 м, что также демонстрирует распространение бризовых фронтов.

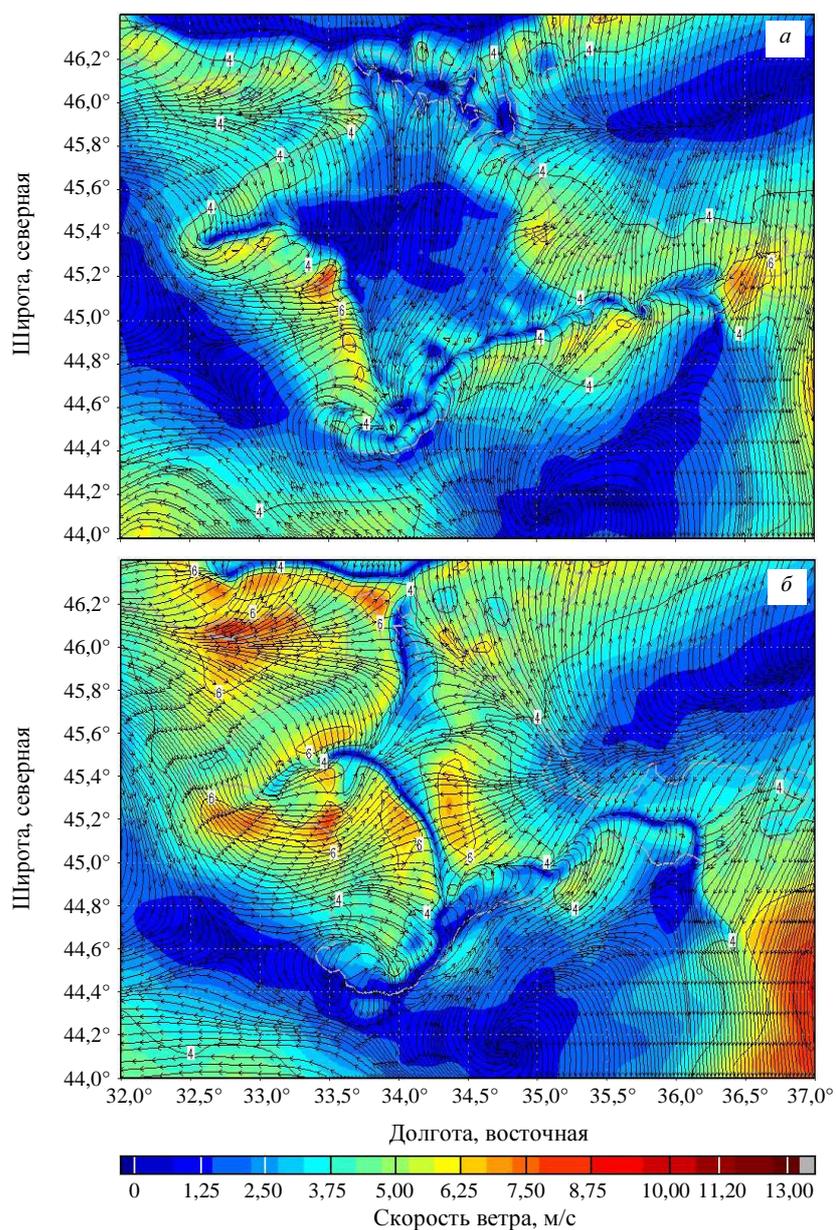


Рис. 12. Распределение скорости ветра на высоте 40 м над Крымским полуостровом в моменты времени 12:00 UTC (а) и 16:00 UTC (б).

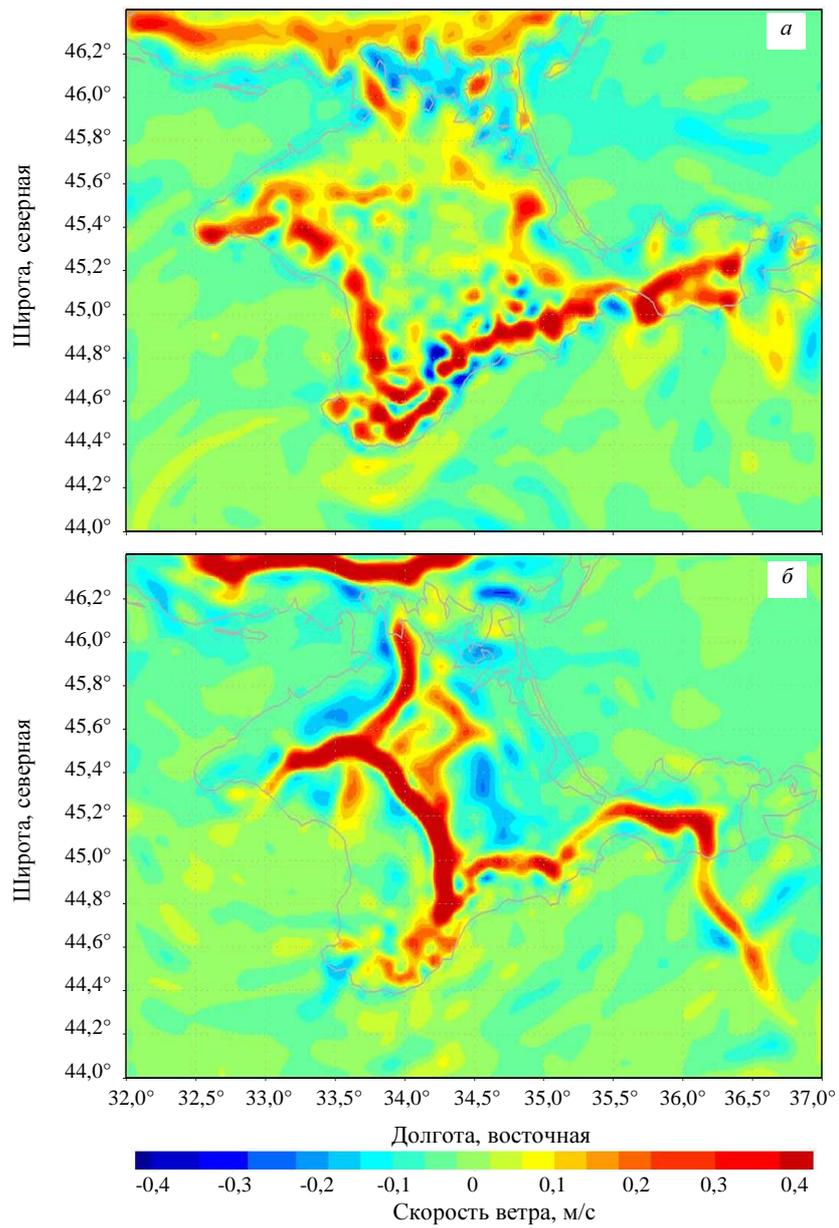


Рис. 13. Распределение вертикальной скорости на высоте 500 м над Крымским полуостровом в моменты времени 12:00 UTC (а) и 16:00 UTC (б).

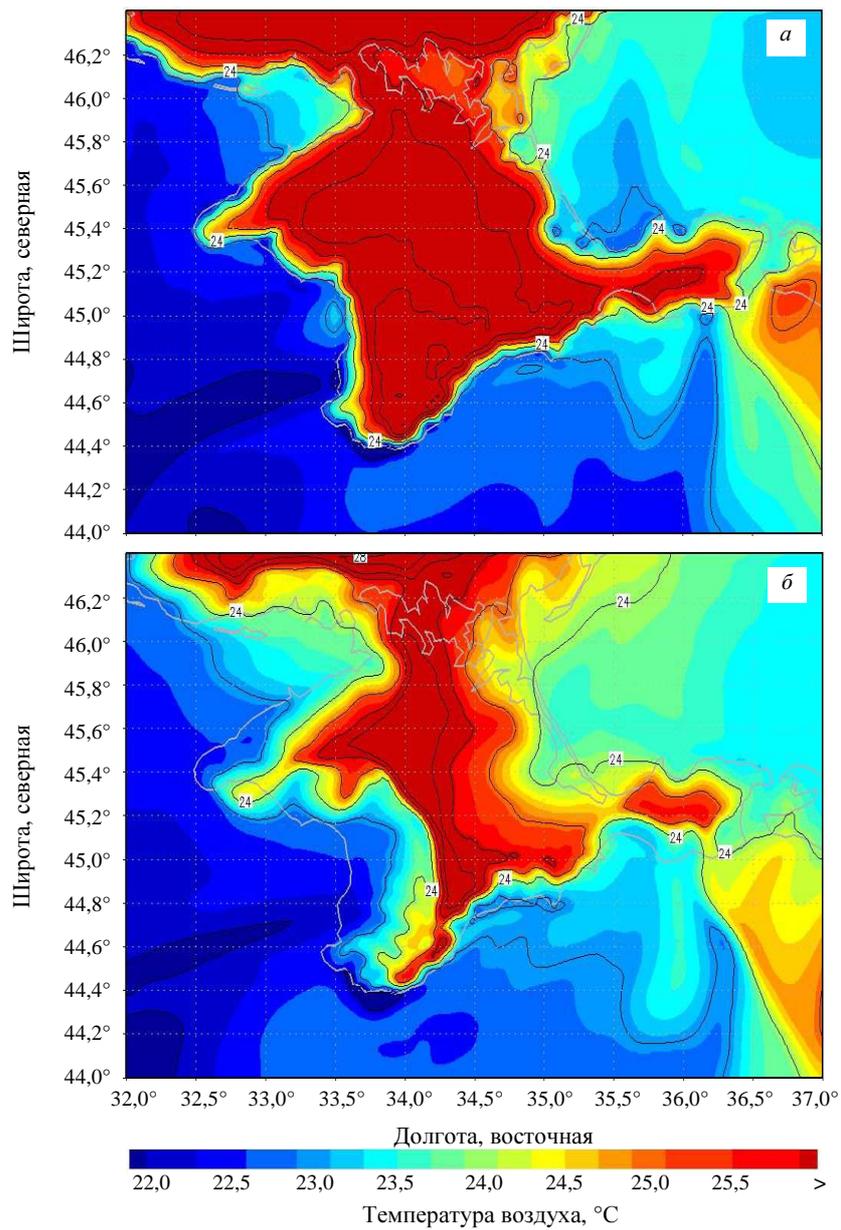


Рис. 14. Распределение температуры воздуха на высоте 2 м над Крымским полуостровом в моменты времени 12:00 UTC (а) и 16:00 UTC (б).

На рис. 15 приведен снимок облачности над Крымским полуостровом, полученный в 15 часов местного времени 12 августа 2003 г. с помощью комплекса дистанционного зондирования (ДЗЗ), установленного на борту ИСЗ *Aqua*. Положение бризового фронта хорошо прослеживается по расположению мелкой кучевой облачности – в области холодного гравитационного течения кучевая облачность отсутствует, перед бризовым фронтом большая вертикальная скорость приводит к усилению мелкой кучевой конвекции. Видно, что над Керченским полуостровом начинает зарождаться очаг глубокой кучевой конвекции.



Рис. 15. Снимок мелкой конвективной облачности над Крымским полуостровом, полученный в видимом спектральном диапазоне 12 августа 2003 г. с помощью комплекса ДЗЗ, установленного на борту ИСЗ *Aqua*.

Типичные значения основных параметров бризовой циркуляции над Крымским полуостровом, полученные в результате численного моделирования, следующие: скорость распространения бризового фронта 5 м/с, вертикальная скорость перед бризовым фронтом 0,5 м/с, горизонтальный масштаб бризовой циркуляции 50 – 100 км, вертикальный масштаб бризовой циркуляции 500 м.

Следует отметить большое практическое значение, которое может иметь достоверный прогноз бризовой циркуляции для некоторых районов. Морской бриз является основным механизмом вентиляции загрязненного воздуха над большими приморскими городами, а также основным источником увлажнения и охлаждения воздуха днем в прибрежных областях суши со средиземноморским и тропическим климатом.

Заключение. Мезомасштабные региональные атмосферные модели необходимы для решения многих важных научных и прикладных задач. Такие модели дают как оперативный, так и ретроспективный атмосферный фор-

синг с высоким пространственным разрешением для моделей циркуляции Черного моря, позволяют планировать проведение и интерпретировать результаты натуральных экспериментов. Важной прикладной задачей мезомасштабных моделей может быть детальный длительный расчет ветроэнергетического потенциала произвольной территории и разработка рекомендаций для оптимального размещения ветровых станций. Не менее важной в настоящее время является задача прогноза распространения атмосферных загрязнений, эта задача также может быть решена с помощью мезомасштабных моделей.

Для решения практических задач необходимо хорошее понимание мезомасштабных атмосферных явлений. Такого понимания можно достичь, исследуя эти явления с использованием региональных атмосферных моделей. В настоящей работе приведены примеры использования региональных моделей для исследования мезомасштабных атмосферных явлений, таких как: квазитропический циклон над Черным морем, образование подветренных вихрей при обтекании Кавказских гор, генерация подветренных вертикально захваченных внутренних волн над Крымскими горами, развитие бризовой циркуляции над Крымским полуостровом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dudhia J.* A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. // *Mon. Wea. Rev.* – 1993. – vol. 121. – P. 1493-1513.
2. *Skamarock W.C., Klemp J.B. et al.* A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR/TN-475=STR, NCAR Technical Note, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center of Atmospheric Research, June 2008, 113 p.
3. *Pleim J.E.* A simple, efficient solution of flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. // *J. Appl. Met.* – 2006. – vol. 45. – P. 341-347.
4. *Barker D. M., Huang W., Guo Y.-R., and Xiao Q.N.* A Three-Dimensional (3DVAR) Data Assimilation System For Use With MM5: Implementation and Initial Results // *Mon. Wea. Rev.* – 2004. – vol. 132. – P. 897-914.
5. *Шокуров М.В., Артамонов С.Ю., Эзау И.Н.* Численное моделирование атмосферы в районе платформы в Кацивели для планирования и интерпретации натуральных экспериментов. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – 2010. – № 21. – С. 239-251.
6. *Ефимов В.В., Шокуров М.В., Яровая Д.А.* Численное моделирование квазитропического циклона над Черным морем // *Известия Российской Академии наук: серия: Физика атмосферы и океана.* – 2007. – том 43, № 6. – С. 667-686.
7. *Яровая Д.А., Ефимов В.В., Шокуров М.В., Станичный С.В., Барабанов В.С.* Квазитропический циклон над Черным морем: наблюдение и численное моделирование // *Морской гидрофизический журнал.* – 2008. – № 3. – С. 41-55.
8. *Ефимов В.В., Станичный С.В., Шокуров М.В., Яровая Д.А.* Наблюдение квазитропического циклона над Черным морем // *Метеорология и гидрология.* – 2008. – № 4. – С. 53-62.
9. *Ефимов В.В., Шокуров М.В., Яровая Д.А., Hein D.* Статистика мезомасштабных циклонических вихрей над Черным морем // *Морской гидрофизический журнал.* – 2009. – № 4. – С. 19-33.
10. *Яровая Д.А., Шокуров М.В.* Мезомасштабные атмосферные циклонические вихри в Черноморском регионе // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – 2007. – № 15. – С. 210-214.

11. Яровая Д.А., Шокуров М.В. Мезомасштабные циклонические вихри, возникающие над Черным морем вблизи Кавказского побережья // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 3. – С. 3-20.
12. Крупин А.В., Шокуров М.В. Генерация захваченных подветренных волн в атмосфере Крымскими горами. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2009. – № 18. – С. 228-235.
13. Haurwitz V. Comments on the sea-breeze circulation // J. Meteorology. – 1947. – vol. 4. – № 1. – P. 1-8.
14. Miller S.T.K., Keim B.D., Talbot R.V., Mao H. Sea-breeze: Structure, forecasting and impacts // Rev. Geophys. – 2003. – vol. 43. – № 3. – P. 1011.
15. Ефимов В.В., Барабанов В.С. Бризовая циркуляция в Черноморском регионе. // Морской гидрофизический журнал. – 2009. – № 5. – С. 23-36.
16. Куклин А.К., Куклина Н.Я., Шабалина О.А. Исследование гидрометеорологических характеристик ЮБК с океанографической платформы в Качивели // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа (Глобальная океаническая наблюдательная система Черного моря: контактные измерения. Вклад Украины в Black Sea GOOS). – Севастополь: МГИ НАН Украины. – 2002. – вып 2 (7). – С. 66-82.
17. Experimental department of Marine hydrophysical institute. Главный портал НАН Украины [Электронный ресурс] <http://www.nas.gov.ua/en/structure/dg/ed/pages/default.aspx> (Последнее обращение 05.10.2011).

Материал поступил в редакцию 27.10.2011 г.

АНОТАЦІЯ Наводиться опис мезомасштабних регіональних моделей MM5 і WRF. Перераховано завдання, які вирішуються за допомогою даних моделей в МГІ НАН України: регіональний оперативний прогноз погоди, регіональний атмосферний реаналіз, планування проведення натурних експериментів, аналіз окремих синоптичних ситуацій. Поданий огляд мезомасштабних атмосферних явищ, що вивчаються з використанням регіональних атмосферних моделей. Наведено приклади використання регіональних моделей для дослідження мезомасштабних атмосферних явищ: квазітропічний циклон над Чорним морем, освіта підвітряних вихорів при обтіканні Кавказьких гір, генерація підвітряних вертикально захоплених внутрішніх хвиль над Кримськими горами, розвиток бризової циркуляції над Кримським півостровом.

ABSTRACT The description of mesoscale regional models MM5 and WRF is given. The problems that are solved using these models in MHI NAN Ukraine are listed: regional operational weather forecasting, regional atmospheric reanalysis, the planning of field experiments, analysis of individual synoptic situations. A review of mesoscale atmospheric phenomena, studied using the regional atmospheric models, is given. Examples of the use of regional models for the study of mesoscale atmospheric phenomena: quasitropical cyclone over the Black Sea. The formation of lee vortices in the flow around the Caucasus Mountains, the generation of vertically trapped internal lee waves over the Crimean Mountains, the development of breeze circulation over Crimean peninsula.

¹ Платформа расположена на Черном море в районе Южного берега Крыма (пгт. Качивели) в точке с географическими координатами 44°23'35" с.ш., 33°59'04" в.д. Расстояние от платформы до берега составляет 600 м, глубина моря в месте ее размещения – около 30 м [16, 17].