

М.В. Шокуров

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь***ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ПОГОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЧЕРНОМОРСКОМ РЕГИОНЕ**

Описаны результаты оперативного прогноза с использованием мезомасштабных региональных моделей *MM5* и *WRF* трех природных катастрофических явлений в Черноморском регионе: 1) Катастрофического шторма на акватории Черного моря 11 ноября 2007 г. с человеческими жертвами, 2) сильных ливневых осадков 6-7 июля 2012 г., приведших к наводнению в г. Крымске с человеческими жертвами, 3) Новороссийской бory, возникающей в зимний период, проявляющейся в значительном усилении ветра и сильном похолодании.

Результаты моделирования показывают для первой ситуации адекватный прогноз скорости ветра более 30 м/с. Прогноз ветровых волн с использованием модели *WAM* дает значительную высоту волн около 7 м в районе Керченского пролива. Для наводнения в г. Крымске прогноз дает максимальное суточное количество осадков более 200 мм. Для Новороссийской бory мезомасштабное моделирование с высоким разрешением позволяет воспроизвести и спрогнозировать это явление. Результаты моделирования всех рассмотренных явлений согласуются с наблюдениями.

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

Введение. В настоящее время в ведущих мировых оперативных центрах прогноза погоды, таких как *NCEP/NCAR* (*National Center for Environmental Prediction / National Centers of Atmospheric Research*) и *ECMWF* (*European Center for Medium range Weather Forecast*), выполняется глобальный оперативный прогноз погоды с заблаговременностью до 15 суток. Прогноз выполняется каждые 6 часов четыре раза в сутки, для анализа состояния атмосферы используются все доступные измерения: наземные, вертикальные зондирования, дистанционные спутниковые измерения и другие. Пространственное разрешение глобальных атмосферных моделей, используемых для прогноза, составляет в настоящее время 50 км для *NCEP/NCAR* и 30 км *ECMWF*. Такое разрешение позволяет достоверно прогнозировать развитие и перемещение синоптических циклонов с заблаговременностью несколько суток.

Однако некоторые региональные мезомасштабные атмосферные явления плохо прогнозируются глобальными моделями. Исправить положение – улучшить прогноз – могут мезомасштабные региональные модели, запускаемые для отдельного небольшого региона, и имеющие пространственное разрешение вплоть до 1 км.

В начале статьи приводится краткое описание мезомасштабных моделей, задач, которые решаются с их помощью в МГИ НАН Украины, а также некоторых мезомасштабных явлений в Черноморском регионе, исследованных с помощью этих моделей.

Основной целью настоящей работы является демонстрация преимуществ региональных моделей по сравнению с глобальными при прогнозировании природных катастрофических явлений в Черноморском регионе, таких как шторм 11 ноября 2007 г., наводнение в Крымске 6 – 7 июля 2012 г., Новороссийская бора. На примере этих явлений показано, что глобальные оперативные прогностические модели недооценивают экстремальные значения скорости ветра и осадков, в то время как региональные мезомасштабные модели дают хорошо оправдывающийся прогноз.

Использование мезомасштабных моделей в МГИ НАН Украины. Мезомасштабные атмосферные модели *MM5* (*Fifth-Generation Penn State /NCAR Mesoscale Model*) и более современный вариант *WRF* (*Weather Research and Forecasting modeling system*) разрабатывались Национальным центром атмосферных исследований США как для научных исследований мезомасштабных атмосферных явлений, так и для выполнения оперативных прогнозов и региональных ре-анализов [1, 2].

Мезомасштабная атмосферная модель описывает движение воздуха и перенос тепла и влаги в атмосфере с использованием высококачественных численных схем. Кроме того, достаточно детально и реалистично описываются следующие физические процессы: 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.

Далее кратко перечислены задачи, которые решаются с использованием мезомасштабных моделей.

В отделе взаимодействия атмосферы и океана Морского гидрофизического института НАН Украины с начала 2007 г. выполняется оперативный прогноз атмосферной циркуляции для региона Черного моря с использованием модели *MM5*. Пространственное разрешение для всего Черноморского региона равно 10 км, с начала 2011 г. 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. Дополнительно к атмосферному прогнозу выполняется также прогноз ветрового волнения на всей акватории Черного моря с использованием модели ветрового волнения *WAM* (*Wave Model*).

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 ММ5. Пространственное разрешение реанализа 18 км, дискретность по времени 1 час, продолжительность по времени 2000 – 2011 гг. Второй проект реанализа был выполнен с использованием региональной климатической модели *PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies)*. В качестве горизонтальных граничных условий использовались результаты глобального реанализа *ECMWF ERA – 40 (ECMWF RE-ANALYSIS-40)*. Пространственное разрешение этого реанализа 25 км, дискретность по времени 1 час, продолжительность по времени 1958 – 2002 гг. Результаты этих атмосферных реанализов предполагается использовать для выполнения реанализа циркуляции вод Черного моря. Второе приложение – исследование изменчивости климата в Черноморском регионе.

Традиционным местом проведения натурных гидрофизических экспериментов в МГИ НАН Украины является стационарная океанографическая платформа, расположенная в акватории Черного моря близ пгт. Кацивели. В настоящее время численные модели атмосферы с высоким пространственным разрешением используются для планирования и интерпретации натурных экспериментов на этой платформе [3].

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 натурных научно-исследовательских океанографических разрезов и полигонов. Такие ретроспективные расчеты требуются также для исследования различных редких экстремальных синоптических явлений.

Кроме перечисленных практических задач, мезомасштабные модели использовались для исследования отдельных мезомасштабных атмосферных процессов в Черноморском регионе. Далее кратко описаны результаты этих исследований.

В работах [4 – 6] с использованием мезомасштабной модели был воспроизведен квазитропический циклон 25 – 30 сентября 2005 г., исследована его структура, аналогичная структуре тропических циклонов, механизмы образования.

Согласно современным представлениям, в отличие от ранних линейных теорий, морской бриз является гравитационным течением тяжелого холодного воздуха, вторгающегося с моря и распространяющегося на сушу при дневном прогреве атмосферного пограничного слоя над сушей. В работе [7] была исследована бризовая циркуляция над Крымским полуостровом с помощью мезомасштабной модели высокого разрешения. Показано, что бризовая циркуляция над Крымским полуостровом имеет форму гравитационных течений, распространяющихся от берегов к центру полуострова, и вызывающих перед бризовым фронтом мелкую или даже глубокую кучевую конвекцию.

Стационарные подветренные гравитационные внутренние волны, возникающие при обтекании горного рельефа стратифицированным потоком, локализованы по высоте в определенном слое, соответствующем максимуму частоты плавучести – волноводе. Результаты моделирования подветренных волн над Крымскими горами и сравнение с наблюдениями опубликованы в работе [8].

При обтекании воздушным потоком горного рельефа при определенных условиях образуются так называемые подветренные вихри. На акватории Черного моря такие вихри возникают при обтекании Кавказских гор и Крымских гор. Результаты их моделирования и сравнение с наблюдениями опубликованы в работах [9 – 11].

Мезомасштабные атмосферные модели использовались для расчета отдельных синоптических ситуаций с экстремальными атмосферными осадками над Крымским полуостровом. Полученные модельные осадки использовались в модели речного стока, с помощью которой изучались катастрофические паводки в крымских реках. Результаты этих исследований опубликованы в [12].

Катастрофический шторм 11 ноября 2007 г. Система оперативного численного прогноза атмосферной циркуляции над Черным морем была запущена в отделе взаимодействия атмосферы и океана МГИ НАН Украины в начале 2007 г. Одним из первых катастрофических явлений, спрогнозированных оперативно, был знаменитый шторм 11 ноября 2007 г. Этот шторм вызвал экстремально высокие волны в Азовском и Черном морях, десятки судов потерпели бедствие.

Утром 11 ноября 2007 г. в Керченском проливе на две части разломился танкер «Волгонефть-139», груженный 4 тысячами тонн мазута, в море вылилось две тысячи тонн мазута, из кормовой части оставшийся мазут удалось откачать.

В порту «Кавказ» затонул сухогруз «Вольногорск», на его борту находится более двух тысяч тонн серы. В Керченском проливе потерпел крушение сухогруз «Нахичевань», пятеро членов команды которого пропали без вести. Затонул сухогруз «Ковель», его экипаж из 11 человек был полностью эвакуирован. В Керченском проливе в корпусе танкера «Волгонефть-123» обнаружена трещина, танкер сумел остаться на плаву, мазут из него был перекачан.

У Севастополя затонул грузинский сухогруз с металлом «Хаш-Измаил», 15 членов команды пропали без вести. В районе Новороссийска на мель сели сразу несколько судов под флагами Грузии, Греции и Турции. Шторм выбросил российский сухогруз на крымское побережье в районе Судака. У западного побережья Крыма сел на мель российский буксир с 13 членами экипажа на расстоянии 15 – 20 метров от берега

Ущерб, нанесенный окружающей среде из-за крушения судов в Керченском проливе в ноябре 2007 г., составил около 20 миллиардов рублей.

В настоящее время синоптические процессы, такие как возникновение и перемещение циклонов, достоверно предсказываются на срок до трех и более суток в международных и национальных центрах глобального анализа и прогноза атмосферной циркуляции. Но разрешение глобальных моделей, составляющее 50 – 100 км, приводит к занижению экстремальных скоростей ветра. Далее будет показано, что результаты оперативного мезомасштабного прогноза циклона 11 ноября 2007 г. с помощью модели *ММ5* и апостериорного прогноза (*hindcast*) с использованием модели *WRF* более достоверны, чем глобальные прогнозы.

Циклон, приведший к катастрофическому шторму в Черном море 11 ноября 2007 г., относится к категории так называемых «южных» циклонов. Тра-

ектория центра циклона (шторм-трек) и минимальное давление в центре на уровне моря показаны на рис. 1. Циклон сформировался над Эгейским морем и двигался на северо-восток над западной частью Черного моря и Крымом. Циклон был достаточно глубоким, минимальное давление в центре циклона достигало 977 гПа.

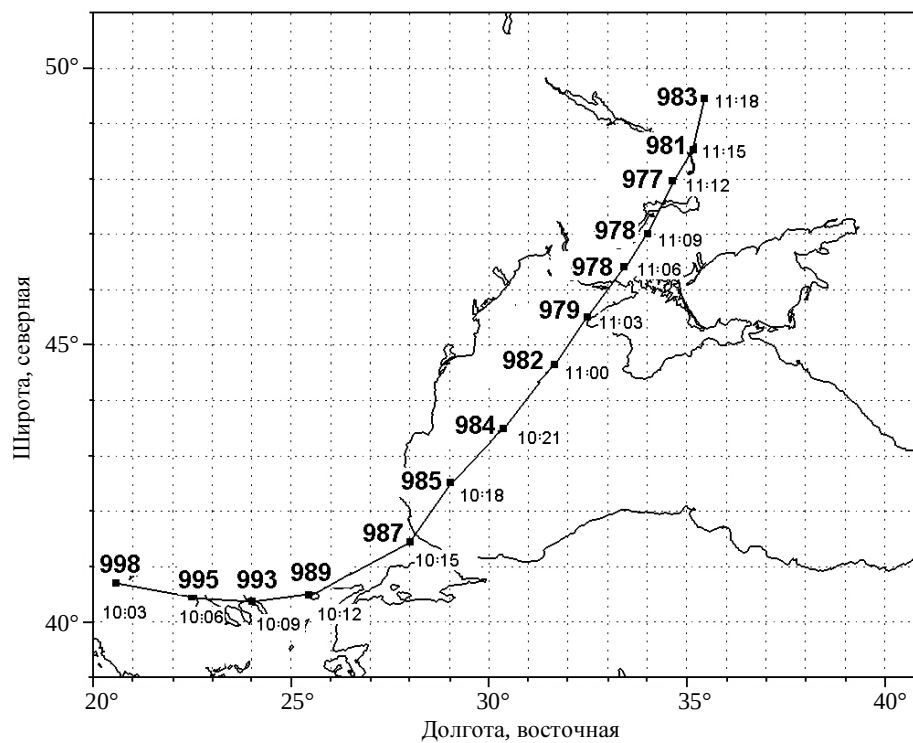


Рис. 1. Траектория центра «южного» циклона 10 – 11 ноября 2007 г. В каждой точке ниже (правее) положения центра циклона указаны дата и время (UTC) в формате (день : час), выше (левее) – минимальное давление на уровне моря в центре циклона (в гПа).

На рис. 2 представлено распределение геопотенциала 500 гПа, давления на уровне моря и разности геопотенциала на уровнях 500 гПа и 1000 гПа, представляющей среднюю по высоте температуру нижней половины атмосферы, на срок 11 ноября 2007 г. в 06:00 UTC (аббревиатура UTC не имеет конкретной расшифровки – Всемирное координированное время)¹. Видна длинная глубокая узкая ложбина на уровне 500 гПа, наполненная холодным воздухом. Рассматриваемый циклон сформировался на южном конце этой ложбины.

¹ Международный союз электросвязи в 1972 г. посчитал, что ни английское название CUT (Coordinated Universal Time), ни французское TUC (Temps Universel Coordonné) не подходят на роль международного, не зависящего от языка, сокращения. Поэтому было предложено нейтральное – UTC. Введено взамен среднего времени по Гринвичу – Ред.

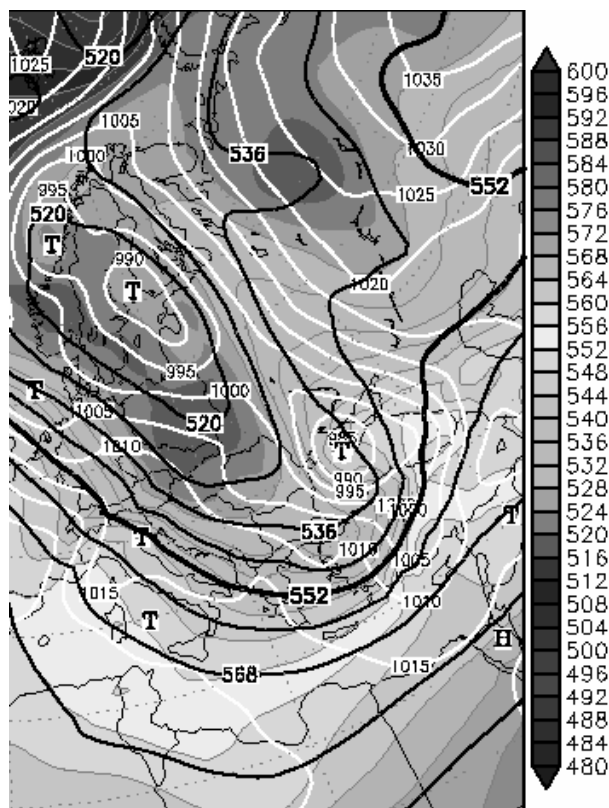


Рис. 2. Распределение геопотенциала (дкм) на уровне 500 гПа и давления на уровне моря (гПа) 11 ноября 2007 г. в 06:00 UTC. Полутонами изображена разность геопотенциалов на уровнях 500 и 1000 гПа (шкала приведена справа).

На следующем рис. 3 представлены спутниковые снимки для двух синоптических сроков:

- 10 ноября 2007 г., 18:00 UTC, когда сформировавшийся над Эгейским морем циклон вышел на акваторию Черного моря (см. рис. 3, а);
- 11 ноября 2007 г. 06:00 UTC, когда центр уже сформировавшегося циклона находился над Крымским полуостровом (см. рис. 3, б).

На рис. 4 представлено расположение фронтов циклона для этих же двух синоптических сроков, полученное по результатам стандартного синоптического анализа.

Из рис. 3 и рис. 4 видно, что циклон сформировался из волны на фронте более крупного циклона, расположенного на севере Европейской территории России. В первый срок циклон имеет вид волнового возмущения на фронте. Через 12 часов он уже сформировался – стал самостоятельным, хотя и довольно компактным, циклоном.

На рис. 5 представлены карты скорости ветра на уровне 10 м над Черным морем по результатам двух моделей: глобального оперативного анализа и прогноза Американского центра *NCEP/NCAR* с разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ и $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ для срока 11 ноября 2007 г. 06:00 UTC.

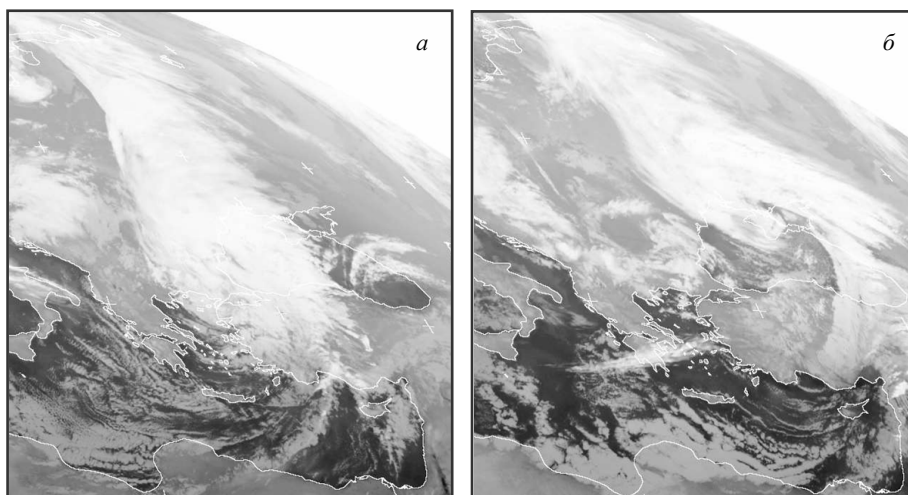


Рис. 3. Спутниковые снимки облачности, полученные с геостационарного спутника *METEOSAT* в инфракрасном спектральном диапазоне для сроков: *а* – 10 ноября 2007 г., 18:00 UTC; *б* – 11 ноября 2007 г., 06:00 UTC.

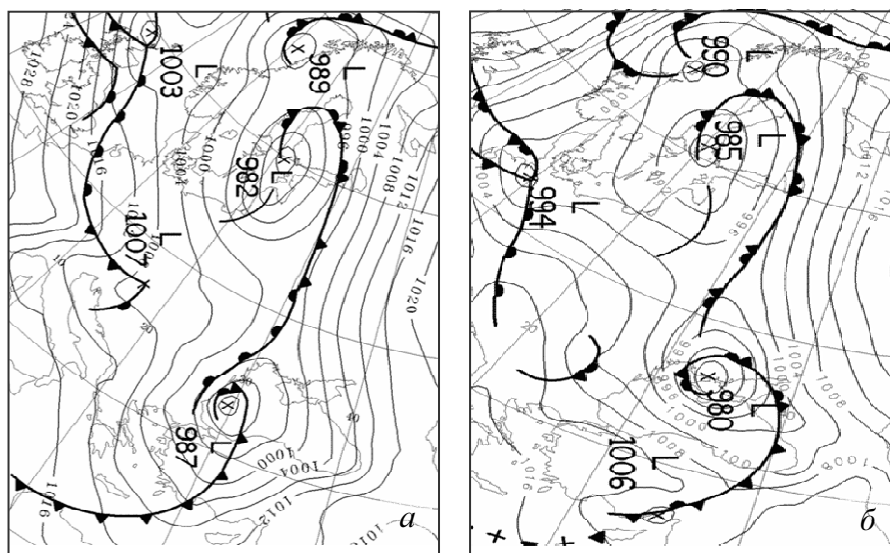


Рис. 4. Стандартные карты оперативного метеорологического анализа по наземным наблюдениям для сроков: *а* – 10 ноября 2007 г., 18:00 UTC, *б* – 11 ноября 2007 г., 06:00 UTC.

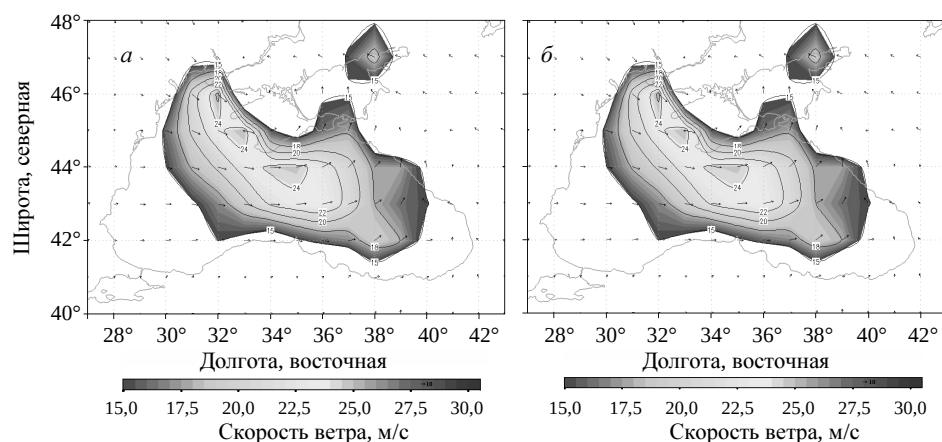


Рис. 5. Карты скорости ветра по результатам глобального оперативного прогноза *GFS* с пространственным разрешением: *a* – $1^\circ \times 1^\circ$; *б* – $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ для срока 11 ноября 2007 г., 06:00 UTC.

Видно, что скорость ветра над Черным морем по результатам глобальных моделей в целом не превышает 25 м/с, иногда кое-где чуть больше 25 м/с. Для других сроков (не показано) скорость ветра над Азовским морем достигает 26 м/с. Реальные скорости ветра значительно превышали 25 м/с. Это видно из рис. 6, на котором представлена карта скорости ветра над акваторией Черного моря, полученная со спутникового скаттерометра *QuikSCAT* (*Quick Scatterometer*) на срок 11 ноября 2007 г. 03:35 UTC. Измеренные на метеостанциях значения скорости ветра, достигали и превышали 30 м/с. В частности, в Геническе максимальная измеренная скорость ветра составляла 35 м/с.

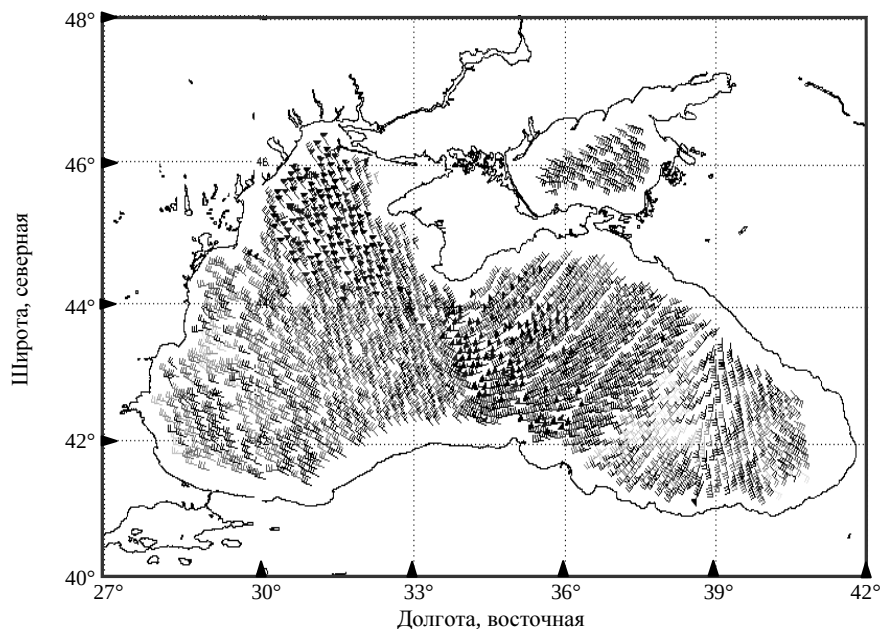


Рис. 6. Карта скорости ветра, измеренного в 03:35 UTC 11 ноября 2007 г. скаттерометром *QuikSCAT* с пространственным разрешением 12,5 км.

Мезомасштабный оперативный прогноз прохождения циклона над акваторией Черного моря выполнялся с помощью модели *MM5* с пространственным разрешением 10 км. Был выполнен также апостериорный прогноз (*hindcast*) с помощью модели *WRF* с пространственным разрешением 9 км. Расчетные области в обоих случаях полностью покрывали акваторию Черного моря (не показано), в качестве боковых граничных условий использовались результаты оперативного прогноза *NCEP/NCAR GFS (Global Forecast System)* с разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ через каждые 6 часов. Результаты этих двух прогнозов практически не отличаются, далее будут показаны только результаты последнего прогноза.

На рис. 7 представлены результаты мезомасштабного прогноза – скорость ветра на уровне 10 м для срока 11 ноября 2007 г. в 06:00 UTC. Как видно из этого рисунка, максимальная скорость ветра теперь достигает 31 – 32 м/с. Для других сроков скорость ветра также имеет большие величины, чем в глобальных моделях.

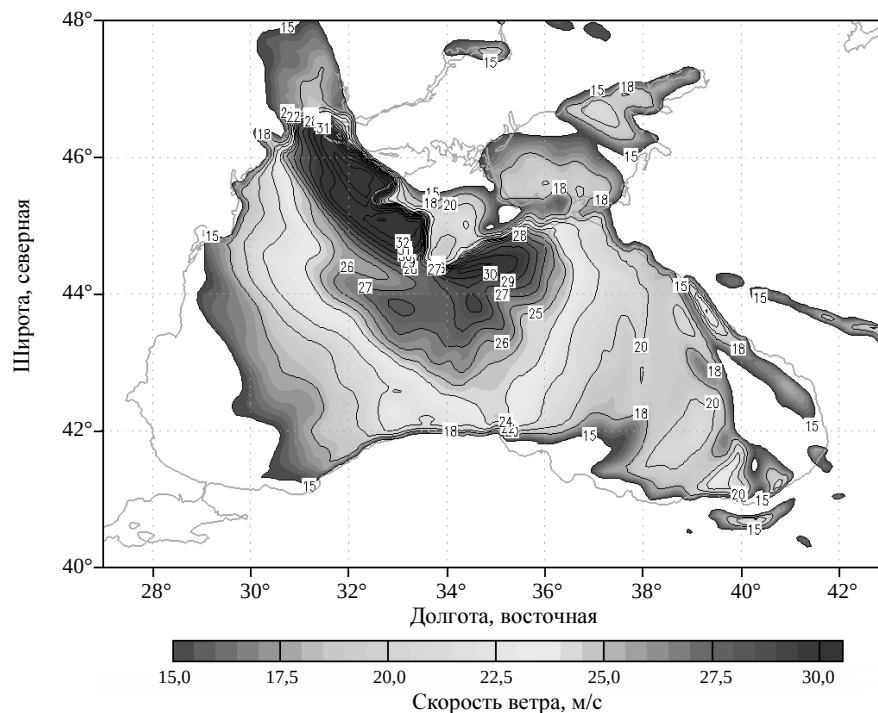


Рис. 7. Карта скорости ветра по результатам мезомасштабного прогноза моделью *WRF* с пространственным разрешением 9 км для срока 11 ноября 2007 г., 06:00 UTC.

Следует отметить, что форма и траектория движения циклона в глобальных и мезомасштабных прогнозах практически идентичны. Это связано с тем, что циклон имеет довольно большие размеры, и его поведение внутри расчетной области мезомасштабной модели определяется граничными условиями, которые берутся из глобальной модели оперативного прогноза. Единственное значимое отличие – увеличение максимальной скорости ветра от 25 до 31 – 32 м/с. Основной результат этого расчета – увеличение мак-

симальной скорости ветра до величины, большей 30 м/с, что согласуется с измеренными значениями скорости ветра.

Результаты мезомасштабного атмосферного прогноза были использованы для выполнения прогноза ветровых волн с помощью модели WAM с разрешением 10 км, которая также используется в оперативном прогнозе в отделе взаимодействия атмосферы и океана МГИ НАН Украины.

На вход волновой модели WAM подавались ветер глобальной модели NCEP/NCAR GFS с разрешением 0,5° и мезомасштабной модели WRF с разрешением 9 км. Результаты прогноза ветровых волн для синоптического срока 11 ноября 2007 г., 10:00 UTC представлены на рис. 8.

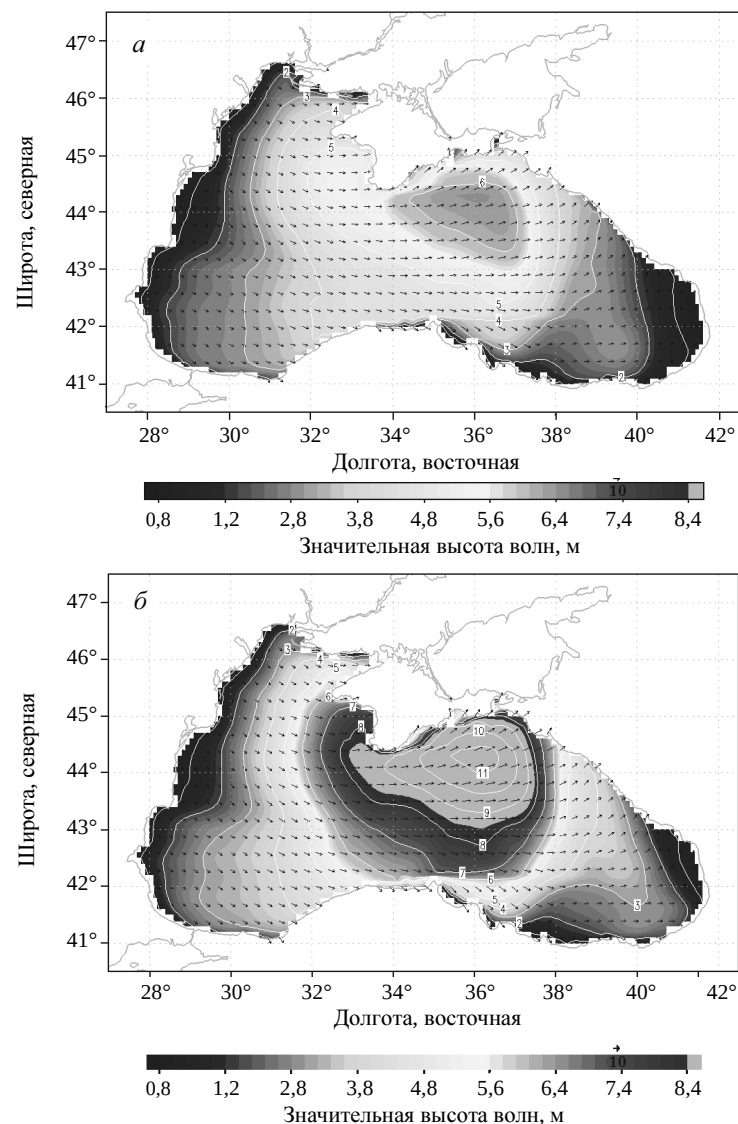


Рис. 8. Результаты прогноза ветровых волн для срока 11 ноября 2007 г., 10:00 UTC. Изолиниями показана значительная высота волн, стрелками направление волн: *а* – ветер из оперативного прогноза GFS; *б* – ветер из прогноза WRF с разрешением 9 км.

Как видно, в районе Севастополя максимальная значительная высота волн достигала значений 5 м для глобальной модели и 7 м для мезомасштабной модели. В районе Керченского пролива, где затонуло много судов, максимальные высоты волн были 5 м и 9 м соответственно. Максимальной высоты порядка 9 м ветровые волны в районе Керченского пролива достигали в результате длинного разгона от Стамбула до Керчи под действием юго-западного ветра. Эти высокие волны и привели в результате к затоплениям судов и разливам нефти.

Мезомасштабные модели позволяют прогнозировать экстремальные скорости ветра, более близкие к реальности, и поэтому они необходимы для прогноза катастрофических штормов. Результаты мезомасштабных оперативных прогнозов должны использоваться судовладельцами и штурманами судов для избежания подобных катастроф в будущем.

Катастрофическое наводнение в Краснодарском крае 6 – 7 июля 2012 г. было вызвано обильными ливневыми осадками, продолжавшимися на протяжении нескольких часов. Уровень горных рек, собравших эти осадки, поднялся на несколько метров. В частности, в городе Крымске Краснодарского края подъем уровня реки Агадум на несколько метров привел к человеческим жертвам (более 170) и значительному материальному ущербу.

Основная цель настоящего раздела – показать преимущество мезомасштабных моделей по сравнению с глобальными при оперативном прогнозе экстремальных осадков. В настоящее время глобальные прогностические модели предсказывают синоптические процессы на срок более трех суток, но из-за недостаточного пространственного разрешения значительно занижают экстремальные осадки. Мезомасштабные модели с разрешением от 10 км до 1 км позволяют прогнозировать экстремальные осадки, более близкие к реальности, и поэтому необходимы для прогноза катастрофических ливневых осадков.

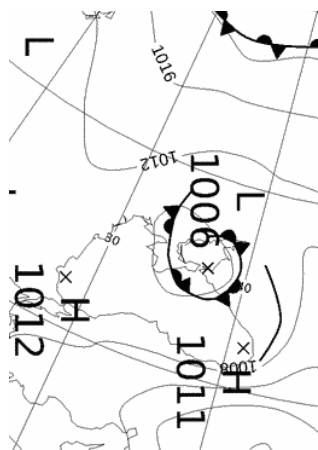


Рис. 9. Стандартная карта оперативного метеорологического анализа по наземным наблюдениям для срока 6 июля 2012 г., 12:00 UTC.

На рис. 9. представлена стандартная синоптическая карта циклона, вызвавшего экстремальные осадки в Краснодарском крае. Это высотный циклон, сформировавшийся восточнее Черного моря, и медленно перемещавшийся на юго-запад.

В течение 6 – 7 июля центр циклона практически не перемещался, он стоял на одном месте. Данный циклон отличался от стандартного синоптического развивающегося циклона баротропностью – отсутствием горизонтальных градиентов температуры практически по всей толще тропосферы, отсутствием выраженных фронтов и слабо развитыми фронтальными облачными системами.

На рис. 10 представлены спутниковые снимки облачности в инфракрасном диапазоне для четырех синоптических сроков. Следует отметить глубокую кучевую конвекцию в районе Новороссийска на протяжении 6 – 7 июля. Далее будет показано, что юго-западный поток воздуха при переваливании хребта в районе Новороссийска

приводил к инициированию глубокой конвекции и локальному выпадению обильных ливневых осадков.

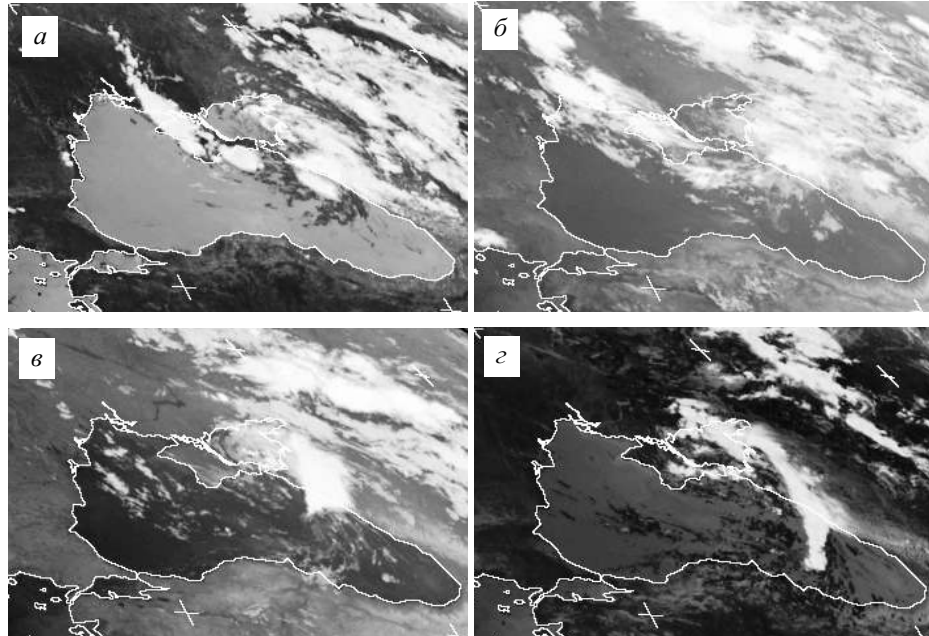


Рис. 10. Спутниковые снимки облачности с геостационарного спутника в инфракрасном спектральном диапазоне для сроков: *а* – 6 июля 2012 г., 12:00 UTC, *б* – 6 июля 2012 г., 18:00 UTC, *в* – 7 июля 2012 г., 00:00 UTC, *г* – 7 июля 2012 г., 06:00 UTC.

Глобальные прогностические модели *NCEP/NCAR GFS* с разрешением $1^\circ \times 1^\circ$ и $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ дают небольшие значения осадков. На рис. 11 приведены результаты расчетов. Нетрудно видеть (см. рис. 11 *а, б*), что максимальные двухсуточные суммы осадков в окрестности Новороссийска достигают величин 60 мм. Согласно измерениям на метеостанциях в Геленджике и Новороссийске количество осадков было значительно большим – соответственно 283 мм и 275 мм. В Крыме двухсуточная сумма осадков составляла 171 мм.

Мезомасштабные прогнозы были выполнены в двух вариантах – оперативный прогноз модели *MM5* с разрешением 10 км и апостериорный прогноз модели *WRF* с разрешением 5 км. Расчетная область (домен) модели *MM5* в первом варианте покрывала все Черное море, во втором случае была построена специальная расчетная область с вложенными доменами с центром в Новороссийске (не показаны). В обоих случаях в качестве боковых граничных условий использовался оперативный глобальный прогноз *NCEP/NCAR GFS* с разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$.

Результаты этих двух мезомасштабных прогнозов представлены на рис. 11 *в, г*. Видно, что максимальные осадки выпали на южном склоне хребта в окрестности Новороссийска с максимумом более 200 мм за двое суток. Это значение в три раза больше, чем дают глобальные модели, и хорошо согласуется с приведенными выше измерениями на метеостанциях.

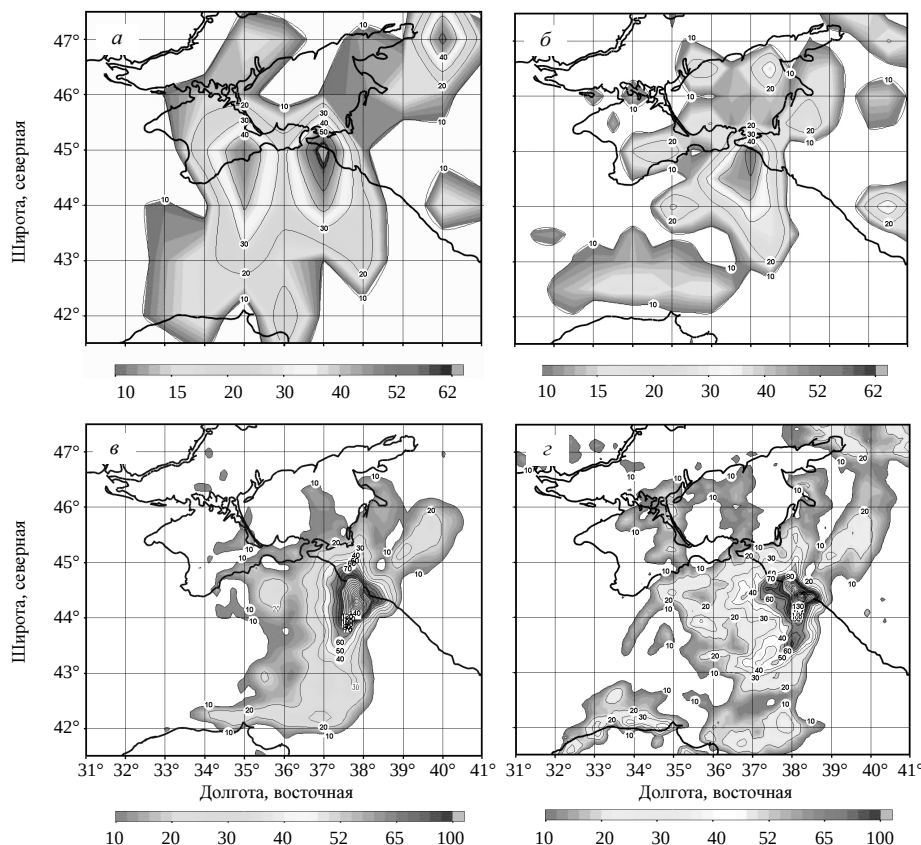


Рис. 11. Двухсуточная сумма осадков (в мм) за 6 – 7 июля 2012 г., выпавших по результатам прогнозов: *а* – оперативный прогноз *GFS*, разрешение $1^\circ \times 1^\circ$; *б* – оперативный прогноз *GFS*, разрешение $0,5^\circ \times 0,5^\circ$; *в* – оперативный прогноз *MM5*, разрешение 10 км; *г* – прогноз *WRF*, разрешение 5 км.

Следует отметить, что экстремально большие осадки выпали на довольно небольшой площади. На рис. 12 приведен фрагмент рис. 11, *г* в более высоком разрешении. Экстремальные осадки с двухсуточной суммой более 100 мм выпали в районе размером около 50 км, наиболее же сильные осадки более 200 мм занимают область размером около 20 км.

Следующий, рис. 13, иллюстрирует механизм выпадения сильных осадков на небольшой площади в данном случае. Высотный циклон практически не перемещался в течение 6 – 7 июля, создаваемый им поток воздуха в районе Новороссийска имел юго-западное направление, что показано линиями тока горизонтальной скорости на рис. 13. При натекании этого потока на хребет возникает подъем воздуха с большой вертикальной скоростью до 14 см/с (показано тоном и изолиниями на рис. 13), что в свою очередь приводит к запуску глубокой кучевой конвекции.

Для прогнозирования наводнений в Крымске или других горных районах, одних только прогнозов осадков мезомасштабными моделями с высоким разрешением недостаточно. Необходима также достаточно реалистич-

ная модель речного стока, на вход которой следует подавать атмосферные осадки. Основным результатом данного раздела является доказательство необходимости использования результатов мезомасштабного оперативного прогноза для предотвращения катастрофических последствий обильных ливневых осадков и вызванных ими наводнений.

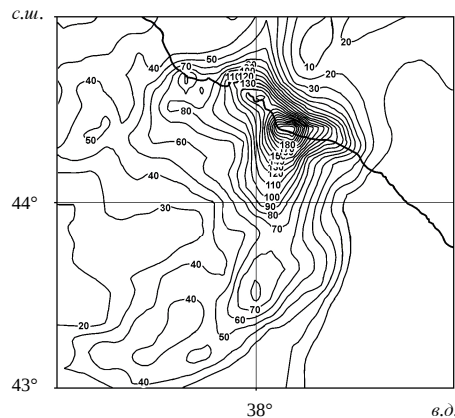


Рис. 12. Двухсуточная сумма осадков (в мм) выпавших за 6 – 7 июля 2012 г., по результатам прогноза WRF, разрешение 5 км.

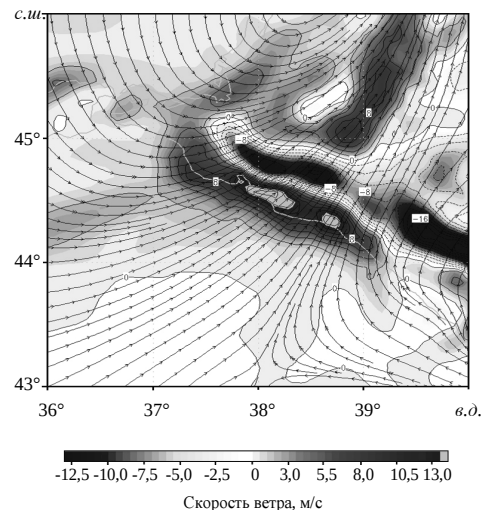


Рис. 13. Горизонтальная скорость ветра (показана линиями тока) и вертикальная скорость (показана полутонами и изолиниями) на уровне 400 м над подстилающей поверхностью для синоптического срока 7 июля 2012 г. 00:00 UTC.

Новороссийская бора. Явление Новороссийской боры – сильного холодного ветра, возникающего при переваливании воздушного потока через невысокий горный хребет, хорошо и давно известно. В Цемесской бухте города Новороссийска часто, особенно зимой, скорость ветра в сильном потоке холодного воздуха может превышать 40 м/с. Новороссийская бора возникает довольно часто – около 20 – 30 случаев в год. Подобное явление возникает также в Югославии на берегу Тирренского моря.

Далее будет рассмотрен типичный эпизод 16 – 20 января 2010 г.

На рис. 14 представлены результаты измерений скорости ветра и температуры на Новороссийской метеостанции в течение пяти суток 16 – 20 января 2010 г.

Представлены три стандартных метеорологических параметра, используемых при измерении сильных ветров:

- 1) средняя за 10 минут скорость в срок наблюдения;
- 2) максимальный порыв за 10 минут в срок наблюдения;
- 3) максимальный порыв между сроками наблюдения.

Как видно из рис. 14, а, скорость ветра 16 января повысилась до 15 м/с, затем к 18 января – до 25 м/с. Максимальный порыв между наблюдениями достигал 34 м/с. Согласно данным, приведенным на рис. 14, б, температура при этом понизилась от 8 °С до небольших отрицательных значений (-2 °С).

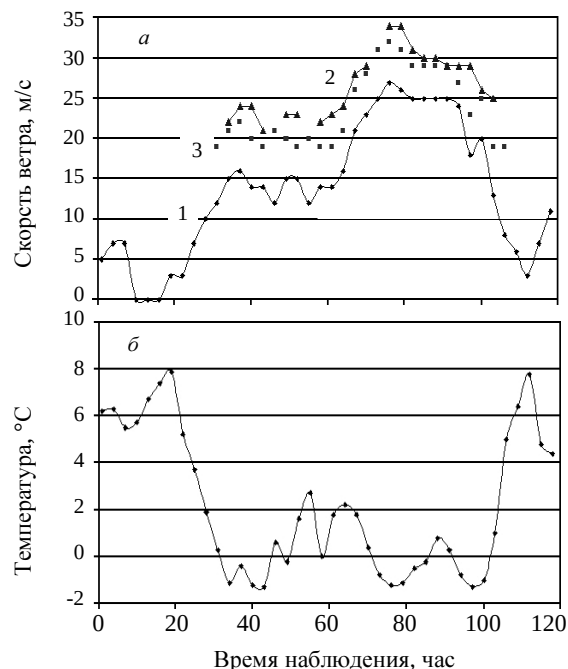


Рис. 14. Скорость ветра (а) и температура воздуха (б) по измерениям на метеостанции Новороссийска для срока 16 – 20 января 2010 г. 1 – средняя скорость ветра в срок наблюдения; 2 – максимальный порыв скорости ветра между сроками наблюдения; 3 – максимальный порыв в срок наблюдения.

Явление боры наблюдается в следующей синоптической ситуации. К северу от хребта расположена холодная антициклоническая континентальная воздушная масса. Стратификация атмосферы очень сильная – довольно толстый нижний холодный слой толщиной 1 – 2 км, над ним потенциально теплый воздух. Такая стратификация типична для умеренных континентальных воздушных масс зимой. Над морем при этом находится теплый воздух с низким давлением. Для рассматриваемого случая синоптическая ситуация была как раз такой (не показано).

Как известно, бора имеет малый пространственный масштаб, ширина хребта составляет всего несколько километров.

Поэтому для численного моделирования с помощью модели *WRF* была выбрана конфигурация расчетной области с тремя вложенными доменами с пространственным разрешением соответственно 5 км, 1,57 км и 555 м. В качестве боковых граничных условий использовались данные оперативного анализа *NCEP/NCAR GDAS* с пространственным разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$.

Результаты моделирования представлены на рис. 15, рис. 16 и рис. 17 для момента времени, когда скорость ветра достигла максимального значения – 18 января 2010 г. в 01:00 UTC.

На первом из них – рис. 15, – представлена карта скорости ветра на уровне 10 м в наименьшем домене с разрешением 555 м. Видно, что максимальная скорость ветра 27 м/с достигается именно в Цемесской бухте, хотя большие скорости ветра наблюдаются вдоль всего южного склона хребта. Область максимального ветра имеет небольшой пространственный масштаб, не превышающий 10 км. Видно также, что к северу от хребта скорость ветра небольшая, а при переваливании воздуха через хребет она сильно увеличивается.

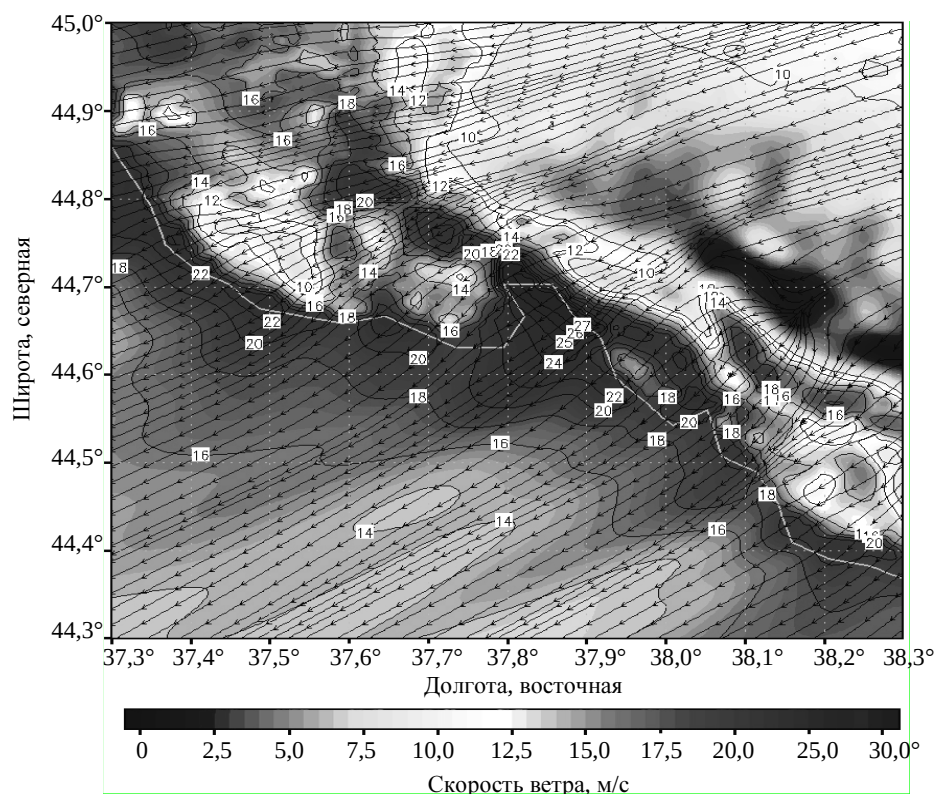


Рис. 15. Распределение скорости ветра на высоте 10 м по результатам моделирования *WRF* для внутреннего домена с пространственным разрешением 555 м для срока 18 января 2010 г., 01:00 UTC. Показаны также линии тока.

На втором – рис. 16, – представлен вертикальный разрез потенциальной температуры в направлении, перпендикулярном к хребту. Видно, что к северу от хребта континентальный воздух сильно стратифицирован, что проявляется в сгущении изолиний потенциальной температуры вблизи уровня 900 гПа. К югу от хребта на этой высоте выделяется область хорошо перемешанного воздуха – здесь образуется интенсивная турбулентность. Рис. 16 позволяет заключить, что в первом приближении стратификацию атмосферы при возникновении явления боры можно считать двухслойной. Толстый слой холодного воздуха к северу от хребта (около 800 м толщиной) после переваливания через хребет высотой 400 м сжимается по вертикали до очень тонкого слоя толщиной порядка 200 – 250 м.

На следующем, – рис. 17, – приведен вертикальный разрез модуля скорости ветра в направлении, перпендикулярном к хребту. Видно, что язык больших скоростей ветра расположен на южном склоне хребта, простирается в море на небольшое расстояние около 10 км и имеет небольшую толщину порядка 200 м. Этот рисунок также подтверждает предположение о двухслойности атмосферы – максимальные скорости ветра сосредоточены именно в нижнем холодном слое.

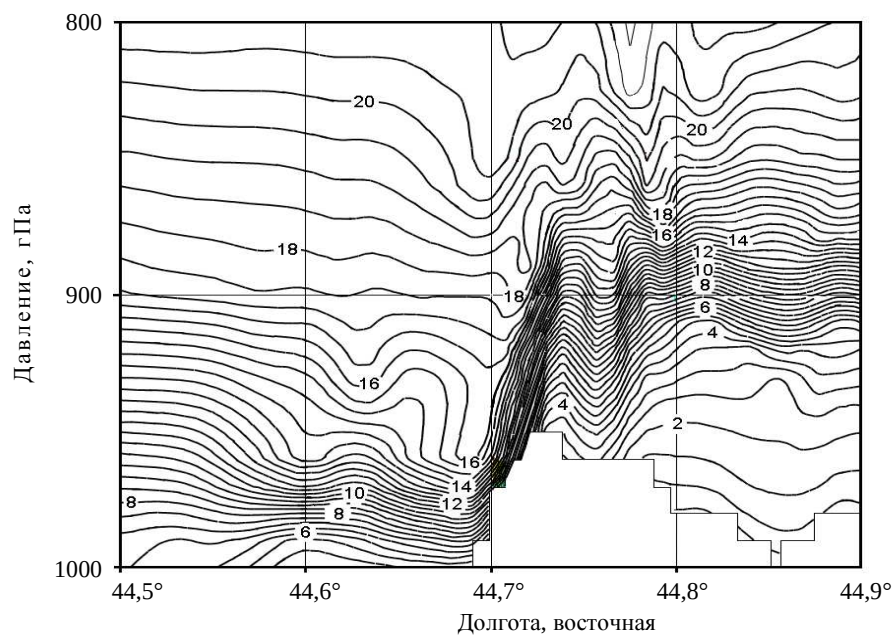


Рис. 16. Вертикальный разрез потенциальной температуры перпендикулярно к горному хребту. Изолинии потенциальной температуры проведены с шагом в $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

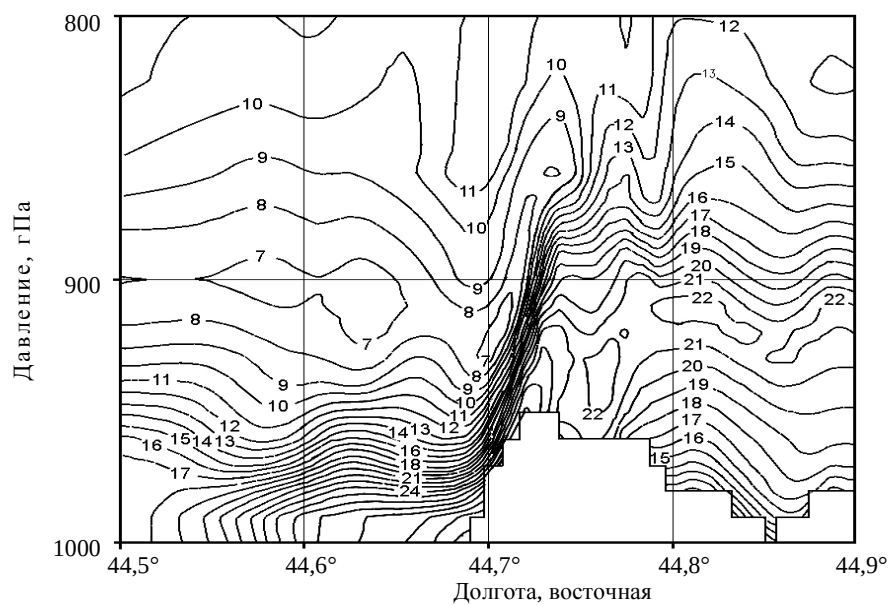


Рис. 17. Вертикальный разрез модуля скорости ветра перпендикулярно к горному хребту. Изолинии модуля скорости ветра проведены с шагом в 1 м/с .

Пользуясь полученной в полной трехмерной модели двухслойностью стратификации и течений, можно предложить эквивалентно-баротропную теорию образования боры. Представим атмосферу слоем однородной жидкости толщины H в поле приведенной гравитации g' . Пусть поток со скоростью U натекает на хребет высоты h .

На рис. 18 представлен механизм образования боры именно в такой простой постановке задачи.

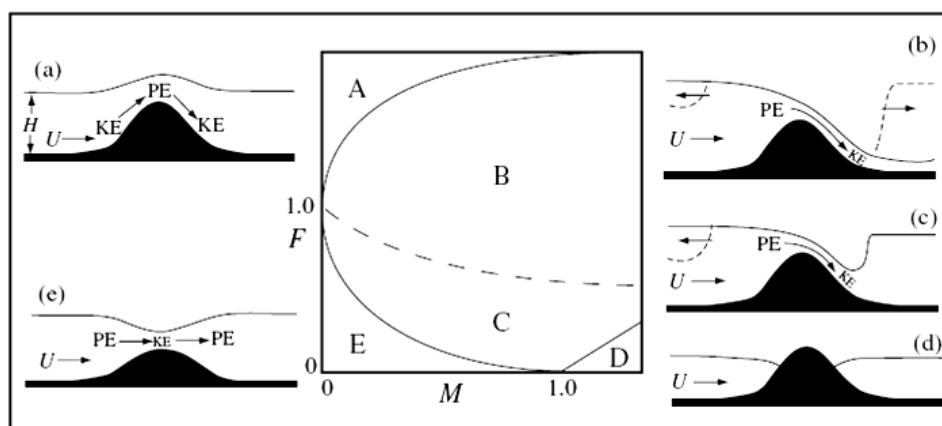


Рис. 18. Режимы реакции однородного потока слоя жидкости толщины H со скоростью U на орографическое препятствие высоты h .

Решение будет зависеть от двух безразмерных чисел:

1) от числа Фруда Fr , равного отношению скорости потока U и скорости волн $\sqrt{g'H}$;

2) от параметра, характеризующего нелинейность задачи, – безразмерной высоты горы h/H .

В зависимости от величины этих чисел возможны различные режимы реакции потока на орографическое препятствие. Эти режимы представлены на диаграмме рис. 18. Боре на этой диаграмме соответствует режим C , при котором гора должна быть ниже, чем толщина слоя, а скорость потока должна быть не очень большой. Тогда на подветренной стороне хребта образуется стационарная обрушивающаяся волна – гидравлический скачок, который не может взобраться на гору против сильного течения. На наветренной же стороне хребта нестационарная реакция на внесение горы в поток в виде волны, бегущей против потока, убегает на бесконечность при малом числе Фруда.

Закключение. Мезомасштабные региональные атмосферные модели необходимы для решения многих важных научных и прикладных задач. Такие модели дают как оперативный, так и ретроспективный атмосферный форсинг с высоким пространственным разрешением для моделей циркуляции Черного моря, позволяют планировать проведение и интерпретировать результаты натурных 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.

Мезомасштабные модели являются незаменимым инструментом при оперативном прогнозировании катастрофических погодных явлений, таких как сильные шторма с экстремальными скоростями ветра, продолжительных ливневых осадков, приводящих к сильным паводкам и наводнениям, сильных ветров типа боры, возникающих в результате реакции атмосферного потока на орографическое препятствие. Использование таких прогнозов способно снизить материальный ущерб и количество человеческих жертв при катастрофических погодных явлениях.

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., J.B. Klemp 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. *Шокуров М.В., Артамонов С.Ю., Эзау И.Н.* Численное моделирование атмосферы в районе платформы в Кацивели для планирования и интерпретации натурных экспериментов // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2010. – Вып. 21. – С. 239-251.
4. *Ефимов В.В., Шокуров М.В., Яровая Д.А.* Численное моделирование квазитропического циклона над Черным морем // *Известия Российской Академии наук, Физика атмосферы и океана.* – 2007. – Том 43, № 6. – С. 667-686.
5. *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.
6. *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.
7. *Ефимов В.В., Барабанов В.С.* Бризовая циркуляция в Черноморском регионе // *Морской гидрофизический журнал.* – 2009. – № 5. – С. 23-36.
8. *Крутин А.В., Шокуров М.В.* Генерация захваченных подветренных волн в атмосфере Крымскими горами // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2009. – Вып. 18. – С. 228-235.
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.* – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2007. – Вып. 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. 14-30.

12. Иванов В.А., Свищева И.А., Прусов А.В., Шокуров М.В.. Прогнозирование катастрофических паводков на основе региональной модели атмосферной циркуляции Южного Крыма. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НППЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2011. – Вып. 25, том 2. – С. 396-418.

Материал поступил в редакцию 18.10.2012 г.

АНОТАЦІЯ Описані результати оперативного прогнозу з використанням мезомасштабних регіональних моделей *MM5* і *WRF* трьох природних катастрофічних явищ в Чорноморському регіоні: 1) Катастрофічного шторму на акваторії Чорного моря 11 листопада 2007 р. з людськими жертвами, 2) сильних зливових опадів 6 – 7 липня 2012 р., що призвели до повені у м. Кримську з людськими жертвами, 3) Новоросійської бори, що виникає в зимовий період, що виявляється в значному посиленні вітру і сильному похолоданні.

Результати моделювання показують для першої ситуації адекватний прогноз швидкості вітру понад 30 м/с. Прогноз вітрових хвиль з використанням моделі *WAM* дає значну висоту хвиль близько 7 м в районі Керченської протоки. Для повені у м. Кримську прогноз дає максимальне добову кількість опадів більше 200 мм. Для Новоросійської бори мезомасштабне моделювання з високою роздільною здатністю дозволяє відтворити і спрогнозувати це явище. Результати моделювання всіх розглянутих явищ узгоджуються зі спостереженнями.

ABSTRACT The results of the operational forecast using regional mesoscale models *MM5* and *WRF* of three natural catastrophic events in the Black Sea region: 1) catastrophic storm on the Black Sea 11 November 2007 with the loss of life, 2) heavy rainfall on July 6-7, 2012, led to flooding in Krymsk with fatalities, 3) Novorossiysk bora occurring in the winter, which is manifested in a significant strengthening of wind and strong cooling.

The simulation results show a valid prediction of the wind speed exceeds 30 m / s for the first situation. Forecast of wind waves using a model *WAM* provides significant wave height of about 7 m in the Kerch Strait. For flooding in Krymsk forecast gives maximum daily rainfall of 200 mm. High resolution mesoscale modeling of Novorossiysk bora allows to reproduce and predict this phenomenon. The simulation results of all these phenomena are consistent with the observations.