

УДК 551.509.327+ 551.515.3

Технология оценки и прогноза смерчеопасности на российской акватории Черного моря и результаты ее тестирования в сезон смерчей 2017 года

О.В. Калмыкова, В.М. Шершаков

*Научно-производственное объединение «Тайфун», г. Обнинск, Россия
kov@feerc.ru; shershakov@rpatyphoon.ru*

В статье дается описание автоматизированной технологии оценки и прогноза смерчеопасности на российской акватории Черного моря. Рассматривается методическая основа указанной технологии, в том числе обоснование выбора используемых в ней общеизвестных индексов прогноза смерчеопасных ситуаций, а также специально разработанного регионального индекса смерчеопасности. Приводится описание программной реализации указанной технологии и аспектов ее потенциального использования в оперативной практике. На конкретном примере демонстрируются результаты работы технологии. Дается общая оценка эффективности работы технологии в сезон смерчей 2017 года. Анализируется оправдываемость предупреждений о смерчах над Черным морем, выданных синоптиками в 2017 году.

Ключевые слова: смерчеопасная ситуация, технология оценки и прогноза смерчеопасности, зоны риска, обработка данных, численное моделирование атмосферы, модель WRF, модель COSMO-Ru2, спутниковые данные, облачные ячейки

Technology of estimation and forecasting of the risk of the waterspouts occurrence over the Russian part of the Black Sea and results of its testing during waterspouts season 2017

O.V. Kalmykova, V.M. Shershakov

*Research and Production Association Typhoon, Obninsk, Kaluzhsky region, Russia
kov@feerc.ru; shershakov@rpatyphoon.ru*

The article presents the description of the automated technology of the estimation and forecasting of the risk of the waterspouts occurrence over the Russian part of the Black Sea. The methodical basis of the technology is considered, including the substantiation of the choice of the well-known indexes of convective instability for tornado-risk situations used, as well as using a new developed regional waterspout risk index. The description of the software implementation of this technology and aspects of its potential use in operational practice is given. Results of the functioning of the technology during a real case of the waterspouts occurrence is considered. Overall estimation of the technology operation during the waterspout season 2017 is given. Accuracy of alarms about the waterspouts occurrence at the Black Sea given by weather forecasters in 2017 are analyzed.

Keywords: waterspout risk situation, technology of estimation and forecasting the risk of the waterspouts occurrence, risk zones, data processing, numerical modeling of the atmosphere, WRF model, COSMO-Ru2 model, satellite data, cloud cells

Введение

Акватория Черного моря занимает лидирующую позицию среди всех остальных регионов России по количеству ежегодно регистрируемых в ее пределах смерчей на единицу площади [14]. Несмотря на малую интенсивность большинства наблюдаемых смерчей, задача заблаговременного предупреждения об их возможном возникновении остается актуальной.

При современном уровне понимания процессов зарождения смерчей задача их прогнозирования сводится к несколько более упрощенной задаче идентификации смерчопасной ситуации, характеризующейся комплексом благоприятных для их возникновения условий.

Известные в настоящее время подходы к прогнозированию смерчопасных ситуаций базируются на использовании индексов конвективной неустойчивости атмосферы – параметров, рассчитываемых по данным численного моделирования атмосферы или радиозондирования [12, 25]. Для каждого индекса устанавливается соответствующее ему пороговое значение, превышение которого сигнализирует о наступлении смерчопасной ситуации.

Выбор предикторов, используемых для расчета индексов, обосновывается закономерностями изменения метеорологических параметров состояния атмосферы незадолго до и в моменты формирования смерчей. Эти закономерности устанавливаются эмпирически в ходе обработки больших рядов данных [18].

Примером специализированной методики прогноза смерчопасных ситуаций, связанных с возникновением водяных смерчей, является методика номограммы SWN (Szilagyi Waterspout Nomogram), имеющая в своей основе двумерную область, характеризующуюся множеством значений двух эмпирически выбранных предикторов, показавших наилучшую корреляцию со случаями регистрации водяных смерчей на Великих озерах [23].

1. Методическая основа технологии

Разработке методики оценки и прогноза смерчопасности на российской акватории Черного моря предшествовало исследование общих характеристик смерчей, отмечавшихся в пределах данного региона в 2014–2016 гг. [3]. Видеозаписи и фотографии смерчей, опубликованные очевидцами, свидетельствуют о том, что все возникшие смерчи были либо практически неподвижны, либо перемещались на небольшое расстояние, но в конечном итоге все равно распадались в море и в целом имели немезоциклонное происхождение. Тем не менее при разработке методики прогнозирования не следует исключать возможности образования в пределах данной территории и сильных мезоциклонных смерчей. В отличие от своих более слабых собратьев, они с большей долей вероятности могут выйти на сушу и нанести значительный ущерб ввиду достаточно продолжительного времени жизни суперячеек, из которых они возникают.

В связи с отмеченным преобладанием в рассматриваемом регионе слабых немезоциклонных смерчей, был проведен обзор работ различных авторов, связанных с исследованием условий, благоприятных для их формирования [13, 26]. Были выделены наиболее часто упоминаемые условия, послужившие основой для выбора предикторов, определяющих формирование смерчей данного типа: большая разность температуры поверхности моря и температуры воздуха на некотором уровне от нее, наличие предварительно сформированной завихренности вблизи подстилающей поверхности, высокая влажность воздуха и небольшие сдвиг и разность скоростей ветра в нижнем слое атмосферы. Впоследствии на базе данных предикторов и сформированного архива смерчей за 2014–2016 гг. было получено выражение для расчета нового индекса смерчеопасности российской акватории Черного моря WRI (Waterspout Risk Index) [2].

На начальном этапе построения методики оценки и прогноза смерчеопасности в пределах исследуемого региона была проведена оценка эффективности различных индексов конвективной неустойчивости, номограммы SWN, а также нового индекса смерчеопасности WRI для случаев наблюдения смерчей из сформированного архива. Расчеты проводились на базе выходных данных модели WRF с шагом вложенной сетки 2×2 км.

Рассматривались три группы индексов конвективной неустойчивости:

1. Индексы немезоциклонных смерчей:

– параметр несуперячейкового смерча NSP (Non-supercell Tornado Parameter) [11], не накладывающий ограничения на тип подстилающей поверхности, над которой формируются немезоциклонные смерчи;

– усиливающий и растягивающий вертикальное вращение потенциал ESP (Enhanced Stretching Potential) [12], аналогично индексу NSP имеющий широкое применение;

– индекс Купера и Хэвина KHS (Kuiper Haven Spout Index) [15], используемый для прогноза немезоциклонных водяных смерчей.

2. Индексы мезоциклонных смерчей:

– сдвиг ветра по Ричардсону WD_{BRN} (Wind Difference Bulk Richardson Number) [25];

– средний сдвиг \overline{S}_i (Mean Shear) [22], где i – толщина рассматриваемого слоя, расчеты проводились для слоя толщиной 1, 2 и 3 км;

– относительная спиральность SRH_i (Storm-Relative Helicity) [25], где i – предел вычисления, расчеты проводились для уровней 1 и 3 км;

– параметр формирования завихренности VGP (Vorticity Generating Parameter) [25];

– энергетический спиральный индекс EHI (Energy-Helicity Index) [25];

– комбинированный суперячейковый параметр SCP (Supercell Composite Parameter) [24];

– параметр сильных смерчей STP_i (Significant Tornado Parameter) [24], где i – индекс расчетного слоя, расчеты проводились для фиксированного (fixed layer) и эффективного слоев (effective layer).

Все индексы рассматриваемой группы, за исключением последнего, используются и для прогноза суперячеек, с которыми может быть связано возникновение смерчей. В то же время индекс STP является строго специализированным индексом прогноза сильных мезоциклонных смерчей.

3. Индексы общей неустойчивости:

- уровень конденсации LCL (Lifting Condensation Level) [22];
- конвективная доступная потенциальная энергия CAPE (Convective Available Potential Energy) [22];
- конвективное торможение CIN (Convective Inhibition) [22].

Для всех индексов рассматриваемой группы расчеты проводились на базе трех модификаций: для поднимающейся частицы с поверхности – SB (Surface Based), для частицы, являющейся самой неустойчивой в нижнем слое толщиной 300 гПа – MU (Most Unstable) и для средневзвешенных параметров в нижнем слое толщиной 100 гПа – ML (Mean Layer).

Для каждого из вышеперечисленных индексов, а также для нового индекса WRI и номограммы SWN был проведен расчет доли удачных прогнозов (HR – Hit Rate) и пространственной погрешности прогноза (минимального расстояния от места фактической регистрации смерча до точки, в которой давался прогноз возникновения смерчеопасной ситуации) R_{min} .

Среди оцениваемых индексов немезоциклонных смерчей наилучшие результаты показал индекс NSP (HR = 88 %, R_{min} = 11 км). Сопоставимые с ним результаты были отмечены для номограммы SWN (HR = 82 %, R_{min} = 7 км) и для нового индекса WRI (HR = 80 %, R_{min} = 12 км).

Индексы общей неустойчивости в различных модификациях своего расчета показали практически 100%-ные результаты по доли удачных прогнозов, что говорит о том, что в моменты формирования смерчей действительно отмечалось неустойчивое состояние атмосферы. Средняя пространственная погрешность прогноза при этом составила порядка 3 км. Для дальнейшего использования были выбраны следующие модификации упомянутых индексов: CAPE_{MU}, CIN_{MU} и LCL_{SB}.

Что касается индексов мезоциклонных смерчей, то для них было установлено, что подавляющее большинство смерчей из сформированного архива регистрировалось при значениях рассматриваемых индексов, много меньших установленных для них порогов, что вполне можно объяснить тем, что данная группа индексов не предназначена для прогноза смерчей немезоциклонной категории происхождения.

По результатам проведенной работы были сформулированы основные положения методики оценки и прогноза смерчеопасности в пределах исследуемого региона. Ключевым элементом методики стал алгоритм

выделения смерчеопасных областей с различными зонами риска на базе данных численного моделирования атмосферы. При его построении использовалось предположение о том, что каждый из индексов той или иной группы, ввиду специфики своего расчета, вносит независимый равный вклад в общий прогноз смерчеопасной ситуации. Иными словами, чем больше различных индексов спрогнозировали возможность возникновения данной ситуации, тем больше вероятность (риск) ее наступления.

В соответствии с ранее упомянутой классификацией индексов, в методике рассматриваются три типа смерчеопасных областей (табл. 1). За каждой областью закрепляется список определяющих предикторов и соответствующих им пороговых значений. В перечень определяющих предикторов областей НМС (немезоциклонные смерчи) и ОН (общая неустойчивость) были включены те индексы, которые показали наилучшие результаты в ходе ранее проведенной оценки. Список предикторов области МС (мезоциклонные смерчи) был составлен из всего множества рассмотренных индексов соответствующей группы.

Таблица 1. Типы смерчеопасных областей

Table 1. Types of the waterspout-risk areas

Обозначение	Описание	Определяющие предикторы и их пороговые значения
Область НМС	Смерчеопасная область, в пределах которой возможно формирование смерчей немезоциклонного происхождения	$NSP \geq 1$ $WRI \geq 1$ $SWN = 1$
Область МС	Смерчеопасная область, в пределах которой возможно формирование смерчей мезоциклонного происхождения	$WD_{BRN} \geq 50$ $\overline{S}_1 \geq 10$ $SRH_1 \geq 100$ $SRH_3 \geq 150$ $VGP \geq 0.3$ $EHI \geq 1$ $SCP \geq 1$ $STP_{fl} \geq 1$ $STP_{el} \geq 1$
Область ОН	Область общей неустойчивости атмосферы	$CAPE_{MU} \geq 1000$ $CIN_{MU} \leq 200$ $LCL_{SB} \leq 800$

В качестве основного параметра смерчеопасной области выступает дискретная величина, рассчитываемая в каждой точке данной области и названная категорией риска. Категория риска присваивается исходя из соотношения количества предикторов N_{ep} , для которых отмечается выход

за пределы установленных для них пороговых значений, к общему количеству предикторов области N_{ap} (табл. 2). Точки с одинаковой категорией риска определяют соответствующие зоны риска смерчеопасных областей.

В ходе дальнейшей работы над методикой был проведен анализ возможности включения в ее состав алгоритмов обработки иных типов данных, используемых для обнаружения смерчей, в частности радиолокационных данных и спутниковых снимков.

Адаптация к исследуемому региону разработанных американскими учеными алгоритмов обнаружения мезоциклонов MDA (Mesocyclone Detection Algorithm) [21] и смерчей TDA (Tornado Detection Algorithm) [16] ставится под сомнение по причине ограниченности территории их применения и, как следствие, необходимости проведения дополнительной работы по обучению алгоритмов на распознавание шаблонов радиальной скорости мезоциклонных смерчей в новых условиях, в то время как смерчи данной категории, как правило, в пределах рассматриваемого региона регистрируются крайне редко.

Таблица 2. Категории риска смерчеопасных областей
Table 2. Categories of risk of waterspout-risk areas

Название	Характеристика	Правило присвоения	Вероятность смерча
Категория 0	Риск отсутствует или минимален	$N_{ep} = 0$	0 %
Категория 1	Повышенный риск	$0 < N_{ep} \leq \frac{1}{3} N_{ap}$	33 %
Категория 2	Высокий риск	$\frac{1}{3} N_{ap} < N_{ep} \leq \frac{2}{3} N_{ap}$	66 %
Категория 3	Крайне высокий риск	$\frac{2}{3} N_{ap} < N_{ep} \leq N_{ap}$	100 %

Что касается спутниковых снимков, то в настоящее время их использование для обнаружения смерчей в большей степени сводится к идентификации границ облачных образований (ячеек), из которых впоследствии могут возникнуть смерчи. В этой связи в состав методики оценки и прогноза смерчеопасности был включен алгоритм присвоения категорий риска областям облачных ячеек, позволяющий дать оценку текущего уровня смерчеопасности той или иной ячейки и впоследствии проследить динамику его изменения.

Алгоритм базируется на использовании ранее полученных данных о смерчеопасных областях и предполагает присвоение категории риска области ячейки по каждому типу смерчей в отдельности. Выделение границ ячеек осуществляется средствами программного обеспечения

SAFNWC/MSG (Satellite Application Facilities/Meteosat Second Generation) [20], разработанного Европейской организацией спутниковой метеорологии (Eumetsat) для обработки данных геостационарных метеорологических спутников серии Meteosat Second Generation (MSG), область охвата которых отвечает требованиям на включение в ее состав исследуемого региона. В качестве методической основы для выделения границ ячеек при этом используется специально разработанный метеорологической службой Франции (Meteo-France) алгоритм быстро развивающихся конвективных ячеек RDT (Rapid Development Thunderstorms) [10], предусматривающий задание адаптивного порога для распознавания области каждой ячейки.

Категория риска для области рассматриваемой ячейки по смерчам того или иного типа устанавливается исходя из максимального значения категории риска точек соответствующей смерчопасной области, которые попадают внутрь области ячейки и в которых категория риска области ОН отлична от нуля, т. е. отмечается некоторый уровень неустойчивости.

Для упрощения процедуры последующего анализа данных, полученных по результатам работы вышеупомянутых алгоритмов методики оценки и прогноза смерчопасности, в ее состав также был включен алгоритм прослеживания во времени информации о категориях риска смерчопасных областей и областей облачных ячеек с целью формирования сообщений о том, какие участки акватории Черного моря и в какие промежутки времени нуждаются в детальном анализе со стороны синоптиков, ввиду установленных для них высоких уровней опасности возникновения смерчей в их пределах. Подобные сообщения имеют структуру, схожую с предупреждениями о возникновении опасного явления (начало и окончание действия, область действия и категория риска), и представляют конечный результат работы методики, являясь формой информационной поддержки принятия решений о выдаче синоптиками реальных предупреждений о смерчах.

В методике рассматриваются два типа предупреждающих сообщений. Предупреждения первого типа даются по областям из списка предварительно заданных областей, а второго типа – по областям облачных ячеек. В конечный список предупреждений включаются предупреждения второй и третьей категории риска.

2. Программная реализация технологии

Ключевым элементом в работе технологии является программный комплекс обработки и представления данных, разработанный для программной реализации заложенных в состав методики алгоритмов. В перечень исходных данных, необходимых для работы программного комплекса, входят:

– спутниковые снимки спектральных каналов VIS0.6, WV6.2, WV7.3, IR8.7, IR10.8, IR12.0 с геостационарного метеорологического спутника Meteosat-10 (MSG3);

– данные о температуре поверхности моря в пределах акватории Черного моря; реализована поддержка работы с данными объективного анализа SST (Sea Surface Temperature), формируемыми американским Национальным центром по прогнозированию окружающей среды NCEP (National Centers for Environmental Prediction) [19];

– данные численного моделирования атмосферы; реализована поддержка работы с данными двух типов: прогностические данные по модели GFS [17], используемые впоследствии в качестве начальных и граничных условий при проведении расчетов по модели WRF; прогностические данные по модели COSMO-Ru2 [5] по Южному федеральному округу;

– радиолокационные данные от действующих в черноморском регионе доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ);

– данные грозопеленгационных станций ГПС «Алвес» и «LS 8000».

Радиолокационные и грозопеленгационные данные включаются в работу технологии для получения общего представления о текущей метеорологической обстановке и не являются обязательными.

В перечень выходной продукции технологии входят поля рассматриваемых в методике индексов, зоны риска смерчеопасных областей, данные об облачных ячейках и набор предупреждающих сообщений, формируемых в соответствии с используемым в методике алгоритмом.

Структура программного комплекса обработки и представления данных включает в себя оперативную базу данных, три подсистемы последовательной обработки данных и подсистему визуализации.

Подсистема предварительной подготовки данных представлена набором сервисов сбора, выборки данных требуемого пространственного охвата, их обработки и последующего архивирования, объединенных под общим названием технология мониторинга смерчеопасных ситуаций [4]. Помимо этого, рассматриваемая подсистема включает в себя блок численного моделирования атмосферы на базе модели WRF, по результатам работы которого формируются прогностические данные с шагом сетки 4×4 км и заблаговременностью 48 часов, а также блок обработки готовых прогностических данных по модели COSMO-Ru2.

Подсистема расчета смерчевых предикторов предназначена для расчета индексов, ранее упомянутых в методике оценки и прогноза смерчеопасности, на базе которых впоследствии осуществляется выделение смерчеопасных областей с различными зонами риска.

Подсистема оценки и прогноза смерчеопасности реализует весь комплекс алгоритмов обработки данных, включенных в состав одноименной методики. Данная подсистема отвечает за формирование конечной выходной продукции технологии.

Подсистема визуализации реализована в виде веб-приложения и является основным инструментом доступа к выходной продукции технологии. Сценарий оперативного использования технологии предполагает постоянную работу синоптика с данным веб-приложением. В ходе

указанной работы он просматривает список текущих предупреждений, получает информацию о смерчопасности обнаруженных облачных ячеек, анализирует фоновые радиолокационные и грозопеленгационные данные (при наличии), а при необходимости проводит анализ полей смерчевых индексов и зон риска смерчопасных областей. За счет композиции данных от различных источников, гибкого механизма послойного представления этих данных и возможности выбора просматриваемых параметров из широкого списка синоптик получает всю необходимую информацию о текущем и прогнозируемом уровне смерчопасности в пределах всего региона.

С июля 2017 года технология оценки и прогноза смерчопасности была запущена в работу в непрерывном режиме на вычислительных мощностях НПО «Тайфун». В течение первого месяца своей работы технология базировалась на обработке прогностических данных только по модели WRF. С августа 2017 года был налажен механизм получения прогностических данных по модели COSMO-Ru2, после чего выходная продукция технологии стала формироваться на базе уже двух упомянутых моделей.

3. Результаты работы технологии на примере семейства смерчей 29 августа 2017 года

По сообщениям очевидцев, 29 августа 2017 г. примерно в 11.45 ч ВСВ в условиях плотной затянутой облачности вблизи побережья Адлера, над морем возникло сразу несколько воронок смерчей (рис. 1). Со временем их количество возросло до 12. Все воронки были небольшого размера и просуществовали в течение нескольких минут, после чего распались в море, не причинив никакого вреда [6].

На рис. 2 показаны результаты работы технологии, полученные на базе обработки прогностических данных по модели COSMO-Ru2 для момента времени 29.08.2017 г. 12.00 ч ВСВ от начала счета 29.08.2017 г. 00.00 ч ВСВ. Пиктограммой в форме воронки обозначено место регистрации смерчей.

Зона максимального риска формирования немезоциклонных смерчей (рис. 2 а) была несколько смещена от места их фактической регистрации, но тем не менее входила в область прогноза, охватывающую район г. Сочи (прямоугольная область с пиктограммой на рис. 2 а).

Смерчопасная область на базе номограммы SWN (рис. 2 б) хотя и включала рассматриваемый случай, но была слишком обширна и характеризовала возможность появления смерчей практически вдоль всего побережья Краснодарского края. Что касается индексов WRI (рис. 2 в) и NSP (рис. 2 г), то их смерчопасные области были значительно меньше по охвату, и именно их пересечение и определило выделенную в конечном итоге зону максимального риска.



Рис. 1. Семейство смерчей 29 августа 2017 г. вблизи Адлера (фото с сайта vk.com).

Fig. 1. Waterspouts family on August 29, 2017 near Adler (a photo taken from the site vk.com).

Представленные результаты демонстрируют целесообразность использования композиции (пересечения) индексов при построении конечных зон риска в противовес рассмотрению каждого из них по отдельности. Некоторое подобие смерчопасных областей индексов WRI и NSP свидетельствует об их возможной корреляции, которую еще предстоит исследовать. Кроме того, становится очевидно, что при выборе определяющих предикторов смерчопасных областей не стоит ограничиваться ранее использованным критерием доли удачных прогнозов, а следует рассматривать его в совокупности с долей ложных тревог, что особо актуально для номограммы SWN.

На рис. 3 показан набор облачных ячеек, обнаруженных по результатам обработки спутниковых снимков для момента времени 29.08.2017 г. 11.45 ч ВСВ. Область материнской ячейки для рассматриваемого семейства смерчей выделена жирной линией. При выборе данной ячейки учитывалась ее пространственная близость к месту регистрации смерчей и соответствие особенностей ее положения тем фактам, которые были установлены по фотографиям очевидцев, в частности тому, что ячейка, из которой формировались смерчи, пересекала береговую линию и простиралась за ее пределы.

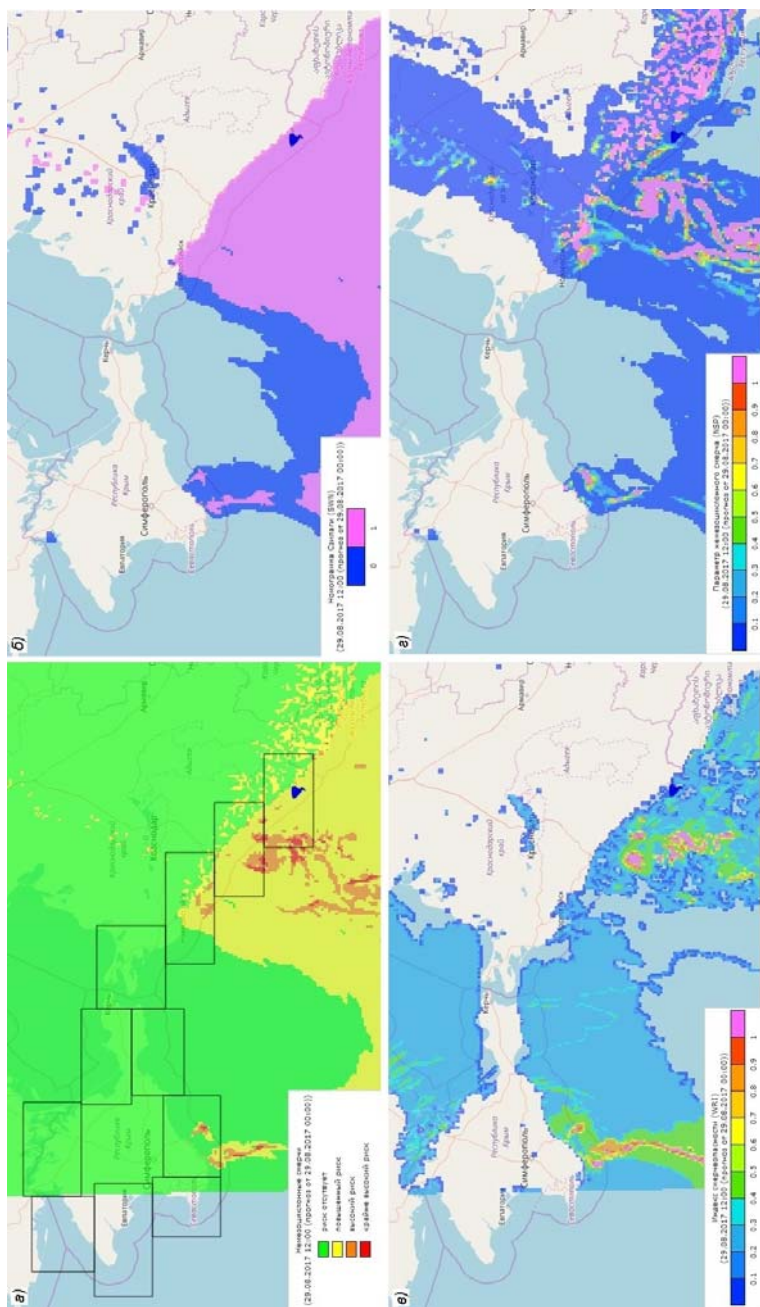


Рис. 2. Результаты работы технологии на примере смерчей 29 августа 2017 г. (модель COSMO-Ru2): зоны риска (а); области номограммы SWN (б); индекс WRI (в); индекс NSP (г).

Fig. 2. Results of the technology operation for the case of waterspouts occurrence on 29 August 2017 (COSMO-Ru2 model): risk zones (а); Sziilagyí waterspout nomogram areas (б); WRI (в); NSP (г).

В соответствии с используемым в методике алгоритмом, материнской ячейке смерчей в момент времени, наиболее приближенный к моменту их регистрации, была присвоена вторая категория риска. Из приведенного на рис. 3 графика динамики категории риска во времени видно, что, во-первых, материнская ячейка была впервые обнаружена на предыдущем цикле сканирования в 11.30 ч ВСВ, т. е. возможно, что процесс формирования смерча и дал толчок к ее возникновению; а, во-вторых, рассматриваемая вторая категория была присвоена ячейке изначально и сохранялась еще около часа после появления смерчей.

В табл. 3 приведены предупреждения на 29 августа по району г. Сочи, сформированные по результатам обработки прогностических данных по модели COSMO-Ru2 различной заблаговременности. Курсивом выделены те предупреждения, которые охватывали момент наблюдения смерчей. Следует отметить, что все они были даны со 100%-ной вероятностью возникновения смерчей. Временной охват данных предупреждений был достаточно широк и определял те промежутки времени, когда по результатам работы технологии в пределах рассматриваемой области обнаруживалась хотя бы одна точка, для которой прогнозировалась как минимум вторая категория риска.

Таблица 3. Предупреждения по области регистрации смерчей 29 августа 2017 г. (модель COSMO-Ru2)

Table 3. Waterspouts alarms by region of their registration on August 29, 2017 (COSMO-Ru2 model)

Начало моделирования (ч ВСВ)	Вероятность смерча	Временной охват (ВСВ)
27.08.2017 12:00:00	100 %	29.08.2017 00:00:00 – 29.08.2017 09:00:00
28.08.2017 00:00:00	100 %	<i>28.08.2017 21:00:00 – 29.08.2017 15:00:00</i>
	66 %	29.08.2017 15:00:00 – 29.08.2017 21:00:00
28.08.2017 12:00:00	100 %	<i>28.08.2017 18:00:00 – 29.08.2017 15:00:00</i>
	66 %	29.08.2017 15:00:00 – 29.08.2017 18:00:00
	100 %	29.08.2017 18:00:00 – 30.08.2017 09:00:00
29.08.2017 00:00:00	66 %	29.08.2017 00:00:00 – 29.08.2017 03:00:00
	100 %	<i>29.08.2017 03:00:00 – 29.08.2017 18:00:00</i>
	66 %	29.08.2017 18:00:00 – 29.08.2017 21:00:00
	100 %	29.08.2017 21:00:00 – 30.08.2017 15:00:00

В целом, начиная от счета 28.08.2017 г. 00.00 ч ВСВ, т. е. с заблаговременностью 24 часа, в течение практически всего дня 29 августа по району г. Сочи с переменной вероятностью давались предупреждения о смерчах. Что касается региональных синоптиков, то на сайте Главного

управления МЧС России по Краснодарскому краю 29 августа 2017 г. в 11 ч 14 мин ВСВ было опубликовано следующее предупреждение: «в ближайшие 3–6 часов и до конца суток 29 августа, а также в течение суток 30 и 31 августа над Черным морем на участке Магри – н. п. Веселое имеется опасность формирования смерчей над морем» [8]. Данное предупреждение, хотя и оказалось оправданным и заблаговременным, но его заблаговременность значительно уступает той, которую удалось достичь с использованием разработанной технологии.

4. Результаты тестирования технологии в сезон смерчей 2017 года

Общая оценка эффективности работы технологии проводилась для временного промежутка наблюдения смерчей в 2017 году. Все отмеченные за это время смерчи имели немезоциклонное происхождение, по этой причине в процессе оценки рассматривались предупреждения только по смерчам соответствующего типа.

Для оценки предупреждений по областям исследуемая территория была разделена на два района. Первый включал в себя часть акватории, примыкающую к Краснодарскому краю, а второй – ту часть, которая примыкает к Республике Крым.

Расчет характеристик качества предупреждений проводился по каждому месяцу, по каждому району и по каждой заблаговременности в отдельности. В процессе расчета осуществлялась агрегация предупреждений по дням месяца и по районам.

В качестве анализируемых характеристик предупреждений по областям были выбраны ROC-диаграмма (Relative Operating Characteristic) [1] и оценка Брайера (Brier Score) [7]. Первая позволяет оценить качество работы вероятностной прогностической системы, используя при этом площадь под кривой на графике зависимости доли удачных прогнозов от доли ложных тревог, построенном на базе различных порогов вероятности. Вторая характеристика предполагает расчет оправдываемости вероятностных прогнозов.

В табл. 4 приведена оправдываемость предупреждений для района Республики Крым и района Краснодарского края для различных моделей и различных заблаговременностей предупреждений.

Большая вариация значений оправдываемости объясняется тем, что от месяца к месяцу отмечалось различное соотношение количества дней реальной регистрации смерчей к количеству дней, для которых по результатам моделирования той или иной модели с определенным уровнем вероятности прогнозировалась смерчопасная ситуация.

Сопоставление значений оправдываемости по различным моделям позволяет говорить о том, что в целом модель COSMO-Ru2 показывает несколько лучшие результаты, чем модель WRF. В частности, средняя оправдываемость по всем месяцам, по всем заблаговременностям и по обоим районам для модели COSMO-Ru2 составила 54 %, а для модели WRF – 28 %.

Таблица 4. Оправдываемость предупреждений для районов Республики Крым и Краснодарского края (%) для различных моделей и заблаговременностей предупреждений 0–36 ч

Table 4. Skill-score of the alarms for the regions of the Crimea Republic and Krasnodar Region (%) for different models and different earliness of the alarms 0–36 h

Модель	Июль				Август				Сентябрь				Октябрь			
	36	24	12	0	36	24	12	0	36	24	12	0	36	24	12	0
Республика Крым																
WRF	–	31	–	49	–	7	–	19	–	52	–	68	–	38	–	33
COSMO-Ru2	–	–	–	–	69	58	60	50	87	82	74	77	78	71	74	71
Краснодарский край																
WRF	–	9	–	18	–	22	–	22	–	42	–	23	–	9	–	3
COSMO-Ru2	–	–	–	–	16	16	9	17	81	57	44	38	55	45	38	28

На рис. 4 для района Республики Крым и на рис. 5 и 6 для района Краснодарского края показаны ROC-кривые предупреждений о смерчах. Для района Республики Крым построение ROC-кривых осуществлялось только для сентября ввиду того, что из трех смерчей, возникших в пределах данного района в 2017 году, два произошли в июне, когда технология еще не была запущена на непрерывную работу. Для района Краснодарского края построение ROC-кривых осуществлялось для июля, августа, сентября и октября.

Из рисунков видно, что для большинства ROC-кривых доля удачных предупреждений была равна единице, т.е. практически для всех отмечавшихся смерчей были даны заблаговременные предупреждения об их возможном возникновении. Значение доли ложных предупреждений варьировалось в пределах от 0,25 до 0,857. Тем не менее площади всех ROC-кривых по обоим моделям, за исключением одной кривой по модели COSMO-Ru2, не выходили за предел, равный 0,5, т.е. лежали выше диагональной линии, которая характеризует ситуацию, когда доля удачных прогнозов равна доли ложных тревог, и в целом прогностическая система лишена полезного сигнала.

Средняя площадь по всем месяцам, по всем заблаговременностям и по обоим районам для модели WRF составила 0,607, а для модели COSMO-Ru2 – 0,651. Отмеченные показатели говорят о том, что разработанная на базе рассматриваемых моделей система предупреждений о смерчах имеет полезный сигнал, степень полезности которого тем не менее несколько ниже рекомендованного уровня 0,7, что дает основание для последующей работы по ее повышению, в частности за счет уменьшения доли ложных тревог.

В процессе оценки предупреждений по ячейкам было установлено, что ввиду отмечавшихся в 2017 г. особенностей пространственного положения большинства материнских ячеек смерчей, в частности того факта, что они возникали над сушей и в моменты формирования из них

смерчей охватывали поверхность моря лишь в пределах погрешностей вычисления их границ, им была присвоена первая категория риска. Это обусловлено тем, что из трех определяющих предикторов области НМС только один индекс NSP не накладывает ограничения на область своего расчета, в то время как расчет индексов WRI и SWN ведется только над водной поверхностью. Таким образом, становится очевидно, что в процессе присвоения области ячейки той или иной категории риска для учета возможных погрешностей вычисления ее границ целесообразно будет, помимо самой области, использовать еще и дополнительную буферную зону вокруг нее.

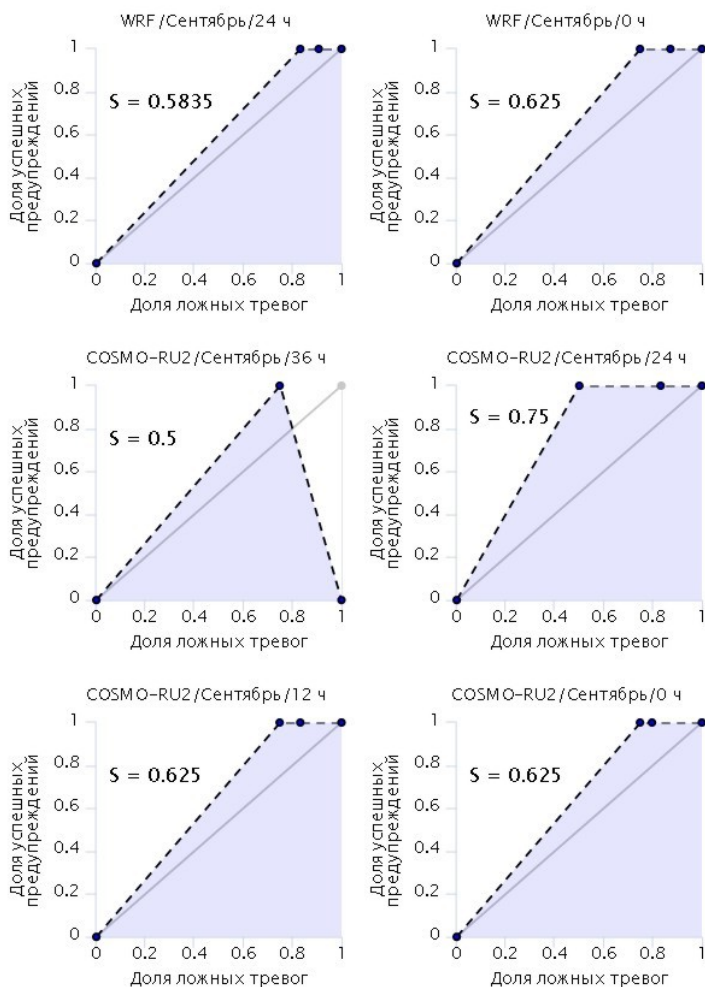


Рис. 4. ROC-кривые предупреждений о смерчах для района Республики Крым.

Fig. 4. ROC-curves of the waterspouts alarms for the region of the Crimea Republic.

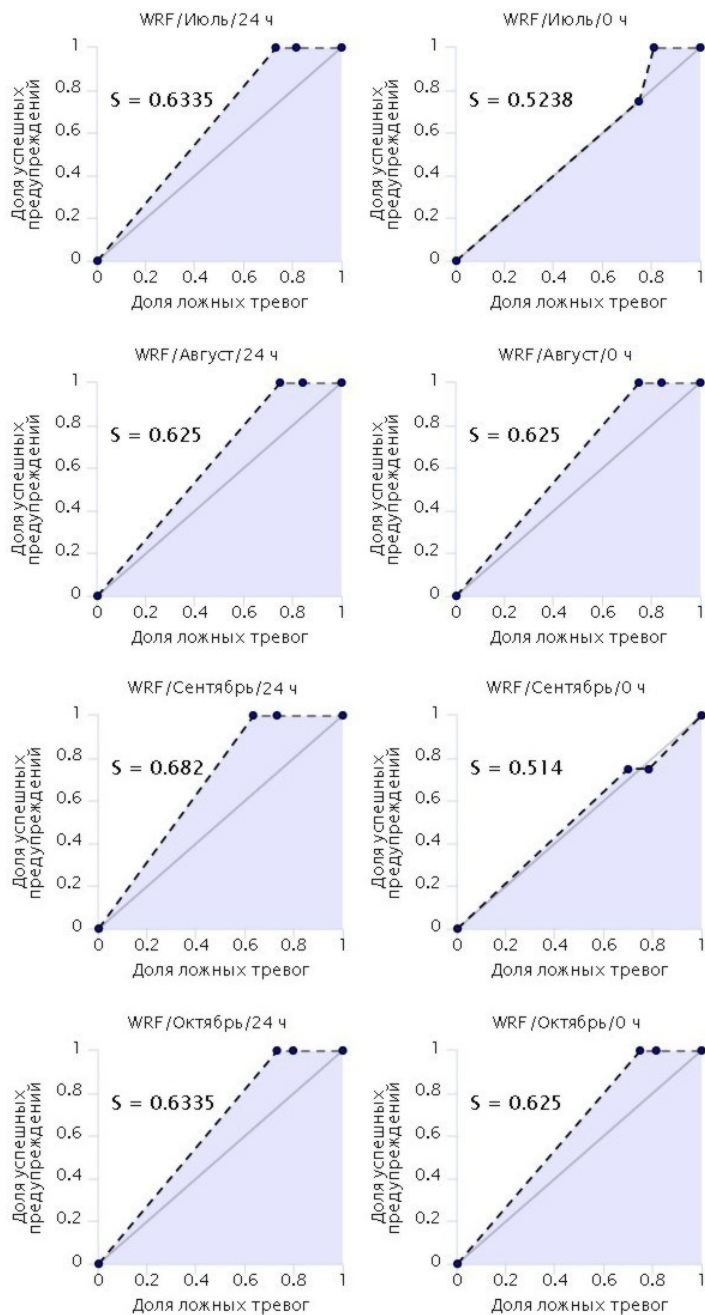


Рис. 5. ROC-кривые предупреждений о смерчах (модель WRF) для района Краснодарского края.

Fig. 5. ROC-curves of the waterspouts alarms on the base of WRF model output for the Krasnodar Region.

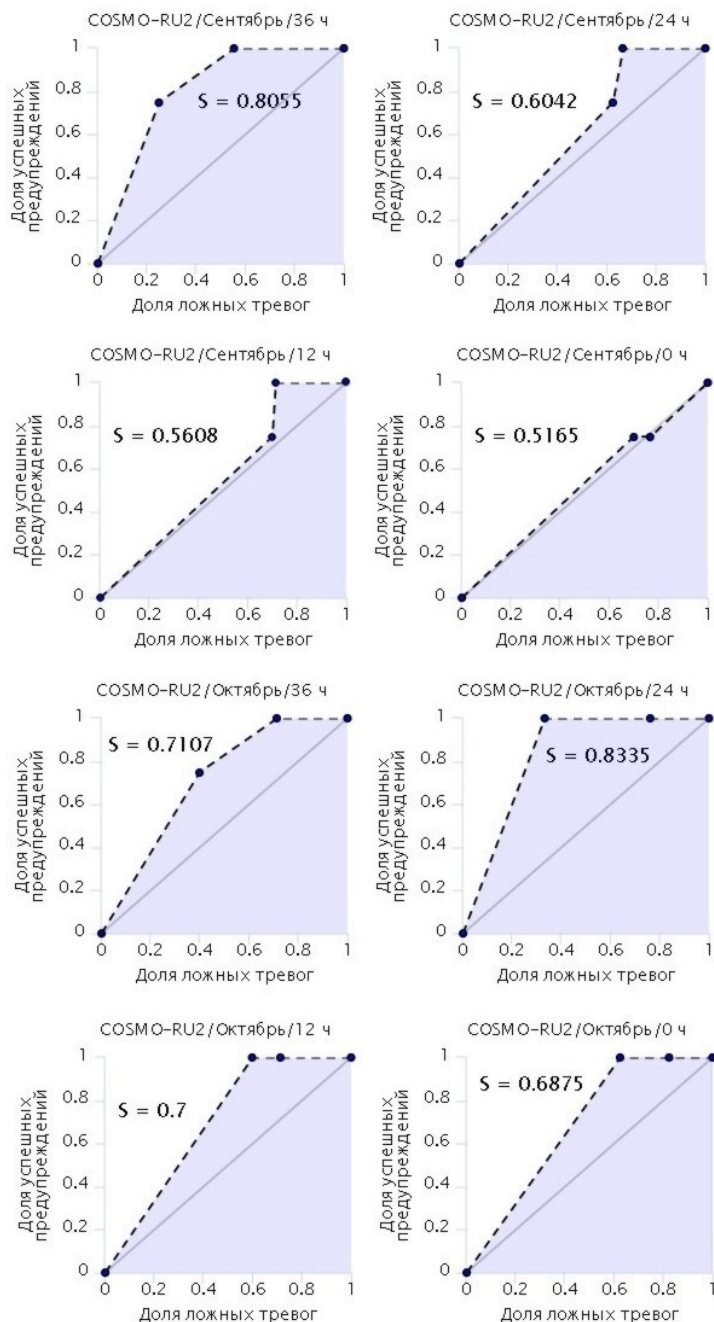


Рис. 6. ROC-кривые предупреждений о смерчах (модель COSMO-Ru2) для района Краснодарского края.

Fig. 6. ROC-curves of the waterspouts alarms on the base of COSMO-Ru2 model output for the Krasnodar Region.

5. Анализ оправдываемости предупреждений о смерчах над Черным морем, выданных синоптиками в 2017 году

Для сопоставления полученных результатов тестирования технологии с результатами работы имеющейся системы оповещения о смерчах над Черным морем был проведен анализ предупреждений, выданных синоптиками с июня по октябрь 2017 г. и опубликованных на сайтах Главных управлений МЧС России по Краснодарскому краю [8] и Республике Крым [9].

В ходе анализа было установлено, что из 19 выданных предупреждений только 2 были действительно заблаговременными, 8 предупреждений были даны спустя какое-то время после наблюдения смерчей, подразумевая, по-видимому, возможность их повторного появления до конца рассматриваемых суток. В данном случае скорее всего следует говорить о том, что именно факт прошедшей регистрации смерча послужил основой для выдачи подобных предупреждений, и по этой причине они лишены какой-либо прогностической значимости и должны быть исключены из дальнейшего рассмотрения. Оставшиеся 9 предупреждений оказались ложными.

Таким образом, оправдываемость имеющейся системы оповещения в случае учета только заблаговременных предупреждений составила 18 %.

Заключение

В ходе проведенной работы была разработана автоматизированная технология оценки и прогноза смерчеопасности на российской акватории Черного моря. Результаты авторского тестирования технологии в сезон смерчей 2017 года и их сопоставление с аналогичными результатами имеющейся системы оповещения о смерчах дают основание для ее последующего практического использования с целью повышения итоговых показателей оправдываемости и заблаговременности предупреждений региональных синоптиков.

В дальнейшем планируется провести работу по уточнению перечня определяющих предикторов смерчеопасных областей за счет использования дополнительного критерия оценки ложных тревог и анализа степени корреляции рассматриваемых предикторов, а также по включению в работу алгоритма присвоения категорий риска областям облачных ячеек дополнительных буферных зон.

Список литературы

1. Бундель А.Ю. Оценка среднесрочных прогнозов количества осадков по данным ансамблевого интегрирования при помощи спектральной модели Гидрометцентра России // Труды Гидрометцентра России. 2008. Вып. 342. С. 134-143.
2. Калмыкова О.В., Шершаков В.М. Индекс смерчеопасности российской акватории Черного моря // Труды ГГО. 2017. Вып. 584. С. 142-163.

3. *Калмыкова О.В., Шершаков В.М.* Общие характеристики смерчей российской акватории Черного моря за период с 2014 по 2015 г. // Труды ГГО. 2016. Вып. 581. С. 165-175.
4. *Калмыкова О.В., Шершаков В.М.* Технология мониторинга смерчопасных ситуаций на российской акватории Черного моря // Метеорология и гидрология. 2016. № 10. С. 93-102.
5. *Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Алферов Д.Ю., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Казакова Е.В., Курсанов А.А., Никитин М.А., Перов В.Л., Суркова Г.В., Ревакотова А.П., Шатунова М.В., Чумаков М.М.* Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 58-70.
6. *Смерч* в Сочи: над морем появились сразу 12 вихрей // Комсомольская правда. Краснодар. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.kuban.kp.ru/daily/26724/3750248/> (дата обращения 20.12.2017).
7. *Хандожко Л.А.* Оценка успешности метеорологических прогнозов. Л.: Ленинградский политехнический институт, 1977. 68 с.
8. Штормовые и экстренные предупреждения: сайт Главного управления МЧС России по Краснодарскому краю [Электронный ресурс]. URL: <http://23.mchs.gov.ru/operationalpage/stormcaution> (дата обращения 20.12.2017).
9. Штормовые и экстренные предупреждения: сайт главного управления МЧС России по Республике Крым [Электронный ресурс]. URL: <http://82.mchs.gov.ru/operationalpage/stormcaution> (дата обращения 20.12.2017).
10. *Algorithm* Theoretical Basis Document for Rapid Development Thunderstorms. SAF/NWC/CDOP2/MFT/SCI/ATBD/11, Issue 3, Rev. 0, 15 July 2013 [Электронный ресурс]. URL: http://www.nwscsaf.org/AemetWebContents/ScientificDocumentation/Documentation/MSG/SAF-NWC-CDOP2-MFT-SCI-ATBD-11_v3.0.pdf (дата обращения 20.12.2017).
11. *Baumgardt D.A., Cook K.* Preliminary evaluation of a parameter to forecast environment conducive to non-mesocyclone tornadogenesis // 23rd Conference on Severe Local Storms: abstracts of conference, St. Louis (USA), 2006. [Электронный ресурс]. URL: <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/115294.pdf> (дата обращения 20.12.2017).
12. *Doswell C.A.* On use of Indices and Parameters in Forecasting Severe Storms / C.A. Doswell, D.M. Schultz // E-Journal of Severe Storms Meteorology. 2006. Vol. 1, no. 3. P. 1-14. URL: <http://www.ejssm.org/>
13. *Dotzek N., Emeis S., Lefebvre C., Gerpott J.* Waterspouts over the North and Baltic Seas: Observations and climatology, prediction and reporting // Meteorologische Zeitschrift. 2010. Vol. 19, no. 1. P. 115-129.
14. European Severe weather Database [Электронный ресурс]. URL: <http://www.eswd.eu> (дата обращения 20.12.2017).
15. *Kuiper J., Haven M.* A new index to calculate risk of waterspout development // 4th European Conference on Severe Storms: preprints. Trieste (Italy), 2007. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.essl.org/ECSS/2007/abs/06-Forecasts/1179250265.kuiper.pdf> (дата обращения 17.11.2017).
16. *Mitchell E.D., Vasiloff S.V., Stumpf G.J., Witt A., Eilts M.D., Johnson J.T., Thomas K.W.* The National Severe Storms Laboratory Tornado Detection Algorithm // Weather and Forecasting. 1998. Vol. 13, no. 2. P. 352-366.
17. NCEP Products Inventory [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/> (дата обращения 20.12.2017).
18. *Rasmussen E.N., Blanchard D.O.* A Baseline Climatology of Sounding-Derived Supercell and Tornado Forecast Parameters // Weather and Forecasting. 1998. Vol. 13, no. 4. P. 1148-1164.
19. Real-time, global, sea surface temperature (RTG_SST) analysis // National Centers for Environmental Prediction/Marine Modeling and Analysis Branch. [Электронный ресурс]. URL: http://polar.ncep.noaa.gov/pub/sst/rtg_high_res/ (дата обращения 20.12.2017).

20. Satellite Application Facility on support to Nowcasting and Very Short-Range Forecasting [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nwcsaf.org> (дата обращения 20.12.2017).
21. *Stumpf G.J., Witt A., Mitchell E.D., Spencer P.L., Johnson J.T., Eilts M.D., Thomas K.W., Burgess D.W.* The National Severe Storms Laboratory Mesocyclone Detection Algorithm for the WSR-88D // *Weather and Forecasting*. 1998. Vol. 13, no. 2. P. 304-326.
22. SVR Parameters // NOAA's National Weather Service [Электронный ресурс]. URL: http://www.weather.gov/media/lmk/soo/svr_parameters.pdf (дата обращения 20.12.2017).
23. *Szilagyi W.* A waterspout forecasting technique // 5th European Conference on Severe Storms: preprints. Landshut (Germany), 2009. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.essl.org/ECSS/2009/preprints/O05-14-sziladgyi.pdf> (дата обращения: 20.12.2017).
24. *Thompson R.L., Edwards R., Hart J.A.* Evaluation and Interpretation of the Supercell Composite and Significant Tornado Parameters at the Storm Prediction Center [Электронный ресурс]. URL: <http://www.spc.noaa.gov/publications/thompson/sigtor.pdf> (дата обращения 20.12.2017).
25. *Thompson R.L.* Explanation of SPC Severe Weather Parameters [Электронный ресурс]. URL: <http://www.spc.noaa.gov/sfctest/help/sfcoa.html> (дата обращения 20.12.2017).
26. *Thornton M.A.* A new Spin on Waterspout Forecasting [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sailingscuttlebutt.com/2015/08/20/a-new-spin-on-waterspout-forecasting/> (дата обращения 17.11.2017).

References

1. *Bundel' A.Yu.* Otsenka srednesrochnykh prognozov kolichestva osadkov po dannym ansamblevogo integrirovaniya pri pomoshchi spektral'noi modeli Gidromettsentra Rossii. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of Hydrometcenter of Russia], 2008, vol. 342, pp. 134-143 [in Russ.].
2. *Kalmykova O.V., Shershakov V.M.* Indeks smercheopasnosti rossiiskoi akvatorii Chernogo morya [Waterspout Risk Index over the Russian Black Sea water area]. *Trudy GGO* [Proceedings of MGO], 2017, no. 584, pp. 142-163 [in Russ.].
3. *Kalmykova O.V., Shershakov V.M.* Obshchie kharakteristiki smerchei rossiiskoi akvatorii Chernogo morya za period s 2014 po 2015 g. [Common characteristics of waterspouts over the Russian Black Sea area during 2014-2015]. *Trudy GGO* [Proceedings of MGO], 2016, vol. 581, pp. 165-175 [in Russ.].
4. *Kalmykova O.V., Shershakov V.M.* A technology of waterspout monitoring over the Russian part of the Black Sea. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, vol. 41, no. 10, pp. 728-734.
5. *Rivin G.S., Rozinkina I.A., Vil'fand R.M., Alferov D.Y., Astakhova E.D., Blinov D.V., Bundel' A.Y., Kazakova E.V., Kirsanov A.A., Nikitin M.A., Perov V.L., Surkova G.V., Revokatova A.P., Shatunova M.V., Chumakov M.M.* The COSMO-Ru system of nonhydrostatic mesoscale short-range weather forecasting of the Hydrometcenter of Russia: The second stage of implementation and development. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, vol. 40, no. 6, pp. 400-410.
6. *Smerch v Sochi: nad morem poyavilis' srazu 12 vikhrei*, available at: www.kuban.kp.ru/daily/26724/3750248/ [in Russ.].
7. *Khandozhko L.A.* Otsenka uspekhov meteorologicheskikh prognozov. L.: Leningradskii politekhnicheskii institut Publ., 1977, 68 p. [in Russ.].
8. *Shtormovye i ekstremnye preduprezhdeniya*, available at: 23.mchs.gov.ru/operationalpage/stormcaution. [in Russ.].
9. *Shtormovye i ekstremnye preduprezhdeniya*, available at: 82.mchs.gov.ru/operationalpage/stormcaution. [in Russ.].
10. *Algorithm Theoretical Basis Document for Rapid Development Thunderstorms*. SAF/NWC/CDOP2/MFT/SCI/ATBD/11, Issue 3, Rev. 0, 15 July 2013, available at: www.nwcsaf.org/AemetWebContents/ScientificDocumentation/Documentation/MSG/SAF-NWC-CDOP2-MFT-SCI-ATBD-11_v3.0.pdf

11. Baumgardt D.A., Cook K. Preliminary evaluation of a parameter to forecast environment conducive to non-mesocyclone tornadogenesis. *Abstracts of 23rd Conference on Severe Local Storms*, St. Louis (USA), 2006, available at: ams.confex.com/ams/pdfpapers/115294.pdf
12. Doswell C.A. On use of Indices and Parameters in Forecasting Severe Storms / C.A. Doswell, D.M. Schultz. *E-Journal of Severe Storms Meteorology*, 2006, vol. 1, no. 3, pp. 1-14, available at: <http://www.ejssm.org/>
13. Dotzek N., Emeis S., Lefebvre C., Gerpott J. Waterspouts over the North and Baltic Seas: Observations and climatology, prediction and reporting. *Meteorologische Zeitschrift*, 2010, vol. 19, no. 1, pp. 115-129.
14. *European Severe weather Database*, available at: www.eswd.eu
15. Kuiper J., Haven M. A new index to calculate risk of waterspout development. *Proc. 4th European Conference on Severe Storms*, Trieste (Italy), 2007. available at: www.essl.org/ECSS/2007/abs/06-Forecasts/1179250265.kuiper.pdf
16. Mitchell E.D., Vasiloff S.V., Stumpf G.J., Witt A., Eilts M.D., Johnson J.T., Thomas K.W. The National Severe Storms Laboratory Tornado Detection Algorithm. *Weather and Forecasting*, 1998, vol. 13, no. 2, pp. 352-366.
17. *NCEP Products Inventory*, available at: www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs
18. Rasmussen E.N., Blanchard D.O. A Baseline Climatology of Sounding-Derived Supercell and Tornado Forecast Parameters. *Weather and Forecasting*, 1998, vol. 13, no. 4, pp. 1148-1164.
19. Real-time, global, sea surface temperature (RTG_SST) analysis. *National Centers for Environmental Prediction, Marine Modeling and Analysis Branch*, available at: polar.ncep.noaa.gov/pub/sst/rtg_high_res/
20. *Satellite Application Facility on support to Nowcasting and Very Short-Range Forecasting*, available at: www.nwcsaf.org
21. Stumpf G.J., Witt A., Mitchell E.D., Spencer P.L., Johnson J.T., Eilts M.D., Thomas K.W., Burgess D.W. The National Severe Storms Laboratory Mesocyclone Detection Algorithm for the WSR-88D. *Weather and Forecasting*, 1998, vol. 13, no. 2, pp. 304-326.
22. SVR Parameters, *NOAA's National Weather Service*, available at: www.weather.gov/media/lmk/soo/svr_parameters.pdf
23. Szilagyi W. A waterspout forecasting technique. *Proc. 5th European Conference on Severe Storms*, Landshut (Germany), 2009, available at: www.essl.org/ECSS/2009/preprints/O05-14-sziladgyi.pdf
24. Thompson R.L., Edwards R., Hart J.A. Evaluation and Interpretation of the Supercell Composite and Significant Tornado Parameters at the Storm Prediction Center, available at: www.spc.noaa.gov/publications/thompson/sigtor.pdf
25. Thompson R.L. Explanation of SPC Severe Weather Parameters, available at: www.spc.noaa.gov/sfctest/help/sfcoa.html
26. Thornton M.A. A new Spin on Waterspout Forecasting, available at: <http://www.sailingscuttlebutt.com/2015/08/20/a-new-spin-on-waterspout-forecasting/>

Поступила в редакцию 17.11.2017 г.
Received by the editor 17.11.2017.