

Академик НАН Украины В. А. Иванов, М. В. Шокуров, В. А. Дулов,
Е. В. Чечина

Прогноз погодных катастроф в Черноморском регионе

Представлены средства оперативного прогноза катастрофических погодных явлений в Черноморском регионе с использованием мезомасштабных атмосферных моделей MM5 и WRF, а также волновой модели WAM. Показано, что наводнение в Краснодарском крае России 7 июля 2012 г. было предсказано за пять дней, а катастрофический шторм 11 ноября 2007 г. вблизи побережья Крыма — за три дня до трагических событий. Обсуждены качество системы регионального прогноза МГИ НАН Украины и ее преимущества перед системами глобального прогноза. Система оперативного регионального моделирования атмосферы в МГИ НАН Украины могла бы стать элементом возможной системы раннего оповещения о погодных катастрофах в Азово-Черноморском регионе.

Наводнение 6–7 июля 2012 г. в Краснодарском крае Российской Федерации унесло более 170 жизней и причинило огромный материальный ущерб. Катастрофический шторм 11 ноября 2007 г. вблизи побережья Крыма привел к гибели и авариям множество судов, человеческим жертвам, экологическим бедствиям из-за сброса в море большого количества мазута. Важно отметить, что прогноз обеих катастроф появился в интернете соответственно за пять и трое суток до трагических событий [1]. Региональная система раннего оповещения о погодных катастрофах в причерноморском регионе позволила бы сделать вывод о надвигающихся бедствиях и, тем самым, смягчить их последствия. Создание такой системы возможно на основе регионального моделирования атмосферы.

Цель данного сообщения — представить средства оперативного регионального прогноза, уже имеющиеся в Морском гидрофизическом институте НАН Украины, как возможный элемент будущей системы раннего оповещения о погодных катастрофах в Азово-Черноморском регионе.

Система краткосрочного метеорологического прогноза МГИ НАН Украины. В ведущих мировых оперативных центрах прогноза погоды, таких как *NCEP/NCAR* и *ECMWF*, четыре раза в сутки выполняется глобальный оперативный прогноз погоды с пространственным разрешением 30–50 км. Для анализа состояния атмосферы используются все доступные данные: спутниковые и наземные измерения, вертикальные зондирования и др. [2, 3]. Глобальные атмосферные модели позволяют достоверно прогнозировать развитие и перемещение синоптических циклонов с заблаговременностью несколько суток, однако, в силу их грубого пространственного разрешения, недооценивают экстремальные значения скорости ветра и осадков [4]. Это обстоятельство имеет критическое значение для предсказания региональных погодных катастроф.

Чтобы улучшить прогноз экстремальных погодных явлений необходимо использовать региональные модели с пространственным разрешением вплоть до 1 км. Соответствующие мезомасштабные атмосферные модели *MM5* и *WRF* разработаны Национальным центром атмосферных исследований США как для научных исследований, так и для выполнения оперативных прогнозов и региональных ре-анализов [5]. Такая модель требует адаптации

к конкретному региону, которая заключается в выборе наиболее подходящих схем параметризации физических процессов, а также более детальном задании свойств подстилающей поверхности, в особенности орографии в данном регионе. Модель *MM5*, адаптированная к Черноморскому региону в МГИ НАН Украины, использовалась для исследования отдельных мезомасштабных атмосферных процессов и экстремальных явлений [6–9].

Начиная с 2007 г., МГИ НАН Украины на основе модели *MM5* выполняет для Черноморского региона оперативный прогноз погоды с пространственным разрешением 10 км и заблаговременностью трое суток. Размеры расчетной области составляют 39–49° с. ш., 25–45° в. д., так что она покрывает всю акваторию Черного моря и позволяет анализировать как синоптическую ситуацию, так и мезомасштабные особенности. В качестве боковых граничных условий используются результаты глобального прогноза *NCEP/NCAR GFS* [2]. С начала 2011 г. выполняется также прогноз для Крымского региона с разрешением 3 км, а с середины 2011 г. заблаговременность прогноза была увеличена до пяти суток. На сегодня в институте реализован краткосрочный метеорологический прогноз для Азово-Черноморского региона с параллельным использованием двух мезомасштабных атмосферных моделей — *MM5* и *WRF*. Дополнительно к атмосферному прогнозу выполняется прогноз ветрового волнения на всей акватории Черного моря с использованием модели *WAM* [10]. Результаты прогноза в графическом и цифровом форматах предоставляются в открытом доступе в сети интернет [1].

Катастрофический шторм 11 ноября 2007 г. Катастрофический шторм был связан с прохождением циклона, который, возникнув над Эгейским морем, двигался на северо-восток над западной частью Черного моря и Крымом [11]. Форма и траектория движения циклона в глобальном и региональном прогнозах оказались практически идентичными. Согласно результатам глобального прогноза [2], скорость ветра на уровне 10 м над Черным морем не должна была превышать 25 м/с, но, по результатам регионального прогноза, она достигала 32 м/с. Правильность регионального прогноза подтверждается данными спутникового скаттерометра *QuikSCAT* (на срок шторма скорость ветра превышала 30 м/с [12]) и стандартными измерениями на метеостанциях. В частности, в Геническе максимальная измеренная скорость ветра составляла 35 м/с (11.11.2007 12 : 00 UTC).

На рис. 1 представлены два варианта прогноза ветровых волн с помощью модели *WAM* с разрешением 10 км. В первом — на вход модели подавался ветер глобального прогноза [2], во втором — оперативного прогноза МГИ НАН Украины. В районе Севастополя максимальная высота значительных волн достигала 5 м для глобальной модели и 7 м для мезомасштабной модели. В районе Керченского пролива, где затонуло много судов, максимальные высоты волн были 5 и 9 м соответственно.

Полученные при региональном прогнозе карты параметров ветровых волн позволяют подробно проследить эволюцию поля волн. Волны, достигнув Керченского пролива, разогнались из области, прилегающей к прол. Босфор, развиваясь под действием юго-западного ветра на протяжении примерно 800 км в течение суток. Как известно, высота волн примерно пропорциональна квадрату скорости ветра (см., например, [10]). Поэтому недооценка величины скорости ветра в глобальном прогнозе привела к гораздо более существенной недооценке высоты волн. В результате глобальный прогноз не содержал предсказания особо опасного шторма, в то время как региональный прогноз на основе моделей *MM5* и *WAM* явно указывал на приближающуюся катастрофу.

Катастрофическое наводнение в Краснодарском крае 6–7 июля 2012 г. Циклон, вызвавший экстремальные осадки в Краснодарском крае, сформировался восточнее Черно-

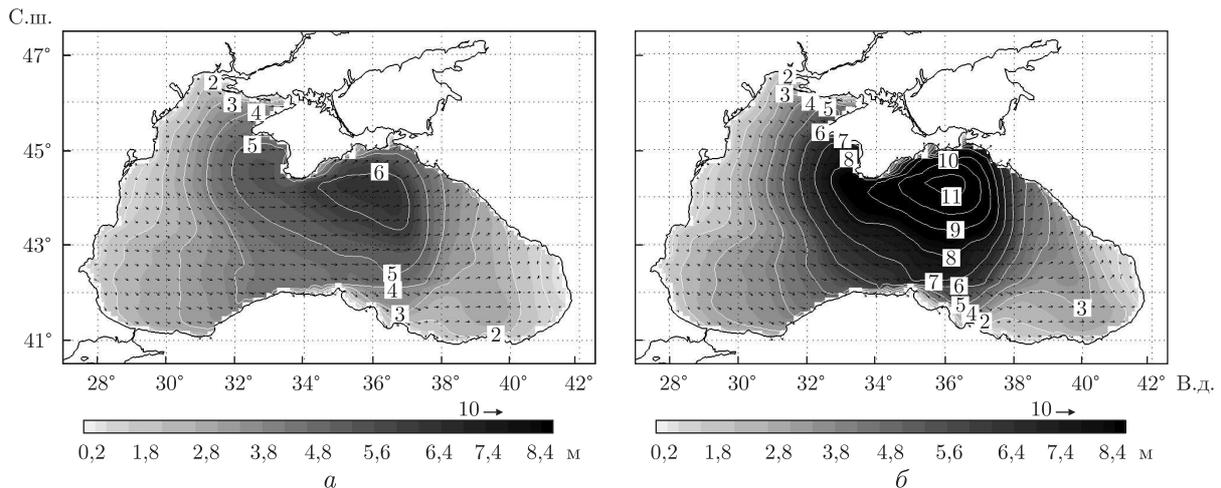


Рис. 1. Поле высоты значительных волн на момент катастрофического шторма. Расчеты выполнены на основе глобального (а) и регионального (б) прогнозов.
 Цифры в квадрате — высота волн, м

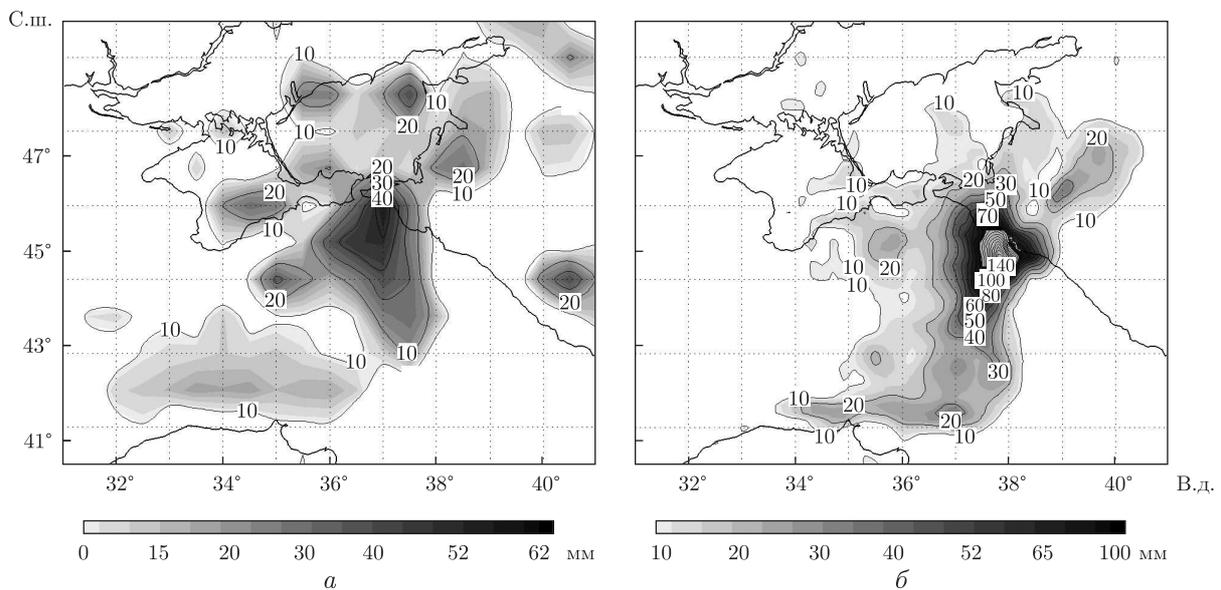


Рис. 2. Двухсуточная сумма осадков в районе катастрофы. Расчеты приведены согласно глобальному (а) и региональному (б) прогнозам.
 Цифры в квадрате — сумма осадков, мм

го моря и медленно перемещался на юго-запад. В течение этих суток (6–7.07) центр циклона практически не сместился [13]. Крупномасштабные особенности этой синоптической картины были предсказаны как глобальными прогностическими моделями, так и в результате регионального прогноза. Глобальные модели дали незначительные величины осадков [2] (см. а на рис. 2), где максимальные двухсуточные суммы осадков в окрестности Новороссийска составляют около 60 мм. Согласно же прямым измерениям на метеостанциях в Геленджике и Новороссийске, количество осадков составляло соответственно 283 и 275 мм. В Крыме двухсуточная сумма осадков достигла 171 мм. Результаты мезомасштабного оперативно-

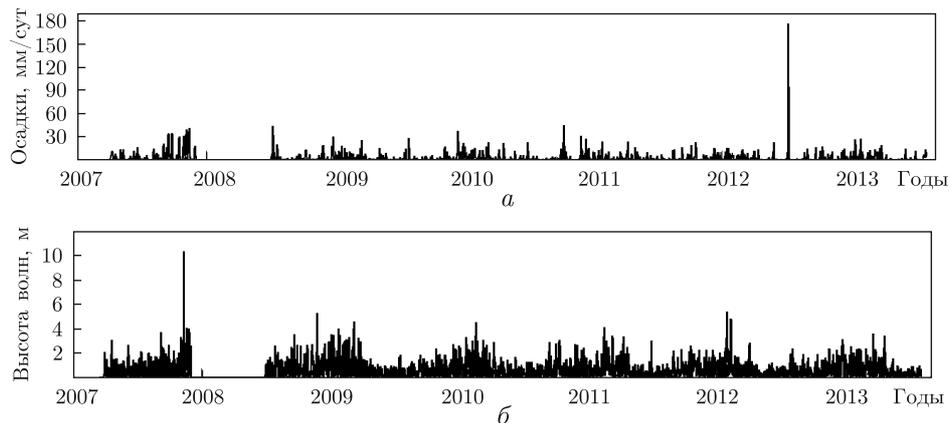


Рис. 3. Результаты оперативного прогноза МГИ НАН Украины за 2007–2013 гг. Суточные суммы осадков в районе Новороссийска (а) и высота значительных волн в районе Керченского пролива (б)

го прогноза по модели *MM5* с разрешением 10 км демонстрирует рис. 2, б. Именно такая карта осадков была представлена в свободном доступе в интернете за пять суток до катастрофы. Она дает сумму осадков за двое суток в окрестности Новороссийска, которая в три раза превышает предсказания глобальных моделей и согласуется с измерениями на метеостанциях во время катастрофы.

Региональные модели в отличие от глобальных выполняют непосредственный расчет процессов кучевой конвекции [4]. Это позволяет не только уточнить прогноз, но и детально разобраться в физике явлений. Создаваемый циклоном поток воздуха имел в районе Новороссийска юго-западное направление. При натекании этого потока на Мархотский хребет возникал подъем воздуха с вертикальной скоростью, достигающей 14 см/с. Это приводило к инициированию глубокой кучевой конвекции и локальному выпадению обильных ливневых осадков. Поскольку циклон практически не перемещался в продолжение 6–7 июля, описанный механизм работал в течение нескольких часов, что и вызвало катастрофическое наводнение. Такое объяснение рассматриваемого явления расходится с выводами [13], основанными только на стандартном метеорологическом анализе, и также невозможно в рамках глобального моделирования, поскольку требует учета региональной орографии. В то же время предложенная трактовка ситуации хорошо согласуется со снимками облачности со спутника Метеосат [14], где выделяется яркая кучевая облачность над зоной катастрофы. Снимки показывают глубокую кучевую конвекцию, продолжающуюся в течение, по крайней мере, 18 ч — с 12:00 6 июля по 6:00 7 июля, когда в районе бедствия выпадали ливневые осадки.

Важно отметить, что прогноз дает весьма небольшую площадь локализации экстремально больших осадков (см. б на рис. 2), которая в действительности имела место [13]. Характерный размер области, где двухсуточная сумма осадков превысила 100 мм, составляет 50 км. Наиболее же сильным осадкам с двухсуточной суммой более 200 мм соответствует область размером около 20 км. Итак, региональный прогноз, правильно учитывая микрофизику атмосферных процессов, действительно дал предсказание катастрофических ливней в окрестности Новороссийска. В то же время в рамках глобального прогноза или традиционного метеорологического анализа такое предсказание было невозможным.

Обсуждение результатов. Качество краткосрочного прогноза за все время работы системы в МГИ НАН Украины демонстрирует рис. 3, где показаны результаты прогноза

интенсивности осадков в районе Новороссийска с 2007 г. по настоящее время (система временно не работала в период с декабря 2007 г. по июль 2008 г.) (см. а) и показаны результаты прогноза высоты значительных волн в районе Керченского пролива (см. б). Графики не оставляют сомнений, что прогнозы аномально сильных ливней на 7 июля 1212 г. и катастрофического шторма на 11 ноября 2007 г. могли бы быть легко идентифицированы.

В настоящей работе на примере двух катастрофических погодных явлений в причерноморском регионе продемонстрированы качество и надежность мезомасштабных атмосферных прогнозов, а также их преимущества по отношению к глобальному прогнозу. Представленные средства оперативного регионального моделирования атмосферы в МГИ НАН Украины могли бы стать элементом возможной системы раннего оповещения о погодных катастрофах в Азово-Черноморском регионе.

Работа выполнена в рамках проекта COCONET (Contract No. 287844) седьмой рамочной программы Европейского Сообщества при частичной поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины (контракт Ф53/117-2013).

1. 5-Day weather forecast over the Black Sea. – Мор. гидрофиз. ин-т НАН Украины, 2007–2013. – <http://vao.hydrophys.org>.
2. Global Forecast System, National Weather Service, NOAA, USA. – Environment. Model. Center, 2013. – <http://www.emc.ncep.noaa.gov/index.php?branch=GFS>.
3. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. – Intergovernmental organisation, London, UK, 2008–2013. – <http://www.ecmwf.int/about/overview/>.
4. Clark A. J., Weiss S. J., John S. et al. An Overview of the 2010. – Hazardous Weather Testbed Experimental Forecast Program Spring Experiment // Bull. Am. Meteor. Soc. – 2012. – **93**. – P. 55–74.
5. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J. et al. A description of the Advanced Research WRF version 3 // NCAR Tech. Note NCAR/TN – 475+STR, 2008. – Mesoscale and Microscale Meteorology Division. – National Center of Atmospheric Research, 2008. – 113 p.
6. Ефимов В. В., Станичний 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 // Мор. гидрофиз. журн. – 2009. – № 5. – С. 23–36.
8. Иванов В. А., Овчаренко И. А., Прусов А. В., Шокуров М. В. Моделирование катастрофических паводков в регионе Южного берега Крыма // Доп. НАН України. – 2012. – № 8. – С. 79–84.
9. Ivanov V. A., Dulov V. A., Kuznetsov S. Yu. et al. Risk assessment of encountering killer waves in the Black Sea // Geography, Environment, Sustainability. – 2012. – **5**, No 1. – P. 84–111.
10. Holthuijsen L. H. Waves in Oceanic and Coastal Waters. – Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2007. – 387 p.
11. Овсиенко С. Н., Фащук Д. Я., Зацена С. Н. и др. Шторм 11 ноября 2007 г. в Керченском проливе: Хроника событий, математическое моделирование и географо-экологический анализ нефтяного разлива // Тр. гос. океанограф. ин-та. – 2008. – **211**. – С. 307–339.
12. Center for Satellite Applications and Research, NOAA Satellite and Information Service (NESDIS), NOAA, USA // Ocean Surface Winds Team. – 2013. – <http://manati.star.nesdis.noaa.gov>.
13. Куклев С. Б., Москаленко Л. В., Мельников В. А. и др. Влияние атмосферных синоптических процессов и ветра (динамические факторы) на термические условия и осадки в районе Северо-Кавказского побережья Черного моря по многолетним данным (1955–2012 гг.) // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. – 2013. – **10**, № 1. – С. 81–92.
14. Dundee Satellite Receiving Station. – Dundee University, 2013. – <http://www.sat.dundee.ac.uk>.

*Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь*

Поступило в редакцию 27.08.2013

Академік НАН України **В. О. Іванов, М. В. Шокуров, В. О. Дулов,
К. В. Чечіна**

Прогноз погодних катастроф у Чорноморському регіоні

Представлено засоби оперативного прогнозу катастрофічних погодних явищ у Чорноморському регіоні з використанням мезомасштабних атмосферних моделей MM5 й WRF, а також хвильової моделі WAM. Показано, що повінь у Краснодарському краї Росії 7 липня 2012 р. було передбачено за п'ять днів, а катастрофічний шторм 11 листопада 2007 р. поблизу узбережжя Криму — за три дні до трагічних подій. Обговорено якість системи регіонального прогнозу МГІ НАН України та її переваги перед системами глобального прогнозу. Система оперативного регіонального моделювання атмосфери в МГІ НАН України може стати елементом можливої системи раннього сповіщення про погодні катастрофи в Азово-Чорноморському регіоні.

Academician of the NAS of Ukraine **V. A. Ivanov, M. V. Shokurov, V. A. Dulov,
E. V. Chechina**

Forecast of weather disasters in the Black Sea region

Means for the operational forecast of catastrophic weather events in the Black Sea region based on MM5 and WRF mesoscale atmospheric models and WAM wave model are presented. It is shown that the flooding in the Krasnodar Region, Russia, July 7, 2012 was predicted five days before the tragic events, and the catastrophic storm of November 11, 2007 off the coast of the Crimea was also predicted three days in advance. Quality of the regional forecast of MHI NASU and its advantages over the global forecast are discussed. The operational regional modeling of the atmosphere in MHI NASU could become an important element of a possible early warning system for weather disasters in the Azov-Black Sea region.