

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Научно-производственное объединение «Тайфун»

На правах рукописи

Калмыкова Ольга Вячеславовна

**ОЦЕНКА СМЕРЧЕОПАСНОСТИ ВБЛИЗИ ЧЕРНОМОРСКОГО
ПОБЕРЕЖЬЯ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ И РЕСПУБЛИКИ КРЫМ**

Специальность
25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор технических наук
Шершаков Вячеслав Михайлович

Обнинск
2019

Оглавление

Введение	5
1 Современное состояние проблемы прогнозирования смерчей	11
1.1 Смерч как опасное метеорологическое явление.....	11
1.1.1 Общие сведения	11
1.1.2 Основные характеристики	14
1.1.3 Классификация.....	14
1.1.4 Шкалы интенсивности.....	16
1.1.5 Пространственное распределение	18
1.1.6 Простейшие модели.....	20
1.2 Механизмы формирования смерчей	22
1.2.1 Смерчи мезоциклонального происхождения.....	23
1.2.2 Смерчи немезоциклонального происхождения.....	27
1.2.3 Водяные смерчи	29
1.3 Основные методологические и технологические подходы к диагностированию смерчей и прогнозированию смерчеопасных ситуаций	31
1.3.1 Индексы конвективной неустойчивости атмосферы	31
1.3.2 Диагностирование смерчей по радиолокационным данным	42
1.3.3 Прогноз опасных явлений по спутниковым данным	46
1.3.4 Прогноз водяных смерчей по номограмме Силадьи	49
1.3.5 Статистические модели прогноза сильных ветров и смерчей.....	51
1.3.6 Типизация синоптических условий формирования смерчей в России.....	52
Выводы по главе 1	55
2 Исследование черноморских смерчей	56
2.1 Состояние наблюдательной сети	56
2.1.1 Наземная сеть	56
2.1.2 Радарная сеть	57
2.1.3 Аэрологическая сеть	58
2.1.4 Спутниковая сеть	58
2.1.5 Грозопеленгационная сеть	59
2.2 Мониторинг смерчеопасных ситуаций	60
2.2.1 Организация мониторинга	60
2.2.2 Автоматизированная технология мониторинга	61
2.3 Характеристики смерчей	66

2.3.1 Создание архива смерчей и его верификация	66
2.3.2 Пространственное положение смерчей	68
2.3.3 Временные характеристики смерчей	70
2.3.4 Характеристики материнских облачных ячеек смерчей	73
2.3.5 Температурные и синоптические условия формирования смерчей	83
Выводы по главе 2	85
3 Методика оценки смерчеопасности вблизи Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым	87
3.1 Использование современных методов диагностирования смерчей и прогнозирования смерчеопасных ситуаций	87
3.1.1 Алгоритм эффективного использования	87
3.1.2 Реализация методов	90
3.1.3 Оценка эффективности реализованных методов.....	93
3.2 Индекс смерчеопасности для прибрежной акватории Черного моря	112
3.2.1 Метод определения регионального индекса смерчеопасности.....	112
3.2.2 Применение метода на прибрежной акватории Черного моря	118
3.2.3 Оценка эффективности нового индекса смерчеопасности	124
3.3 Этапы работы методики оценки смерчеопасности	126
3.3.1 Выделение смерчеопасных областей с различными зонами риска	126
3.3.2 Присвоение категорий риска облачным ячейкам	129
3.3.3 Формирование предупреждений о возможном возникновении смерчей и выявление наиболее смерчеопасных облачных ячеек.....	130
3.4 Оперативная технология расчета по методике оценки смерчеопасности	132
3.4.1 Схема работы технологии	132
3.4.2 Состав входных и выходных данных.....	133
3.4.3 Программный комплекс обработки и представления данных	135
Выводы по главе 3	137
4 Тестирование методики оценки смерчеопасности в непрерывном режиме счета.....	140
4.1 Схема тестирования и перечень анализируемых показателей.....	140
4.2 Результаты работы методики на I этапе тестирования	142
4.2.1 Период со смерчами	142
4.2.2 Период без смерчей	161
4.3 Усовершенствование методики оценки смерчеопасности	162
4.4 Результаты работы методики на II этапе тестирования.....	166
4.4.1 Период со смерчами	166

4.4.2 Период без смерчей	183
Выводы по главе 4	185
Заключение.....	187
Список сокращений	189
Список литературы	191
<i>Приложение №1.</i> Список смерчей, зарегистрированных у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым в 2014-2018 гг.	206
<i>Приложение №2.</i> Зоны риска смерчей.....	219
<i>Приложение №3.</i> Материнские ячейки смерчей	223
<i>Приложение №4.</i> Смерчеопасные области по радиолокационным данным.....	227
<i>Приложение №5.</i> Предупреждения о возможном формировании смерчей	229

Введение

Актуальность темы исследования. Опасные метеорологические явления (ОМЯ) относят к природным явлениям, которые могут причинить вред здоровью и благополучию людей, а также нанести ущерб различным отраслям экономики. В настоящее время во многих регионах земного шара отмечается тенденция к увеличению количества подобных явлений, обусловленная, по-видимому, последствиями изменения климата. Среди них одними из наименее изученных и в то же время сложных по своей природе являются смерчи, называемые также торнадо и тромбами.

Под смерчом понимают интенсивный вихрь относительно небольших горизонтальных масштабов (порядка 10-2000 м), обычно простирающийся от нижней границы облака, называемого материнским, к подстилающей поверхности, в качестве которой может выступать поверхность земли или воды. Смерчи возникают в различных частях земного шара, однако частота их появления крайне неодинакова. Наиболее часто, около тысячи случаев в год [147], смерчи регистрируют в США. Ежегодный ущерб от их прохождения по данной территории оценивается в среднем в несколько миллиардов долларов [133]. Кроме того, смерчи регистрируют в странах Европы (Великобритания, Испания, Германия, Турция и др.) [78, 102], Азии (Япония, Индия, Бангладеш, Китай и др.), Америки (Канада, Бразилия, Аргентина и др.) Африки (ЮАР), в Австралии и Новой Зеландии [99], а также в России [33, 64].

В России смерчи в подавляющем большинстве случаев возникают в центре ее Европейской части, где имеются условия для встречи очень теплых влажных масс с юга-запада и сухих воздушных масс с северо-запада, а также над Черным морем [33]. Прибрежная акватория Черного моря является наиболее смерчеопасным регионом России по количеству смерчей на единицу площади [58]. Смерчи, регистрируемые над Черным морем, как правило, малоподвижны и распадаются в море, не достигнув побережья. Но не исключается возможность возникновения и более мощных по своей интенсивности смерчей, способных выйти на суши, что подтверждается известными случаями [54, 74].

Несмотря на высокую повторяемость смерчей у Черноморского побережья России, круг вопросов, относящихся к их характеристикам и возможностям прогноза, в отечественной литературе отражен недостаточно. Наибольший интерес у специалистов вызывают случаи регистрации более интенсивных смерчей в Европейской части России [48], Сибири [30] и на Урале [65]. В частности, анализу условий возникновения и возможности прогнозирования смерча, возникшего 29 августа 2014 г. в Башкирии, посвящено несколько работ различных авторов [19, 39, 65, 67].

Деятельность региональных синоптиков по выдаче предупреждений о смерчах над Черным морем опирается на накопленный за долгое время практический опыт прогнозирования условий, благоприятных для возникновения смерчей [47]. Основанием для выдачи предупреждений обычно являются результаты анализа текущих метеорологических условий и сложившейся в регионе синоптической ситуации. В ряде случаев предупреждения даются уже после регистрации смерчей, с указанием на возможность их повторного возникновения до конца рассматриваемых суток. Заблаговременность выдаваемых предупреждений, как правило, невысока.

Современные, используемые в зарубежной практике, методы прогноза смерчей опираются на эмпирически установленные закономерности изменения состояния атмосферы незадолго до и в моменты их возникновения, выявленные в ходе обработки больших рядов данных наблюдений [90]. Подобные закономерности, как правило, характеризуют комплекс условий, благоприятных для формирования смерчей, иными словами смерчеопасную ситуацию. Под смерчеопасностью при этом понимают вероятность возникновения данной ситуации.

Наиболее широко используемым подходом к прогнозу смерчеопасных ситуаций является анализ полей индексов конвективной неустойчивости атмосферы, рассчитываемых по данным численного моделирования. Предложенные на его основе методы прогноза позволяют спрогнозировать наступление смерчеопасной ситуации с заблаговременностью порядка нескольких суток. Временные рамки и область охвата территорий, по которым дается прогноз смерчеопасной ситуации, как правило, достаточно велики.

Подходы к диагностированию смерчей, в свою очередь, базируются на использовании оперативно обновляемых радиолокационных и спутниковых данных. Помимо определения точного местоположения смерча, они предусматривают расчет предполагаемой траектории его перемещения. Заблаговременность оповещения о смерче в этом случае составляет 10-20 минут [82]. В отличие от прогноза смерчеопасной ситуации подобные предупреждения даются по строго определенным населенным пунктам, попадающим в зону риска.

Недостаточная изученность смерчей над Черным морем, невысокие показатели успешности выдаваемых предупреждений об их возможном формировании, а также появление за рубежом новых подходов к диагностике и прогнозированию смерчей, не использующихся в оперативной практике в России, определяют актуальность и практическую значимость данного исследования, посвященного систематизации характеристик черноморских смерчей и созданию на базе новейших подходов новой автоматизированной методики оценки (анализа и прогноза) смерчеопасности.

Объект исследования: смерчи у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым, а также методы их диагностики и прогнозирования, используемые метеорологическими службами различных стран мира.

Предмет исследования: особенности условий возникновения черноморских смерчей, которые могут быть положены в основу методики их прогнозирования, возможности использования в рассматриваемом регионе имеющихся методов диагностики и прогнозирования смерчей.

Цели и задачи работы. Основной целью диссертационной работы является разработка новой методики оценки смерчеопасности вблизи Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым и ее программная реализация для повышения качества предупреждений о возможном формировании смерчей.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- организация автоматизированного мониторинга смерчеопасных ситуаций, а также создание архива смерчей у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым, определение характеристик смерчей с использованием архивных данных;
- разработка алгоритма использования известных методов диагностики и прогнозирования смерчей на прибрежной акватории Черного моря, программная реализация методов и их тестирование;
- разработка метода определения регионального индекса для прогноза водяных смерчей немезоциклонального происхождения и получение формулы расчета нового индекса смерчеопасности для прибрежной акватории Черного моря;
- разработка автоматизированной методики оценки смерчеопасности вблизи Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым и оперативной технологии расчета по данной методике;
- тестирование автоматизированной методики в непрерывном режиме счета и оценка ее эффективности.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

- создан подробный архив смерчей у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым за период 2014-2018 гг. и пополняющийся в оперативном режиме с 2014 г. архив данных наблюдательной сети; по результатам работы с архивом предложен алгоритм верификации сообщений о смерчах;
- получены количественные оценки условий возникновения черноморских смерчей на основе исследования аномалии температуры на водной поверхности и разности температур воздуха и водной поверхности;

- получены распределения параметров смерчевых облаков над Черным морем по спутниковым данным;
- определены пороговые значения для распознавания смерчеопасных областей вблизи Черноморского побережья Краснодарского края по данным радиолокационных наблюдений;
- предложен новый региональный индекс смерчеопасности WRI для прибрежной акватории Черного моря, позволяющий получать более высокие оценки качества прогноза смерчей;
- разработана методика оценки смерчеопасности вблизи Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым, позволяющая в автоматическом режиме формировать предупреждения о смерчах с заблаговременностью до 30 ч, сводя к минимуму вероятность их пропуска, а также выявлять смерчевые облака в среднем за час до момента появления смерча.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы состоит в систематизации характеристик черноморских смерчей, что, кроме использования при прогнозировании, может найти применение при описании общей климатологии и физики смерчей рассматриваемого региона. Разработанная автоматизированная методика оценки смерчеопасности может быть основой для создания аналогичных методик для других, в том числе сухопутных, регионов России.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанная методика реализована в оперативной компьютерной технологии, в рамках которой осуществляется формирование всей необходимой для работы этой методики метеорологической информации. Использование данной методики синоптиками в оперативной работе позволит повысить качество предупреждений об угрозах формирования смерчей над Черным морем.

Методы исследования. Для решения сформулированных в диссертационной работе задач использованы методы статистической обработки данных, численного моделирования атмосферных процессов, обобщения метеорологических условий и особенностей возникновения редкого опасного явления на основе рассмотрения совокупности отдельных случаев, а также методы структурного и объектно-ориентированного программирования и оценки успешности метеорологических прогнозов.

Положения, выносимые на защиту

1. Количественные оценки условий возникновения смерчей у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым, а также распределения параметров их материнских облаков по спутниковым данным.
2. Новый региональный индекс смерчеопасности WRI для прибрежной акватории Черного моря, обеспечивающий наилучшее качество прогноза смерчей.

3. Автоматизированная методика оценки смерчеопасности вблизи Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым, обеспечивающая формирование в автоматическом режиме предупреждений об угрозах возникновения смерчей с заблаговременностью до 30 ч, сводя к минимуму вероятность их пропуска, а также автоматическое выявление смерчевых облаков в среднем за час до момента появления смерча.

Обоснованность и достоверность результатов работы. Обоснованность научных положений и выводов, приведенных в диссертационной работе, обусловлена анализом большого объема данных о смерчах и корректным использованием современных методов их прогноза. Достоверность полученных результатов подтверждена валидацией разработанной методики на основе сопоставления формируемых по ней предупреждений о смерчах с предупреждениями, составленными синоптиками.

Использование результатов диссертации. Результаты исследования в форме оперативной технологии расчета по разработанной методике предназначены для использования в учреждениях, обеспечивающих выпуск предупреждений об угрозах формирования смерчей над Черным морем.

Соответствие паспорту специальностей. Диссертация соответствует п. 5 «Опасные и особо опасные явления погоды – тропические циклоны, тромбы (торнадо), засухи, наводнения» паспорта научной специальности 25.00.30 «Метеорология, климатология, агрометеорология».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на заседаниях секций Ученого совета НПО «Тайфун», на семинаре по краткосрочным и среднесрочным прогнозам погоды в Гидрометцентре России (г. Москва, 5 июля 2017 г.), на Пятнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 13-17 ноября 2017 г.), на Второй научно-практической конференции «Современные информационные технологии в гидрометеорологии и смежных с ней областях» (г. Обнинск, 21-23 ноября 2017 г.), на международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика А.М. Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» (г. Москва, 16-18 мая 2018 г.), на совещании-семинаре «Развитие инфраструктуры Росгидромета и информационных ресурсов для специализированного гидрометеорологического обеспечения пользователей» (г. Самара, 30 октября – 2 ноября 2018 г.), на семинаре в Специализированном центре по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Черного и Азовского морей (г. Сочи, 13-14 марта 2019 г.). Работе автора по результатам диссертационного исследования присуждена первая премия в конкурсе работ молодых ученых на конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (2017 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ. Из них 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 5 работ – тезисы докладов международных конференций, 2 работы – тезисы докладов всероссийских конференций и 1 статья в сборнике трудов международной конференции.

Личный вклад автора. Все результаты, составляющие основное содержание диссертационной работы, получены автором лично или при его непосредственном участии. Автором лично создан подробный архив смерчей у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым за период 2014-2018 гг., реализованный в виде базы данных, разработаны и реализованы алгоритмы для анализа характеристик смерчей; проведены расчеты по мезомасштабной численной модели прогноза погоды WRF для случаев смерчей за период 2014-2016 гг.; разработаны программные средства для расчета полей индексов конвективной неустойчивости; созданы и реализованы алгоритмы для оценки качества прогноза смерчей на основе полей индексов, а также алгоритмы для задания адаптированных к региону пороговых значений предикторов смерчей; предложен новый предиктор смерчеобразования – потенциал вертикальной завихренности; разработана методика оценки смерчеопасности и ее программная реализация, проведена валидация методики на базе результатов расчетов по различным мезомасштабным моделям атмосферы (WRF и COSMO-Ru2).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 150 наименований, а также пяти приложений. Основное содержание диссертации представлено на 188 страницах, включая 98 рисунков и 49 таблиц.

1 Современное состояние проблемы прогнозирования смерчей

1.1 Смерч как опасное метеорологическое явление

1.1.1 Общие сведения

Среди ОМЯ смерч является одним из самых сложных и трудно прогнозируемых. В мировой литературе используются различные синонимы этого явления. Так, в Северной Америке используется термин «торнадо», в ряде других стран – «тромб» [61].

Смерч – сильный маломасштабный вихрь под облаками с приблизительно вертикальной, но часто изогнутой осью [60]. Неотъемлемыми видимыми проявлениями смерча являются:

- материнское облако, откуда смерч берет свое начало;
- стремительное круговое движение воздуха – вихрь;
- подстилающая поверхность земли или воды, которой в большинстве случаев касается смерч.

В качестве материнского облака для смерча обычно выступает кучево-дождевое облако (*Cb*) (рисунок 1.1а), часто сопровождаемое грозовой активностью, мощное кучевое облако (*Cu con*) (рисунок 1.1б) или же облако хорошей погоды (*Cu hum*) (рисунок 1.1в). Чаще всего смерчи возникают с правой стороны облака, представляя собой продолжение крутящегося вала [7].

Тип материнского облака смерча в совокупности с атмосферными условиями, при которых он формируется, определяют его интенсивность. Под интенсивностью смерча понимают характеристики кругового движения воздуха внутри него и степень оставленных после него разрушений. Так в большинстве случаев из *Cb* развиваются самые сильные по своей интенсивности смерчи. Слабые и непродолжительные смерчи обычно связаны с *Cu con* или *Cu hum*.

Круговое движение воздуха в смерче происходит по спирали, направление вращения обычно циклоническое – против часовой стрелки в северном полушарии и по часовой в южном. Однако имеют место случаи (заведомо менее 10% от общего числа) и антициклонического вращения: в северном полушарии – по часовой стрелке, в южном – против [7, 20]. Наиболее часто вихрь принимает форму воронки с расширяющейся частью, обращенной к материнскому облаку. В природе также можно наблюдать смерчи в виде столбов, рогов, конусов, песочных часов и др. [37]. В большинстве случаев в круговое движение воздуха вовлекаются частицы пыли или капли воды с подстилающей поверхности, а также капли воды из материнского облака, вследствие чего вихрь становится видимым и ярко очерченным.



Рисунок 1.1 – Разнообразие материнских облаков смерчей

- а) кучево-дождевое облако [фото с сайта nssl.noaa.gov]
- б) мощное кучевое облако (г. Обнинск 23 мая 2013 г.) [фото с сайта obninsk.name]
- в) облако хорошей погоды (г. Сочи 13 июня 2014 г.) [фото с сайта vk.com]

Структура смерча весьма сложная. В центральной части смерча образуется так называемое ядро с достаточно сильными (60-80 м/с) нисходящими потоками воздуха. Вокруг ядра отмечаются восходящие движения, скорость которых составляет 70-90 м/с [7]. Иногда вокруг смерча образуются дополнительные вихри, создающие каскад и футляр. Особенно это характерно для водяных смерчей [37] (рисунок 1.2).

Давление в центре смерча значительно ниже, чем на периферии. Быстрое падение давления в совокупности с большими скоростями ветра, доходящими иногда до 140 м/с, определяют разрушительные свойства смерчей [7]. Интенсивным течением, возникающим вблизи поверхности соприкосновения смерча с сушей или водой, находящиеся поблизости предметы втягиваются внутрь него.

Касание смерча подстилающей поверхности, как правило, свидетельствует об окончании основной фазы его формирования. Известны случаи, когда со стороны наблюдателя казалось, что смерч прыгает – воронка то опускается вниз, то поднимается вверх. В случае если касания

не происходит, то говорят о возникновении облака-воронки (рисунок 1.3). Обычно интенсивность смерчей не связывают с типом поверхности, над которой они формируются, однако статистические данные говорят о том, что водяные смерчи чаще всего имеют малую интенсивность, небольшую по ширине воронку и непродолжительны по времени своего существования.



Рисунок 1.2 – Структура смерча (г. Сочи 22 августа 2017 г.) [фото с сайта vk.com]



Рисунок 1.3 – Облако-воронка (п. Большой Утриш 10 мая 2015 г.) [фото с сайта vk.com]

1.1.2 Основные характеристики

Основными количественными характеристиками смерчей являются: скорость ветра, диаметр и высота вихря, длина пути, скорость перемещения и время жизни смерча. Эти характеристики в природе очень сильно варьируются. Скорость ветра в смерчах может составлять порядка 20-140 м/с. Диаметр смерча обычно около 200 м, однако он может варьироваться в широких диапазонах от 10 м до 1.5-2 км [80]. Высота вихря достигает нескольких сот метров, иногда до 1.5 км. Что касается длины пути и скорости перемещения смерча, то в среднем они составляют 20-30 км и 50-60 км/ч соответственно [13, 36]. Слабые смерчи, особенно те, которые возникают над водной поверхностью, обычно либо практически не перемещаются, либо движутся с небольшой скоростью. Время жизни смерча зависит от многих факторов, в частности, от интенсивности поддерживающих его восходящих потоков, а также от особенностей подстилающей поверхности на пути его перемещения. Чаще всего оно варьируется от нескольких минут до нескольких часов, для слабых смерчей, как правило, не превышает 10 минут [116]. Самый продолжительный смерч в истории был зафиксирован в США в 1917 г. Он просуществовал 7 часов 20 минут [36].

Что касается качественных характеристик смерчей, то по свидетельствам очевидцев в некоторых случаях им сопутствуют акустические волны, ощущаемые как шипение, свист или грохот. Громкость звука в непосредственной близости к смерчу велика, но быстро убывает с расстоянием [52]. Помимо звуков очевидцы также иногда наблюдают в смерчах световые шары, облака, кольца и др. [36]. Этот факт можно объяснить тем, что вихри в смерчах также генерируют и электромагнитные поля, сопровождаемые молниями различной формы [5]. Перечисленные особенности смерчей до сих пор не вполне изучены. Тем не менее, в США уже сейчас разрабатывается прототип системы инфразвуковой сети IS Net [106, 107], нацеленной на повышение качества прогноза опасных явлений погоды и в первую очередь смерчей.

1.1.3 Классификация

В зависимости от механизма формирования смерчей их принято подразделять на мезоциклоные (рисунок 1.4а) и немезоциклоные (рисунок 1.4б). Первые формируются из мощной конвективной ячейки, называемой суперячейкой, в структуре которой присутствует мезоциклон [115]. Инициатором вторых является предварительно сформированное круговое движение воздуха вблизи подстилающей поверхности, которое восходящими потоками вытягивается вверх к материнскому облаку [148]. Более подробное описание механизмов формирования смерчей обеих категорий приведено в подразделе 1.2.

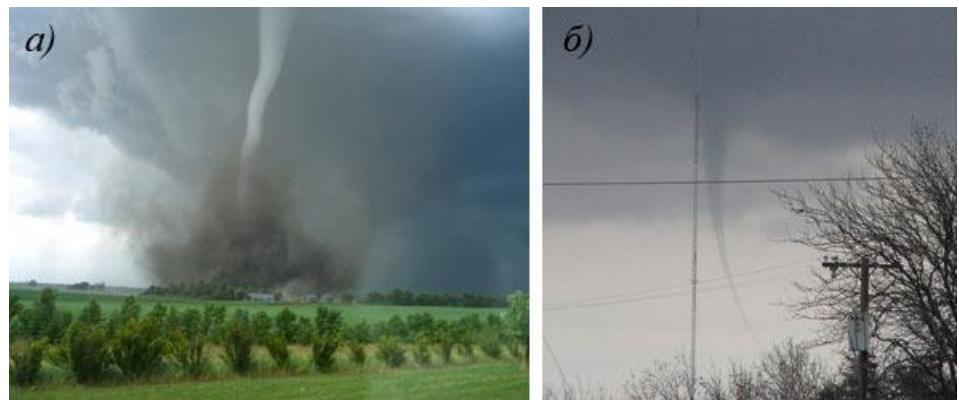


Рисунок 1.4 – Разновидности смерчей по природе своего происхождения

а) мезоциклоный смерч [фото с сайта www.nssl.noaa.gov]

б) немезоциклоный смерч [фото с сайта www.nssl.noaa.gov]

В зависимости от типа подстилающей поверхности смерчи также подразделяют на сухопутные и водяные. В некоторых источниках к смерчам относят и менее интенсивные вихревые образования, возникающие все связи с материнским облаком: пыльные, огненные и снежные (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Разновидности смерчей в зависимости от типа подстилающей поверхности

а) пыльный смерч [фото с сайта c1.staticflickr.com] б) водяной смерч [фото с сайта vk.com]

в) огненный смерч [фото с сайта cdnph.upi.com] г) снежный смерч [фото с сайта i.ytimg.com]

Пыльный смерч – смерч, проходящий над сушей и поднимающий большое количество пыли и мусора. Огненный смерч возникает вследствие вулканического извержения, пожара или взрыва и всегда связан с интенсивным выделением тепла. Снежные смерчи возникают над заснеженной поверхностью [13].

В природе встречаются различные комбинации перечисленных выше классификаций. Так, например, сухопутные смерчи могут иметь как мезоциклонное, так и немезоциклонное происхождение, то же самое касается и смерчей, возникающих над водной поверхностью. Последние, тем не менее, чаще всего формируются по немезоциклонному механизму. Скорость движения воздуха в них обычно ниже, чем у смерчей, возникающих над сушей, а время жизни, как правило, не превышает 15-20 минут [13, 37]. Нередко из одного материнского облака возникает группа водяных смерчей – два и более смерча. Такую группу обычно именуют семейством смерчей (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Семейство водяных смерчей (Тайланд, 25 ноября 2018 г.)

[фото с сайта thailand-news.ru]

1.1.4 Шкалы интенсивности

Для классификации смерчей было разработано несколько шкал интенсивности. Наиболее распространенной из них является введенная в 1971 г. в США шкала Фудзиты (Fujita scale) (таблица 1.1) [95]. В 2007 г. ей на смену пришла улучшенная шкала Фудзиты (Enhanced

Fujita Scale) [92]. Несмотря на некоторую устарелость первой из них, в литературе до сих пор встречается классификация смерчей в соответствии с этой шкалой.

Таблица 1.1 – Классификация смерчей по исходной и улучшенной шкале Фудзиты

Шкала Фудзиты		Улучшенная шкала Фудзиты		Степень разрушений	Категория смерчей
Класс	Оценочная скорость ветра, м/с	Класс	Оценочная скорость ветра, м/с		
F0	<32	EF0	29-38	небольшая	слабые
F1	32-50	EF1	39-49	средняя	
F2	51-70	EF2	50-60	значительная	сильные
F3	71-92	EF3	61-73	сильная	
F4	93-116	EF4	74-90	громадная	крайне сильные
F5	117-142	EF5	> 90	колossalная	

В исходной и улучшенной шкале Фудзиты выделяют шесть классов смерчей от F0 до F5 и от EF0 до EF5 соответственно. Определяющими признаками того или иного класса являются оценочная скорость ветра, а также степень разрушений, оставленных после прохождения смерча. В отличие от исходной, в улучшенной шкале Фудзиты для более точной оценки ущерба были введены 28 индикаторов разрушений (объектов, подвергшихся разрушению), для каждого из которых в свою очередь было установлено несколько градаций их разрушения.

Другая известная шкала – шкала TORRO [142], получившая свое название по названию организации, занимавшейся ее разработкой (Tornado and Storm Research Organization, Великобритания) (таблица 1.2). В этой шкале выделяют 11 классов смерчей от T0 до T10. В качестве определяющих признаков класса также используется оценочная скорость ветра и общая характеристика разрушительных способностей смерча.

Иногда в литературе используется более упрощенная шкала, включающая в себя три категории: слабые смерчи, сильные смерчи, крайне сильные смерчи. В таблицах 1.1 и 1.2 каждого классу смерчей сопоставлена соответствующая ему категория.

Таблица 1.2 – Классификация смерчей по шкале TORRO

Класс	Оценочная скорость ветра, м/с	Характеристика смерча	Категория смерчей
T0	17-24	крайне слабый	слабые
T1	25-32	слабый	
T2	33-41	умеренный	
T3	42-51	сильный	
T4	52-61	крайне сильный	сильные
T5	62-72	интенсивный	
T6	73-83	умеренно-разрушительный	
T7	84-95	сильно-разрушительный	
T8	96-107	крайне-сильно разрушительный	крайне сильные
T9	108-120	интенсивно-разрушительный	
T10	121-134	супер-смерч	

1.1.5 Пространственное распределение

Пространственное распределение смерчей на земном шаре крайне неоднородно. Причиной этому служит разнообразие климата, обуславливающее наличие территорий, где смерчи являются большой редкостью, ввиду отсутствия благоприятных условий для их формирования. Не следует также исключать и субъективности их учета, зависящей во многом от плотности населения и наблюдательной сети. Как следствие, имеющиеся оценки частоты их появления в тех или иных странах могут быть занижены.

Наиболее благоприятны для образования смерчей обширные равнины, над которыми происходит встреча холодных и теплых воздушных течений [10]. Примером таких равнин является территория центральных штатов Северной Америки, простирающаяся от Скалистых гор до гор Аппалачи. Эта область получила название «Аллея торнадо», где ежегодно регистрируются порядка 1000 смерчей [147]. В Европе Русская равнина по своей геоморфологии наиболее близка к равнинам Северной Америки [36], и, как следствие, в ее пределах также отмечаются случаи возникновения смерчей.

Достаточно долгое время считалось, что среднее число смерчей, возникающих в странах бывшего СССР, в год составляет 8-10 [58]. Однако, благодаря не так давно начатой работе российских специалистов по сбору данных о смерчах от различных источников и в том числе за

счет уточнения случаев возникновения смерчей в лесной зоне России посредством обнаружения по спутниковым снимкам оставленных после них ветровалов, удалось получить новые оценки, в соответствии с которыми в России за год возникают порядка 100 смерчей [64, 70, 93]. В работе [132] описывается методика поиска смерчевых ветровалов и определения их характеристик. По результатам применения этой методики, а также анализа данных о смерчах в Северной Евразии (страны бывшего СССР) за период с 979 по 2016 гг., полученных от различных источников, было установлено, что наибольшая повторяемость смерчей в пределах этой территории отмечается у Черноморского побережья, а также в ряде регионов Средней полосы и Балтии. В северо-восточных регионах Северной Евразии смерчи, как правило, не формируются. Самый северный смерч был выявлен на широте 68.8° с.ш. [63].

На рисунке 1.7 представлена карта пространственного распределения смерчей по земному шару. Как видно из рисунка помимо США и Европы наиболее подвержена возникновению смерчей территория Австралии. Меньший охват по смерчеопасности характерен для территории Бразилии, ЮАР, Новой Зеландии, Индии, Китая, Японии и Филиппин [99]. Формирование смерчей в Южном полушарии, как правило, связано с глубокими меридиональными вторжениями воздушных масс, приводящими к тесному контакту резко контрастирующих между собой по свойствам полярного и тропического воздуха на образующемся холодном фронте [20].

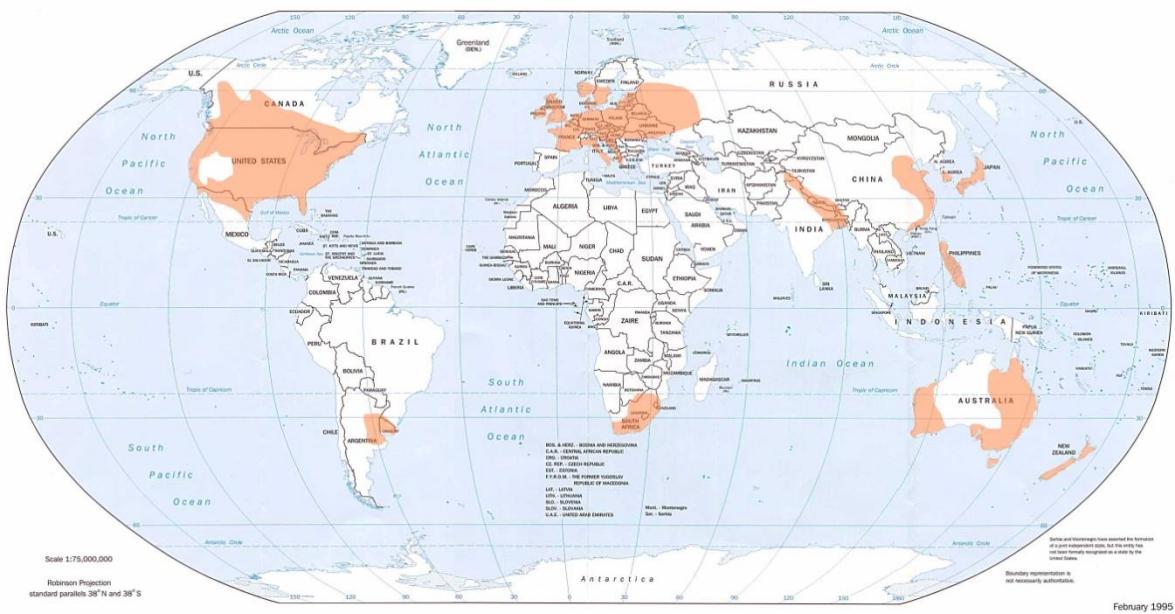


Рисунок 1.7 – Пространственное распределение смерчей на земном шаре
[рисунок с сайта www.ncdc.noaa.gov]

В настоящее время отмечается повышение интереса общественности к смерчам, которое проявляется в увеличении свидетельств очевидцев и их публикаций в глобальной сети

Интернет и в СМИ, что позволяет вести статистику даже самых слабых по своей интенсивности смерчей, которые в официальных метеосводках могут и не упоминаться. Подобная тенденция отчасти объясняет ежегодное увеличение количества наблюдаемых на земном шаре смерчей [64]. Однако не следует исключать возможности влияния и процессов изменения климата нашей планеты, которые, по-видимому, способствуют возникновению благоприятных для зарождения смерчей условий там, где ранее эти явления никогда не регистрировались [30].

1.1.6 Простейшие модели

Ниже приводятся простейшие модели поля ветра и распределения давления в смерче, отражающие некоторые его характерные черты.

Наиболее упрощенной моделью является модель вихря Рэнкина (Rankine vortex) [4, 83, 111, 116]. В соответствии с данной моделью рассматривается цилиндрический вихрь с конечным ядром круглого сечения радиуса a , в котором завихренность ω постоянна, вне ядра течение безвихревое (рисунок 1.8а). В пределах ядра угловая скорость постоянна и равна ω_{\max} , где ω_{\max} – максимальное значение угловой скорости на границе ядра. Внешнее течение характеризуется постоянной угловой скоростью $\omega = \omega_{\max}$.

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\max}, & r \leq a \\ \omega_{\max} r/a, & r > a \end{cases}, \quad (1.1)$$

где ω_{\max} – максимальное значение угловой скорости на границе ядра. Из (1.1) видно, что внутри ядра значение угловой скорости в каждой точке пропорционально расстоянию до оси вихря, а во внешней по отношению к ядру области – обратно пропорционально.

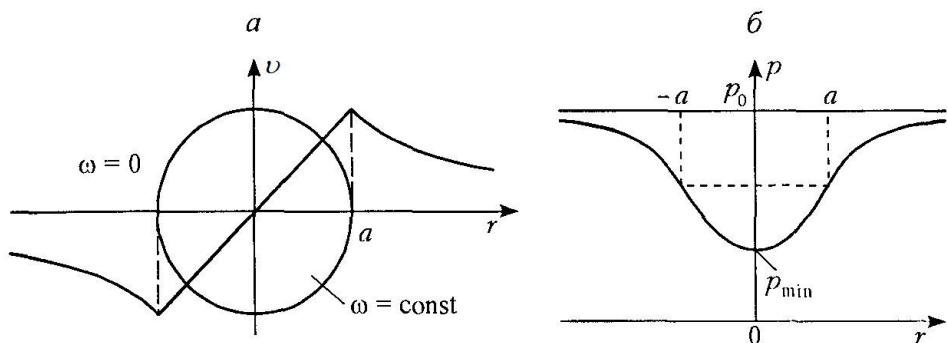


Рисунок 1.8 – Распределение азимутальной скорости (а) и давления (б) в вихре Рэнкина [4]

Чисто азимутальный профиль ветра в вихре Рэнкина связан с наличием циклострофического баланса. По этой причине данная модель более приемлема на высотах

выше приземного слоя. С учетом этого формула для расчета отклонений давления имеет следующий вид:

$$p'(r) = \begin{cases} -\frac{1}{2} \rho v_{\max}^2 \frac{a^2}{r^2}, & r > a \\ -\rho v_{\max}^2 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{r^2}{a^2}\right), & r \leq a \end{cases}, \quad (1.2)$$

где ρ – плотность воздуха.

В соответствии с (1.2) минимальное давление в смерче отмечается в его центре (рисунок 1.8б):

$$p_{\min} = p_0 - \rho v_{\max}^2, \quad (1.3)$$

где p_0 – фоновое давление (давление вдали от вихря). Для слабых смерчей ($v_{\max} \approx 25 \text{ м/с}$ и $\rho \approx 1000 \text{ кг/м}^3$) падение давления по формуле (1.3) составляет 6 гПа, а для более интенсивных ($v_{\max} \approx 100 \text{ м/с}$) достигает 100 гПа.

Другой часто используемой моделью является модель вихря Бюргерса (Burgers vortex) [4, 116]. За счет учета радиальных и вертикальных движений, а также вязкости она более реалистична по сравнению с моделью вихря Рэнкина. Тем не менее, используемое в ней предположение о линейном росте вертикальной скорости с высотой без рассмотрения верхнего предела роста, а также о постоянстве циркуляции скорости сохраняет за ней положение идеализированной модели:

$$u = -\frac{1}{2} \alpha r \quad (1.4)$$

$$v = \frac{C}{2\pi r} \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha r^2}{4\nu}\right) \right] \quad (1.5)$$

$$w = \alpha z \quad (1.6)$$

$$p = p_0 - \frac{1}{2} \rho \alpha^2 \left(z^2 + \frac{r^2}{4}\right) + \rho \int_0^r \frac{v^2}{r} dr, \quad (1.7)$$

где u, v, w – соответственно радиальная, азимутальная и вертикальная компоненты скорости, C – циркуляция, ν – турбулентная вязкость, α – интенсивность восходящих потоков. Интеграл в формуле (1.7) вычисляется численными методами.

Профили азимутальной скорости ветра в обеих моделях практически совпадают, за исключением того, что в модели вихря Бюргерса отмечается более сглаженное достижение максимума скорости на границе ядра (рисунок 1.9).

Существование стационарного решения в модели вихря Бюргерса при наличии вязкости объясняется тем, что вязкая диффузия завихренности компенсируется радиальным переносом завихренности благодаря аксиальному растяжению вихря [4].



Рисунок 1.9 – Профили азимутальной скорости в моделях вихря Рэнкина и Бюргерса [4]

Нередко рассматривается и более сложная модель вихря Салливана (Sullivan vortex). Эта модель построена на основе точного решения уравнений Навье-Стокса в форме стационарного вихря [4, 116]:

$$u = -\frac{\alpha r}{2} + \frac{6\nu}{r} \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha r^2}{4\nu}\right) \right] \quad (1.8)$$

$$v = \frac{C}{2\pi r} \left[H\left(\frac{\alpha r^2}{4\nu}\right) / H(\infty) \right] \quad (1.9)$$

$$w = \alpha z \left[1 - 3 \exp\left(-\frac{\alpha r^2}{4\nu}\right) \right] \quad (1.10)$$

$$p = p_0 - \frac{1}{2} \rho \left\{ \alpha^2 z^2 + \frac{\alpha^2 r^2}{4} + 36 \frac{\nu^2}{r^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha r^2}{4\nu}\right) \right]^2 \right\} + \rho \int_0^r \frac{v^2}{r} dr \quad (1.11)$$

$$H(x) = \int_0^x \exp \left\{ -t + 3 \int_0^t [1 - \exp(-s)] s^{-1} ds \right\} dt \quad (1.12)$$

1.2 Механизмы формирования смерчей

Несмотря на многолетнюю историю изучения смерчей в США механизмы их формирования до сих пор не вполне изучены. В соответствии с классическим представлением о смерчегенезе рассматриваются два варианта условий его осуществления. При первом варианте предполагается, что интенсивности имеющейся вблизи поверхности земли вертикальной завихренности недостаточно для возникновения смерча, поэтому ее усиление происходит в процессе формирования суперячейки [124]. Подобным образом возникают мезоциклонные

смерчи. Второй вариант предусматривает, что смерчи не связаны с мезоциклоном, а их формирование обусловлено процессами, происходящими вблизи поверхности.

1.2.1 Смерчи мезоциклона происхождения

Суперячейкой называют мощное кучево-дождевое облако, в структуре которого присутствует мезоциклон – область вращающегося вокруг вертикальной оси воздуха диаметром от 2 до 5 км [80].

Трансформации кучево-дождевого облака в суперячейку способствует наличие больших сдвигов ветра (изменений скорости и направления ветра с высотой) и струйного течения нижнего уровня. Последнее в условиях сдвига ветра начинает закручиваться, в результате чего формируется горизонтальная завихренность – потоки воздуха, вращающиеся вокруг горизонтальной оси (рисунок 1.10а). Связанные с кучево-дождевым облаком восходящие потоки, встречаясь с такими областями кругового движения воздуха, начинают постепенно поднимать их вверх, наклоняя при этом ось их вращения (рисунок 1.10б). В конечном итоге исходная горизонтальная завихренность трансформируется в вертикальную (рисунок 1.10в) [116, 100].

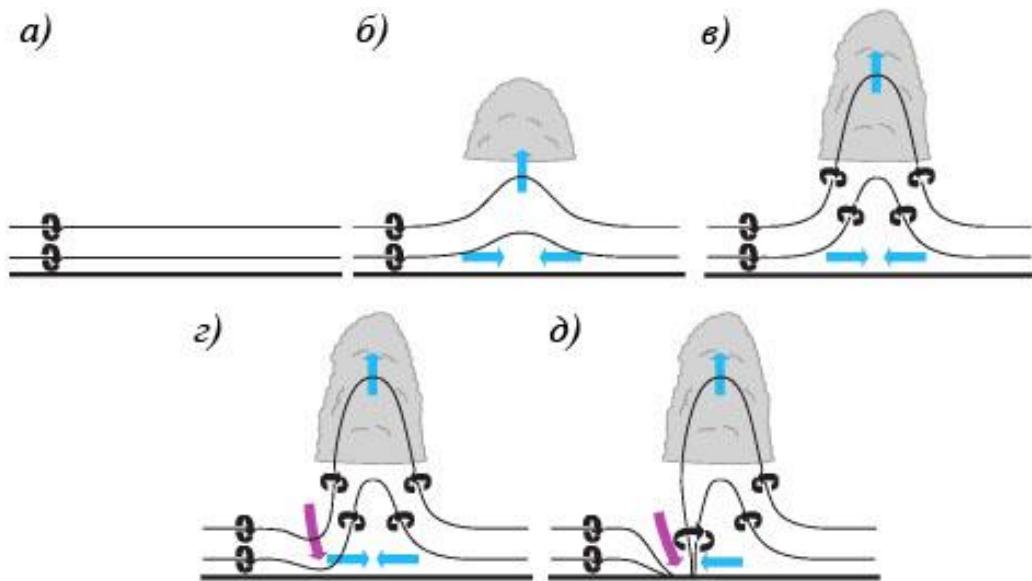


Рисунок 1.10 – Смерчегенез мезоциклона типа [116]

Если исходное вращение воздуха является достаточно сильным, то, встраиваясь в структуру кучево-дождевого облака, оно устремляется вверх, пробивает наковальню (верхнюю границу облака – anvil) и формирует над ней возвышающуюся макушку – купол (overshooting top, рисунок 1.11) [87]. В результате в центре облака образуется мезоциклон, а само кучево-

дождевое облако становится суперячейкой. Продолжительное время существования суперячейки объясняется смещением области выпадения осадков (нисходящих потоков) от центра мезоциклона, где преобладают восходящие потоки, постоянно подпитывающие облако. По мере ослабления мезоциклона происходит постепенный распад и суперячейки. Формирование мезоциклона является первой стадией смерчегенеза [87, 117].

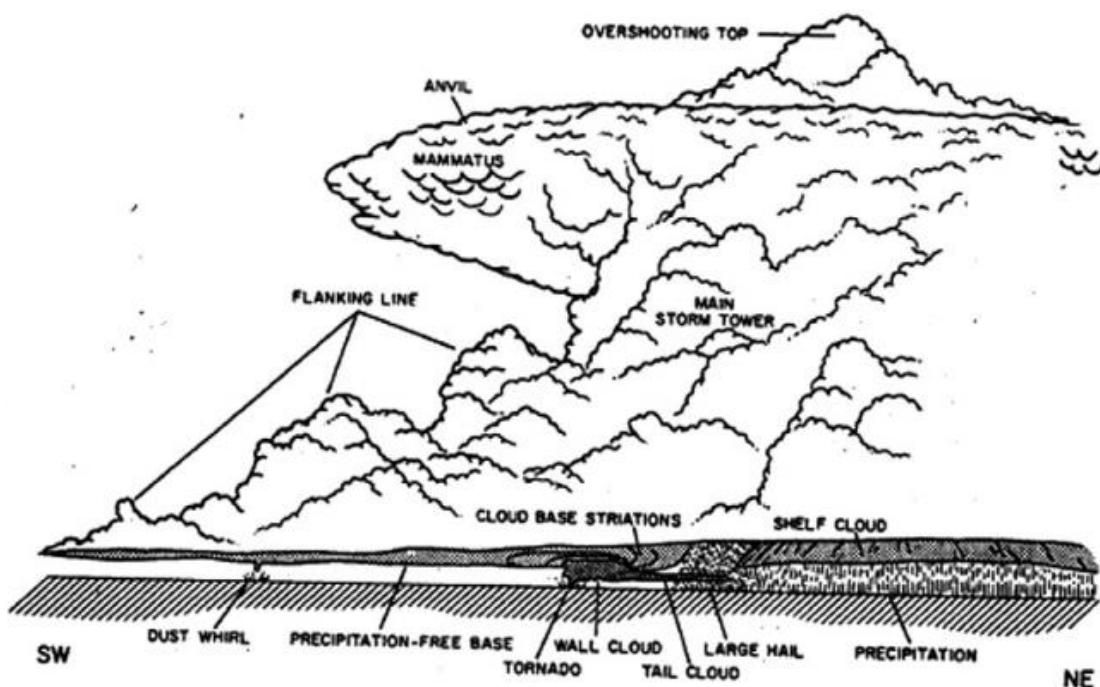


Рисунок 1.11 – Структура суперячейки [87]

На второй стадии за счет нисходящих потоков суперячейки возникшее на высоте вращение начинает распространяться вниз, перенося с собой угловой момент к поверхности земли (рисунок 1.10г) [88, 116, 117]. Таким образом, вблизи нее возникает вертикальная завихренность. Если интенсивность потоков велика, и они транспортируют завихренность непосредственно к поверхности, то при соприкосновении вращающихся масс воздуха с землей возникает сильный радиальный поток, который смещает частицы воздуха ближе к центру. Ввиду постоянства углового момента скорости они начинают вращаться сильнее (рисунок 1.12). Нарушается циклострофический баланс. Вблизи поверхности генерируется стремительный восходящий поток, дающий начало смерчу (рисунок 1.10д) [88].

Как известно, не во всех суперячейках образуются смерчи. Причиной этого является наличие многих факторов, которые могут препятствовать их формированию. К примеру, как правило, смерчи не возникают в условиях малой интенсивности связанных с суперячейкой сходящихся потоков, а также при наличии на поверхности устойчиво стратифицированного воздуха с высокой плотностью [87]. Кроме того важную роль в смерчегенезе играет отношение

максимальной азимутальной скорости v_{\max} в смерче к скорости восходящего потока w – вихревое отношение (swirl ratio) [88]:

$$S = \frac{v_{\max}}{w} \quad (1.13)$$

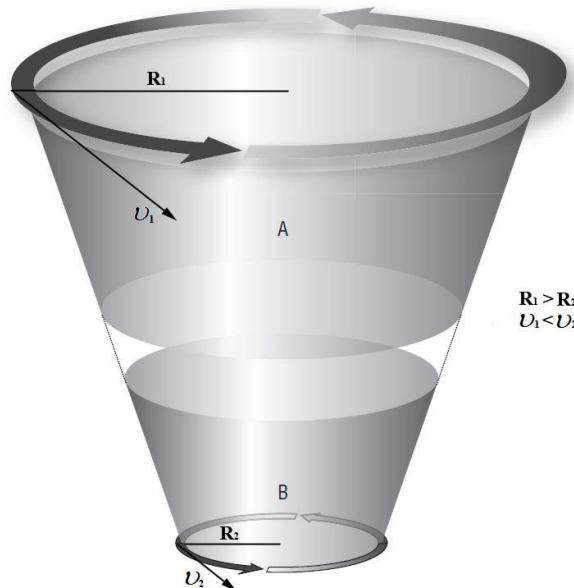


Рисунок 1.12 – Сохранение углового момента в смерчах
(v – азимутальная скорость, R – расстояние от оси вихря) [77]

Чем больше S , тем интенсивнее вращение вокруг вертикальной оси и тем больше падение давления в центре вихря. При $S < 1$ (рисунок 1.13а) вблизи поверхности происходит разделение потоков, вследствие чего смерч не образуется [88]. При $S = 1$ (рисунок 1.13б) возможно образование слабого смерча. При больших значениях S (рисунки 1.13с – 1.13е) воздух вблизи поверхности устремляется вверх, и формируется интенсивный восходящий вихрь [88]. При подъеме до уровня основания суперячейки при соприкосновении с более медленно движущимся воздухом возникает нисходящий поток, в котором радиус вращения устремляется в бесконечность [87]. В верхней части вихря иногда формируется вторичный вихрь называемый футляром (рисунок 1.2). Чем больше S , тем ближе к поверхности располагается точка торможения (stagnation point) (смены направления движения потока) (рисунок 1.13д). При дальнейшем увеличении S (рисунок 1.13е) нисходящий поток растекается по поверхности и формируется двухячейковый вихрь с кольцеобразной областью восходящих потоков. Подобная организация потоков приводит к нередко наблюдаемому каскаду – вторичному вихрю в нижней части смерча (рисунок 1.2). При крайне больших значениях S вихрь становится неустойчивым, около него образуется семейство смерчей, врачающихся вокруг оси центрального вихря (рисунок 1.13ф) [88].

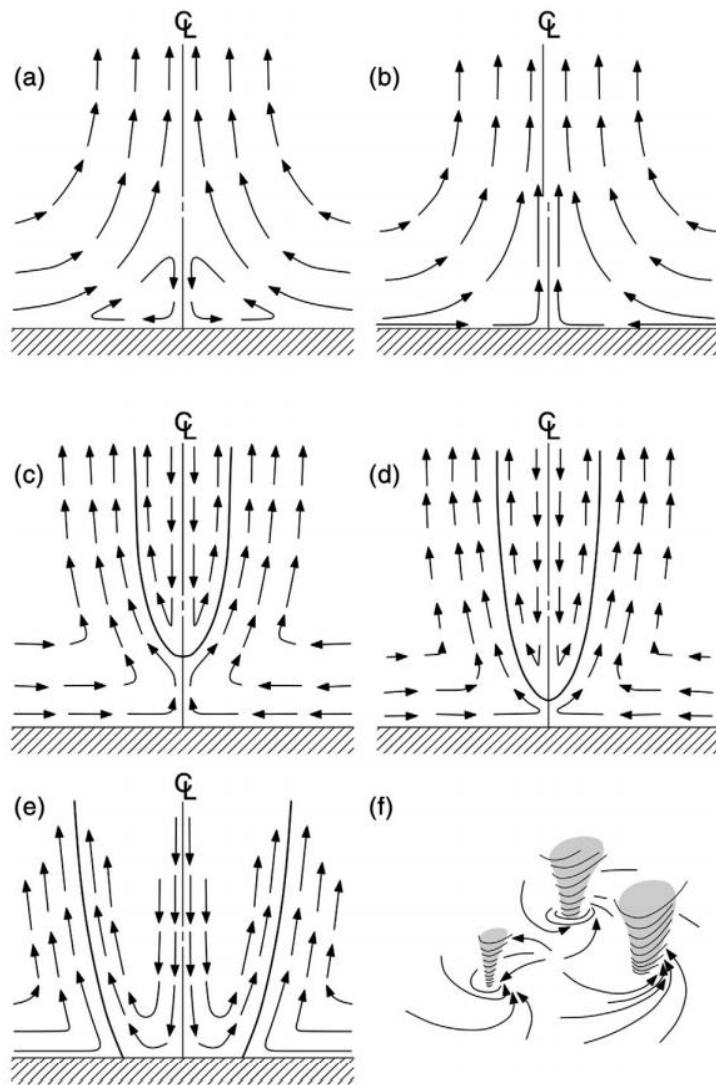


Рисунок 1.13 – Влияние вихревого отношения на структуру потоков в смерче [88]

a) $S < 1$; b) $S = 1$; c), d), e), f) $S > 1$

При определенных условиях смерч может сформироваться не вблизи поверхности земли, а на некоторой высоте. Если имеющийся вблизи поверхности угловой момент невелик, то смерч так и останется существовать в форме воронкообразного облака [88].

В настоящее время наиболее спорным моментом в представленном описании мезоциклонального смерчегенеза является механизм формирования завихренности вблизи поверхности земли. По мнению многих специалистов, этот процесс может быть весьма разнообразен [87].

Наиболее часто благоприятные для формирования мезоциклональных смерчей условия встречаются в США в районе Аллеи торнадо (рисунок 1.14).

Механизмы формирования мезоциклональных смерчей определяют их характерные черты: в большинстве случаев смерчи данной категории продолжительны по времени своего

существования, имеют довольно широкую воронку и за счет больших скоростей ветра оставляют после себя значительные разрушения.

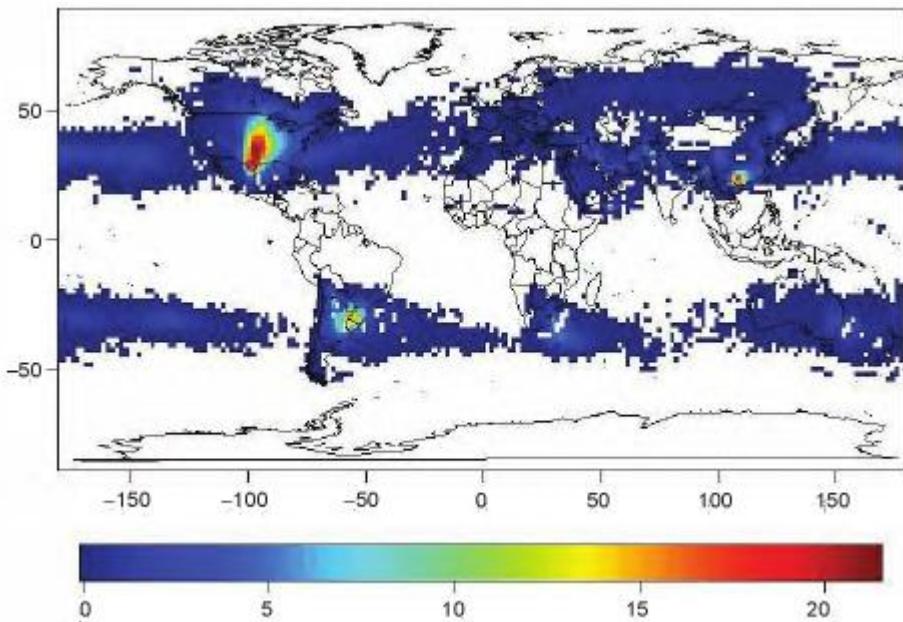


Рисунок 1.14 – Среднее число дней в году на земном шаре с условиями, благоприятными для возникновения мезоциклональных смерчей [116]

1.2.2 Смерчи немезоциклонного происхождения

Немезоциклональные смерчи (landspouts) формируются из быстро растущих кучевых облаков с низкой нижней границей, образующихся за счет сильного нагрева подстилающей поверхности и высокой влажности в приземном слое. Инициирующим фактором для смерчей данной категории является наличие вблизи подстилающей поверхности предварительно сформированной вертикальной завихренности [116, 124, 148]. Подобная завихренность обычно возникает в зоне столкновения воздушных масс, двигающихся в разных направлениях, а также под влиянием бризов [91, 116, 148]. По этой причине иногда немезоциклональные смерчи формируются целым семейством, выстраиваясь при этом в цепочку (рисунок 1.15). Известны случаи, когда смерчи данной категории наблюдали и на периферии суперячеек [116].

Немезоциклональные смерчи начинают формироваться спустя какое-то время после появления их материнского облака. В зоне конвергенции возникает ряд микровихрей с вертикальной осью вращения, располагающихся на примерно одинаковом расстоянии друг от друга (рисунок 1.16а). При взаимодействии микровихрей расстояние между ними увеличивается, увеличивается и их совместная циркуляция, происходит усиление вертикальных

потоков и рост материнского облака, появляются первые очертания вытягивающейся вихревой структуры (рисунок 1.16b).



Рисунок 1.15 – Семейство немезоциклических смерчей [116]

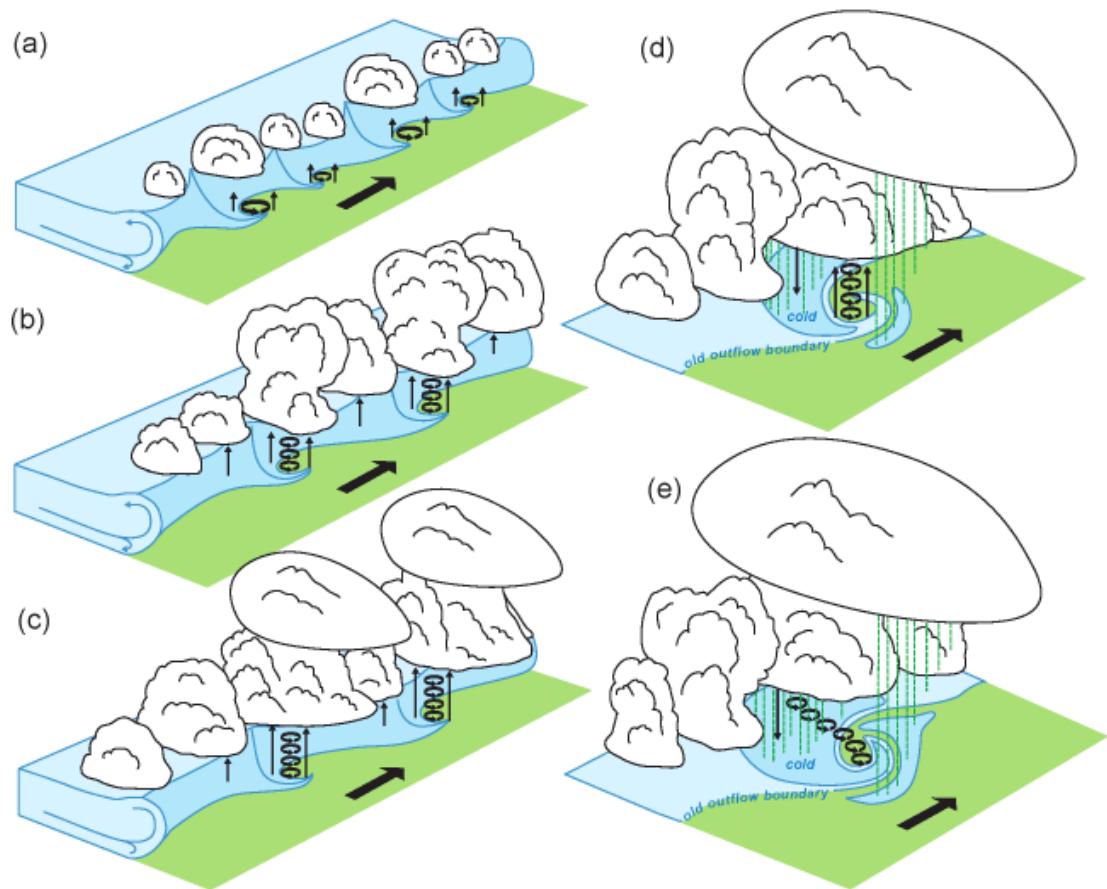


Рисунок 1.16 – Стадии формирования немезоциклических смерчей [116]

Дальнейшее усиление потоков приводит к тому, что вертикальная завихренность начинает распространяться все дальше вверх к основанию облака, увеличивается его

вертикальная протяженность, формируется смерч (рисунок 1.16с). Устойчивость сформированной вихревой структуры будет определяться величиной сдвига ветра, а также появлением нисходящих потоков из материнского облака (рисунок 1.16д). Сильно меняющийся с высотой ветер и нисходящие потоки будут подавлять приток воздуха к смерчу, что в конечном итоге приведет к его распаду, (рисунок 1.16е) [116]. Нередко незадолго до распада отмечается наклон оси вращения смерча.

Смерчи немезоциклонного происхождения, как правило, не так интенсивны, как мезоциклонные, по этой причине их очень сложно диагностировать на экране радиолокатора. Тем не менее, известны случаи и довольно сильных немезоциклонных смерчей, которые оставили после себя значительные разрушения [77].

1.2.3 Водяные смерчи

Водяные смерчи (waterspouts) в большинстве случаев имеют в своей основе немезоциклонное происхождение (рисунок 1.17а), и лишь небольшая их часть связана с суперячейками (рисунок 1.17б). Интенсивные восходящие потоки, способствующие образованию быстро растущих кучевых облаков, которые в дальнейшем и становятся материнскими облаками для водяных смерчей, как правило, обязаны своим появлением большой разности температуры поверхности воды и температуры воздуха на некоторой высоте от нее (1-3 км) [53, 136, 145]. Чаще всего водяные смерчи возникают над теплыми водами морей или больших озер.

Исследователь водяных смерчей Дж. Голден (J.H. Golden) выделил пять стадий их образования и последующего существования [96, 97, 98]:

1) темное пятно (dark spot) – видимый на поверхности воды диск, окруженный большой областью с неопределенной формой и размытыми границами (рисунок 1.18а), продолжительность 1-22 мин;

2) спиральный шлейф (spiral pattern) – шлейф от диска на поверхности воды состоящий из капель воды и частиц воздуха, поднимающихся вверх по винтовой траектории (рисунок 1.18б), продолжительность 2-7 мин;

3) разбрызгивающееся кольцо (spray ring) – плотное вихревое кольцо из водяных брызг, называемое каскадом, и появляющееся вокруг спирального шлейфа (рисунок 1.18в), продолжительность 1-2 мин;

4) зрелый вихрь (mature vortex) – водяной смерч становится видимым (от поверхности воды до материнского облака), приобретает максимальную организацию и интенсивность; его воронка часто кажется пустой, сформированной из турбулентного конденсата; при своем

движении он оставляет за собой серию волн на поверхности воды (рисунок 1.18г), продолжительность 2-17 мин;

5) распад (decay) – ввиду ослабления притока теплого воздуха, вихрь и связанный с ним каскад начинают распадаться (рисунок 1.18д), продолжительность до 7 мин.



Рисунок 1.17 – Разновидности водяных смерчей

- а) водяной смерч немезоциклонального происхождения [фото с сайта 3.bp.blogspot.com]
- б) водяной смерч мезоциклонального происхождения [фото с сайта onemom.files.wordpress.com]

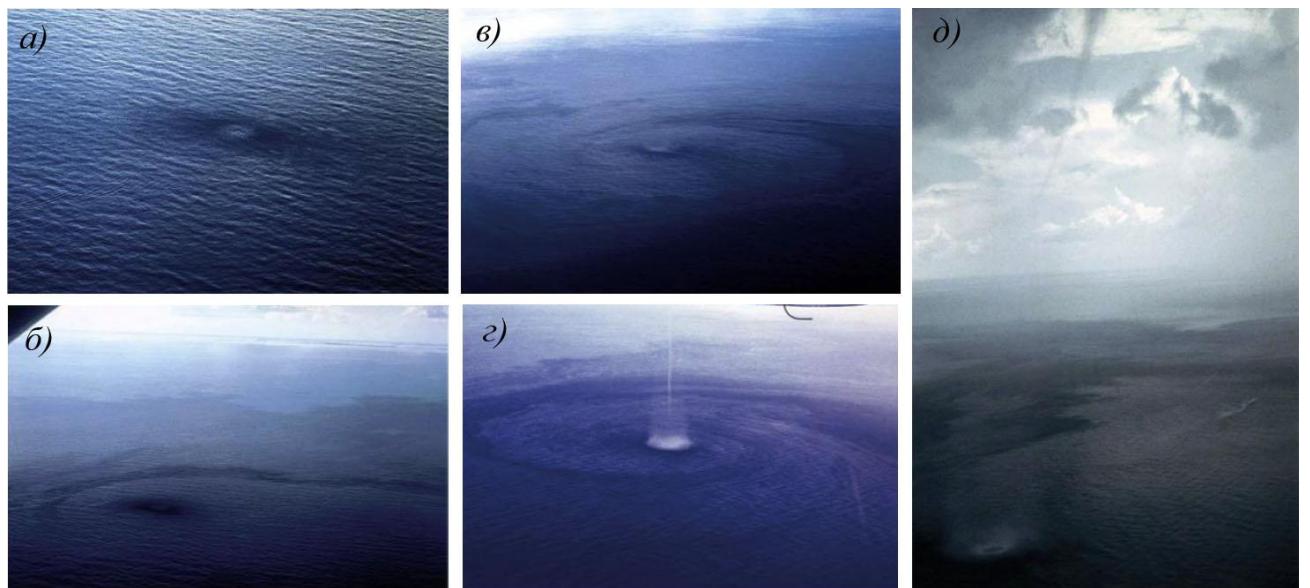


Рисунок 1.18 – Стадии жизненного цикла водяных смерчей [98]

Скорость ветра в водяных смерчах, как правило, не превышает 22 м/с. В работе [31] малая интенсивность смерчей, возникающих над водной поверхностью, объясняется невозможностью транспортировки большого объема воды на высоту, достаточную для выделения теплоты перехода вода-лед, которая необходима для их поддержания.

Чаще всего водяные смерчи малоподвижны. Однако нередки и случаи выхода таких смерчей на сушу, которые, как правило, приводят к разрушению прибрежной инфраструктуры [77].

1.3 Основные методологические и технологические подходы к диагностированию смерчей и прогнозированию смерчеопасных ситуаций

1.3.1 Индексы конвективной неустойчивости атмосферы

Специалистами из Национальной лаборатории сильных штормов (NSSL) США был предложен подход к оценке вероятности возникновения опасных явлений погоды на базе специально разработанных параметров состояния атмосферы, которые получили название индексов конвективной неустойчивости (далее просто индексы) [89, 103, 125]. Исходными данными для расчета индексов обычно выступают данные радиозондирования или численного моделирования атмосферы.

Основная идея построения индексов конвективной неустойчивости заключается в следующем. На начальном этапе формируется перечень параметров того или иного индекса $P_1, P_2 \dots P_n$, которые также называют предикторами. В состав предикторов обычно входят стандартные показатели, получаемые в результате моделирования или измерения, такие, например, как температура воздуха, влажность воздуха, скорость ветра и др. Выбор предикторов определяется особенностями анализируемой ситуации. Так, например, при рассмотрении шквалов определяющими являются характеристики ветра, а взрывной конвекции – температура и влажность воздуха.

На втором этапе осуществляется построение математического выражения для расчета индекса:

$$I = f(P_1, P_2, \dots, P_n) \quad (1.14)$$

В некоторых случаях при этом используются ранее установленные критические значения выбранных предикторов. На большом объеме выборки проводится расчет значений индекса. Затем осуществляется анализ полученных значений и выявление тех из них, при которых отмечалась анализируемая опасная ситуация. В конечном итоге, на базе этих выбранных значений устанавливаются диапазоны значений индекса, каждому из которых присваивается определенная прогнозируемая градация опасной ситуации:

$$\begin{cases} A \leq I < B - 1 \text{ градация} \\ B \leq I < C - 2 \text{ градация} \\ C \leq I < D - 3 \text{ градация} \\ \dots \dots \end{cases} \quad (1.15)$$

Границы диапазонов $A, B, C, D \dots$ называют критическими или пороговыми значениями рассматриваемого индекса. К примеру, ниже приведена формула расчета индекса Cross Totals

(СТ), используемого для оценки возможности возникновения грозовой облачности, и соответствующие ему диапазоны градаций опасности:

$$CT = T_{d,850} - T_{500} \begin{cases} CT < 18 & \text{слабая вероятность грозовой облачности} \\ 18 \leq CT \leq 19 & \text{средняя вероятность грозовой облачности} \\ 20 \leq CT \leq 21 & \text{высокая вероятность грозовой облачности} \\ 22 \leq CT \leq 23 & \text{слабая вероятность грозовой облачности с опасными явлениями} \\ 24 \leq CT \leq 25 & \text{средняя вероятность грозовой облачности с опасными явлениями} \\ CT > 25 & \text{высокая вероятность грозовой облачности с опасными явлениями,} \end{cases} \quad (1.16)$$

где $T_{d,850}$ – температура точки росы на уровне 850 гПа, T_{500} – температура воздуха на уровне 500 гПа.

Одной из особенностей рассматриваемого подхода является территориальная и климатическая привязанность пороговых значений разрабатываемых индексов, которая, как может показаться на первый взгляд, ограничивает возможности их применения. Однако результаты тестирования многих известных индексов для различных стран мира показывают, что, в целом, установленные локальные пороги могут быть распространены и на другие территории [103, 113, 123]. Тем не менее, перед непосредственным использованием индекса на практике целесообразно провести его предварительное тестирование в новых условиях. При необходимости по результатам тестирования установленные для него пороги могут быть скорректированы.

К еще одной особенности рассматриваемого подхода можно отнести широкое разнообразие и отчасти взаимозаменяемость индексов. Последнее подразумевает, что для прогноза одной и той же ситуации могут быть использованы различные индексы. В работе [101] приведен обзор наиболее часто используемых в настоящий момент индексов, иллюстрирующий это утверждение. Специфику схожих индексов, как правило, определяет перечень входящих в их состав предикторов.

Индексы, используемые для прогноза смерчеопасных ситуаций, можно условно разделить на две большие группы: общие и специальные. Индексы общего типа позволяют спрогнозировать неустойчивое состояние атмосферы, которое, в частности, предшествует и сопутствует смерчам как мезоциклонального, так и немезоциклонального происхождения. Среди множества индексов данного типа наиболее распространеными применительно к смерчам являются индексы *CAPE*, *CIN* и *LCL* (таблица 1.3) [144].

Специальные индексы – индексы, используемые для оценки опасности формирования смерчей конкретной категории. К индексам, разработанным для прогноза смерчеопасных ситуаций, связанных со смерчами мезоциклонального происхождения, относят *WD_{BRN}* [149],

S [138], *SRH* [144], *VGP* [125], *EHI* [125], *SCP* [126, 143] и *STP* [126, 143] (таблица 1.3). Данные индексы были предложены американскими специалистами, и, наряду с индексами общего типа, успешно применяются в метеорологической практике как в США, так и в других странах [30, 71, 103, 113].

Что касается смерчей немезоциклонального происхождения, то здесь разнообразие индексов не столь велико. К индексам данной категории относят индексы *ESP* [84, 89] и *NSP* [79], разработанные американскими специалистами, а также индекс *KHS* [112, 146], разработанный специалистами из Нидерландов для прогнозирования водяных смерчей. В настоящий момент упомянутые индексы немезоциклональных смерчей все еще находятся в стадии тестирования.

В таблицах 1.3 и 1.4 приведены подробные сведения о каждом из упомянутых индексов. В частности, рассматриваются формулы расчета индексов, их пороговые значения [79, 85, 89, 101, 112, 138, 144], имена авторов и год публикации их работ, а также общие пояснительные сведения о каждом индексе.

Таблица 1.3 – Индексы конвективной неустойчивости атмосферы, используемые для прогноза смерчеопасных ситуаций

Название	Формула	Пояснения
Уровень конденсации (Lifting Condensation Level)	<p>Графическое определение или по приближенным формулам [81]:</p> $T_{LCL} = \frac{2840}{3.5 \ln T - \ln e - 4.805} + 55$ $h_{LCL} = h + \frac{T - T_{LCL}}{g} \cdot c_p \cdot (1 + 0.887r)$ <p>T – начальная температура частицы в К e – давление водяного пара в Па h – начальная высота частицы в м g – ускорение свободного падения в $\frac{м}{с^2}$ $c_p = 1004 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ (удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении) r – отношение смеси</p>	Используется для оценки нижней границы облачности.
Конвективная доступная потенциальная энергия (Convective Available Potential Energy)	$CAPE = g \int_{LFC}^{EL} \frac{T_{v,p} - T_{v,e}}{T_{v,e}} dz$ <p>LFC – высота уровня свободной конвекции в м EL – высота уровня равновесия в м $T_{v,p}$ – виртуальная температура частицы в К $T_{v,e}$ – виртуальная температура окружающей среды в К</p>	<p>Характеризует энергию плавучести частицы. В зависимости от алгоритма вычисления выделяют:</p> <p>$CAPE_{SB}$ – энергия, вычисленная для частиц, поднимающихся с поверхности земли.</p> <p>$CAPE_{MU}$ – энергия, вычисленная для самых неустойчивых частиц из нижнего слоя</p>

		<p>атмосферы толщиной 300 гПа.</p> <p>$CAPE_{ML}$ – энергия, вычисленная для частиц со средними характеристиками из нижнего слоя атмосферы толщиной 100 м.</p> <p>$CAPE_{ML3km}$ – то же что и $CAPE_{ML}$, только уровень вычисления ограничивают 3 км.</p>
Конвективное торможение (Convective Inhibition)	$CIN = g \int_0^{LFC} \frac{T_{v,p} - T_{v,e}}{T_{v,e}} dz$	Характеризует энергию необходимую частице для преодоления слоя, задерживающего ее подъем. Используется та же классификация что и для $CAPE$ – CIN_{SB} , CIN_{MU} , CIN_{ML} .
Сдвиг ветра по Ричардсону (Bulk Richardson Number Shear)	$WD_{BRN} = \frac{1}{2} [(vx_{500} - vx_{5500-6000})^2 + (vy_{500} - vy_{5500-6000})^2]$ <p>vx_{500} и vy_{500} – компоненты скорости ветра на уровне 500 м в $\frac{m}{s}$</p> <p>$vx_{5500-6000}$ и $vy_{5500-6000}$ – компоненты средневзвешенной скорости ветра в слое 5500-6000 м в $\frac{m}{s}$</p>	Характеризует степень сдвига ветра, способствующую образованию смерчей мезоциклонального происхождения.
Средний сдвиг (Mean shear)	$S = \frac{\int_0^h \frac{\partial \vec{v}(z)}{\partial z} dz}{\int_0^h dz}$ <p>$\vec{v}(z)$ – вектор скорости</p> <p>h – предел вычисления</p>	Используется для общей оценки вероятности формирования суперячеек. В качестве предела вычисления чаще всего выбирают уровни 1 км – S_1 и 3 км – S_3 .

Относительная спиральность (Storm Relative Helicity)	$SRH = - \int_0^h \vec{k}(\vec{v}(z) - \vec{c}) \times \frac{\partial \vec{v}(z)}{\partial z} dz$ <p>\vec{k} – единичный нормальный вектор</p> <p>\vec{c} – вектор скорости движения конвективной ячейки</p>	Используется для оценки степени вертикальной закрутки. В качестве предела вычисления чаще всего выбирают уровни 1 км – SRH_1 и 3 км – SRH_3 .
Параметр формирования завихренности (Vorticity Generating Parameter)	$VGP = \sqrt{CAPE} \cdot S$	На начальной стадии формирования мезоциклона характеризует скорость перехода изначально горизонтальной завихренности в вертикальную.
Энергетический спиральный индекс (Energy Helicity Index)	$EHI = \frac{CAPE \cdot SRH_3}{160000}$	Используется для прогноза суперячеек и сильных мезоциклонных смерчей (F3 и более).
Комплексный параметр для прогноза суперячеек (Supercell Composite Parameter)	$SCP = \frac{CAPE_{MU}}{1000} \cdot \frac{SRH_E}{50} \cdot A$ $A = \begin{cases} 0, & \text{если } WD_E < 10 \frac{m}{c} \\ \frac{WD_E}{20}, & \text{если } 10 \frac{m}{c} \leq WD_E \leq 20 \frac{m}{c} \\ 1, & \text{если } WD_E > 20 \frac{m}{c} \end{cases}$ <p>SRH_E – эффективная относительная спиральность (вычисленная на</p>	Используется для прогноза суперячеек.

	<p>уровнях, для которых $CAPE_{SB} > 100 \frac{\Delta \text{ж}}{\kappa g}$ и $CIN_{SB} > -250 \frac{\Delta \text{ж}}{\kappa g}$) в $\frac{m^2}{c^2}$</p> <p>WD_E – сдвиг ветра в слое от уровня подъема самых неустойчивых частиц в нижнем слое толщиной 300 гПа до 50%-ного уровня их равновесия в $\frac{m}{c}$</p>	
Параметр сильных смерчей (Significant Tornado Parameter)	$STP_{fl} = \frac{CAPE_{SB}}{1500} \cdot A \cdot \frac{SRH_1}{150} \cdot B$ $A = \begin{cases} 0, & \text{если } LCL_{SB} > 2000 \text{ м} \\ \frac{2000 - LCL_{SB}}{1000}, & \text{если } 1000 \text{ м} \leq LCL_{SB} \leq 2000 \text{ м} \\ 1, & \text{если } LCL_{SB} < 1000 \text{ м} \end{cases}$ $B = \begin{cases} 0, & \text{если } WD_{0-6} < 12.5 \frac{m}{c} \\ \frac{WD_{0-6}}{20}, & \text{если } 12.5 \frac{m}{c} \leq WD_{0-6} \leq 30 \frac{m}{c} \\ 1.5, & \text{если } WD_{0-6} > 30 \frac{m}{c} \end{cases}$ $STP_{el} = \frac{CAPE_{ML}}{1500} \cdot C \cdot \frac{SRH_E}{150} \cdot D \cdot E$ $C = \begin{cases} 0, & \text{если } LCL_{ML} > 2000 \text{ м} \\ \frac{2000 - LCL_{ML}}{1500}, & \text{если } 1000 \text{ м} \leq LCL_{ML} \leq 2000 \text{ м} \\ 1, & \text{если } LCL_{ML} < 1000 \text{ м} \end{cases}$	<p>Используется для прогноза сильных мезоциклонных смерчей (F2 и более). В зависимости от алгоритма вычисления выделяют:</p> <p>STP_{fl} – индекс в фиксированном слое;</p> <p>STP_{el} – индекс в эффективном слое.</p>

	$D = \begin{cases} \frac{200 + CIN_{ML}}{150}, & \text{если } CIN_{ML} \leq -50 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \\ 1, & \text{если } CIN_{ML} > -50 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \end{cases}$ $E = \begin{cases} 0, & \text{если } WD_E < 12.5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \\ \frac{WD_E}{20}, & \text{если } 12.5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \leq WD_E \leq 30 \frac{\text{м}}{\text{с}} \\ 1.5, & \text{если } WD_E > 30 \frac{\text{м}}{\text{с}} \end{cases}$ <p>LCL_{ML} и LCL_{SB} – уровень конденсации в формулах для расчета соответственно $CAPE_{ML}$ и $CAPE_{SB}$ в м</p> <p>WD_{0-6} – сдвиг ветра в слое 0-6 км в $\frac{\text{м}}{\text{с}}$</p>	
Усиливающий вытягивающий потенциал (Enhanced Stretching Potential)	$ESP = \begin{cases} LR_{0-2} - 7 \cdot \frac{\min(CAPE_{ML\,3km}, 100)}{50}, & \text{если } CAPE_{SB} \geq 500 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \\ 0, & \text{если } CAPE_{SB} < 500 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \end{cases}$ <p>LR_{0-2} – вертикальный градиент температуры в слое 0-2 км в $\frac{\text{К}}{\text{км}}$</p>	Используется для прогноза условий, благоприятных для формирования смерчей немезоциклонального происхождения.
Параметр несуперячейкового смерча (Non-supercell Tornado Parameter)	$NSP = \frac{LR_{0-1}}{9} \cdot \frac{CAPE_{ML\,3km}}{100} \cdot \frac{225 - CIN_{ML}}{200} \cdot \frac{18 - WD_{0-6}}{5} \cdot \frac{\zeta_r}{8}$ <p>LR_{0-1} – вертикальный градиент температуры в слое 0-1 км в $\frac{\text{К}}{\text{км}}$</p> <p>$\zeta_r$ – завихренность на уровне поверхности в $10^{-5} \frac{1}{\text{с}}$</p>	Используется для прогноза условий, благоприятных для формирования смерчей немезоциклонального происхождения.

<p>Индекс Купера и Хэвина (Kuiper Haven Spout Index)</p>	$KHS = A \cdot B \cdot C \cdot D$ $A = \min(2, \frac{5}{WD_{0-3}})$ $B = \begin{cases} \frac{LR_{0-500m}}{10}, & \text{если } LR_{0-500m} \geq 8 \frac{K}{\text{км}} \\ 0, & \text{если } LR_{0-500m} < 8 \frac{K}{\text{км}} \end{cases}$ $C = \begin{cases} \frac{RH_{0-1}}{50}, & \text{если } RH_{0-1} \geq 50\% \\ 0, & \text{если } RH_{0-1} < 50\% \end{cases}$ $D = \min(2, \frac{5}{v_{10m}})$ <p>WD_{0-3} – сдвиг ветра в слое 0-3 км в $\frac{M}{c}$</p> <p>LR_{0-500m} – вертикальный градиент температуры в слое 0-500 м в $\frac{K}{\text{км}}$</p> <p>RH_{0-1} – средняя влажность в слое 0-1 км в %</p> <p>v_{10m} – скорость ветра на уровне 10 м в $\frac{M}{c}$</p>	<p>Характеризует комплекс условий благоприятных для формирования водяных смерчей немезоциклонального происхождения.</p>
--	---	---

Таблица 1.4 – Индексы конвективной неустойчивости атмосферы, используемые для прогноза смерчеопасных ситуаций (продолжение)

Название	Единица измерения	Пороговые значения			Авторы (год публикации)
		Оцениваемая ситуация	Отсутствие	Наличие	
LCL	м	Образование смерчевых конвективных облаков	> 1500	< 800	
CAPE	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Степень неустойчивости атмосферы	< 0	$0 \leq CAPE_{SB} < 1000$ – слабая неустойчивость. $1000 \leq CAPE_{SB} < 2500$ – средняя неустойчивость, возможность образования быстро растущих конвективных облаков или суперячеек при сопутствующем сильном сдвиге ветра. $2500 \leq CAPE_{SB} < 3500$ – сильная неустойчивость, возможность образования быстро растущих конвективных облаков или суперячеек при сопутствующем хотя бы незначительном сдвиге ветра. $CAPE_{SB} \geq 3500$ – крайне сильная неустойчивость, возможность образования мощных суперячеек. $CAPE_{ML} > 250$ – сильная неустойчивость. $CAPE_{ML\ 3km} > 100$ – умеренная неустойчивость.	
CIN	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Образование конвективных облаков	≥ 200	$CIN_{SB} < 200$	
WD _{BRN}	$\frac{m^2}{c^2}$	Образование суперячеек	< 25	$25-50$ – суперячейки > 50 – суперячейки со смерчами	Weisman, Klemp (1982)

S	$\frac{m}{c \cdot km}$	Образование суперячеек	< 10	≥ 10	
SRH	$\frac{m^2}{c^2}$	Образование суперячеек со смерчами	$SRH_3 < 150$ $SRH_1 < 100$	$150 \leq SRH_3 \leq 299$ – слабые смерчи (F0 и F1) $300 \leq SRH_3 \leq 449$ – сильные смерчи (F2 и F3) $SRH_3 > 450$ – крайне сильные смерчи (F4 и F5) $SRH_1 \geq 100$	Davies-Jones (1990)
VGP	$\frac{\Delta \mathcal{J} c^{1/2} \cdot m}{\kappa g^{1/2} \cdot c \cdot km}$	Образование суперячеек со смерчами	< 0.3	≥ 0.3	Rasmussen (1998)
EHI	$\frac{\Delta \mathcal{J} \cdot m^2}{\kappa g \cdot c^2}$	Образование суперячеек со смерчами	< 1	1-2 – слабые или непродолжительные смерчи (F0 и F1) 2-3.9 – сильные смерчи (F2 и F3) > 4 – крайне сильные смерчи (F4 и F5)	Hart, Korotky (1991)
SCP		Образование суперячеек	< 1	≥ 1	Thompson (2003)
STP		Образование суперячеек со смерчами	< 1	≥ 1 – сильные смерчи (F2 и более)	
ESP		Образование немезоциклональных смерчей	< 1	≥ 1 – чем больше значение, тем больше вероятность образования смерчей	Davies (2005)
NSP		Образование немезоциклональных смерчей	< 1	≥ 1 – чем больше значение, тем больше вероятность образования смерчей	Baumgardt, Cook, (2006)
KHS		Образование немезоциклональных водяных смерчей		Значения варьируются в диапазоне от 0 до 10 – чем больше значение, тем больше вероятность образования смерчей	Kuiper, Haven (2007)

1.3.2 Диагностирование смерчей по радиолокационным данным

Развитая сеть доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ), а также многолетний опыт наблюдения за смерчами в США позволили специалистам из NSSL разработать эмпирические алгоритмы обработки радиолокационных данных для локализации областей вихревого движения воздуха и их дальнейшей классификации. К указанным алгоритмам относятся алгоритм обнаружения мезоциклона (Mesocyclone Detection Algorithm – MDA) [137] и алгоритм обнаружения смерча (Tornado Detection Algorithm – TDA) [120]. Они позволяют распознать факт наличия вихревой структуры на анализируемом радиолокационном изображении и спрогнозировать траекторию ее дальнейшего перемещения, но не дают возможности заранее спрогнозировать время и место появления подобной структуры. Заблаговременность предупреждения об уже образовавшихся смерчах, которую удается достичь с использованием алгоритмов TDA и MDA, составляет порядка 10-20 минут [82].

В основе алгоритмов MDA и TDA лежит пороговый принцип распознавания и классификации, применяемый к азимутальным сегментам сдвига и к впоследствии формируемым 1, 2, 3 и 4-х мерным фигурам, получаемым в результате обработки данных о радиальной скорости.

В процессе работы алгоритма MDA формируются фигуры различной размерности. Одномерные фигуры представляются азимутальными сегментами сдвига (рисунок 1.19), двумерные формируются путем объединения смежных одномерных сегментов сдвига по горизонтали. Трехмерные фигуры формируются путем объединения смежных двумерных фигур по вертикали, а четырехмерные – путем ассоциации соответствующих трехмерных фигур по времени.

Под азимутальным сегментом сдвига в алгоритме MDA понимают участки, на которых с увеличением азимута отмечается увеличение радиальной скорости. Поиск сегментов начинается со сравнения двух соседних по азимуту значений радиальной скорости, соответствующих одному и тому же фиксированному расстоянию до радара. При этом допускается наличие небольшого по сравнению с протяженностью найденного сегмента участка с отрицательным приращением радиальной скорости. Поиск продолжается до тех пор, пока размеры примыкающего участка с отрицательным приращением радиальной скорости не будут сопоставимы с размерами самого сегмента сдвига. На рисунке 1.19 показан пример сегмента сдвига, соответствующего участку АВ, при этом видно, что на участке СD радиальная скорость с увеличением азимута не увеличивается, а уменьшается, но ввиду указанной выше причины участок СD также включается в состав сегмента АВ.

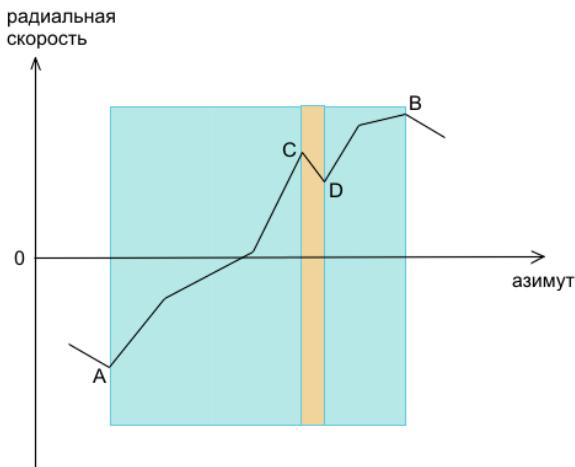


Рисунок 1.19 – Пример азимутального сегмента сдвига АВ

На всех этапах работы алгоритма MDA после выделения фигур соответствующей размерности для каждой из них вычисляется набор специально разработанных параметров. Впоследствии на основании значений этих параметров и используемых критериев отбора ряд фигур может быть исключен из рассмотрения. Оставшиеся фигуры в дальнейшем участвуют в построении фигур большей размерности.

Конечным результатом работы алгоритма MDA является множество трехмерных фигур, каждой из которых присваивается один из трех классов: мезоциклон, циркуляция или «куплет» скорости (velocity couplet – область с противоположными по знаку значениями радиальной скорости).

Для всех фигур, классифицированных как мезоциклон, дополнительно рассчитывается вероятность возникновения из них различных опасных явлений, в том числе смерчей. С этой целью в алгоритме MDA используется специально обученная нейронная сеть, анализирующая значения 23 характеристик производных от радиальной скорости [114, 118].

Ассоциация полученных трехмерных фигур по времени, реализуемая на заключительном этапе работы алгоритма MDA, позволяет спрогнозировать траекторию их дальнейшего перемещения и тем самым выделить зоны риска.

Алгоритм TDA используется для обнаружения сильных локальных вихрей. Подобно MDA TDA исследует приращение радиальной скорости с увеличением азимута для соседних точек сканирования на одном и том же расстоянии до ДМРЛ и на каждом высотном угле сканирования. В отличие от алгоритма MDA, учитывающего все найденные сегменты сдвига, в алгоритме TDA к найденным сегментам применяется пороговый принцип отбора: если приращение скорости для какой-либо пары точек сканирования превышает установленный порог (таблица 1.5), тогда эта пара сохраняется как сегмент сдвига. Таким образом, из

рассмотрения исключаются сегменты с небольшими приращениями скорости, которые, как правило, не связаны со смерчами. Для всех сохраненных сегментов сдвига вычисляется набор специально разработанных параметров.

Таблица 1.5 – Пороговые значения важнейших параметров алгоритма TDA

Название параметра	Пороговое значение
Минимальное значение приращения скорости для сегмента сдвига	11 м/с
Минимальное число сегментов сдвига, формирующих двумерную фигуру	3
Максимальное соотношение сторон (отношение радиального расстояния к азимутальному)	4
Минимальное число двумерных фигур, формирующих трехмерную фигуру	3
Минимальная глубина трехмерной фигуры для присвоения класса TVS или ETVS	1.5 км
Минимальная высота основы для присвоения класса TVS	0.5° или менее 600 м над уровнем радара
Минимальное значение приращения скорости для основы или любого уровня трехмерной фигуры для присвоения класса TVS и ETVS	25 м/с и 36 м/с соответственно

Дальнейшие этапы работы алгоритма TDA по своей сути аналогичны этапам обработки, используемым в алгоритме MDA: сохраненные сегменты сдвига впоследствии объединяются в двумерные фигуры и далее в трехмерные. Все сформированные трехмерные фигуры, состоящие из трех или более двумерных, сохраняются, остальные исключаются из рассмотрения. Далее каждой оставшейся трехмерной фигуре присваивается один из двух классов: TVS или ETVS. Первый класс определяет сигнатуру смерча (tornado vortex signature – TVS), второй – сигнатуру так называемого высотного смерча, для которой не выполняются критерии по высотному расположению (Elevated TVS – ETVS). На конечном этапе работы алгоритма TDA осуществляется вычисление направления и скорости перемещения каждой из обнаруженных сигналов.

Отсутствие мезоциклона, а также малая интенсивность вращения и малые размеры немезоциклонных смерчей приводят к тому, что их очень сложно диагностировать на экране

радиолокатора. По этой причине рассмотренные алгоритмы MDA и TDA для смерчей данной категории, как правило, не применяются.

Для идентификации на основе радиолокационных данных облачных образований специалисты из Швейцарской и Французской метеорологических служб разработали алгоритм TRT (Thunderstorm Radar Tracking) [104, 105]. С его помощью в работе [122] диагностируются системы глубокой конвекции, которые нередко дают начало сильным смерчам. В основе алгоритма TRT лежит принцип адаптивного порога, устанавливаемого по результатам анализа поля радиолокационной отражаемости R . Данный принцип предполагает, что пороговое значение для выделения области каждой ячейки (dB_{th}) определяется исходя их характеристик поля R в пределах зон его локальных максимумов (рисунок 1.20).

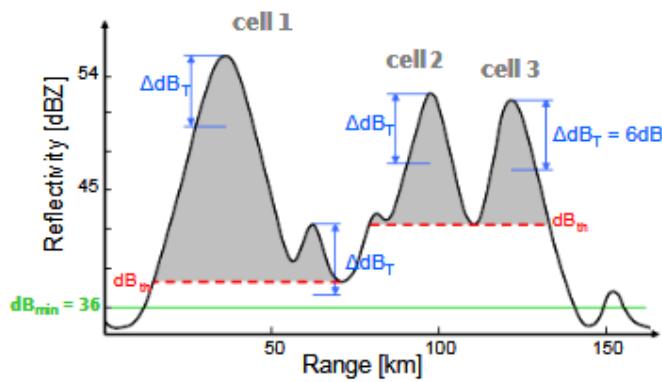


Рисунок 1.20 – Задание адаптивного порога для распознавания ячеек в алгоритме TRT [104]

Вопросы диагностирования смерчей нашли свое выражение и в работах отечественных специалистов. Возможности идентификации зон активной конвекции (ЗАК) со смерчами и сильными шквалами с применением данных от различных источников, в частности, от радиолокаторов, спутников и данных радиозондирования рассмотрены в работе [32]. Предложенные алгоритмы идентификации базируются на описании благоприятного для развития смерчей и шквалов состояния атмосферы, обобщенного в ходе анализа случаев возникновения наиболее разрушительных смерчей в странах бывшего СССР за период 1980-1986 гг. За каждым типом данных закрепляется свой набор параметров распознавания. Применительно к радиолокационным данным рассматривается композиция следующих параметров:

$$P(dBZ_m, H_{BGO}, C_{\alpha}) = \begin{cases} dBZ_m \geq 46 \text{ dBZ} \\ H_{BGO} \geq 13 \text{ км} \\ C_{\alpha} \in [\text{гроза, град}] \end{cases}, \quad (1.17)$$

где dBZ_m – максимальная радиолокационная отражаемость, H_{BGO} – высота верхней границы облачности, C_{α} – класс метеоявления.

При одновременном выполнении условий (1.17) в комплексе с параметрами распознавания ЗАК по спутниковым снимкам и термобарическим полям, о которых пойдет речь в последующих подразделах 1.3.3 и 1.3.6. диагностируется потенциальная возможность формирования смерча.

В математическом обеспечении обработки данных российских ДМРЛ-С для идентификации смерчей используются значения отражаемости на специальном уровне, высота которого превышает нулевую изотерму на 2-2.5 км, максимальной отражаемости dBZ_m и превышения верхней границей облака уровня тропопаузы [17].

1.3.3 Прогноз опасных явлений по спутниковым данным

В методике идентификации ЗАК со смерчами и сильными шквалами в качестве параметров распознавания потенциальных материнских смерчевых облаков используются их морфологические характеристики: специфическая форма скоплений Св (округлые, овальные, неправильной формы с четкими «лысыми» краями), имеющих большую протяженность $100 \text{ км} < L \leq 400 \text{ км}$ с возможным их последующим слиянием [32].

В работе [3] описывается методика распознавания облаков с возможными конвективными стихийными явлениями, в основу которой положен анализ значений протяженности облаков L и радиояркостной температуры (Brightness Temperature - BT) их верхней границы по данным инфракрасного диапазона спектра 10-12 мкм. На базе указанных параметров для каждого типа опасных явлений устанавливаются критерии их распознавания при сопутствующих обязательных условиях на значение высоты нулевой изотермы ($2.5 \text{ км} < H_0 \leq 3.5 \text{ км}$) и упорядоченных вертикальных движений ($\tau_{850} \leq 50 \text{ гPa}/12 \text{ ч}$) (таблица 1.6).

Работа вышеупомянутых методик построена на обработке исходной, получаемой со спутников, цифровой информации и выделении областей наличия конвективной облачности с потенциальными опасными явлениями. Несколько иной подход к прогнозу опасных явлений по спутниковым данным подразумевает использование предварительно полученных результатов выделения границ всех облачных ячеек, обнаруженных на определенном цикле сканирования, для последующей оценки формирования из них тех или иных явлений.

Подобный поход был реализован в проекте COALITION (Complex and Scale Oriented Thunderstorm Satellite Predictors Development) [122], нацеленном на научастинг глубокой конвекции в Альпийском регионе со сложным рельефом местности. В рамках данного проекта реализуется усвоение данных от различных источников метеорологической информации

(спутников, радиолокаторов, численного моделирования, грозопеленгаторов и топографических данных) для построения эвристической модели взаимодействия конвективной ячейки с окружающей средой, с помощью которой вычисляется вероятность ее эволюционирования в суперячейку (рисунок 1.21). В процессе построения данной модели рассматриваются восемь модулей, каждый из которых описывает это взаимодействие с той или иной точки зрения (рисунок 1.22). Прогноз изменения характеристик ячейки дается с заблаговременностью 60 минут.

Таблица 1.6 – Критерии распознавания грозовых, градовых и шкваловых облаков [3]

Тип облаков и явлений	Критерии распознавания (BT в °C, L в км)		Вероятность осуществления явления, %
Кучево-дождевые облака или их скопления	BT ≤ -20	50 ≤ L ≤ 400	100
Ливни без гроз	BT ≤ -25	50 ≤ L ≤ 400	82
	BT ≤ -30		96
Грозы с ливнями без града	-40 ≤ BT ≤ -30	50 ≤ L ≤ 400	87
Грозы с ливнем, градом	BT ≤ -41	50 ≤ L ≤ 400	77
Грозы с ливнем, градом и/или шквалом со скоростью ветра 20-24 м/с	BT ≤ -42	50 ≤ L ≤ 120	75
Грозы с ливнем, градом и/или шквалом со скоростью ветра 25 м/с и более	BT ≤ -48	120 ≤ L ≤ 350	82

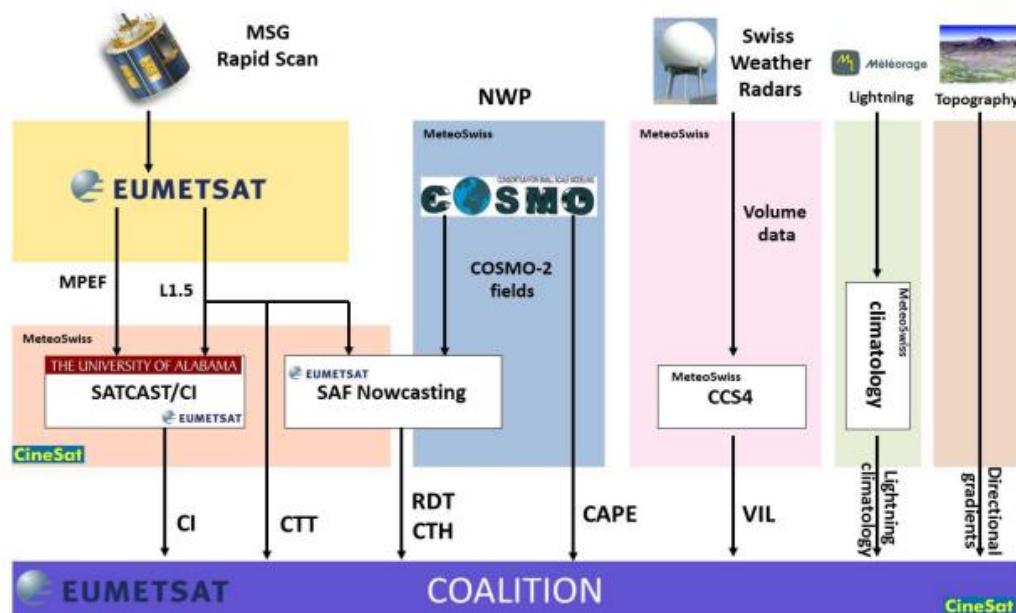


Рисунок 1.21 – Состав входных данных проекта COALITION

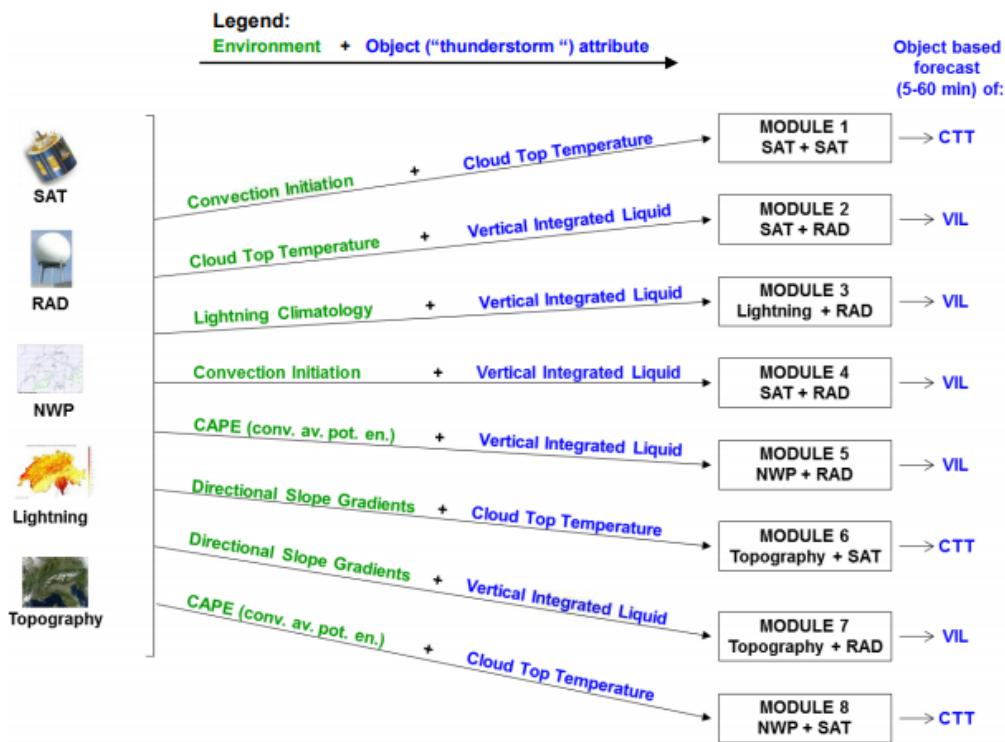


Рисунок 1.22 – Восемь модулей проекта COALITION, формирующих единую эвристическую модель взаимодействия конвективной ячейки с окружающей средой

Результаты тестирования модели COALITION свидетельствуют о том, что при заблаговременности 15-20 мин до момента достижения наивысшей стадии развития ячейки вероятность успешного прогнозирования формирования суперячеек составляет более 60% [122]. Указанный диапазон времени сопоставим с ранее отмеченной заблаговременностью предупреждения о смерчах, которую удается достичь по результатам обработки радиолокационных данных. Подобное сходство, по-видимому, обусловлено быстротечностью рассматриваемых процессов и характеризует общую тенденцию временных пределов оповещения о них, которая отмечается на современном этапе развития науки и техники.

Для выделения границ облачных ячеек в проекте COALITION используются ранее упомянутый алгоритм TRT и RDT [75, 76]. Алгоритм RDT (Rapid Development Thunderstorms), предложенный метеорологической службой Франции, базируется на анализе распределения BT в инфракрасном диапазоне с центром 10.8 мкм (BT10.8) и подобно TRT устанавливает адаптивный порог обнаружения каждой ячейки. Данный алгоритм был реализован в одноименном модуле программного обеспечения (ПО) SAFNWC/MSG v.2013 (Satellite Application Facilities/Meteosat Second Generation) [130], разработанного Европейской организацией спутниковой метеорологии (Eumetsat) с целью обработки данных, поступающих с европейских геостационарных спутников второго поколения. На момент написания

диссертационной работы к спутникам данной серии относятся Meteosat-8, Meteosat-9, Meteosat-10, Meteosat-11, которые, в частности, полностью охватывают акваторию Черного моря.

Помимо простого выделения границ облачных ячеек, в модуле RDT реализована схема классификации ячеек по природе их происхождения (конвективная ячейка, дочерняя ячейка по отношению к родительской конвективной, неактивная конвективная ячейка, неконвективная ячейка, ячейка неопределенной природы), прослеживания их по времени и идентификации куполов (*overshooting tops*) облаков вертикального развития. В процессе классификации используется линейная дискриминантная функция, зависящая от 102 предикторов, выбранных из перечня наиболее информативных параметров ячейки, рассчитываемых по спутниковым данным различных спектральных каналов. Коэффициенты, используемые для вычисления значения функции, были получены по результатам ее соответствующего обучения на выборке данных о конвективных ячейках на территории Франции с июня по август 2008 г. и с июня по сентябрь 2009 г. [75].

1.3.4 Прогноз водяных смерчей по номограмме Силадьи

В 1996 г. канадским метеорологом В. Силадьи (W. Szilagyi) был предложен подход к прогнозу водяных смерчей на базе эмпирически полученной номограммы смерчеопасности [135, 139, 140]. Для ее построения был проведен предварительный анализ 172 случаев регистрации водяных смерчей на Великих озерах за период с 1988 по 2009 гг., по результатам которого из 14 рассмотренных предикторов были отобраны 2 наиболее информативных, показавших наилучшую корреляцию с анализируемыми случаями:

- разность температуры поверхности моря (Sea Surface Temperature – SST) и температуры воздуха на уровне 850 гПа (T_{850});
- глубина конвекции – разность уровня равновесия (уровня с нейтральной плавучестью) (Equilibrium Level – EL) и уровня конденсации (Lifting Condensation Level – LCL).

В процессе построения номограммы на плоскость были нанесены точки со значениями указанных предикторов по всем случаям анализируемой выборки. Область максимального скопления этих точек была очерчена двумя кривыми, получившими название верхней и нижней границы смерчеопасной области. Для учета степени устойчивости вихря было предложено использовать ограничение на значение скорости ветра на уровне 850 гПа (V_{850}): если $V_{850} > 21$ м/с, то смерч не прогнозируется, даже если точка попадает в смерчеопасную область.

На рисунке 1.23а показан итоговый вид номограммы, опубликованный в работе [139]. Сплошная красная линия на номограмме отражает нижнюю границу, а штриховая красная – верхнюю границу смерчеопасной области. По результатам проведенной классификации

вышеупомянутых случаев водяных смерчей на номограмме были выделены подобласти следующих классов:

- смерчи, связанные с грозовыми облаками (thunderstorm related waterspouts – сплошная бордовая кривая);
- смерчи, обусловленные бризовой циркуляцией (land breeze waterspouts – сплошная синяя кривая);
- смерчи, формируемые в условиях высотных циклонов (upper low waterspouts – сплошная розовая кривая);
- зимние смерчи (winter waterspouts – сплошная зеленая кривая).

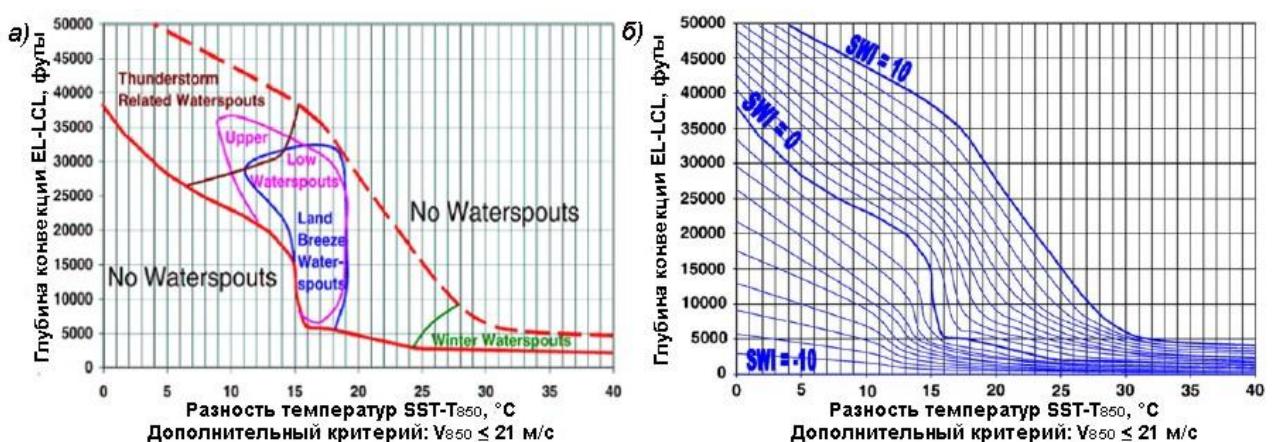


Рисунок 1.23 – Номограмма Силадьи (а) и соответствующий ей индекс SWI (б)

Вероятность возникновения водяных смерчей по методу номограммы Силадьи определяется в ходе анализа принадлежности точки к смерчеопасной области на номограмме. В качестве координат данной точки берутся значения вышеуказанных двух предикторов: [SST – T₈₅₀, EL – LCL] в узлах имеющейся расчетной сетки. Если рассматриваемая точка попадает внутрь смерчеопасной области и значение скорости ветра на уровне 850 гПа не превышает 21 м/с, то вероятность возникновения смерчей в ней считается высокой, иначе – крайне низкой. Множество узлов расчетной сетки, для которых была установлена высокая смерчеопасность, и формируют в конечном итоге смерчеопасную область.

В 2004 г. на основе номограммы Силадьи был предложен индекс SWI (Szilagyi Waterspout Index) (рисунок 1.23б) [140]. Данный индекс представляет собой цифровую интерпретацию номограммы, для его определения используется специально разработанная таблица соответствия. Значения индекса варьируются от -10 до 10 и отражают вероятность формирования водяных смерчей: -10 – отсутствие смерчей, 10 – высокая вероятность смерчей.

Номограмма Силадьи впоследствии была успешно протестирована не только в пределах Великих озер, но и в акватории Средиземного [110], Адриатического [128], Ионического [135] и

Балтийского морей [91]. В 2008 г. группой специалистов из разных стран под руководством Силады был основан Международный центр по исследованию водяных смерчей (International Centre For Waterspout Research) [134]. Одной из задач данного центра является разработка на базе предложенной номограммы оперативной технологии прогноза водяных смерчей в режиме реального времени.

1.3.5 Статистические модели прогноза сильных ветров и смерчей

Метод прогноза сильных ветров и смерчей на базе статистических моделей был предложен специалистами Гидрометцентра России [48, 49, 50]. В 1984 г. была разработана первая статистическая модель, обеспечивающая прогноз сильных ветров со скоростью > 19 м/с и смерчей с заблаговременностью 12-18 ч. Данная модель базировалась на дискриминантной линейной функции от 6 наиболее информативных, физически обоснованных и слабо зависимых предикторов:

- V_{700} – скорость ветра на уровне 700 гПа;
- H_0 – высота нулевой изотермы над пунктом прогноза;
- $(T - T)_{500}$ – отклонение кривой состояния от кривой стратификации на уровне 500 гПа;
- $\partial T / \partial n_3$ – горизонтальный контраст температуры воздуха у поверхности земли;
- T_3 – максимальная температура воздуха у поверхности земли;
- Td_3 – максимальное значение температуры точки росы у поверхности земли.

Коэффициенты дискриминантной функции были получены в результате ее соответствующего обучения на выборке случаев регистрации указанных явлений и при их отсутствии. Модель успешно прошла оперативные испытания и была рекомендована к использованию в оперативной практике Гидрометцентра России.

В 1993 г. (для скорости ветра > 19 м/с) и в 2000 г. (для скорости ветра > 24 м/с) были разработаны новые статистические модели прогноза с заблаговременностью 12-24 ч. также базирующиеся на дискриминантных функциях с эмпирически найденными для них весами. Впоследствии последняя из моделей была адаптирована к гидродинамическим прогнозам метеоэлементов из новой региональной модели Гидрометцентра России и включена в его оперативную практику. Прогнозы по данной модели рассчитываются два раза в сутки и передаются в региональные управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС).

Следует отметить, что упомянутые модели в первую очередь рассчитаны на прогноз сильных ветров, в то время как прогноз возможности возникновения смерчей в

рассматриваемом населенном пункте или районе дается как следствие ожидаемой высокой скорости ветра в их пределах. Впоследствии авторами моделей были предприняты попытки разработки экспертной системы уточнения прогноза смерчей, которая учитывала бы качественные признаки метеорологических ситуаций, при которых они могут возникнуть [48].

1.3.6 Типизация синоптических условий формирования смерчей в России

Во фронтальных зонах умеренных широт в силу динамических причин нередко возникают мезомасштабные циклонические вихри небольшого диаметра (несколько десятков километров), способствующие возникновению ОМЯ, и, в частности, смерчей [10].

Большинство смерчей в нашей стране наблюдается на ее европейской части и на Урале [33, 58]. Такое распределение объясняется особенностями циклонов, перемещающихся вдоль данной территории, в которых, как правило, и возникают смерчи. В частности, тем, что в циркуляцию данных циклонов обычно вовлечен морской воздух с высоким влагосодержанием, что способствует возникновению облаков с низкой нижней границей. Особенно это характерно для южных циклонов, формирующихся над Средиземным или Черным морем, а затем движущихся на северо-запад [58].

Зоны активной конвективной и грозовой деятельности, в которых формируются смерчи, как правило, образуются при большой вертикальной неустойчивости воздушной массы, характеризующейся сходимостью теплых и влажных потоков в ее нижней части и расходимостью относительно холодных и сухих потоков в верхней тропосфере и нижней стратосфере [14, 18].

Наиболее благоприятны для формирования смерчей области с большими контрастами температуры и значительным влагосодержанием [33]. Немаловажную роль играет и неравномерное нагревание приземного слоя воздуха от подстилающей поверхности, эффект которого усиливается за счет шероховатости. Так, высокие горы создают особенно сложные условия для развития конвекции, увеличивая ее повторяемость и интенсивность [33].

По результатам обобщения 248 случаев смерчей на территории бывшего СССР Снитковским А.И. было получено распределение синоптических условий их формирования. В 70% случаев смерчи возникают в теплом секторе циклона в 50-100 км впереди холодного фронта. В 20% случаев – вблизи точки окклюзии. В 5% случаев – впереди линии теплого фронта, но не далее 100 км от него. В оставшихся 5% случаев – в горизонтально однородной воздушной массе [58].

Сильные смерчи возникают при больших запасах потенциальной энергии атмосферы и ее высвобождении за сравнительно короткий срок за счет крупномасштабных вертикальных

движений воздуха [18, 32]. Эти условия реализуются посредством образования взрывным образом мощных кучево-дождевых облаков, вершины которых превышают уровень тропопаузы на 1-3 км [58]. Инициатором этих облаков является быстрый подъем теплого и влажного воздуха вдоль фронтальной поверхности и в результате окклюдирования, вследствие чего происходит разрушение задерживающего инверсионного слоя [14, 58]. Более слабые смерчи обычно возникают вдали от центров циклонов, волновых участков или фронтов окклюзии. Что касается совсем слабых смерчей, то их образованию способствует термическая конвекция [58].

Смерчи, формирующиеся на акватории Черного моря, возникают в результате мощных вторжений холода на Кавказ, при температуре поверхности моря более 20 °C, как правило, в условиях, присущих тыловым частям циклонов, и при наличии устойчивого западно-восточного переноса воздушных масс со скоростью 20 м/с в средней тропосфере [58].

Снитковский А.И. выделил четыре типа атмосферных процессов, при которых в нашей стране возможно образование смерчей различной интенсивности (рисунок 1.24) [58].

I тип (рисунок 1.24а) характеризуется наличием циклона, движущегося на северо-восток, север или северо-запад. При этом в верхней тропосфере существует струйное течение, направленное с юга-запада на северо-восток, а в пограничном слое – струйное течение нижних уровней, направленное с юга-востока или с юга на северо-запад или север. Наиболее вероятной областью возникновения смерчей является центр циклона, а также область впереди теплого фронта, у точки окклюзии или впереди холодного фронта. Данный тип атмосферных процессов связан с возникновением наиболее сильных смерчей и часто обуславливает смерчи в Центральном, Центрально-Черноземном, Волго-Вятском, Северном районах и на Урале. Именно при такой конфигурации синоптических процессов наблюдались интенсивные смерчи 9 июня 1984 г. в Ивановской области и 29 августа 2014 г. в Республике Башкортостан [20].

II тип (рисунок 1.24б) характеризуется перемещением южных циклонов и активных волновых возмущений на север. В теплом секторе этих циклонов часто имеется фронт окклюзии, вблизи которого, а также в центрах волновых возмущений высока вероятность возникновения смерчей средней интенсивности. Данный тип соответствует смерчам, наблюдаемым в Прибалтике и Белоруссии.

III тип (рисунок 1.24в) характеризуется перемещением циклонов, возникающих вблизи точки окклюзии, в восточном направлении. Вблизи центра этих циклонов возможно образование смерчей слабой и средней интенсивности, которые часто встречаются в Молдавии, на юге Украины и на Северном Кавказе.

IV тип (рисунок 1.24г) связан с возникновением у точки окклюзии большой протяженности фронта окклюзии циклона, движущегося на северо-запад, северо-восток или юго-восток. Вблизи центра этого циклона возможны слабые смерчи. Подобная ситуация часто

обуславливает смерчи на Украине, Северном Кавказе, востоке Центрально-Черноземного района и на западе Поволжья.

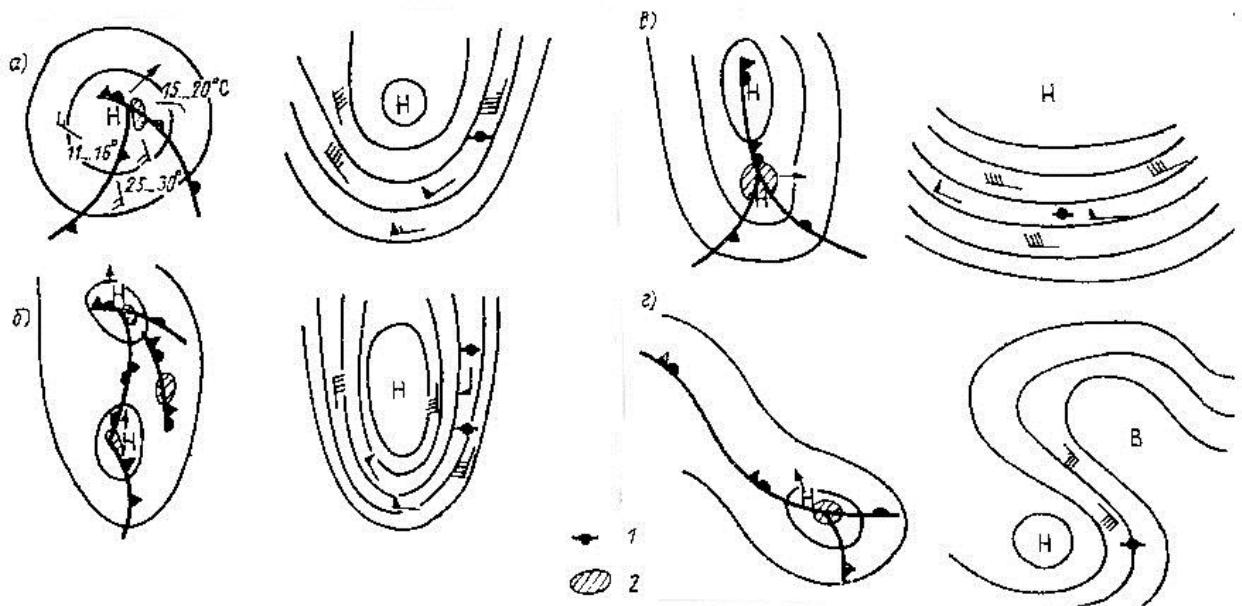


Рисунок 1.24 – Схема процессов, при которых возможно образование смерчей [58]

слева – приземная карта погоды, справа – карта AT500

1 – местоположение циклона у земли, 2 – район наиболее вероятного образования смерчей

В работе [14] обобщены наиболее часто встречающиеся синоптические признаки атмосферных процессов, способствующих образованию интенсивных конвективных явлений, в том числе смерчей, используемые в NSSL. Данные признаки были апробированы и для территории нашей страны по результатам анализа условий возникновения сильных смерчей 9 июня 1984 г., наблюдавшихся на ее европейской части:

- 1) наличие динамического фактора, обеспечивающего подъем теплого и влажного воздуха нижней тропосфера вверх, что имеет место в волновых возмущениях, циклонах, на фронтах и на разделах воздушных масс с различной влажностью;
- 2) большая конвективная неустойчивость в атмосфере, характеризующаяся вертикальными градиентами температуры значительно больше влажноадиабатических;
- 3) сильные с большим вертикальным сдвигом юго-западные ветры в средней и верхней тропосфере (наличие мощного струйного течения) и существование в пограничном слое атмосферы струйного течения нижних уровней, имеющего юго-восточное или южное направление;
- 4) подток с юга и юго-востока влажного воздуха в слое земля-1000 м и сухого воздуха с запада и юго-запада в слое 1000-2500 м;
- 5) наличие задерживающего слоя выше пограничного слоя, вследствие чего образование мощных кучево-дождевых облаков происходит взрывным образом.

В работе [9] приводятся часто встречающиеся типы вертикальной структуры воздушных масс, благоприятных для образования смерчей:

1) теплая воздушная масса, состоящая из трех слоев в нижней части тропосфера: нижний слой – влажный, условно неустойчивый, средний слой – сухой, устойчивый, верхний – условно неустойчивый, в нем влажность сначала растет медленно, а затем отмечается ее резкое увеличение; ветер усиливается с высотой, над нижним слоем преобладает сильное узкое течение, направленное перпендикулярно потоку в нижнем слое; незадолго до смерча происходит резкое повышение температуры точки росы, давление медленно падает, а в момент его формирования это падение ускоряется;

2) теплая, влажная, неустойчивая воздушная масса, обычно морской тропический воздух без инверсий и задерживающих слоев; ветер с высотой обычно меняется мало, но для формирования смерча необходим значительный вертикальный сдвиг ветра хотя бы в тонком слое;

3) относительно холодная, неустойчивая и влажная воздушная масса; ветер усиливается с высотой и быстро меняет направление.

В вышеупомянутой методике идентификации ЗАК со смерчами и сильными шквалами характерное для них термобарическое поле описывается следующими параметрами: горизонтальные градиенты температуры у Земли и на поверхности $850 \text{ гПа} > 2 \text{ }^{\circ}\text{C}/100 \text{ км}$, а горизонтальный градиент геопотенциала на поверхности $500 \text{ гПа} > 2 \text{ гп. м}/100 \text{ км}$. Район возможного возникновения смерчей определяется смыканием холодного фронта с фронтом окклюзии в теплом секторе или холодного с вторичным холодным [32].

Выходы по главе 1

Смерч – опасное метеорологическое явление большой разрушительной силы, механизмы формирования которого до сих пор до конца не изучены. Наиболее часто смерчи регистрируют в США, самым смерчеопасным регионом России является прибрежная акватория Черного моря. Задача прогноза смерчей ввиду недостаточного объема знаний о них сводится к идентификации смерчеопасных ситуаций – комплекса условий благоприятных для формирования смерчей. Результаты обобщения процессов синоптического масштаба, способствующих возникновению подобных ситуаций, свидетельствуют о преобладающем формировании смерчей в циклонах и в более редких случаях в горизонтально однородной воздушной массе. Современные автоматизированные методы диагностирования смерчей и прогнозирования смерчеопасных ситуаций опираются на статистический анализ больших рядов данных с целью отбора наиболее информативных физически обоснованных предикторов смерчей и их пороговых значений.

2 Исследование черноморских смерчей

2.1 Состояние наблюдательной сети

На начальном этапе исследования черноморских смерчей был проведен обзор степени оснащения наблюдательной сети Росгидромета в рассматриваемом регионе. В процессе подготовки обзора анализировался список параметров, измеряемых на сети, частота проведения измерений, а также пространственное расположение постов измерения.

2.1.1 Наземная сеть

В сегменте наземной сети интерес представляют станции метеорологических наблюдений. На момент написания диссертационной работы на Черноморском побережье Краснодарского края [45] и Республики Крым [34] функционируют 22 метеостанции (рисунок 2.1).

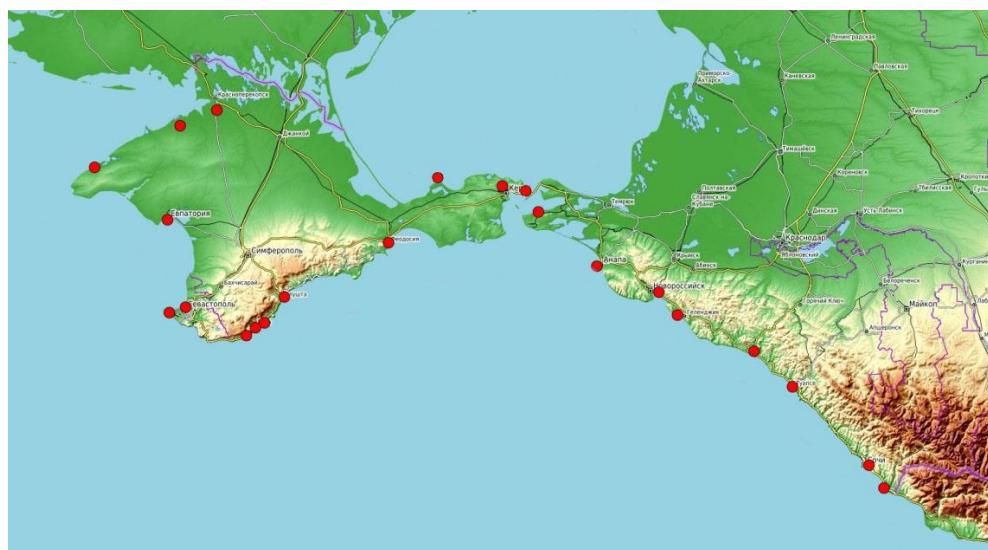


Рисунок 2.1 – Расположение действующих метеостанций на Черноморском побережье Краснодарского края и Республики Крым

На метеостанциях измеряются следующие параметры: давление (на уровне станции и приведенное к уровню моря), температура, направление и скорость ветра, точка росы, осадки (за срок наблюдения и за сутки), категория погоды (прошедшая и на срок наблюдения), количество облаков, нижняя граница облачности, характер облачности, код особых явлений погоды. Шаг измерений по времени равен 3 часам.

2.1.2 Радарная сеть

В структуру радарной сети черноморского региона России на момент написания диссертационной работы входят четыре ДМРЛ установленные в г. Краснодар, г. Сочи (гора Ахун), г. Минеральные Воды и г. Ставрополь [44]. На рисунке 2.2 показано расположение упомянутых ДМРЛ. Желтым цветом обозначена зона охвата ДМРЛ в режиме измерения отражаемости, а оранжевым – в режиме измерения радиальной скорости. Из рисунка 2.2 видно, что территория Крыма не охвачена радиолокационными наблюдениями. В таблице 2.1 приведены основные технические характеристики рассматриваемых ДМРЛ [44].

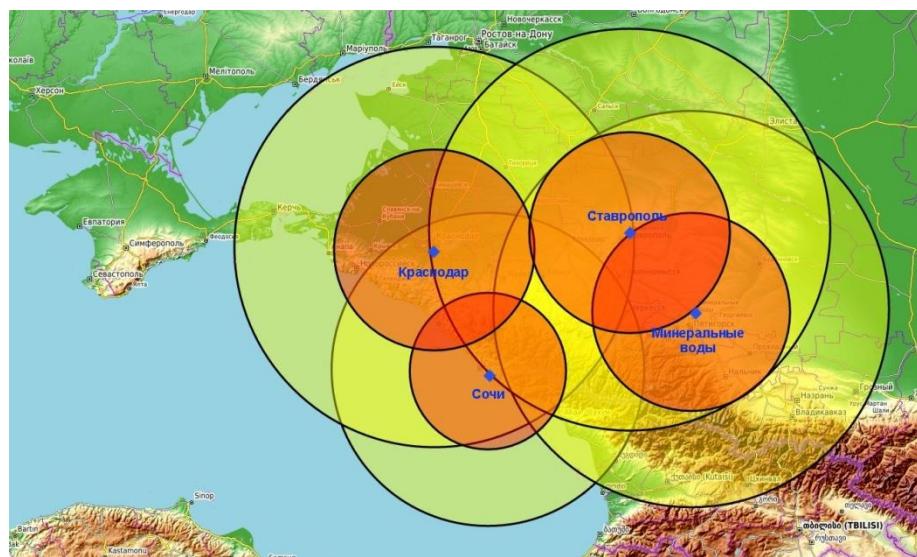


Рисунок 2.2 – Расположение ДМРЛ, действующих в пределах черноморского региона России

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики ДМРЛ, действующих в пределах черноморского региона России

Название	Год ввода в эксплуатацию	Радиус измерений в режиме «Отражаемость»	Радиус измерений в режиме «Скорость»	Частота измерений
ДМРЛ «Ахун» (Сочи)	2012	200 км	100 км	10 мин
ДМРЛ «Минеральные воды»	2012	250 км	125 км	10 мин
ДМРЛ «Ставрополь»	2013	250 км	125 км	10 мин
ДМРЛ «Краснодар»	2015	250 км	125 км	10 мин

В состав первичных данных ДМРЛ входят следующие параметры: радиолокационная отражаемость на горизонтальной поляризации, доплеровская радиальная скорость, ширина доплеровского спектра, дифференциальная отражаемость, коэффициент кросскорреляции между горизонтальным и вертикальным каналами, дифференциальная фаза [46].

2.1.3 Аэрологическая сеть

На момент написания диссертационной работы аэрологическая сеть черноморского региона России включает в себя одну станцию, расположенную в г. Туапсе непосредственно близи побережья, и одну станцию в г. Белогорск, расположенную в порядке 30 км от него (рисунок 2.3) [43].



Рисунок 2.3 – Расположение аэрологических станций, действующих в пределах черноморского региона России

На станциях осуществляются измерения вертикальных профилей температуры, давления, абсолютной и относительной влажности воздуха, направления и скорости ветра, а также потенциальной температуры. Измерения проводятся два раза в сутки.

2.1.4 Спутниковая сеть

В сегменте спутниковой сети интерес представляют геостационарные метеорологические спутники, зона охвата которых включает в себя черноморский регион России. На момент написания диссертационной работы над исследуемым регионом функционируют три группы спутников данного типа: российские спутники серии Электро-Л

(оператор НИЦ Планета) [6], европейские спутники второго поколения серии Meteosat (Meteosat Second Generation – MSG) (оператор Европейская организация спутниковой метеорологии) [131] и индийский спутник Kalpana-1 (оператор Индийская организация по космическим исследованиям) [109]. В таблице 2.2 приведены основные характеристики рассматриваемых групп.

Таблица 2.2 – Основные характеристики геостационарных метеорологических спутников, охватывающих черноморский регион России

Спутники (дата запуска)	Спектральные каналы			Периодичность съемки
	Диапазон	Коли-чество	Разрешение, км	
Электро-Л №1 (20.01.2011 г.) Электро-Л №2 (11.12.2015 г.)	видимый	3	1	30 мин (в штатном режиме) 15 мин (по командам с Земли)
	инфракрасный	7	4	
Meteosat-8 (28.08.2002 г.) Meteosat-9 (22.12.2005 г.) Meteosat-10 (05.07.2012 г.) Meteosat-11 (15.07.2015 г.)	видимый	1	1	15 мин
	видимый	2	3	
	водяной пар	2	3	
	инфракрасный	7	3	
Kalpana-1 (12.09.2002 г.)	видимый	1	2	30 мин
	водяной пар	1	8	
	инфракрасный	1	8	

Из таблицы 2.2 видно, что наилучшими характеристиками (по частоте съемки, по количеству спектральных каналов и по разрешению в диапазоне инфракрасного излучения) среди рассматриваемых групп спутников обладают спутники серии MSG.

2.1.5 Грозопеленгационная сеть

В пределах черноморского региона России функционируют грозопеленгационные системы (ГПС) «Алвес» [16, 57] и «LS 8000» [1, 57]. ГПС «Алвес» была построена Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Войкова. Она включает в себя 45 пунктов регистрации молниевых разрядов и охватывает большую часть Европейской территории России. За развертывание и функционирование ГПС «LS 8000» в Северо-Кавказском регионе отвечает Высокогорный геофизический институт. Изначально данная ГПС состояла из четырех

грозопеленгаторов, но впоследствии она была расширена путем установки еще четырех дополнительных грозопеленгаторов в Ростовской области (рисунок 2.4).

Общими параметрами, измеряемыми на обеих ГПС, являются дата и время молниевого разряда и координаты разряда. В качестве основного информационного параметра в ГПС «Алвес» используется количество разрядов, а в ГПС «LS 8000» – сила и полярность тока в канале разряда. Отличительной особенностью ГПС «LS 8000» является ее возможность регистрации разрядов как категории «Облако-Земля», так и категории «Облако-Облако».



Рисунок 2.4 – Зона обзора ГПС «LS 8000» в Северо-Кавказском регионе

[фото с сайта vgistikhiya.ru]

2.2 Мониторинг смерчеопасных ситуаций

2.2.1 Организация мониторинга

Мониторинг смерчеопасных ситуаций предусматривает ведение непрерывного архива данных метеонаблюдений с целью его последующего использования для исследования характеристик черноморских смерчей, а также для оценки эффективности применения современных методов диагностирования смерчей и прогнозирования смерчеопасных ситуаций в рассматриваемом регионе [22].

Для организации мониторинга была разработана соответствующая автоматизированная технология, осуществляющая обработку потоков данных от различных систем метеорологических наблюдений и выбор тех из них, которые по своему пространственному

охвату относятся к черноморскому региону. Выбранные данные впоследствии записываются в оперативную базу данных мониторинга. Кроме них в базу также записывается информация о случаях регистрации смерчей над Черным морем, пополняемая в ручном режиме.

Выбор состава архивируемых данных мониторинга производился из множества рассмотренных в подразделе 2.1 параметров на основании вышеописанных критериев по направленности дальнейшего использования этих данных. В конечный перечень архивируемых параметров были включены:

- продукция обработки данных от геостационарных метеорологических спутников серии MSG, представленная набором облачных ячеек с соответствующими пространственными и атрибутивными характеристиками (координаты граничных точек, скорость перемещения, стадия развития и др.);
- радиолокационные данные от действующих в черноморском регионе ДМРЛ, представленные набором следующих параметров: горизонтальная отражаемость, дифференциальная отражаемость и радиальная скорость в различных слоях, интенсивность осадков, сумма осадков за последний час, сумма осадков за последние 3 часа, верхняя граница облачности, карта метеоявлений;
- грозопеленгационные данные.

Помимо этого, к рассматриваемому перечню также относятся прогностические данные по модели GFS, для потенциальной возможности их использования в качестве начальных и граничных условий при проведении расчетов по модели высокого пространственно-временного разрешения. Архив этих данных поддерживается американским Национальным центром по прогнозированию окружающей среды NCEP (National Centers for Environmental Prediction) [121]. В рамках работы технологии мониторинга из этого архива вырезается область с данными в узлах расчетной сетки, которые охватывают акваторию Черного моря.

2.2.2 Автоматизированная технология мониторинга

Основное назначение технологии мониторинга – автоматизация процессов сбора, обработки, хранения и визуализации данных метеонаблюдений в пределах черноморского региона России.

Разработка технологии мониторинга велась в среде операционной системы (ОС) семейства UNIX, ввиду того, что эта среда является базовой программной платформой для работы используемого в технологии ПО SAFNWC/MSG v.2013 и большинства численных моделей прогноза погоды. Данная зависимость объясняется тем, что разрабатываемая

технология должна быть встроена в информационную среду упомянутых программных средств и должна иметь возможность обрабатывать результаты их работы.

Для разработки программных компонентов технологии мониторинга были использованы базовые языки программирования ОС семейства UNIX, в частности, язык C, Fortran, PHP и командная оболочка bash. В качестве системы управления базами данных (СУБД) была выбрана документно-ориентированная СУБД MongoDB, особенностью которой является отсутствие жестко установленного формата хранения данных, а также высокая производительность за счет выгрузки часто используемых данных в оперативную память, что позволяет в значительной степени снизить время выполнения запросов к данным большого объема. В рамках данной СУБД таблицы с данными именуются коллекциями.

Программная реализация технологии мониторинга включает в себя сервисы сбора и обработки данных (сервисы C1, C2, C3, C4, C5, C6 на рисунке 2.5), оперативную БД, ПО SAFNWC/MSG v.2013 и подсистему визуализации данных.

Работа технологии мониторинга осуществляется в непрерывном режиме и включает в себя три этапа, повторяющиеся по мере поступления новых данных. На первом этапе производится обработка потоков данных от различных систем, в частности, от спутниковой, радиолокационной и грозопеленгационной систем, а также новых прогнозов по модели GFS (рисунок 2.5). На втором этапе подготовленные каждым сервисом данные записываются в соответствующие коллекции оперативной БД. По мере добавления новых данных для ускорения поиска осуществляется их автоматическая индексация по ключевым полям. Для просмотра собранных данных используется специально разработанная подсистема визуализации, позволяющая, во-первых, в оперативном режиме контролировать процессы поступления новых данных, а, во-вторых, просматривать архивные данные.

С целью повышения эффективности работы подсистемы визуализации, в частности, для уменьшения объема оперируемых в подсистеме данных и в конечном итоге для уменьшения времени доступа к этим данным, на третьем этапе работы технологии мониторинга реализуется автоматический экспорт данных с истекшим сроком давности из оперативной БД в файлы формата JSON. Впоследствии экспортированные данные удаляются из оперативной БД.

Сервис C1 отвечает за мониторинг поступления новой порции спутниковых данных в формате HRIT по протоколу FTP из НИЦ «Планета» и последующую передачу этих данных на вход ПО SAFNWC/MSG v.2013. По результатам обработки формируется файл формата BUFR с информацией обо всех обнаруженных за рассматриваемую временную отметку облачных ячейках. Сервис C2 осуществляет чтение данного файла и готовит файл формата JSON для записи полученной информации в оперативную БД.

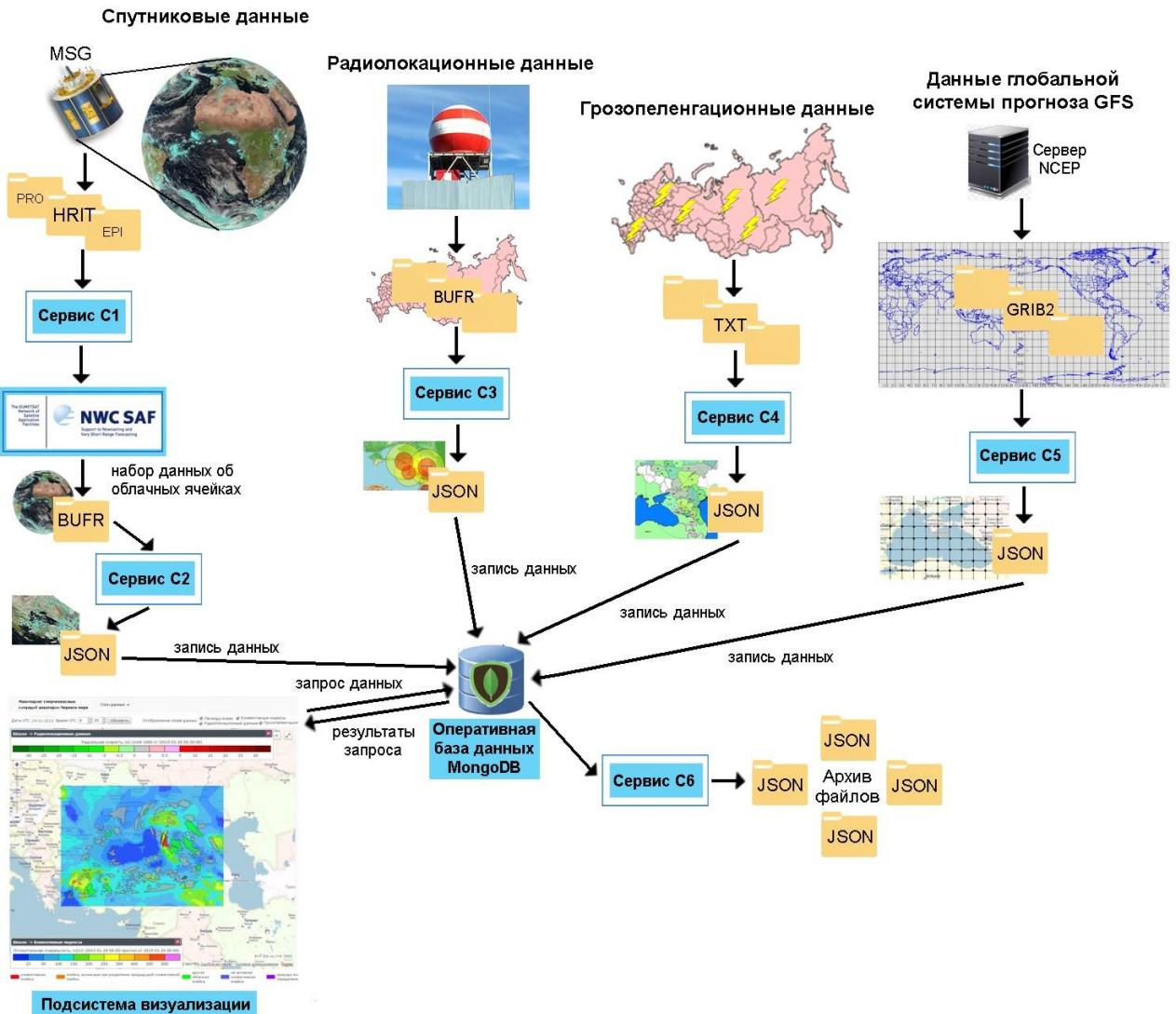


Рисунок 2.5 – Общая схема работы технологии мониторинга

Сервисы С3 и С4 отвечают за мониторинг поступления соответственно новых радиолокационных и грозопеленгационных данных по протоколу FTP из Авиаметтелеома Росгидромета. В первом случае реализуется чтение пришедших BURF-сообщений, а во втором текстовых файлов специального формата. По результатам работы данных сервисов формируются файлы формата JSON для записи данных, относящихся к исследуемому региону, в оперативную БД.

Сервис обработки прогностических данных по модели GFS C5 по протоколу HTTP обращается к серверу NCEP. При наличии результатов счета от текущей запрашиваемой даты запускается процесс скачивания соответствующих этой дате файлов прогнозов в формате GRIB2 с пространственным разрешением 0.5° , 3-х часовым шагом по времени и заблаговременностью до 2 суток. В процессе чтения полученных прогнозов из исходной глобальной расчетной сетки вырезается область с данными, охватывающими акваторию

Черного моря, которые записываются в файл формата JSON и впоследствии импортируются в оперативную БД.

Сервис архивации С6 по заданному расписанию обращается к оперативной БД и из каждой хранящейся в ней коллекции данных, за исключением коллекции случаев регистрации смерчей, извлекает данные с истекшим сроком давности. Извлеченные данные каждой коллекции впоследствии записываются в файлы формата JSON и удаляются из оперативной БД. Сформированные файлы сохраняются в архивной папке на жестком диске.

Для использования ПО SAFNWC/MSG v.2013 на пользователя в лице НПО «Тайфун» была получена персональная лицензия. В рамках работы технологии мониторинга данное ПО формирует продукцию следующего типа [129]:

- облачная маска (Cloud Mask – CM);
- тип облака (Cloud Type – CT);
- температура и высота верхней границы облачности (Cloud Top Temperature/Height – CTTH);
- интенсивность осадков (Convective Rainfall Rate – CRR);
- быстро развивающиеся конвективные ячейки (Rapid Development Thunderstorms – RDT).

Первые четыре типа являются вспомогательными и используются для уточнения информации об обнаруженных облачных ячейках и при диагностировании категории их природы [108].

Для каждой облачной ячейки вычисляется набор атрибутивных и пространственных данных. К числу пространственных данных ячейки относятся координаты граничных точек области ячейки и координаты ее центра тяжести. Набор атрибутивных данных представлен широким списком параметров, таких как категория природы ячейки, скорость и направление ее перемещения и др. [129].

Подсистема визуализации данных мониторинга реализована в виде веб-приложения, главным компонентом которого является управляемая картографическая основа (рисунок 2.6).

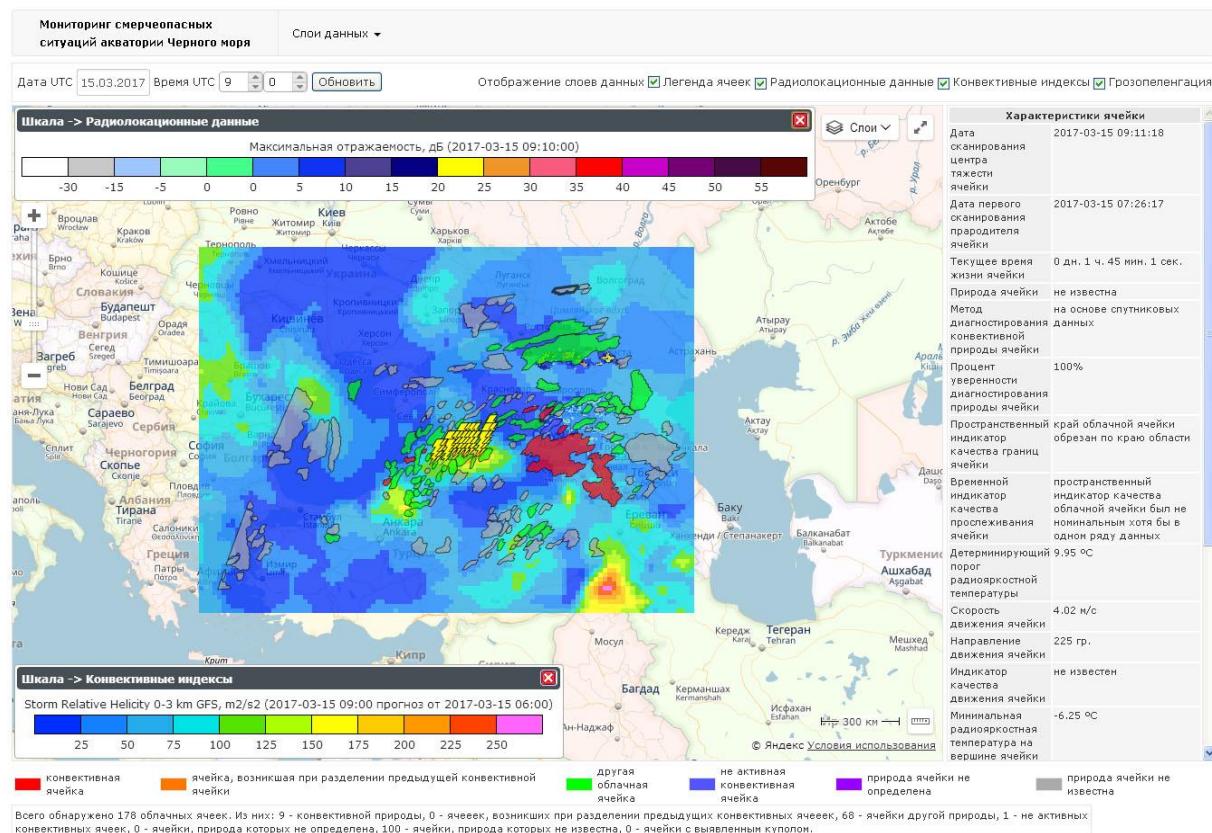


Рисунок 2.6 – Подсистема визуализации данных мониторинга

База данных мониторинга включает в себя шесть коллекций (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Перечень коллекций базы данных мониторинга

Название коллекции	Описание коллекции
cloud_system	коллекция данных об облачных ячейках, обнаруженных по результатам работы ПО SAFNWC/MSG v.2013
cloud_system_overshoot	коллекция данных о выявленных куполах облачных ячеек, обнаруженных по результатам работы ПО SAFNWC/MSG v.2013
radar	коллекция радиолокационных данных
grozopeleng	коллекция грозопеленгационных данных
nwp	коллекция прогностических данных по модели GFS
watespout	коллекция данных о случаях регистрации смерчей у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым

Временной промежуток работ по разработке технологии мониторинга охватывал вторую половину 2014 г. С начала 2015 г. технология была запущена в работу в непрерывном режиме, с этого же момента начал формироваться архив данных мониторинга. В состав архива также были включены сохранившиеся наборы данных за 2014 г. Параллельно с разработкой

технологии мониторинга в 2014 г. была начата работа по сбору данных о случаях регистрации смерчей у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым, о которой пойдет речь в подразделе 2.3.1.

По результатам разработки технологии мониторинга в журнале «Метеорология и Гидрология» №10 за 2016 г. была опубликована соответствующая статья [27].

2.3 Характеристики смерчей

2.3.1 Создание архива смерчей и его верификация

Ввиду того, что в официальных метеосводках, как правило, содержатся упоминания лишь о наиболее заметных случаях смерчей, для создания как можно более полного архива смерчей у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым были использованы записи Европейской базы данных об опасных метеоявлениях (European Severe Weather Database – ESWD) [93], систематизирующей сообщения очевидцев.

ESWD является открытым источником информации об опасных метеоявлениях Европы, а также европейской части России, который широко используется во многих странах [91, 135], в том числе и в России [12, 64, 68]. ESWD поддерживается Европейской лабораторией сильных штормов (European Severe Storm Laboratory – ESSL) и включает в себя данные о случаях наблюдения таких опасных метеоявлений как град, ливень, смерч, шквал, сход лавины и др.

Каждая запись, хранящаяся в ESWD, содержит временные и пространственные характеристики наблюдавшегося явления, а также параметр качества данной записи. Этот параметр принимает одно из четырех значений: записи, не имеющие возможности подтверждения (QC0); записи, прошедшие первичную проверку (QC0+); записи, достоверность которых подтверждена надежными источниками и для которых приводятся ссылки на эти источники, чаще всего представленные публикациями в сети Интернет (QC1); записи, имеющие наивысший ранг надежности, подтвержденные специально проведенной верификацией (QC2). Следует подчеркнуть, что все использованные для анализа в диссертационной работе записи ESWD о смерчах имели ранг QC1.

Работа по сбору записей ESWD о черноморских смерчах была начата в 2014 г. Охватить более ранний временной промежуток не представлялось возможным по ряду причин. Во-первых, по причине недоступности на момент начала работы на веб-сайте первоисточника информации о записях, занесенных в ESWD в 2013 г. и ранее. Во-вторых, из-за того, что техническая возможность получения спутниковых данных, на базе которых в дальнейшем проводилась верификация рассматриваемых случаев, о которой пойдет речь далее, появилась

только со второй половины 2014 г. В конечном итоге, использованный для анализа в диссертационной работе архив случаев смерчей определялся периодом с 2014 по 2016 гг.

Имеющаяся информация о случаях наблюдения смерчей из архива ESWD была детально изучена на предмет ее логической непротиворечивости и наличия фотографий или видеозаписей смерча. Случаи без сопроводительных материалов не учитывались при дальнейшем рассмотрении. В Приложении №1 приведены записи итогового архива, полученного после проведения указанной первичной обработки.

В дальнейшем была проведена дополнительная верификация каждого случая из подготовленного архива смерчей. Ее суть заключалась в идентификации с использованием результатов работы ПО SAFNWC/MSG v.2013 материнской облачной ячейки над местом регистрации смерча в момент его наблюдения (рисунок 2.7).

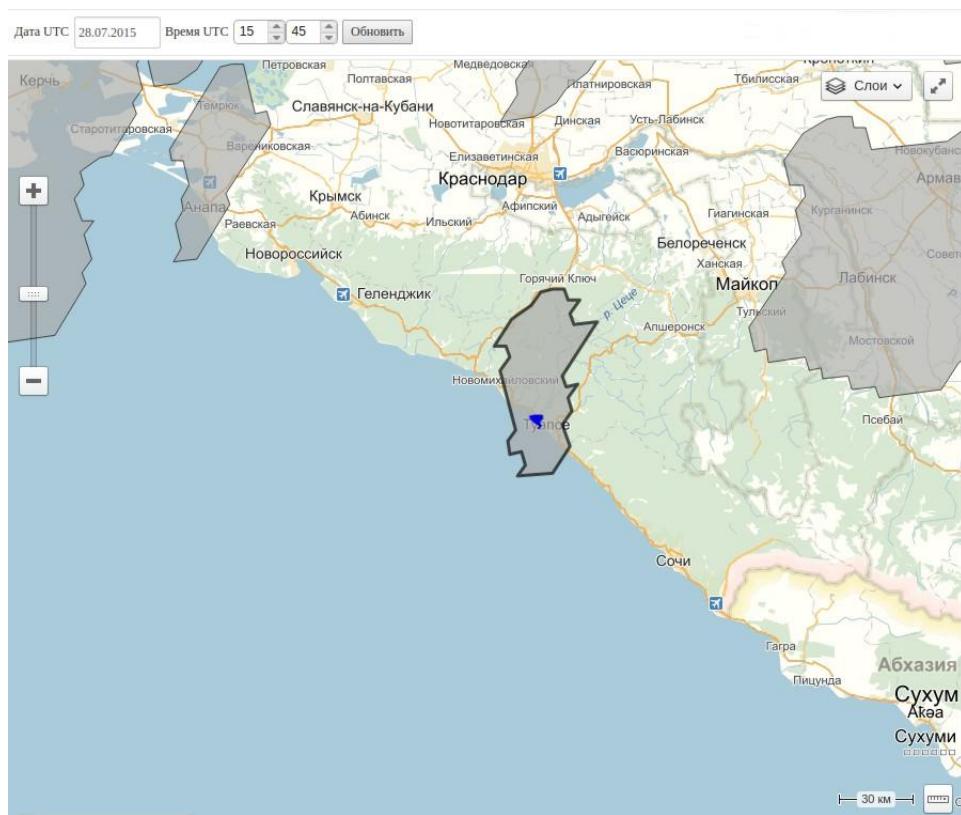


Рисунок 2.7 – Пример идентификации материнской облачной ячейки смерча вблизи г. Туапсе 28 июля 2015 г.

В процессе идентификации для визуального подтверждения наличия материнской ячейки смерча была использована подсистема визуализации разработанной технологии мониторинга. Предварительно из архива в оперативную БД были загружены наборы данных об облачных ячейках за требуемые моменты времени.

По результатам проведенной верификации все рассматриваемые случаи смерчей были разделены на три категории:

- достоверные – подтвержденные наличием материнской облачной ячейки смерча;
- вероятные – достоверность которых не была установлена, ввиду отсутствия спутниковых данных за требуемый промежуток времени;
- возможные – для которых отсутствовали данные о времени регистрации смерча.

В последнем столбце таблиц из Приложения №1 за 2014-2016 гг. для каждого случая из архива приведено значение категории достоверности, присвоенное в ходе верификации. Из таблиц видно, что в 2014 г. у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым было зафиксировано 32 смерча, из них 25 достоверных, 4 вероятных и 3 возможных; в 2015 г. – 46 смерчей, из них 45 достоверных и 1 возможный; в 2016 г. – 40 смерчей, из них 25 достоверных, 10 вероятных и 5 возможных. В сумме сформированный архив смерчей за период 2014-2016 гг. включал в себя 118 случаев, 9 из которых относились к смерчам без указания точного времени их возникновения.

2.3.2 Пространственное положение смерчей

На рисунках 2.8-2.10 показано пространственное положение смерчей по годам. Из рисунков видно, что большинство смерчей возникало вблизи побережья Краснодарского края на участке с. Тамань – г. Сочи (Адлер). В меньшей степени смерчи фиксировали вблизи побережья Республики Крым – не более 3 случаев за год. Наибольшая плотность смерчей отмечалась в районах г. Сочи и г. Туапсе.

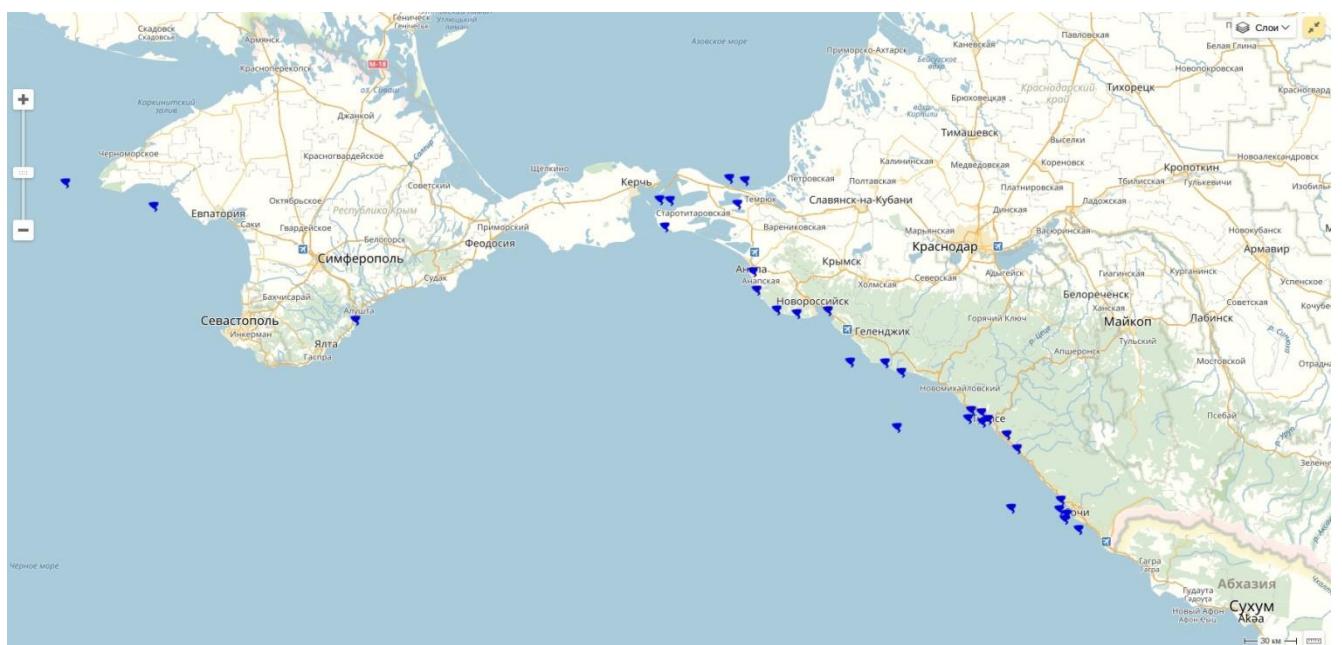


Рисунок 2.8 – Положение черноморских смерчей в 2014 г.

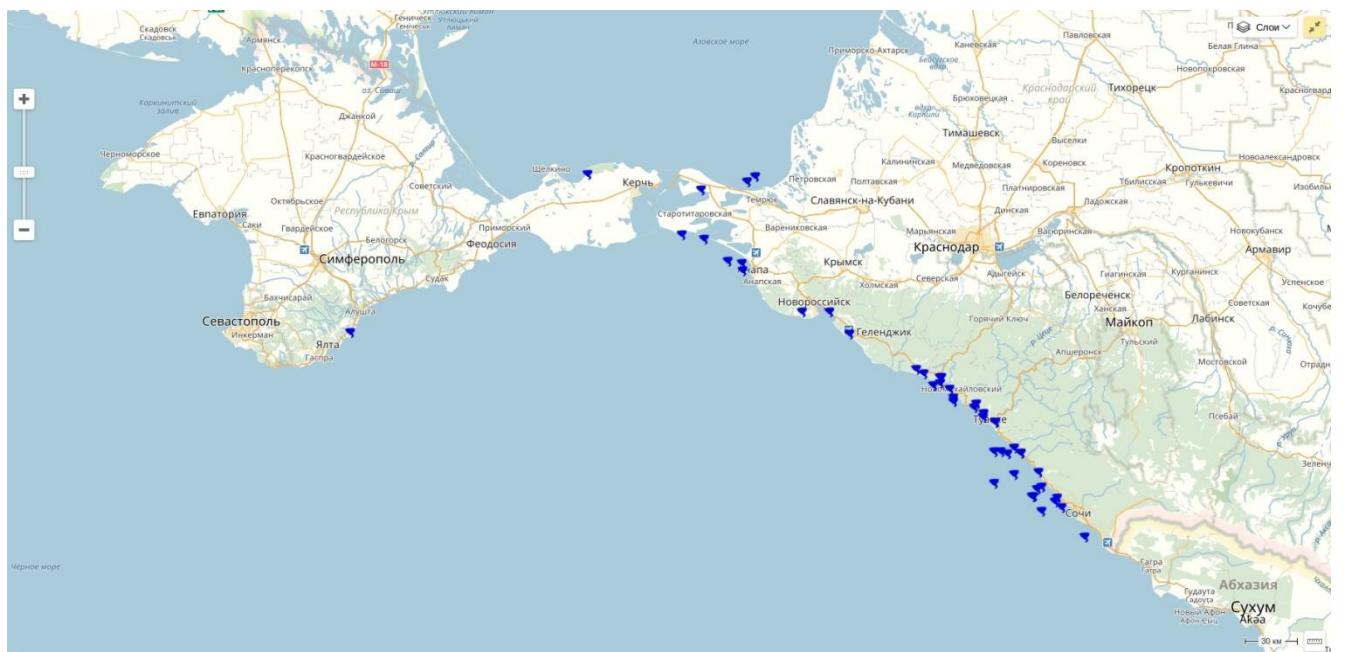


Рисунок 2.9 – Положение черноморских смерчей в 2015 г.

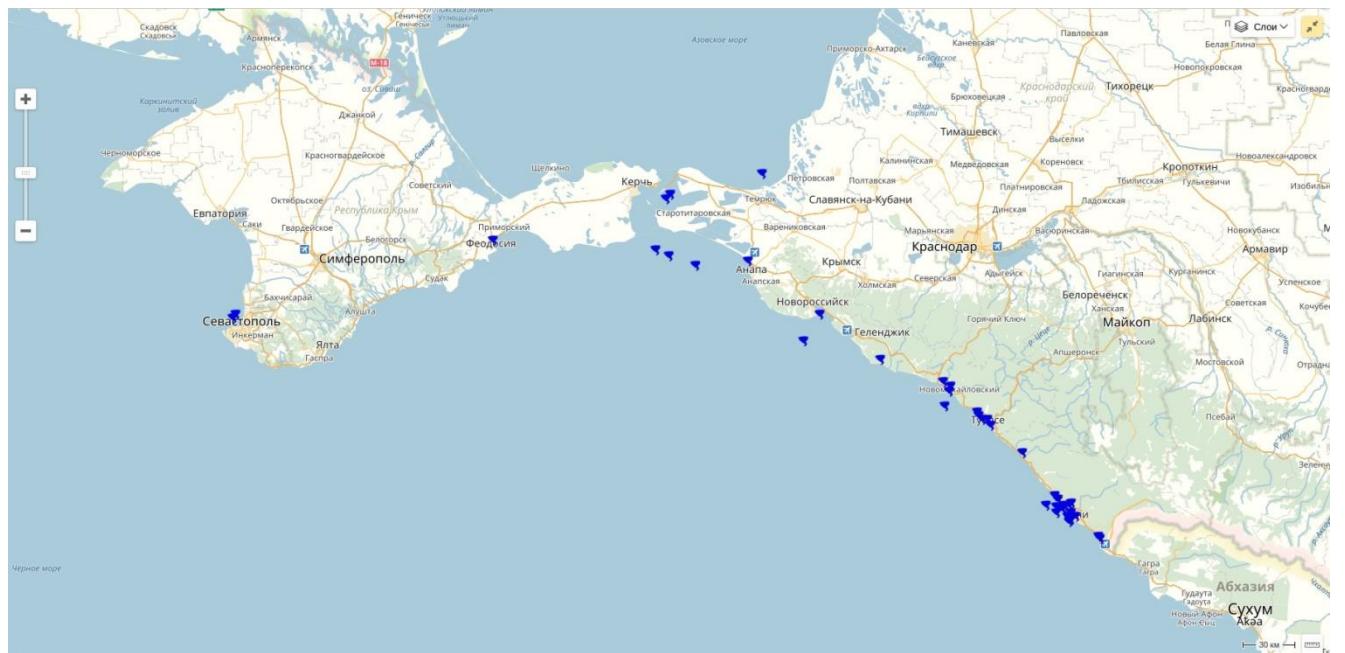


Рисунок 2.10 – Положение черноморских смерчей в 2016 г.

Полученное распределение согласуется с имеющимися данными о смерчах над Черным морем из каталога смерчей на территории бывшего СССР за период 1844-1988 гг. и Российской Федерации за период 1987-2001 гг. [54]. В 44% случаев, упомянутых в каталоге, смерчи регистрировали в районе г. Туапсе, в 38% случаев – в районе г. Сочи, остальные смерчи наблюдались на участке г. Анапа – г. Геленджик.

2.3.3 Временные характеристики смерчей

В 2014 г. сезон смерчей над Черным морем продлился с мая по сентябрь, исключением стал смерч в конце декабря. В течение 23 дней было зафиксировано 32 смерча (рисунок 2.11), из которых 31 смерч имел малую интенсивность (EF0 по улучшенной шкале Фудзиты). Смерч, возникший 21 июля вблизи г. Анапа, по свидетельствам очевидцев вышел на сушу и нанес незначительный ущерб имуществу отдохнувших на побережье людей, что подтверждается опубликованными в сети Интернет фотографиями. Вследствие этого он был отнесен к промежуточной категории EF0-EF1. В 2014 г. наибольшее количество смерчей отмечалось в июле (рисунок 2.12), а по времени суток смерчи чаще всего возникали с 9 до 10 ч по ВСВ (рисунок 2.13).

В 2015 г. сезон смерчей над Черным морем продлился с апреля по октябрь. В течение 20 дней было зафиксировано 46 смерчей (рисунок 2.11), что почти в полтора раза превышает аналогичный показатель в 2014 г. Рост случаев смерчей при общем уменьшении количества дней со смерчами в 2015 г. по сравнению с прошлым годом объясняется несколькими вспышками смерчей (*waterspout outbreaks*) – случаями их массового появления в один день. Так, если в 2014 г. отмечался всего один день, когда в течение нескольких часов было зарегистрировано более трех смерчей, то в 2015 г. количество таких дней увеличилось до трех. Все смерчи, возникшие в 2015 г., имели малую интенсивность и соответствовали категории EF0 по улучшенной шкале Фудзиты. Наибольшее количество смерчей в 2015 г. отмечалось в июне (рисунок 2.12), а по времени суток смерчи чаще всего регистрировали с 6 до 7 ч, с 9 до 10 ч и с 16 до 17 ч по ВСВ (рисунок 2.13).

В 2016 г. сезон смерчей над Черным морем продлился с мая по октябрь, исключением стал смерч в начале декабря. В течение 21 дня было зафиксировано 40 смерчей (рисунок 2.11). По сравнению с предыдущими годами количество дней со смерчами практически не изменилось. Что касается количества смерчей, то отмечается снижение на 13% по сравнению с 2015 г. и рост на 25% по сравнению с 2014 г. Как и в предыдущем году в 2016 г. были зарегистрированы три вспышки смерчей. Все смерчи, возникшие в 2016 г., имели малую интенсивность и соответствовали категории EF0 по улучшенной шкале Фудзиты. Наибольшее количество смерчей в 2016 г. отмечалось в сентябре (рисунок 2.12), а по времени суток смерчи чаще всего регистрировали с 5 до 6 ч по ВСВ (рисунок 2.13).

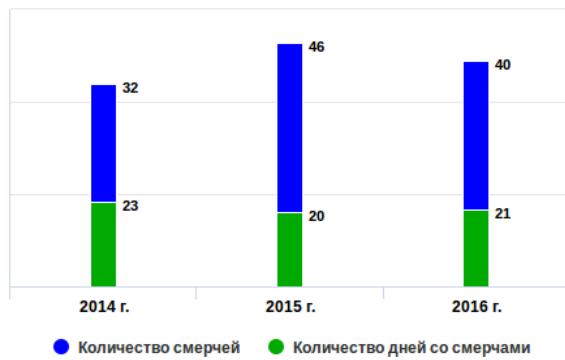


Рисунок 2.11 – Количество смерчей и дней со смерчами у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым за период с 2014 по 2016 гг.

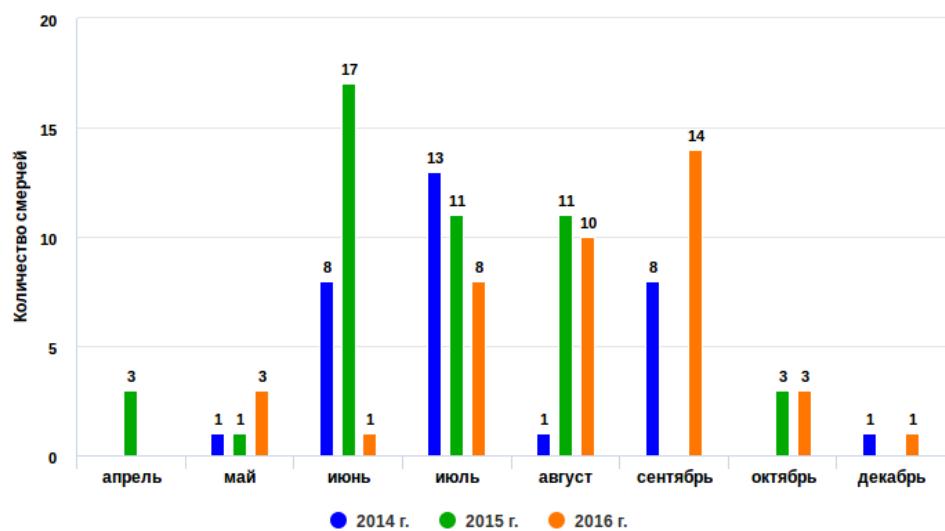


Рисунок 2.12 – Годовой ход смерчей у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым за период с 2014 по 2016 гг.

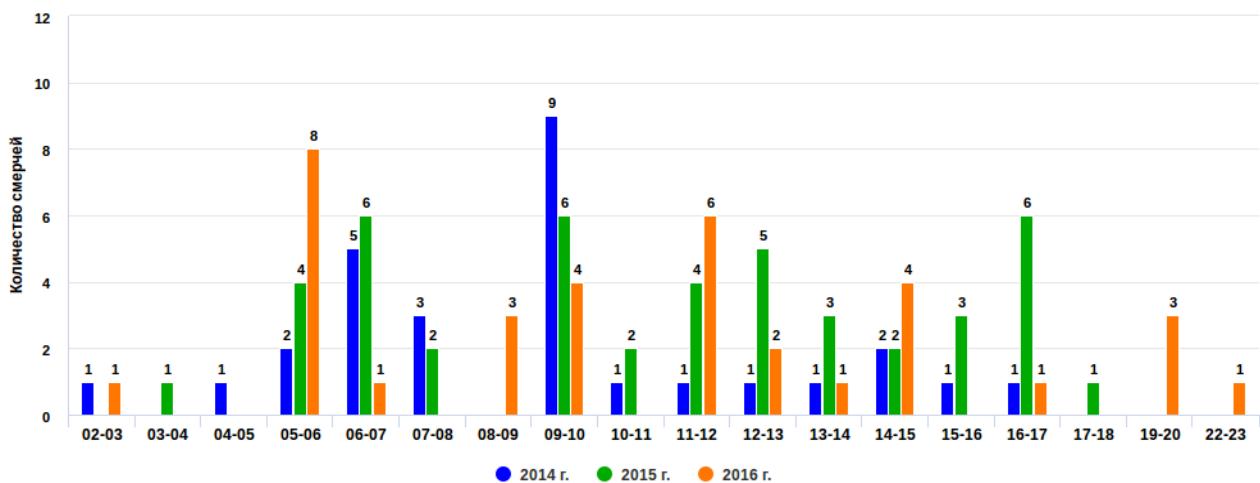


Рисунок 2.13 – Суточный ход (по ВСВ) смерчей у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым за период с 2014 по 2016 гг.

Полученные данные уточняют ранее имевшееся представление о ежегодном количестве смерчей над Черным морем. Так, в работах Д.К. Старова и Н.И. Попова [37, 51] упоминается о том, что за 10 лет над морем было зафиксировано 25-30 смерчей, т.е. в среднем три смерча за год, а в работе Д.В. Наливкина [36] – что за 6 лет было 24 смерча, т.е. четыре смерча за год. Результаты анализа каталога смерчей [54] свидетельствуют о том, что за период с 1954 по 2001 гг. ежегодное количество смерчей над Черным морем варьировалось от одного до семи, и в среднем составило три смерча за год.

По-видимому, в поле зрения упомянутых авторов и составителей каталога смерчей попадали лишь самые заметные случаи, которые либо оставляли после себя разрушения, либо были у всех на виду, т.к. представляется маловероятным, что за последние 60 лет ежегодное количество смерчей над Черным морем увеличилось с 4 почти до 40, т.е. практически в 10 раз. Подобную тенденцию отчасти можно объяснить появлением новых способов распространения информации о смерчах (посредством сети Интернет), благодаря которым удается учесть даже самые слабые и непродолжительные случаи, которые ранее обычно не принимались во внимание. В работе [63] увеличение числа зарегистрированных случаев не только водных, но и сухопутных смерчей, установленное по результатам анализа специально созданной базы данных о смерчах в Северной Евразии, также связывают с неоднородностью источников информации. Не следует, тем не менее, исключать и объективного роста количества смерчей вследствие изменения климата. В подтверждение этого в работе [62] приводятся результаты анализа изменения условий смерчегенеза в Северной Евразии за период с 1979 по 2016 гг., которые демонстрируют рост повторяемости в данном регионе метеорологических событий, способствующих возникновению смерчей. На основании этих результатов было установлено, что наиболее значимые изменения в сторону увеличения риска смерчегенеза отмечаются на Черноморском побережье и юге Дальнего Востока.

Годовой ход смерчей, упомянутых в каталоге [54], определялся периодом с июня по сентябрь. При этом отмечались единичные случаи регистрации смерчей в феврале и в марте, а также в октябре и в ноябре. По времени чаще всего смерчи регистрировали с 6 до 15 ч по ВСВ. Данные факты, в целом, согласуются с полученными данными (рисунки 2.12 и 2.13).

За приведенный в каталоге [54] период 11 смерчей вышли на сушу. Наиболее разрушительные смерчи наблюдались вблизи г. Сочи и г. Туапсе в 1991 г. [74]. Большинство смерчей все же распадалось в море, не достигнув побережья. Таким образом, характер их интенсивности также согласуется с полученными в 2014-2016 гг. данными.

2.3.4 Характеристики материнских облачных ячеек смерчей

В перечень анализируемых по спутниковым данным (Meteosat-10 и Meteosat-11) параметров материнских облачных ячеек достоверных случаев смерчей вошли наиболее информативные показатели, архивируемые в ходе работы технологии мониторинга: температурные параметры ячеек на верхней границе облачности (ВГО) – максимальная (температурный порог выделения границ ячейки) и минимальная BT10.8 в пределах ячейки, а также их разность, средняя BT10.8 в пределах ячейки, коэффициент расширения и коэффициент охлаждения области ячейки, продолжительность жизни, категория природы, скорость и направление перемещения ячейки, интенсивность осадков, фаза жизненного цикла и наличие купола – вершины ячейки, располагающейся выше уровня тропопаузы. Значения указанных параметров анализировались в момент времени, наиболее приближенный к моменту регистрации смерча.

На рисунках 2.14-2.23 приведены гистограммы распределения значений числовых параметров и сглаживающие их кривые, а на рисунках 2.24 и 2.25 – распределения значений категориальных параметров.

Из рисунков 2.14, 2.15 и 2.17 видно, что, в целом, все рассмотренные температурные параметры имели довольно большой разброс значений. Максимальная BT10.8 (рисунок 2.14), варьировалась от -48 до 15 °C, а на гистограмме выделялись диапазоны трех локальных максимумов: [-34 °C, -30 °C], [-8 °C, -4 °C] и [7 °C, 11 °C], соответствующих наиболее часто встречающимся значениям температурного порога.

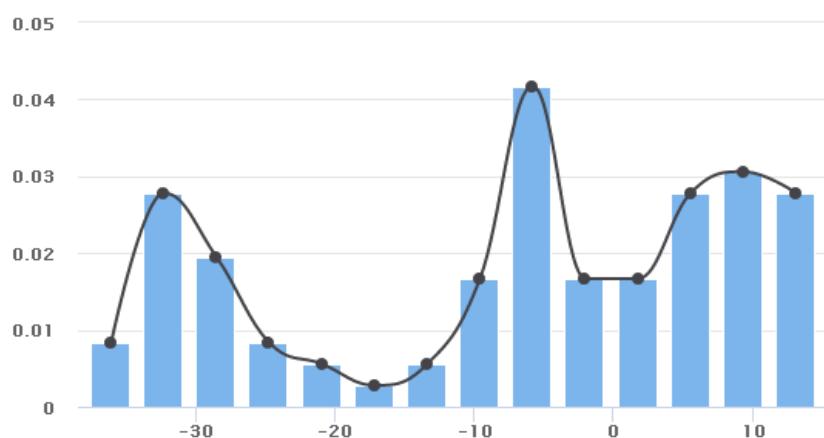


Рисунок 2.14 – Гистограмма распределения значений максимальной BT10.8 в пределах материнских ячеек смерчей, в °C

Минимальная BT10.8 (рисунок 2.15) варьировалась от -58 до 8 °C. На соответствующей гистограмме прослеживались два преобладающих диапазона [-50 °C, -35 °C] и [-10 °C, 0 °C],

характеризующие соответственно облака с большой высотой ВГО и более слабо развитые по вертикали облака, для которых ВГО была не так высока. Для сравнения минимальная BT10.8 суперячейковых смерчевых облаков, формирующихся на Европейской территории России и на Урале на фоне сильной конвективной неустойчивости, как показано в работе [69], ниже -60°C , а формирующихся на фоне умеренной или слабой неустойчивости для проанализированных в работе [69] случаев смерчей находилась в пределах от -57 до -47°C .

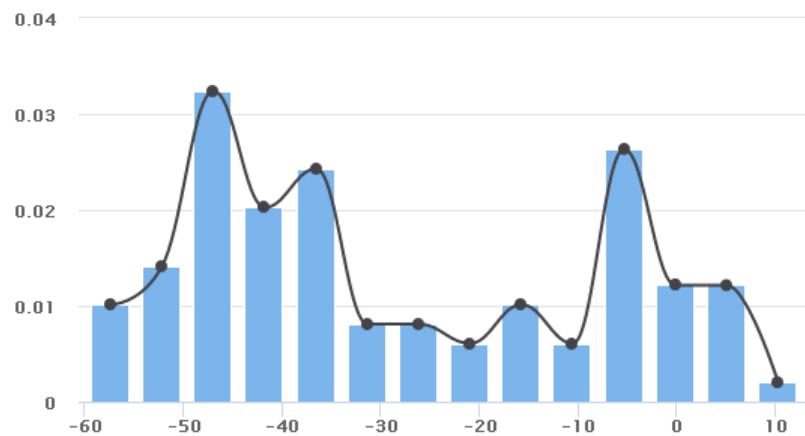


Рисунок 2.15 – Гистограмма распределения значений минимальной BT10.8 в пределах материнских ячеек смерчей, в $^{\circ}\text{C}$

Разность между максимальной и минимальной BT10.8 (рисунок 2.16) распределялась практически по экспоненциальному закону. В большинстве случаев она не превышала 17°C . Средняя BT10.8 (рисунок 2.17) варьировалась от -51 до 13°C , а ее распределение по форме более напоминало равномерное.

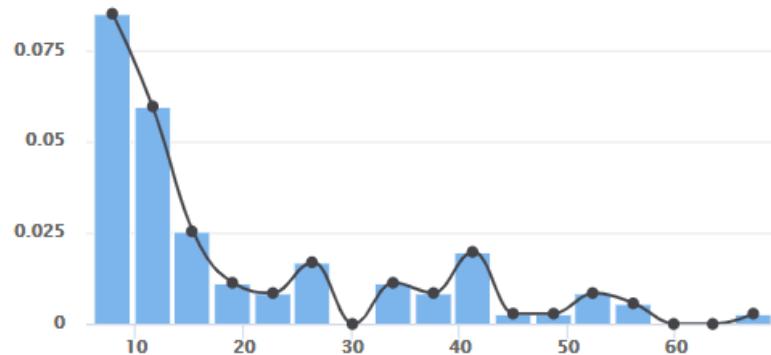


Рисунок 2.16 – Гистограмма распределения разности между максимальной и минимальной BT10.8 в пределах материнских ячеек смерчей, в $^{\circ}\text{C}$

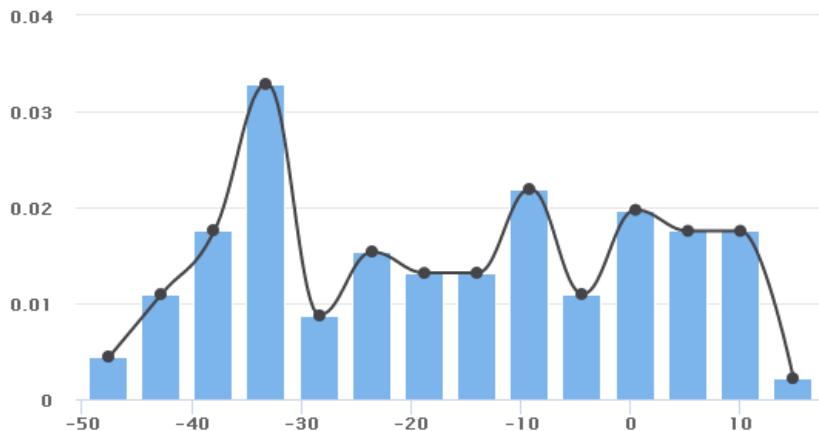


Рисунок 2.17 – Гистограмма распределения значений средней BT10.8 в пределах материнских ячеек смерчей, в °C

Полученные распределения значений температурных параметров, ввиду их большой вариации, не позволяют однозначно выделить критические значения подобно тем, которые используются в методике распознавания конвективных стихийных явлений [3].

Значения коэффициентов расширения k_{exp} и охлаждения k_{col} имели распределение по форме схожее с нормальным (рисунки 2.18 и 2.19). Для их расчета используются следующие формулы:

$$k_{\text{exp}} = \frac{A_v - A_b}{A_b} \cdot \frac{1}{t_v - t_b} \quad (2.1)$$

$$k_{\text{col}} = \frac{T_{\min v} - T_{\min b}}{t_v - t_b}, \quad (2.2)$$

где A_v (A_b) и $T_{\min v}$ ($T_{\min b}$) – площадь и минимальная BT10.8 в пределах ячейки в текущий t_v (предыдущий t_b) момент времени.

На гистограмме коэффициента расширения выделялся явный максимум, расположенный вблизи нулевого значения. Большая часть значений при этом лежала в положительной области, что говорит о том, что формирование смерчей происходило в условиях увеличения горизонтальных размеров их материнских ячеек.

Что касается коэффициента охлаждения, то для него на гистограмме также выделялся явный максимум, расположенный уже в области отрицательных значений. Таким образом, в моменты возникновения смерчей минимальная BT10.8 в пределах большинства ячеек понижалась, т.е. облако вытягивалось вверх. С учетом вышеупомянутого увеличения горизонтальных размеров это увеличение ВГО свидетельствует о нахождении ячеек в стадии роста.

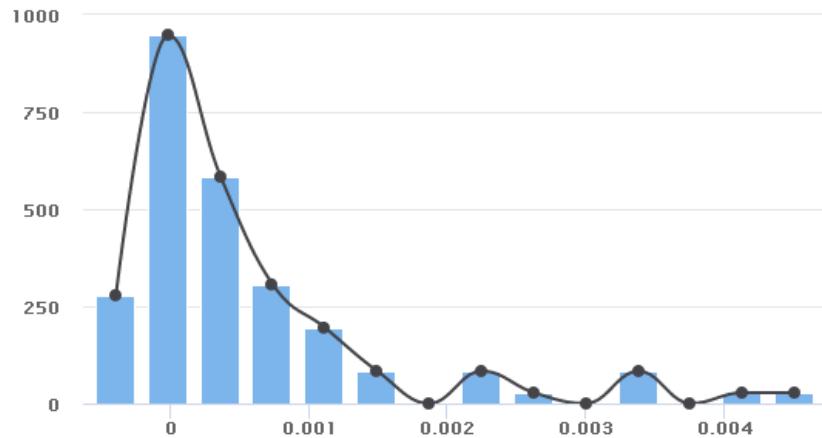


Рисунок 2.18 – Гистограмма распределения значений коэффициента расширения материнских ячеек смерчей, в $1/\text{с}$

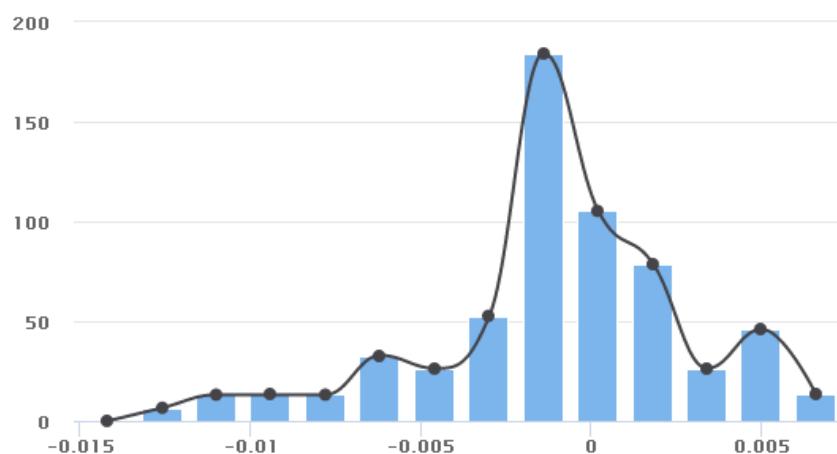


Рисунок 2.19 – Гистограмма распределения значений коэффициента охлаждения материнских ячеек смерчей, в $^{\circ}\text{С}/\text{с}$

Значения продолжительности жизни ячеек на момент формирования из них смерчей распределялись практически по экспоненциальному закону (рисунок 2.20). Для основной массы ячеек эта продолжительность не превышала 3 часов. Чаще всего смерчи образовывались в интервале 0-30 мин от начала жизни ячейки. Для 11 ячеек момент регистрации смерча совпадал с моментом их первого обнаружения по спутниковым данным.

Скорость перемещения ячеек варьировалась от 0 до 31 м/с (рисунок 2.21). Максимум распределения приходился на диапазон 3-6 м/с. Что касается направления перемещения, то оно в основном было ориентировано на северо-восток или восток (рисунок 2.22). Данная ориентация согласуется с известными данными о преобладающем северном и северо-восточном направлении перемещения циклонов и активных волновых возмущений, в условиях которых формируется подавляющее большинство смерчей в России [58].

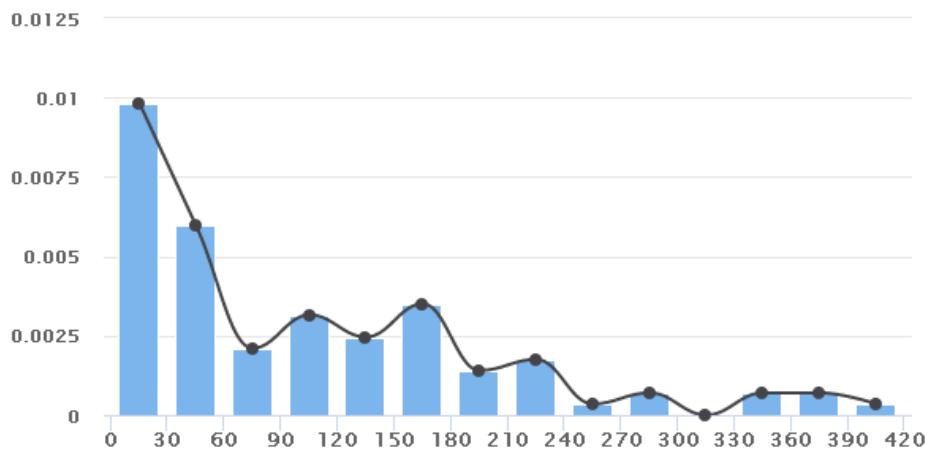


Рисунок 2.20 – Гистограмма распределения значений продолжительности жизни материнских ячеек на момент формирования из них смерчей, в мин

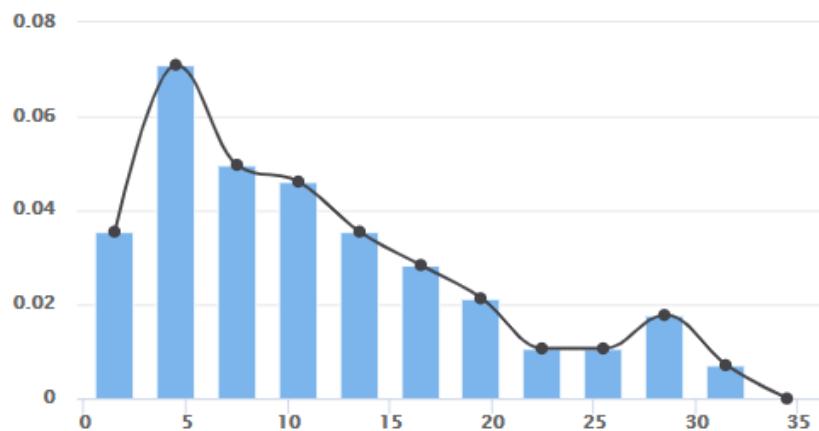


Рисунок 2.21 – Гистограмма распределения значений скорости перемещения материнских ячеек смерчей, в м/с

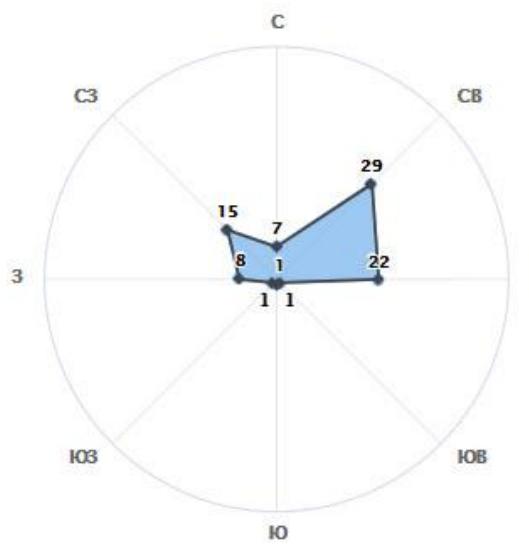


Рисунок 2.22 – Распределение материнских ячеек смерчей по направлению их перемещения

Интенсивность осадков материнских ячеек смерчей не превышала 8 мм/ч (рисунок 2.23). В большинстве случаев она изменялась в пределах от 0 до 2 мм/ч. Для расчета интенсивности осадков в ПО SAFNWC/MSG v.2013 используется специально откалиброванная по радиолокационным данным эмпирическая функция, зависящая от BT IR10.8, разности BT IR10.8 и WV6.2, а также от отражаемости в спектральном канале VIS0.6 [129].

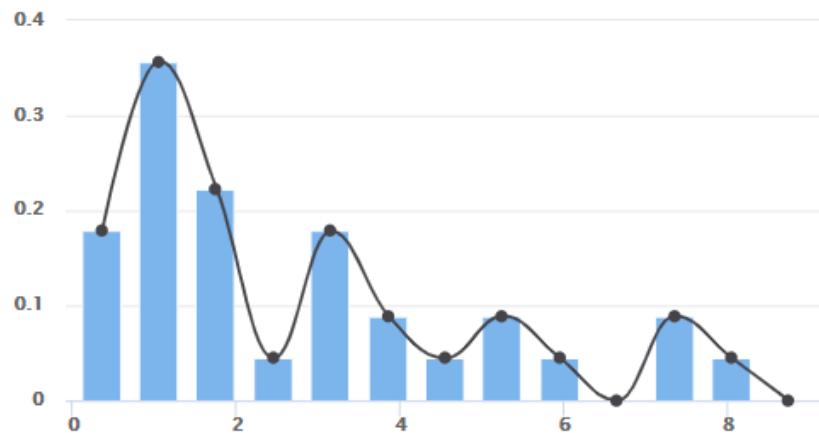


Рисунок 2.23 – Гистограмма распределения значений интенсивности осадков материнских ячеек смерчей, в мм/ч

Классификация ячеек по природе происхождения осуществлялась с использованием встроенной в модуль RDT линейной дискриминантной функции. Ввиду того, что в перечень предикторов данной функции входят параметры, характеризующие динамику состояния ячейки, для впервые обнаруженных 11 материнских ячеек смерчей классификация не производилась. Среди оставшихся 84 ячеек 30 были классифицированы как конвективные, 21 ячейка отнесена к классу неконвективных, для 33 ячеек определить природу их происхождения не удалось.

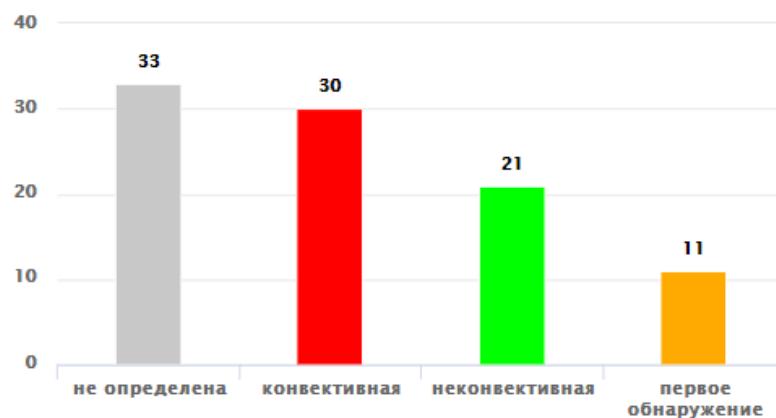


Рисунок 2.24 – Распределение материнских ячеек смерчей по категориям природы

На рисунке 2.25 показано распределение материнских ячеек смерчей по стадиям жизненного цикла, исходя из которого видно, что, как и было установлено ранее, большинство смерчей возникало в моменты, когда их материнское облако находилось в стадии роста, в меньшей степени – в стадии зрелости. При присвоении стадий жизненного цикла в модуле RDT учитывается динамика минимальной BT10.8 в пределах ячейки, а также коэффициентов охлаждения и расширения ячейки.

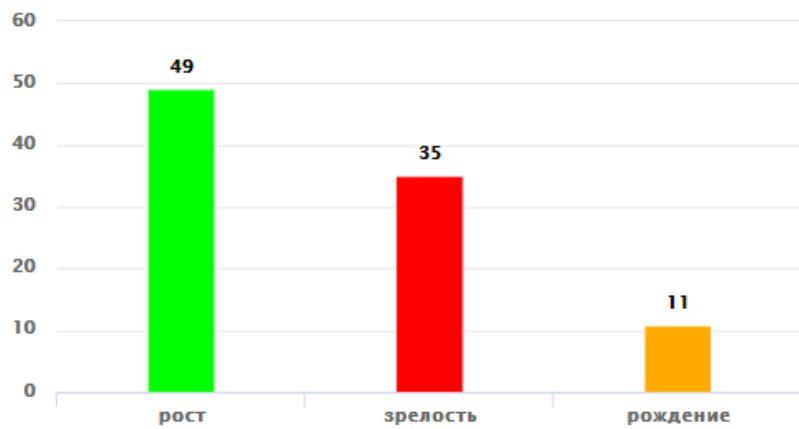


Рисунок 2.25 – Распределение материнских ячеек смерчей по стадиям жизненного цикла

Анализ динамики температурных параметров материнских ячеек смерчей показал, что для большинства ячеек момент возникновения смерча совпадал или был близок к моменту достижения максимума разности между максимальной и минимальной BT10.8 в пределах ячейки (рисунок 2.26). По-видимому, этот момент соответствовал и достижению максимальной вертикальной протяженности облака. Как правило, в этот момент отмечалась и наибольшая высота ВГО ячейки по BT10.8 за все время ее жизни. Схожие выводы об уменьшении BT10.8 в окрестности места регистрации смерча при приближении к моменту его формирования были представлены в работе [119]. Выявленная особенность может быть использована для уточнения времени появления смерча, а также в процессе выявления смерчевых облаков – устойчивый рост облака по вертикали при наличии угроз возникновения смерчей может свидетельствовать о все возрастающей вероятности их появления. Для остальных параметров подобных закономерностей установить не удалось.

Для всех ячеек, классифицированных как конвективные, в пределах их границ выделялась область минимальных значений BT10.8, соответствующих наиболее холодной части облака, которая впоследствии фигурировала как отдельная ячейка (рисунок 2.27). Выделение подобных вышележащих ячеек свидетельствует о ярко выраженной вершине облака. По результатам работы модуля RDT случаев пробоя тропопаузы для материнских ячеек смерчей выявлено не было, что вполне очевидно, поскольку данные случаи, как правило,

свойственны суперячейкам. Для определения высоты тропопаузы использовались результаты расчетов по модели GFS с шагом сетки 0.5° .

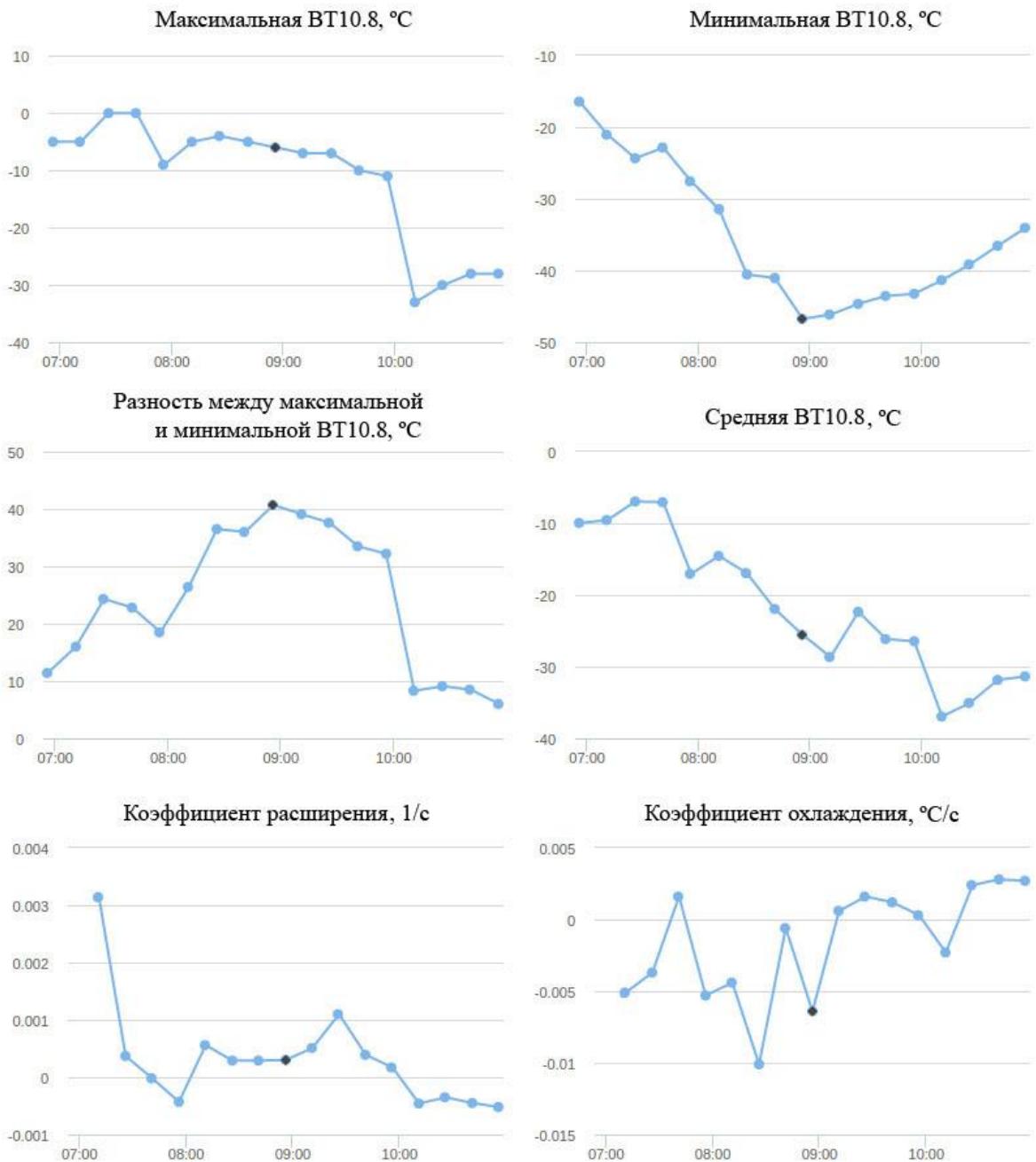


Рисунок 2.26 – Динамика параметров материнской ячейки на примере смерча 8 июля 2014 г. вблизи г. Туапсе (черным цветом обозначен момент регистрации смерча)

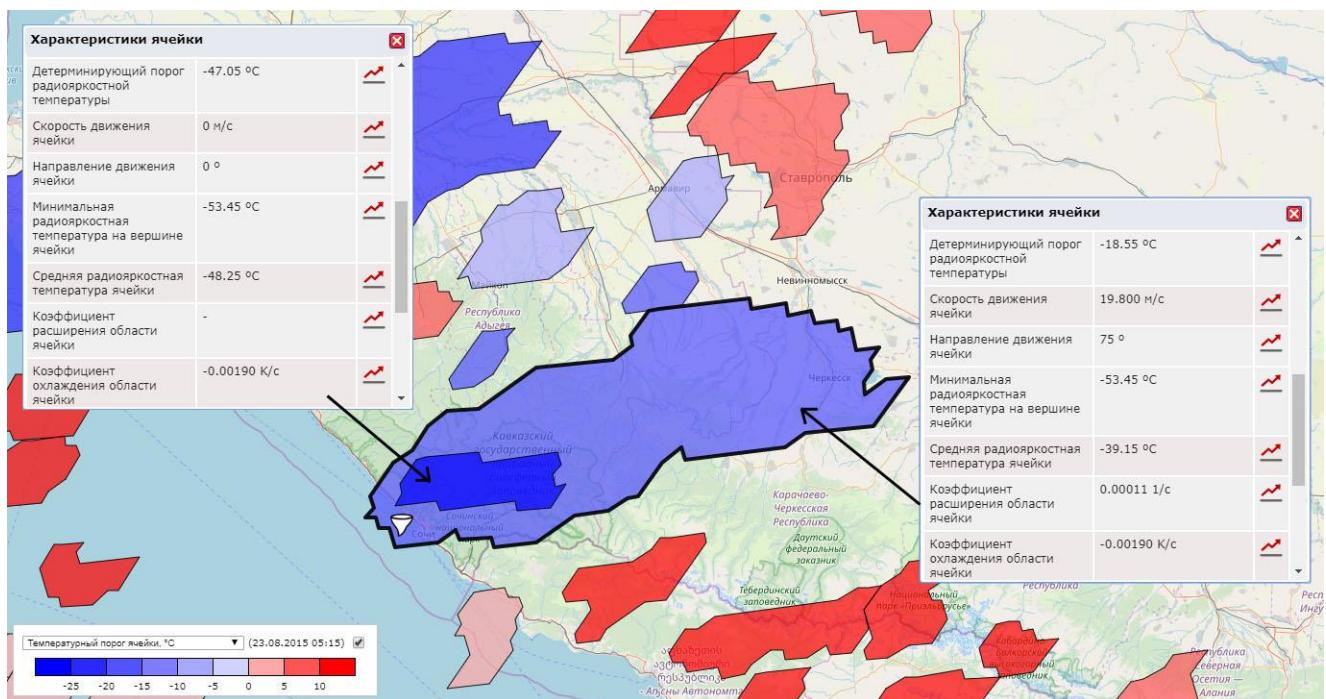


Рисунок 2.27 – Материнская ячейка с вышележащей более холодной ячейкой (вершиной) на примере смерча 23 августа 2015 г. вблизи г. Сочи

По результатам анализа распределений параметров смерчевых облаков над Черным морем по спутниковым данным была опубликована статья в сборнике материалов международной конференции «Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления»)» [29].

В дополнение к рассмотренным выше параметрам ячеек по спутниковым данным были также проанализированы радиолокационные данные в моменты формирования смерчей, грозопеленгационные данные на протяжении времени жизни их материнских ячеек и фотографии и видеозаписи смерчей, опубликованные очевидцами.

По радиолокационным данным для ячеек смерчей анализировались значения ВГО (НВГО), максимальной отражаемости в слое 0-11 км (dBZ_m), вертикально интегрированной водности (VIL – Vertically Integrated Liquid) [17], максимальной скорости конвективного потока (W_m) [2], интенсивности осадков (R) и код метеоявления (C_y). Для характеристики ячейки использовались максимальные значения указанных параметров в пределах ее области. Значения dBZ_m , VIL и W_m рассчитывались по исходным радиолокационным данным:

$$dBZ_m = \max_{i \in [0,11]} (dBZ_i) \quad (2.3)$$

$$VIL = 3.44 * 10^{-6} * \sum_{i \in [1,11]} [(Z_i + Z_{i+1}) / 2]^{4/7} * \Delta h \quad (2.4)$$

$$W_m = 1.33 * [0.038 * H_{BGO} * (dBZ_m - 18) + 3.52] + 4, \quad (2.5)$$

где dBZ_i и Z_i – значение горизонтальной отражаемости в i -слое соответственно в единицах dBZ и $\text{мм}^6/\text{м}^3$, Δh – разность высот между уровнями i и $i+1$ в м.

Анализ проводился для 11 ячеек, для которых в архиве, созданном по результатам работы технологии мониторинга в 2015-2016 гг., имелись соответствующие им радиолокационные данные. Пробелы в наличии данных были обусловлены используемой схемой их получения. Оперативный прием данных от ДМРЛ «Краснодар» из Авиаметтелеом Росгидромета был включен в работу технологии мониторинга лишь в конце 2016 г. Что касается ДМРЛ «Ахун», то в течение рассматриваемого периода для него функционировала схема получения данных из Института радарной метеорологии (ИРАМ), и в этой схеме нередко отмечались сбои, вследствие чего данные не поступали.

Значения Н_{ВГО} для проанализированных ячеек варьировались в пределах от 9 до 13 км, dBZ_m – от 20 до 40 dBZ, что характерно для кучево-дождевых облаков [2], VIL – от 0.2 до 6 $\text{kг}/\text{м}^2$, W_m – от 11 до 21 м/с. Ся в большинстве случаев соответствовал наличию осадков, а их интенсивность R изменялась в диапазоне от 0.22 до 17 $\text{мм}/\text{ч}$, что выше аналогичных оценок, полученных по спутниковым данным. В области двух ячеек отмечалась грозовая активность, им же соответствовали наиболее высокие значения указанных параметров.

Полученные пределы Н_{ВГО}, в целом, согласуются с ранее известными оценками вертикальной мощности материнских облаков смерчей над Черным морем. В работе [51] по результатам обобщения данных о четырех черноморских смерчах в 1954 г., два из которых сопровождались грозой, было установлено, что соответствующие значения мощности для полностью развитых смерчей составляют 8.5-11 км, а для не до конца сформированных – 3-3.5 км.

Полученные значения dBZ_m и Н_{ВГО}, а также Ся несколько ниже тех пороговых значений, которые используются в методике распознавания ЗАК со смерчами и сильными шквалами [32]. Значения W_m также ниже характерных для смерчевых облаков значений в 35 м/с, упомянутых в работе [18]. По-видимому, подобное занижение можно объяснить тем, что при установлении этих порогов принимались во внимание случаи сильных смерчей, в то время как проанализированные случаи смерчей над Черным морем были значительно менее интенсивными. В подразделе 4.3 по результатам анализа радиолокационных данных в пределах материнских ячеек смерчей, наблюдавшихся в 2017 г., а также с учетом выше полученных данных для 11 ячеек в 2014-2016 гг. для dBZ_m , Н_{ВГО}, VIL и Ся были предложены новые адаптированные для рассматриваемого региона пороговые значения. На базе этих значений впоследствии было определено правило распознавания потенциальных смерчевых облаков.

По грозопеленгационным данным было установлено, что в 24% случаев в пределах материнских ячеек смерчей в течение времени их жизни отмечались грозовые разряды, которые

регистрировались на достаточно удаленном расстоянии от смерчей (в среднем ~ 23 км). Полученные данные, в целом, согласуются как с вышеотмеченными фактами регистрации гроз в материнских облаках смерчей по радиолокационным данным, так и с ранее известными данными [51].

Видеозаписи и фотографии смерчей, опубликованные очевидцами, свидетельствуют о хорошо развитой вертикальной структуре их материнских облаков (рисунок 1.15, рисунок 2.28). Редким исключением стали случаи, когда смерчи формировались из облаков хорошей погоды (*Cu hum*) (рисунок 1.1в).



Рисунок 2.28 – Смерч в районе г. Сочи 24 августа 2015 г. [фото с сайта vk.com]

2.3.5 Температурные и синоптические условия формирования смерчей

Для оценки температурных условий, при которых формировались черноморские смерчи, были проанализированы значения аномалии температуры поверхности моря ($SST_{\text{аномалия}}$) и разности температуры поверхности моря (SST) и температуры воздуха на уровне 850 гПа (T_{850}). Первый из указанных параметров определяет насколько текущее значение SST отличается от среднего. Положительное значение $SST_{\text{аномалия}}$ характеризует превышение текущего значения над средним, отрицательное – превышение среднего над текущим. Второй из указанных параметров отражает конвективную неустойчивость в нижнем слое атмосферы. Значение верхней границы данного слоя было позаимствовано из номограммы Силадьи. В качестве источника данных о $SST_{\text{аномалия}}$ и SST были использованы данные объективного анализа центра NCEP с шагом сетки 0.083° . Временной диапазон осреднения для расчета $SST_{\text{аномалия}}$ охватывал

период с 1961 по 1990 гг. [127]. Для анализа T_{850} были использованы результаты расчетов по модели GFS с шагом сетки 0.5° [121].

На рисунке 2.29 показаны множества значений рассматриваемых параметров для случаев смерчей из категории достоверных и вероятных.

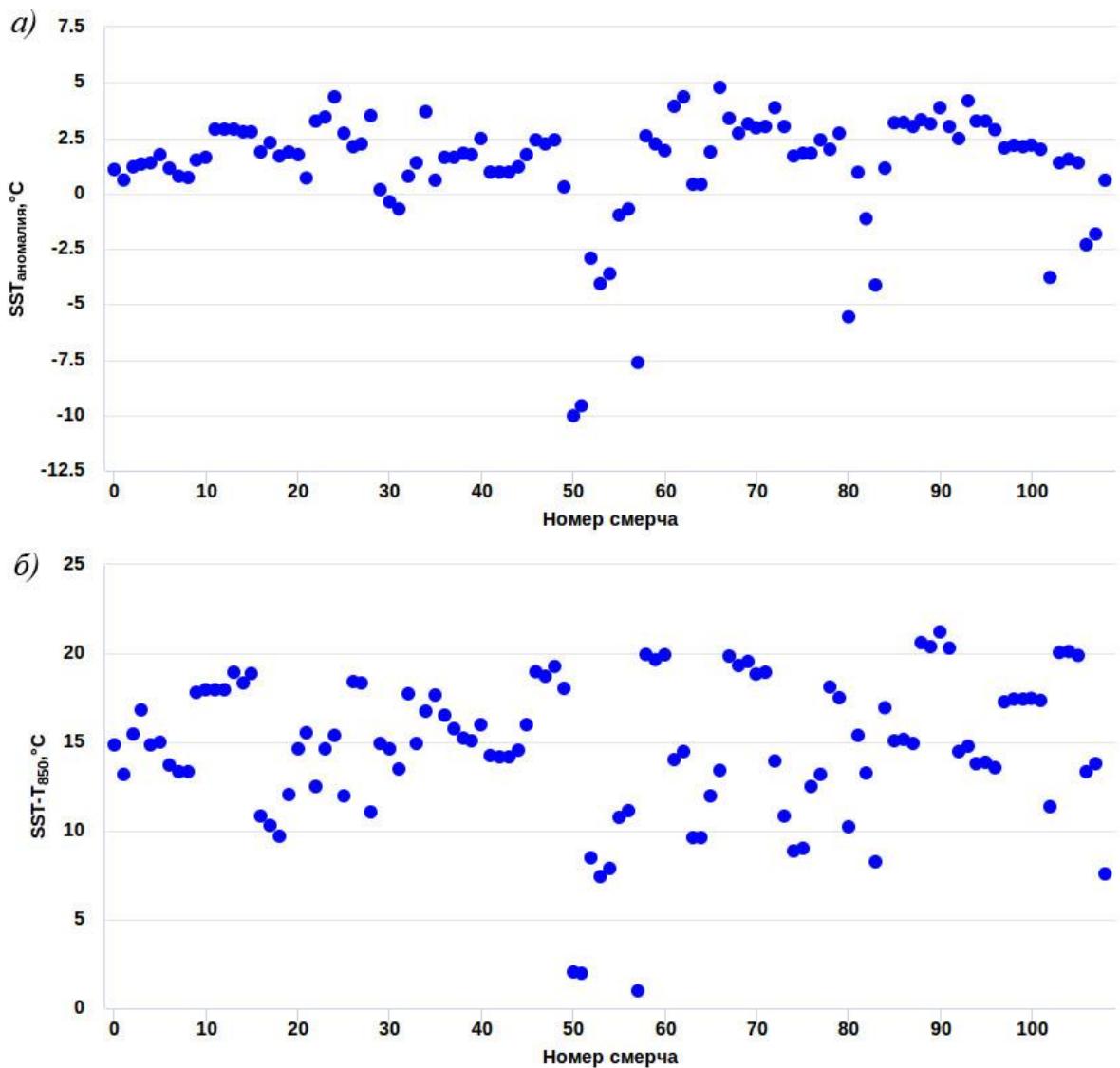


Рисунок 2.29 – Значения SST_{аномалия} и SST-T₈₅₀ для случаев регистрации смерчей у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым в 2014-2016 гг.

Из рисунка 2.29а видно, что в моменты возникновения большинства смерчей отмечалась положительная аномалия SST от 0 до 5 °C, указывающая на более сильный прогрев поверхности моря по сравнению со средним. Из рисунка 2.29б видно, что для основной массы рассматриваемых случаев разность температур SST и T_{850} лежала в интервале от 10 до 20 °C, что свидетельствует о наличии сильной конвективной неустойчивости. Из общего ряда значений как первого, так и второго параметра выделялось множество, соответствующее 3 смерчам, возникшим в приграничной с Азовским морем области. Для них отмечались резко

отрицательные значения SST_{аномалия} от -10 до -7.5 °C, а разность температур SST-T₈₅₀ была менее 2 °C.

В целом, отмеченные выше положительная аномалия SST и большой контраст температур SST и T₈₅₀, характерные для основной массы рассматриваемых случаев, позволяют сделать вывод о том, что в моменты возникновения смерчей существовали крайне неустойчивые условия, которые, по-видимому, и способствовали формированию восходящих потоков воздуха, давших начало материинскому облаку смерча, а впоследствии и самому смерчу. Полученные данные согласуются с представлением о возникновении смерчей у Черноморского побережья Кавказа при достаточном прогреве поверхности моря и значениях SST больших 20 °C, упомянутых в работе [58].

По результатам анализа синоптических карт было установлено, что в 70% случаев смерчи возникали в циклонах. Центры этих циклонов в основном располагались над морем в непосредственной близости от места регистрации смерча. Циклоны имели небольшие горизонтальные размеры. Чаще всего они охватывали территории, площадь которых составляла примерно от четверти до половины площади моря. В оставшихся 30% случаев смерчи возникали в горизонтально однородной воздушной массе.

Полученное выше распределение для черноморских смерчей с одной стороны, в целом, согласуется с известными данными о преобладающем на территории нашей страны формировании смерчей в циклонах [58], а с другой – определяет специфику условий смерчегенеза на рассматриваемой территории, задавая для нее новое соотношение синоптических ситуаций. Установленное шестикратное превышение повторяемости смерчей, возникающих в условиях горизонтально однородной воздушной массы, по сравнению с данными по всей стране в целом (5%) обусловлено физико-географическими особенностями акватории Черного моря, способствующими частому развитию термической конвекции. В рассматриваемой ситуации она играет основную роль в образовании мощных облаков, из которых впоследствии формируются малоинтенсивные смерчи [58].

По результатам рассмотрения характеристик смерчей в журнале «Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова» вып. 581 за 2016 г. была опубликована соответствующая статья [24].

Выходы по главе 2

Проведен обзор степени оснащения наблюдательной сети Росгидромета в черноморском регионе России. Отмечено, что территория Крыма не входит в зону охвата радиолокационными наблюдениями. Подчеркнута малочисленность станций аэрологического зондирования

атмосферы. В сегменте спутниковой сети по техническим характеристикам выявлено преимущество европейских спутников второго поколения серии Meteosat.

Разработана автоматизированная технология мониторинга смерчоопасных ситуаций вблизи Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым, обеспечивающая в непрерывном режиме ведение архива радиолокационных, спутниковых и грозопеленгационных данных, а также прогнозов по глобальной модели GFS.

По сообщениям очевидцев создан подробный архив случаев наблюдения смерчей у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым за период 2014-2016 гг. Предложен алгоритм верификации записей архива с привлечением спутниковых данных (Meteosat-10/11), по результатам применения которого установлено преобладание (81%) в архиве достоверных случаев наивысшей степени надежности.

Проведен анализ пространственных и временных характеристик смерчей из созданного архива. Отмечено практически десятикратное увеличение ежегодной повторяемости смерчей у Черноморского побережья России по сравнению с ранее известными данными, которое в большой степени объясняется появлением сети Интернет и связанной с ней возможностью быстрой публикации сообщений о смерчах. К наиболее смерчоопасным участкам акватории по количеству смерчей на единицу площади отнесены районы г. Сочи и г. Туапсе.

Впервые для рассматриваемого региона получены распределения параметров материнских ячеек смерчей по спутниковым данным. Отмечены большие вариации температурных параметров ячеек на ВГО. Выявлена преобладающая согласованность момента достижения максимальной вертикальной протяженности облака и максимальной ВГО по радиояркостной температуре с моментом формирования смерча. Определены основные черты материнских ячеек смерчей, согласующиеся с известными данными: активный рост, небольшая скорость и северо-восточное или восточное направление перемещения, в большинстве случаев конвективная природа происхождения, выпадение осадков и наличие ярко выраженной вершины облака.

Для ряда ячеек оценены значения их радиолокационных параметров, свидетельствующие о более низких порогах их возможного заблаговременного диагностирования по сравнению с известными порогами, полученными в ходе обобщения данных о смерчах на Европейской территории России. Отмечена возможность регистрации в ячейках грозовых разрядов на достаточно удаленном расстоянии от смерчей.

Подтверждены известные данные о температурных и синоптических условиях возникновения водяных смерчей. Отмечено шестикратное превышение повторяемости черноморских смерчей в условиях горизонтально однородной воздушной массы по сравнению с данными по всей России в целом.

3 Методика оценки смерчеопасности вблизи Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым

3.1 Использование современных методов диагностирования смерчей и прогнозирования смерчеопасных ситуаций

3.1.1 Алгоритм эффективного использования

При разработке алгоритма эффективного использования рассмотренных в подразделе 1.3 методов диагностирования смерчей и прогнозирования смерчеопасных ситуаций учитывалась специфика их работы, а также наличие необходимых данных мониторинга. Для каждого метода была дана оценка целесообразности его применения, а в случае положительного решения по использованию, определен состав входных данных.

Расчет индексов конвективной неустойчивости осуществляется по известным формулам, а для идентификации смерчеопасных ситуаций используются общеизвестные для них пороговые значения. Прозрачность и простота работы данного метода в совокупности с его широким применением во всем мире не вызывает сомнений в целесообразности его реализации в рассматриваемом регионе. Алгоритм реализации включает в себя разработку программных средств для расчета и визуализации полей индексов, приведенных в таблице 1.3. В качестве входных данных будут использованы результаты расчетов по модели высокого пространственно-временного разрешения, а также данные объективного анализа SST центра NCEP с шагом сетки 0.083° [127]. Численное моделирование будет осуществляться на базе модели WRF [150], начальные и граничные условия для которой будут задаваться по данным глобальной модели GFS с шагом сетки 0.5° , запрашиваемым с сервера NCEP [121].

Алгоритмы MDA и TDA схожи по своему подходу к обработке радиолокационных данных и по степени полноты имеющегося описания этапов их работы. В опубликованных работах [120, 137] приводятся формулы расчета параметров, используемых в качестве критериев распознавания, однако не для всех из них указываются пороговые значения. Таким образом, имеющейся информации об этих алгоритмах недостаточно для возможности их прямой реализации и последующего тестирования в новых условиях. Чтобы установить новые пороговые значения для выявления и классификации вихревых структур потребуется проведение дополнительной работы по обработке большого и непрерывного набора радиолокационных данных, охватывающих прибрежную акваторию Черного моря.

Возможность выполнения указанной работы ставится под сомнение по ряду причин. Во-первых, алгоритмы MDA и TDA были разработаны для диагностирования мезоциклонов и

возникающих из них смерчей, т.е. смерчей мезоциклонного происхождения, которые в пределах рассматриваемого региона, как правило, регистрируются крайне редко. Во-вторых, определить новые пороговые значения по собранным за период с 2014 по 2016 гг. наборам радиолокационных данных не представляется возможным, т.к. в этот период не было зафиксировано ни одного случая мезоциклонного происхождения. Также в этот период отмечались пропуски данных (в некоторые моменты времени данные от ряда ДМРЛ не поступали) и непостоянство зоны охвата наблюдениями (в своем окончательном составе радарная сеть черноморского региона России была развернута лишь во второй половине 2015 г.).

Таким образом, использовать алгоритмы MDA и TDA в рассматриваемом регионе имеет смысл только при наличии необходимой для их адаптации обучающей выборки, на сбор которой, по-видимому, потребуется довольно длительное время. В течение этого времени не исключается возможность появления новых методов обработки радиолокационных данных. Указанные соображения позволяют сделать вывод о неэффективности реализации алгоритмов MDA и TDA, вследствие чего следует исключить их из дальнейшего рассмотрения.

Опубликованное в работе [104] описание этапов работы алгоритма TRT является по большей части обзорным. По этой причине заложенные в его основу идеи следует рассматривать как возможное направление работ по выявлению облачных ячеек с использованием радиолокационных данных. Схожую задачу только с применением уже спутниковых данных решает алгоритм RDT, о котором пойдет речь ниже. Он позволяет получить более детальную информацию о каждой ячейке.

Подход к оценке смерчеподобности той или иной облачной ячейки, предварительно выделенной в ходе обработки спутниковых данных, взамен непосредственного выделения областей конвективной облачности по исходных данным о радиояркостной температуре, представляется более эффективным в плане дальнейшей работы с уже имеющимся набором параметров ячейки с целью выбора наиболее информативных из них. Кроме того данный подход широко используется в Европе, в частности, в рассмотренном в подразделе 1.3.3 проекте COALITION [122]. По этой причине, а также ввиду наличия готовой программной реализации алгоритма RDT в виде соответствующего модуля ПО SAFNWC/MSG v.2013, данный алгоритм был протестирован на выборке смерчей 2014-2016 гг. На основе результатов его работы проводилась верификация собранного архива, и впоследствии анализировались характеристики материнских облачных ячеек смерчей.

Суть метода номограммы Силады представляется вполне понятной для своей реализации. Для нахождения граничных точек номограммы следует провести оцифровку ее изображения, опубликованного в работе [139]. Однако отсутствие информации о таблице

соответствия, используемой для перехода от номограммы к индексу SWI, сужает возможную оценку смерчеопасности по данному методу до двух категорий: прогноз смерчей и прогноз отсутствия смерчей, в то время как значение индекса SWI позволило бы более точно указать вероятность возникновения смерчеопасной ситуации.

Одним из возможных последствий указанного ограничения по использованию метода номограммы Силадьи может стать увеличение количества ложных прогнозов за счет выдачи прогноза смерчей при любом положительном значении индекса SWI. Тем не менее, поскольку этот метод является наиболее известным на момент написания диссертационной работы методом, ориентированным на прогноз водяных смерчей, целесообразность его реализации не вызывает сомнений. Алгоритм реализации этого метода предусматривает расширение функциональности ранее упомянутых программных средств расчета индексов конвективной неустойчивости путем включения в их состав функций расчета используемых в методе предикторов и определения принадлежности точки к смерчеопасной области на номограмме. В качестве входных данных будут использоваться те же данные, что и в случае расчета индексов конвективной неустойчивости атмосферы.

Метод прогноза сильных ветров и смерчей на базе статистических моделей внедрен в оперативную практику ряда УГМС. В публикациях авторов данного метода приводятся сведения о том, что по результатам его работы многие смерчи над Черным морем были предупреждены [49], однако более детальные оценки его эффективности в рассматриваемом регионе не известны.

Рассмотренные в подразделе 1.4.6 обобщения синоптических условий, при которых на территории России формируются смерчи, в целом, могут быть выражены в виде возможных предикторов их прогноза, многие из которых уже учтены в индексах конвективной неустойчивости атмосферы из таблицы 1.3. В подразделе 3.2 дается описание метода определения регионального индекса для прогноза водяных смерчей немезоциклонального происхождения, перечень предикторов которых был составлен, в том числе, и с учетом рассмотренных обобщений.

Таким образом, в соответствии с предлагаемым алгоритмом для черноморского региона будут реализованы и протестированы два метода краткосрочного прогноза смерчеопасных ситуаций: метод, базирующийся на индексах конвективной неустойчивости атмосферы и метод номограммы Силадьи. По аналогии с подходом, положенным в основу работы проекта COALITION для потенциального присвоения риска возникновения смерча из той или иной облачной ячейки в перечень используемых методов также включается алгоритм RDT, который уже показал свою эффективность по выделению границ облачных ячеек в рассматриваемом регионе (подраздел 2.3.1).

3.1.2 Реализация методов

В процессе реализации метода прогноза смерчеопасных ситуаций на базе индексов конвективной неустойчивости атмосферы был разработан программный модуль CONV_IND. Разработка велась на языке программирования Fortran.

В качестве входных данных для модуля CONV_IND используется следующий перечень параметров в узлах расчетной сетки:

- давление на расчетных уровнях;
- температура воздуха на расчетных уровнях;
- относительная влажность воздуха на расчетных уровнях;
- зональная составляющая скорости ветра на расчетных уровнях;
- меридиональная составляющая скорости ветра на расчетных уровнях;
- геопотенциальная высота на расчетных уровнях;
- высота поверхности земли;
- температура воздуха на уровне 2 м;
- относительная влажность воздуха на уровне 2 м;
- температура воздуха на поверхности земли;
- давление на поверхности земли;
- зональная составляющая скорости ветра на уровне 10 м;
- меридиональная составляющая скорости ветра на уровне 10 м;
- температура поверхности моря.

Выходными данными для модуля CONV_IND являются значения индексов из таблицы 1.3, а также параметров, используемых в методе номограммы Силадьи, в узлах расчетной сетки.

В процессе разработки модуля CONV_IND предполагалось его дальнейшее использование для обработки выходных данных различных численных моделей атмосферы. Указанная универсальность была достигнута за счет включения в состав данного модуля функций вычисления значений на заданном изобарическом или высотном уровне на базе значений на стандартных для используемой модели расчетных уровнях и алгоритмов интерполяции.

Тестирование модуля CONV_IND осуществлялось на выходных данных моделей GFS, COSMO-Ru и WRF (рисунки 3.1 и 3.2). Для работы с каждой из моделей на языке программирования С были написаны соответствующие программные модули NWPGFSReader, NWPCOSMORReader и NWPWRFReader. Каждый из этих модулей был разработан с учетом особенностей, присущих выходным данным соответствующих моделей. В частности, такой особенностью для модели GFS является использование изобарических расчетных уровней

[141], для модели COSMO-Ru – использование повернутой сетки [15, 55, 56, 86], для модели WRF – неявное задание значений температуры воздуха, давления и высоты поверхности земли и необходимость их предварительного расчета [150].

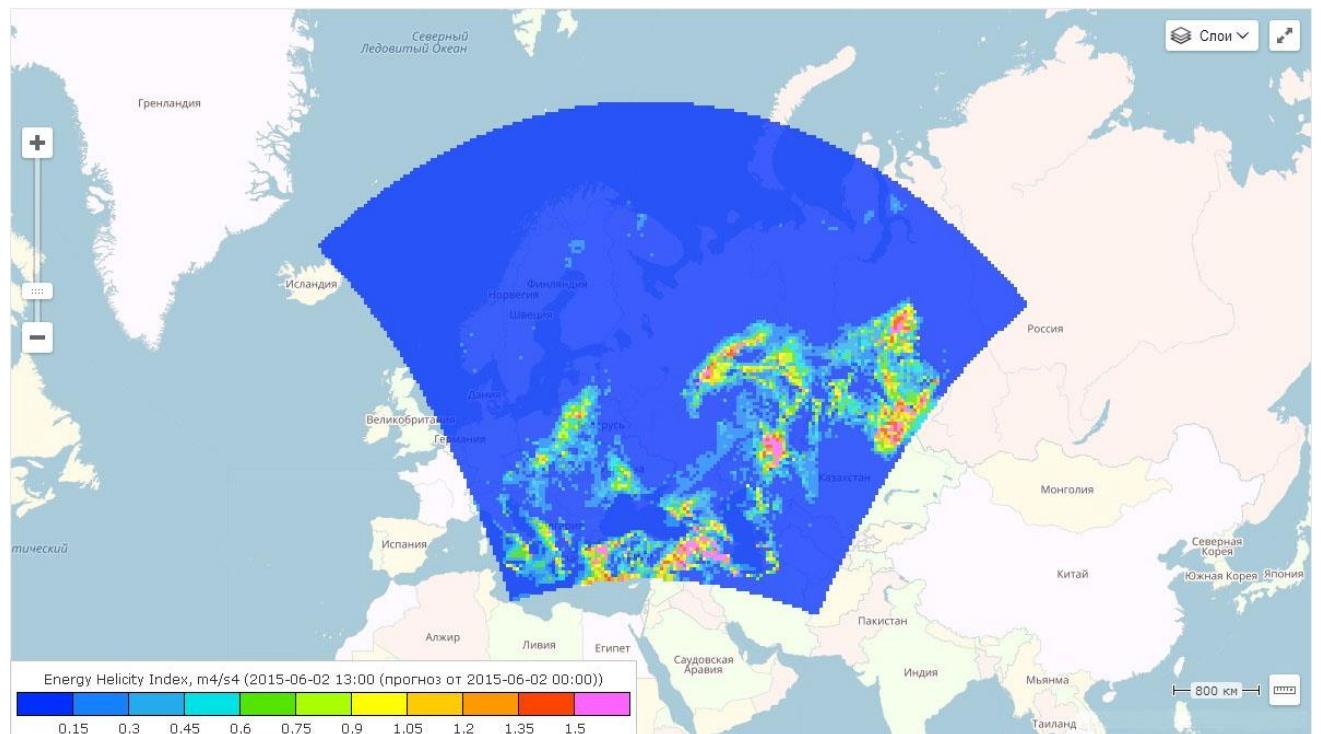


Рисунок 3.1 – Пример расчета поля индекса ЕНІ (модель COSMO-Ru, шаг сетки 7 км)

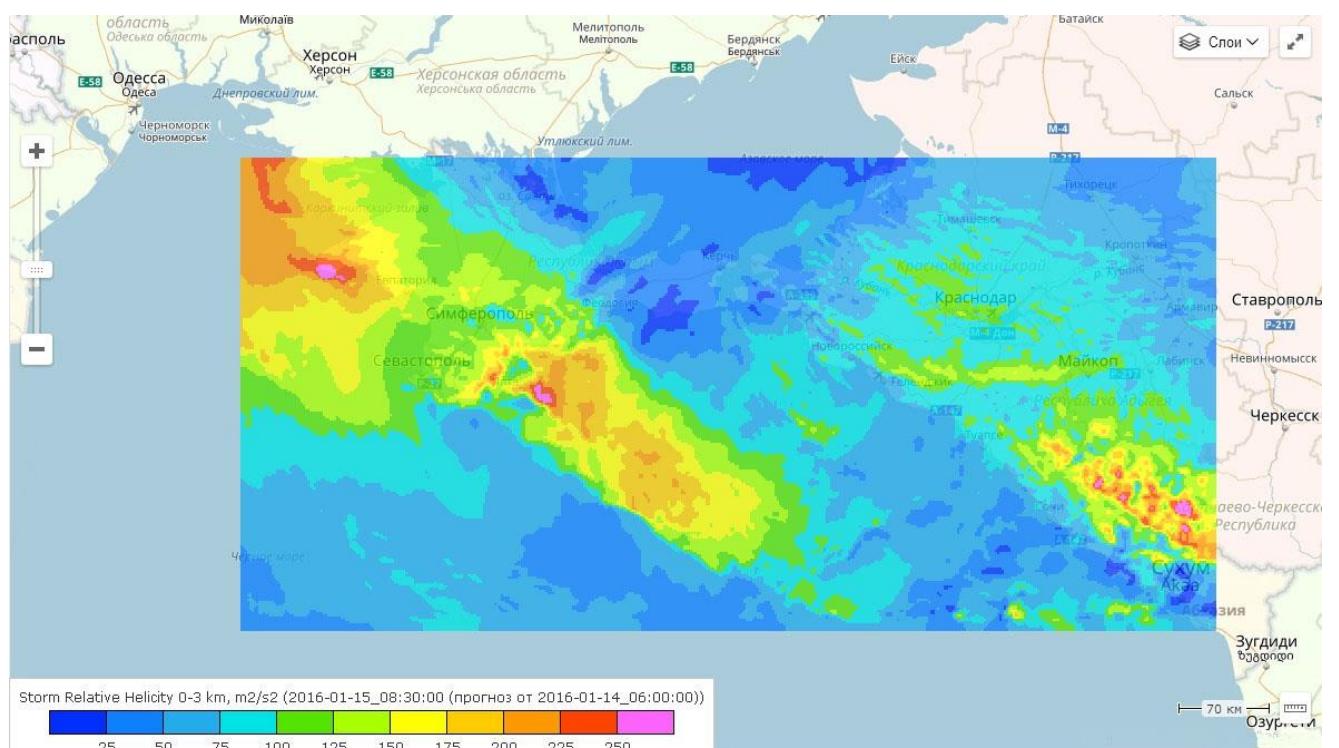


Рисунок 3.2 – Пример расчета поля индекса SRH₃ (модель WRF, шаг сетки 2 км)

Разработанный модуль CONV_IND реализует расчет полей индексов. Для непосредственного выделения смерчеопасных областей на базе значений этих индексов был разработан отдельный модуль RISK_AREA, о котором пойдет речь в подразделе 3.4.3.

В процессе реализации метода номограммы Силади был разработан программный модуль SZ_NOMOGRAM. Данный модуль определяет принадлежность точки к области, ограниченной красными кривыми на номограмме, с учетом дополнительного ограничения на значение скорости ветра. Разработка модуля велась на языке программирования С.

В качестве входных данных для модуля SZ_NOMOGRAM используется следующий перечень параметров в узлах расчетной сетки:

- глубина конвекции;
- разность температуры поверхности моря и температуры воздуха на уровне 850 гПа;
- скорость ветра на уровне 850 гПа;
- маска земля-суша.

Выходными данными для модуля SZ_NOMOGRAM являются значения категории смерчеопасности (SWN – Szilagyi Waterspout Nomogram) в узлах расчетной сетки: SWN = 1 (опасность возникновения смерчей) и SWN = 0 (без смерчей). Непосредственное вычисление категории смерчеопасности производится только в тех узлах, которые соответствуют водной поверхности, остальным узлам присваивается код пустого значения (рисунок 3.3).

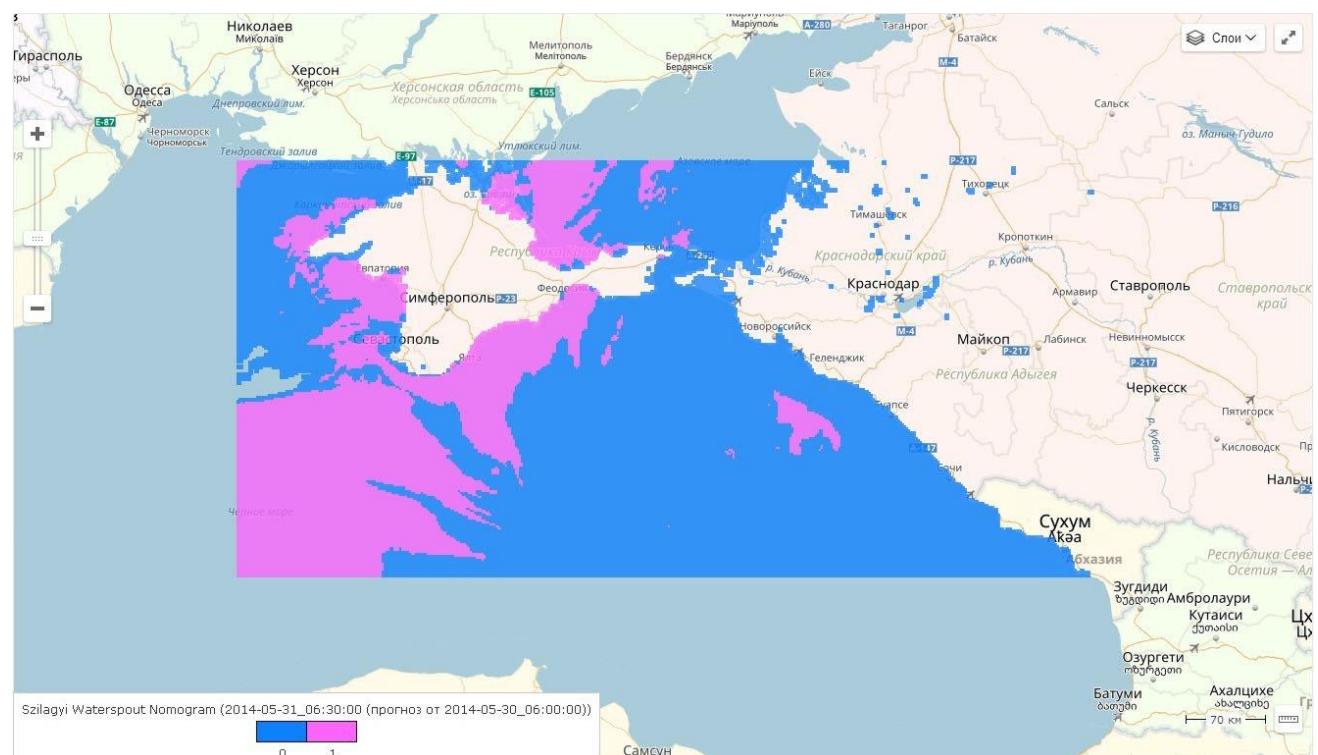


Рисунок 3.3 – Пример расчета категории смерчеопасности по методу номограммы Силади (модель WRF, шаг сетки 2 км)

3.1.3 Оценка эффективности реализованных методов

Тестирование реализованных методов проводилось на созданном архиве смерчей 2014–2016 гг. При тестировании рассматривались случаи с определенным временем возникновения смерчей.

Для оценки качества прогноза смерчей на базе индексов конвективной неустойчивости и по методу номограммы Силады были использованы два подхода. Первый подход предусматривал разделение прибрежной акватории на отдельные области (рисунок 3.4), границы которых были выбраны с учетом особенностей пространственного положения смерчей из собранного архива, описанных в подразделе 2.3.2, и примерного сохранения равновеликости конечных областей. При втором подходе рассматривались не предварительно выделенные области, а области материнских облачных ячеек смерчей (рисунок 3.5). Оценка успешности прогноза того или иного случая смерча в обоих подходах давалась по всей области, к которой относился рассматриваемый случай.

На первом этапе оценивания с целью получения исходных данных для расчета полей анализируемых индексов было проведено численное моделирование атмосферы на базе модели WRF спецификации WRF-ARW v.3.7.1. Конфигурация модели предусматривала использование в качестве начальных и граничных условий прогностических данных по модели GFS с шагом сетки 0.5° (для приближения к реальной ситуации использовались диагностические поля и прогнозы на срок не более 3 ч) и данных SST объективного анализа центра NCEP с шагом сетки 0.083° . Расчеты проводились по внешней (шаг 8×8 км, размер 210×153) и вложенной в нее более мелкой сетке (шаг 2×2 км, размер 381×185) (рисунок 3.6) на 32 вертикальных уровнях. Период моделирования составлял 24 часа, результаты выдавались каждые 30 минут. В таблице 3.1 приведены настройки модели WRF, использованные при моделировании. Эти настройки показали свою значимость в ходе сравнения результатов расчетов по модели с данными наблюдений на высотной метеорологической мачте (ВММ) в г. Обнинск в нижнем 300-метровом слое атмосферы [39, 40].

На втором этапе оценивания с помощью модулей CONV_IND и SZ_NOMOGRAM и результатов моделирования на вложенной сетке 2×2 км были рассчитаны поля анализируемых индексов для каждого случая из используемой выборки.

На третьем этапе оценивания для каждого индекса было подсчитано количество оправдавшихся прогнозов смерчей. При подсчете применялся следующий алгоритм. Учитывалось количество узлов области, включающей рассматриваемый случай, значение индекса в которых в зависимости от его типа было больше или равно или меньше или равно установленному для него решающему значению. В качестве такого решающего значения для

индексов с неограниченной областью значений использовалось характерное для них критическое пороговое значение. Для индекса KHS, отличающегося вероятностной областью значений в диапазоне [0,10], в качестве решающего был выбран уровень 60% от его максимума: $KHS \geq 6$, а для метода номограммы Силады – значение, соответствующее риску смерча: $SWN = 1$.

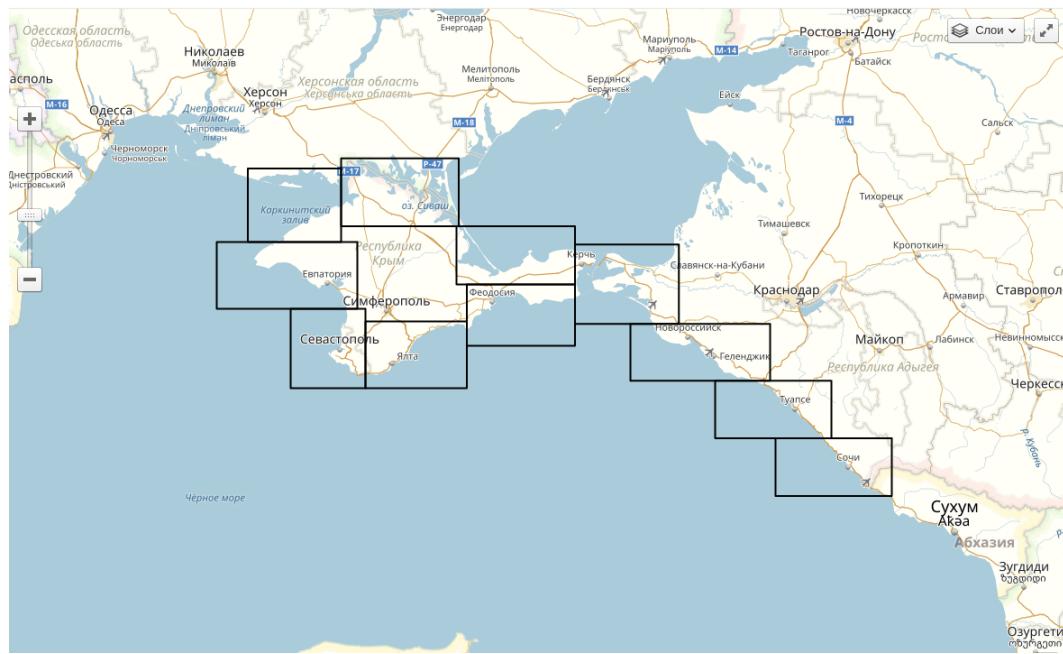


Рисунок 3.4 – Области для оценки успешности прогноза в рамках первого подхода

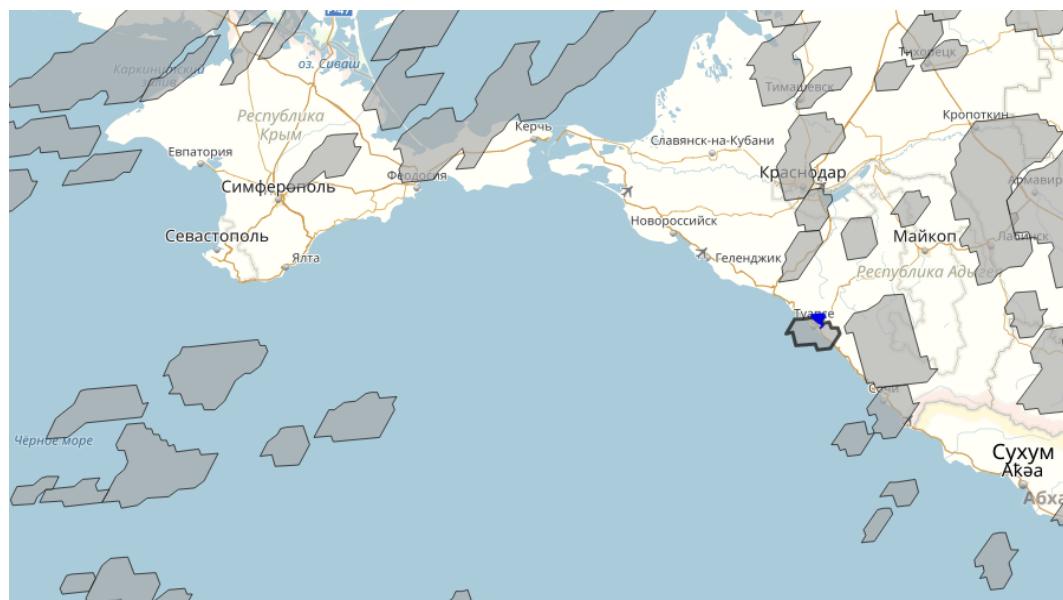


Рисунок 3.5 – Пример области для оценки успешности прогноза в рамках второго подхода для случая смерча вблизи г. Туапсе (синей пиктограммой на карте обозначено место регистрации смерча)

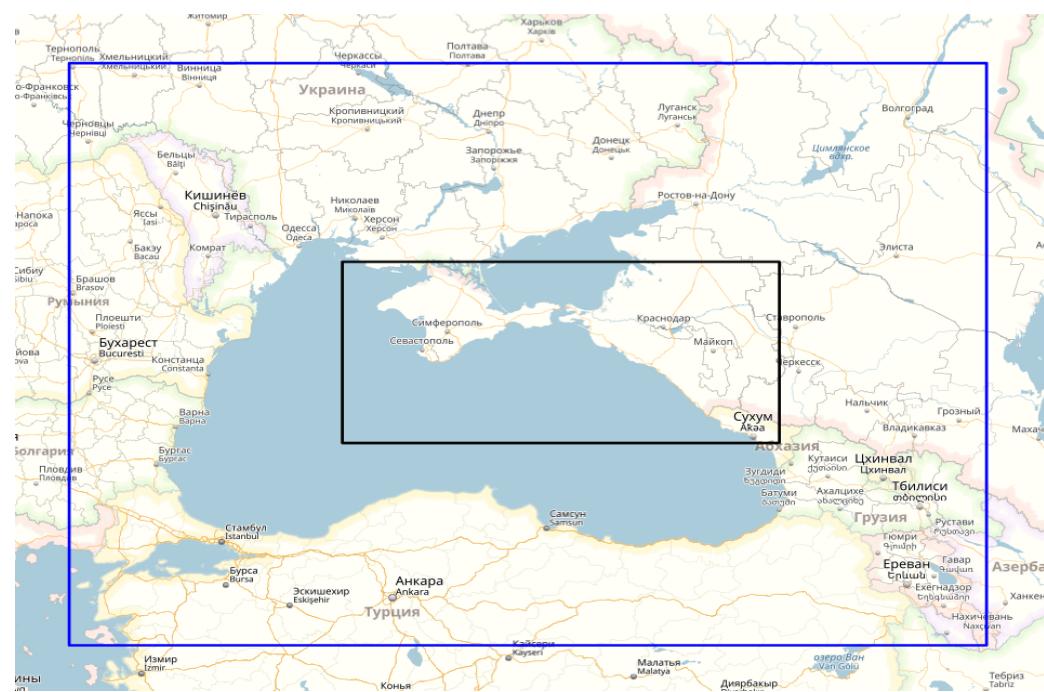


Рисунок 3.6 – Область охвата внешней и вложенной расчетных сеток модели WRF

Таблица 3.1 – Настройки модели WRF

Параметр	Значение
микрофизика (mp_physics)	Thompson graupel scheme
длинноволновая радиация (ra_lw_physics)	RRTM scheme
коротковолновая радиация (ra_sw_physics)	Dubnia scheme
поверхность земли (sf_surface_physics)	thermal diffusion scheme
приземный слой (sf_sfclay_physics)	Monin-Obukhov scheme
пограничный слой (bl_pbl_physics)	Mellor-Yamada-Janjic scheme
параметризация кучевой облачности (cu_physics)	Kain-Fritsch scheme (для вложенной сетки параметризация отключалась)
модель океана (sf_ocean_physics)	simple ocean mixed layer (oml) model
обновление граничных условий о температуре поверхности моря (sst_update)	1

Окончательное решение об успешности прогноза смерчеопасной ситуации в пределах охватывающей случай области принималось исходя из количества узлов данной области, для которых давался соответствующий прогноз. Рассматривалось несколько вариантов возможного количества таких узлов: хотя бы один узел (A1), не менее 5% от общего количества узлов области (A2), не менее 10% от общего количества узлов области (A3).

Для количественной оценки успешности прогнозов была применена концепция заполнения таблицы сопряженности (таблица 3.2) [35, 38, 66].

Таблица 3.2 – Таблица сопряженности

Прогноз	Наблюдалось	
	Смерч	Без смерча
Смерч	a	b
Без смерча	c	d

В приведенной таблице 3.2 фигурируют следующие величины: a – количество случаев оправдавшихся прогнозов (смерч прогнозировался и наблюдался), b – количество случаев неоправдавшихся прогнозов (смерч прогнозировался, но не наблюдался), c – количество случаев неоправдавшихся прогнозов отсутствия явления (смерч не прогнозировался, но наблюдался), d – количество случаев оправдавшихся прогнозов отсутствия явления (смерч не прогнозировался и не наблюдался).

Ввиду того, что используемая выборка содержит сведения только о случаях наблюдения смерчей, и для иных моментов времени моделирование не проводилось, в рамках данной оценки таблица сопряженности была заполнена лишь наполовину и включала в себя величины a и c. На их основе для каждого индекса в соответствии с [35, 38, 66] была рассчитана предупрежденность наличия смерчей:

$$\Pi_{\text{я}} = \frac{a}{a+c} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Следует отметить, что рассмотрение показателя $\Pi_{\text{я}}$ вне связи с другими важными показателями, такими как оправдываемость прогноза и количество ложных прогнозов, является малоинформативным с точки зрения общей оценки качества прогноза, однако в указанных ограниченных условиях оно позволило исключить заведомо неинформативные индексы.

Расчет $\Pi_{\text{я}}$ проводился для каждого сезона смерчей и за весь рассматриваемый период в целом. В таблицах 3.3 и 3.4 приведены результаты расчета $\Pi_{\text{я}}$ по вышеупомянутым подходам к выбору области прогноза для индексов немезоциклических смерчей и индексов общей неустойчивости. В этих таблицах в столбце R_{\min} указано усредненное по всем случаям минимальное расстояние от фактического места регистрации смерча до узла охватывающей случай области, в котором давался прогноз смерчеопасной ситуации. Данное расстояние отражает пространственную погрешность прогноза. О результатах работы индексов мезоциклических смерчей будет сказано ниже.

Таблица 3.3 – Оценка эффективности индексов немезоциклических смерчей и общей неустойчивости на базе первого подхода

Индекс	Предупрежденность наличия смерчей, %												R_{min} , км			
	хотя бы один узел				не менее 5% узлов				не менее 10% узлов				2014 г.	2015 г.	2016 г.	
	2014 г.	2015 г.	2016 г.	весь период	2014 г.	2015 г.	2016 г.	весь период	2014 г.	2015 г.	2016 г.	весь период				
Индексы немезоциклических смерчей																
ESP	66	33	66	52	28	24	40	30	17	20	29	22	23	14	11	16
NSP	100	98	83	94	72	64	60	65	59	49	43	50	8	13	9	10
KHS	28	36	23	29	7	18	0	9	4	11	0	6	32	18	35	26
SWN	86	82	89	86	79	80	66	75	79	78	66	74	6	8	13	9
Индексы общей неустойчивости																
LCL _{SB}	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1	1	1	1
LCL _{ML}	83	82	77	81	48	44	49	47	24	31	17	25	18	19	21	19
LCL _{MU}	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1	1	2	1
CAPE _{SB}	97	91	94	94	90	87	86	87	83	82	86	84	2	3	6	4
CAPE _{ML}	86	84	94	88	79	69	63	70	72	64	57	64	4	10	12	9
CAPE _{MU}	97	91	94	94	90	87	94	90	83	82	94	86	2	3	5	3
CAPE _{ML3km}	83	71	66	73	28	27	26	27	10	13	17	14	18	23	17	20
CIN _{SB}	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1	1	1	1
CIN _{ML}	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1	1	1	1
CIN _{MU}	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1	1	1	1

Таблица 3.4 – Оценка эффективности индексов немезоциклических смерчей и общей неустойчивости на базе второго подхода

Индекс	Предупрежденность наличия смерчей, %												R_{min} , км			
	хотя бы один узел				не менее 5% узлов				не менее 10% узлов				2014 г.	2015 г.	2016 г.	
	2014 г.	2015 г.	2016 г.	весь период	2014 г.	2015 г.	2016 г.	весь период	2014 г.	2015 г.	2016 г.	весь период				
Индексы немезоциклических смерчей																
ESP	52	38	56	46	36	22	28	27	16	16	24	18	26	29	16	24
NSP	88	84	72	82	88	67	64	72	64	60	44	57	9	15	10	12
KHS	20	22	20	21	0	11	8	7	0	11	4	6	29	24	24	25
SWN	92	76	64	77	88	73	60	74	84	71	60	72	9	4	4	5
Индексы общей неустойчивости																
LCL _{SB}	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	6	4	6	5
LCL _{ML}	60	73	48	63	48	40	20	37	36	31	12	27	15	22	24	21
LCL _{MU}	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	96	99	6	4	6	5
CAPE _{SB}	96	89	100	94	92	87	84	87	88	82	84	84	5	9	7	7
CAPE _{ML}	84	76	96	83	76	67	68	70	76	67	68	70	7	11	11	10
CAPE _{MU}	96	91	100	95	92	87	96	91	88	82	96	87	5	9	6	7
CAPE _{ML3km}	76	60	48	61	16	20	28	21	12	13	20	15	17	31	15	23
CIN _{SB}	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	6	4	6	5
CIN _{ML}	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	6	4	5	5
CIN _{MU}	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	6	4	5	5

Из таблиц 3.3 и 3.4 можно сделать следующие выводы. Успешность прогноза на базе индексов немезоциклонных смерчей зависит от выбранного алгоритма принятия решения о его выдаче (A1, A2 или A3), т.е. от размера смерчеопасной области, в то время как для индексов общей неустойчивости эта зависимость проявляется в несколько меньшей степени, а для некоторых вариантов расчета этих индексов она и вовсе отсутствует. Этот факт, по-видимому, можно объяснить типичными небольшими размерами смерчеопасной области, локализуемой по индексам немезоциклонных смерчей, в то время как область общей неустойчивости, как правило, более обширна.

Среди индексов немезоциклонных смерчей по всем алгоритмам подсчета A1, A2, A3 наилучшие результаты показал индекс NSP ($\Pi_{я} = 88\%$, $R_{min} = 11$ км (в среднем по всему периоду по обоим подходам и алгоритму A1, данное осреднение используется для всех величин текущего абзаца)). Результаты для индексов ESP ($\Pi_{я} = 49\%$, $R_{min} = 20$ км) и KHS ($\Pi_{я} = 25\%$, $R_{min} = 26$ км) оказались существенно ниже.

Метод номограммы Силадьи SWN показал сопоставимые с индексом NSP результаты ($\Pi_{я} = 82\%$ и $R_{min} = 7$ км). Кроме того, данный метод успешно спрогнозировал редкий для декабря смерч вблизи г. Сочи в 2016 г. (рисунок 3.7).

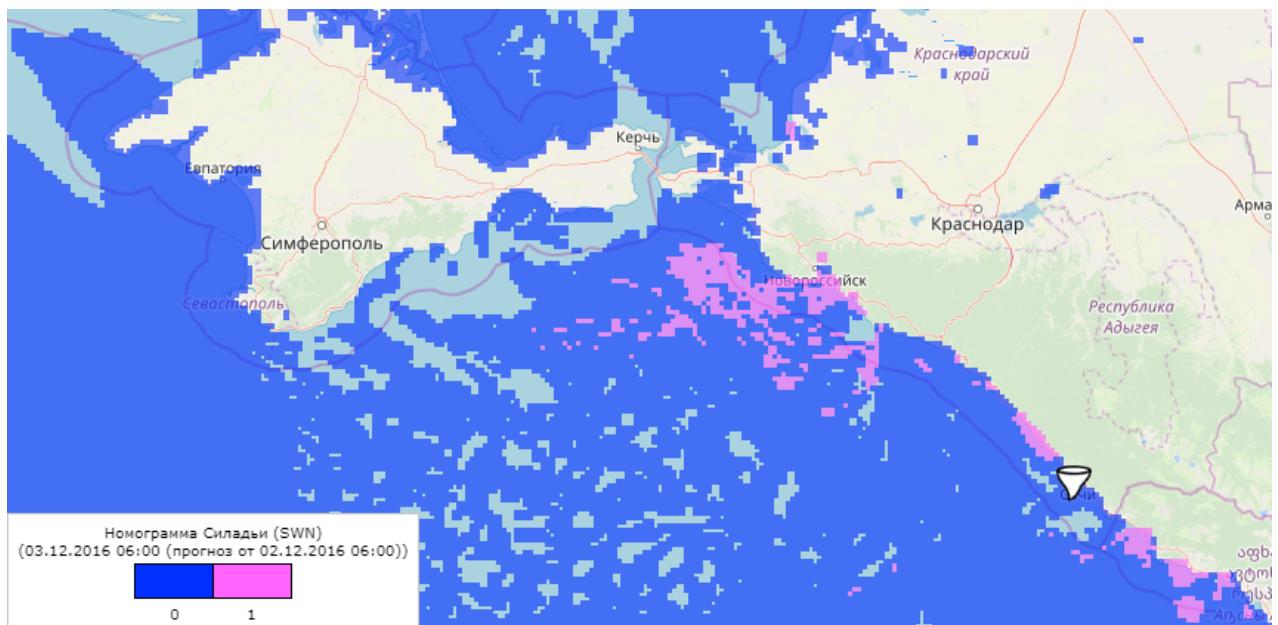


Рисунок 3.7 – Смерчеопасные области по методу номограммы Силадьи для смерча
3 декабря 2016 г. вблизи г. Сочи

Среди индексов общей неустойчивости наиболее информативными оказались следующие варианты их расчета: LCL_{SB} ($\Pi_{я} = 100\%$, $R_{min} = 3$ км), CAPE_{MU} ($\Pi_{я} = 95\%$, $R_{min} = 5$ км) и CIN_{MU} (CIN_{ML}) ($\Pi_{я} = 100\%$, $R_{min} = 3$ км). По указанной выше причине высокие результаты для этих вариантов, превышающие аналогичные результаты для индекса NSP, не могут

гарантировать хорошее качество прогноза. Для получения наиболее полной оценки необходимо провести тестирование рассматриваемых индексов в непрерывном режиме, чему была посвящена глава 4.

На рисунках 3.8-3.10 показаны множества значений индексов мезоциклонных смерчей (слева) для всех случаев смерчей из оцениваемой выборки, которые, как было установлено ранее, имели немезоциклональную природу происхождения, а также соответствующие каждому множеству гистограммы распределения и сглаживающие их кривые (справа). Красным цветом на оси абсцисс каждой гистограммы обозначено пороговое значение индекса.

Из рисунков 3.8-3.10 видно, что подавляющее большинство смерчей регистрировалось при значениях индексов мезоциклонных смерчей много меньших чем те, которые используются в мировой практике в качестве пороговых для них. Подобное занижение не следует трактовать как необходимость выбора новых пороговых значений для этих индексов в рассматриваемом регионе, поскольку они принципиально не предназначены для прогноза немезоциклональных смерчей. В их работу был заложен определенный физический смысл распознавания благоприятных для образования мезоциклональных смерчей условий, которые по ряду аспектов противоречат тем же условиям для немезоциклональных смерчей. В частности, первые обычно формируются при больших сдвигах ветра в нижнем слое атмосферы, для вторых, в свою очередь, наоборот необходимо как можно более равномерное поле ветра для поддержания сформированного вихря. Неэффективность мезоциклональных индексов на рассматриваемой выборке еще раз свидетельствует о том, что для каждого типа смерчей следует использовать свой набор индексов.

Таким образом, к наиболее информативным методам прогноза смерчеопасных ситуаций, связанных с формированием немезоциклональных смерчей у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым, на основании показателя их предупрежденности в 2014-2016 гг. могут быть отнесены индексы NSP, LCL_{SB}, CAPE_{MU}, CIN_{MU} и метод номограммы Силадьи SWN. Ввиду немногочисленности индексов немезоциклональных смерчей и, как оказалось, неэффективности большинства из них в рассматриваемом регионе, был предложен метод определения нового регионального индекса для прогноза водяных смерчей данного типа, о котором пойдет речь в подразделе 3.2.

В связи с невозможностью на имеющейся выборке смерчей 2014-2016 гг. выделить наиболее информативные для рассматриваемого региона индексы мезоциклональных смерчей, для прогноза смерчеопасных ситуаций, связанных с формированием интенсивных смерчей над Черным морем, предлагается привлекать все индексы данной группы, перечисленные в таблице 1.3.

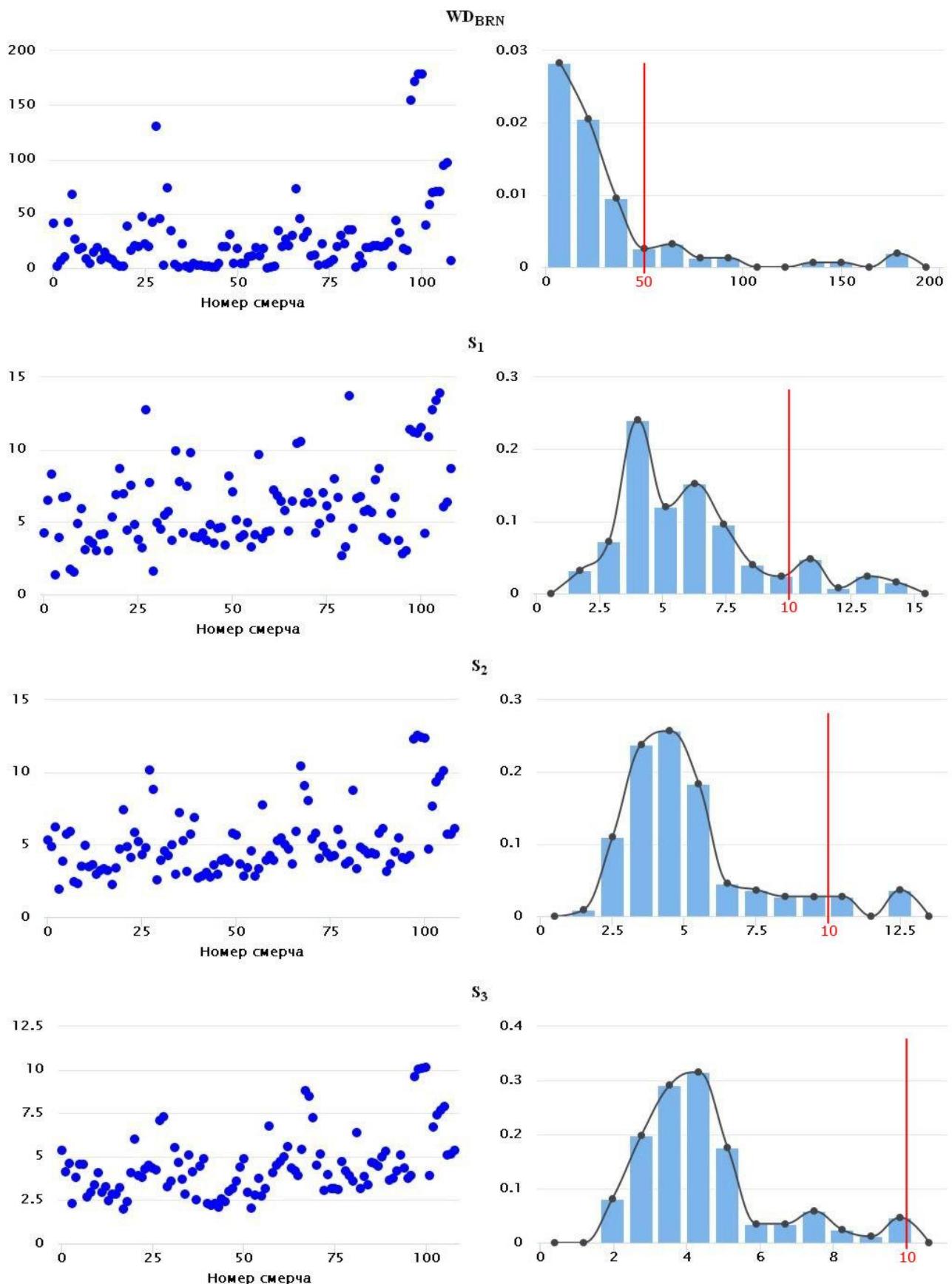


Рисунок 3.8 – Множества значений индексов WD_{BRN}, S₁, S₂, S₃ и соответствующие каждому множеству гистограммы распределения (красная линия – пороговое значение) для случаев регистрации смерчей у Черноморского побережья России в 2014-2016 гг.

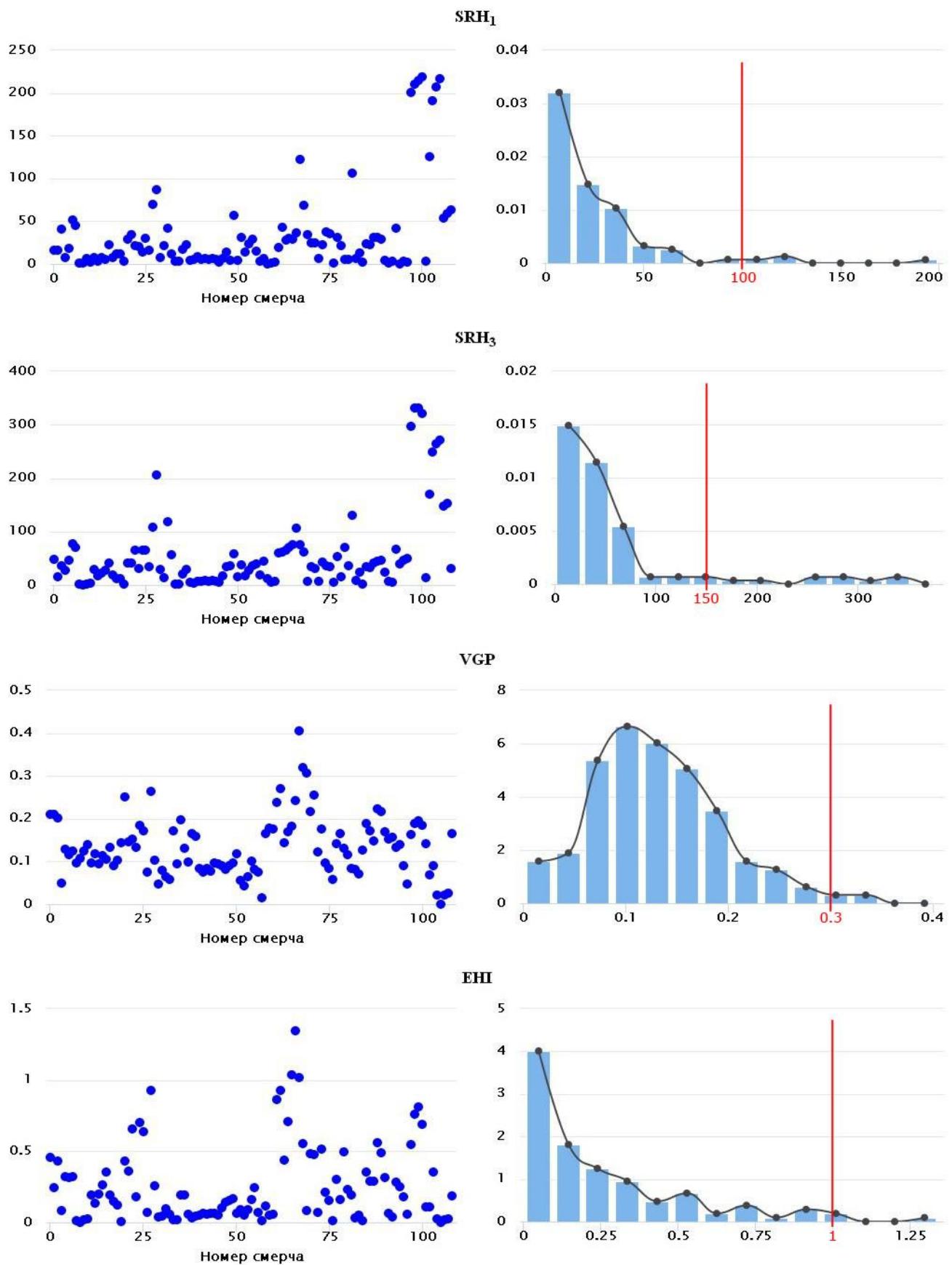


Рисунок 3.9 – Множества значений индексов SRH₁, SRH₃, VGP, EHI и соответствующие каждому множеству гистограммы распределения (красная линия – пороговое значение) для случаев регистрации смерчей у Черноморского побережья России в 2014-2016 гг.

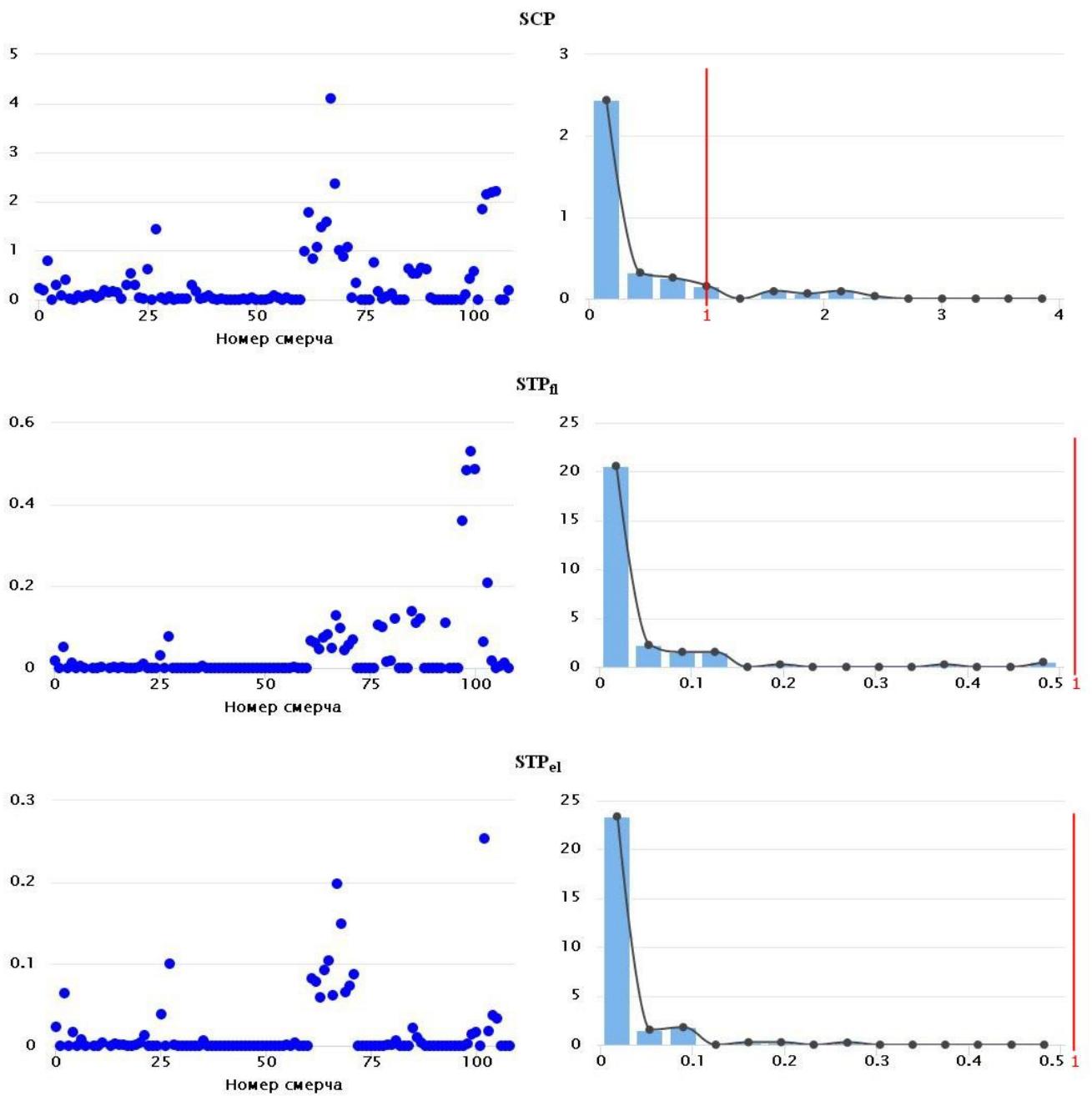


Рисунок 3.10 – Множества значений индексов SCP, STP_{fl}, STP_{el} и соответствующие каждому множеству гистограммы распределения (красная линия – пороговое значение) для случаев регистрации смерчей у Черноморского побережья России в 2014-2016 гг.

В рамках отдельной работы, проведенной совместно с Новицким М.А., Шмерлинным Б.Я. и др., была протестирована эффективность мезоциклонных индексов на случаях регистрации более интенсивных сухопутных смерчей на Европейской территории России. В частности были проанализированы смерчеопасные ситуации, способствовавшие возникновению смерчей в г. Обнинск (23.05.2013 г.) [40], в Башкирии (29.08.2014 г.) [39] и других смерчей, зарегистрированных в 2015 и 2016 гг. [41], а также оценены возможности их прогноза. Ниже приводятся основные результаты, полученные в ходе выполнения этой работы.

По данным стандартных метеорологических наблюдений (ВММ, станции аэропондирования, радиолокаторы) 23 мая 2013 г. никаких особых условий, предвещающих возможное возникновение смерча в г. Обнинск не наблюдалось. Индексы конвективной неустойчивости оказались более информативными. Расчет индексов проводился на базе результатов моделирования на вложенной сетке с шагом 2 км с использованием двух вариантов параметризации пограничного слоя модели WRF: схема университета Енсей и схема Меллора-Ямады-Янича. Остальные параметры модели были аналогичны указанным в таблице 3.1. Для задания начальных и граничных условий использовались данные реанализа центра NCEP, т.е. строился квазипрогноз.

По второму варианту в момент времени максимально приближенный к моменту регистрации смерча отмечалось более высокое значение максимума индекса CAPE_{ML}, чем по первому. Для остальных индексов LCL_{ML}, CIN_{ML}, SRH₃, EHI, CT, TT, K, SWEAT [85] существенных отличий при использовании различных вариантов не наблюдалось.

По результатам анализа рассчитанных полей индексов к наиболее значимым были отнесены индексы CAPE_{ML}, SRH₃ и EHI. Они имели явно выраженный максимум, значение которого, тем не менее, было несколько меньше порогового. Момент достижения максимума практически совпадал с моментом регистрации смерча. Для индексов SRH₃ и EHI кроме прочего отмечалась существенная локализация областей повышенного значения этих индексов во времени и в пространстве.

Для смерча, прошедшего по территории Республики Башкортостан 29 августа 2014 г., впервые в отечественной практике удалось провести совместный анализ полей индексов и данных ДМРЛ-С. Использовавшиеся для анализа радиолокационные данные ДМРЛ-С «Ижевск» были любезно предоставлены Павлюковым Ю.Б. (ЦАО). На радиолокационных картах метеорологических явлений данный смерч не был идентифицирован, т.к. соответствующий алгоритм его диагностирования еще требует уточнения. Тем не менее, значения радиолокационных параметров его материнского облака свидетельствовали о явном присутствии суперячейки (рисунок 3.11).

По свидетельствам очевидцев максимального развития смерч достиг в районе с. Кариево (белый крест на рисунке 3.11), затем со скоростью порядка 70 км/ч переместился на северо-восток в направлении г. Янаул (белый круг на рисунке 3.11). В 12 ч 20 мин ВСВ, когда смерч прошел через с. Кариево, dBZ_m в этом районе достигала значений 67 dBZ (рисунок 3.11б), горизонтальные размеры области с dBZ_m ≥ 55 dBZ составляли 10 км, а вертикальные – около 9 км. По мере приближения смерча к г. Янаул вертикальные размеры уменьшились примерно на 1.5 км. НВГО превышала 15 км (рисунок 3.11в), в то время как высота тропопаузы по данным аэропондирования составляла 13 км, т.е. суперячейка имела возвышающийся на 2 км купол.

Максимальное значение VIL, равное $63 \text{ кг}/\text{м}^2$ наблюдалось над поверхностью Нижнекамского водохранилища (рисунок 3.11г). По мере удаления от него VIL уменьшалась и в районе г. Янаул достигла значения $43 \text{ кг}/\text{м}^2$.

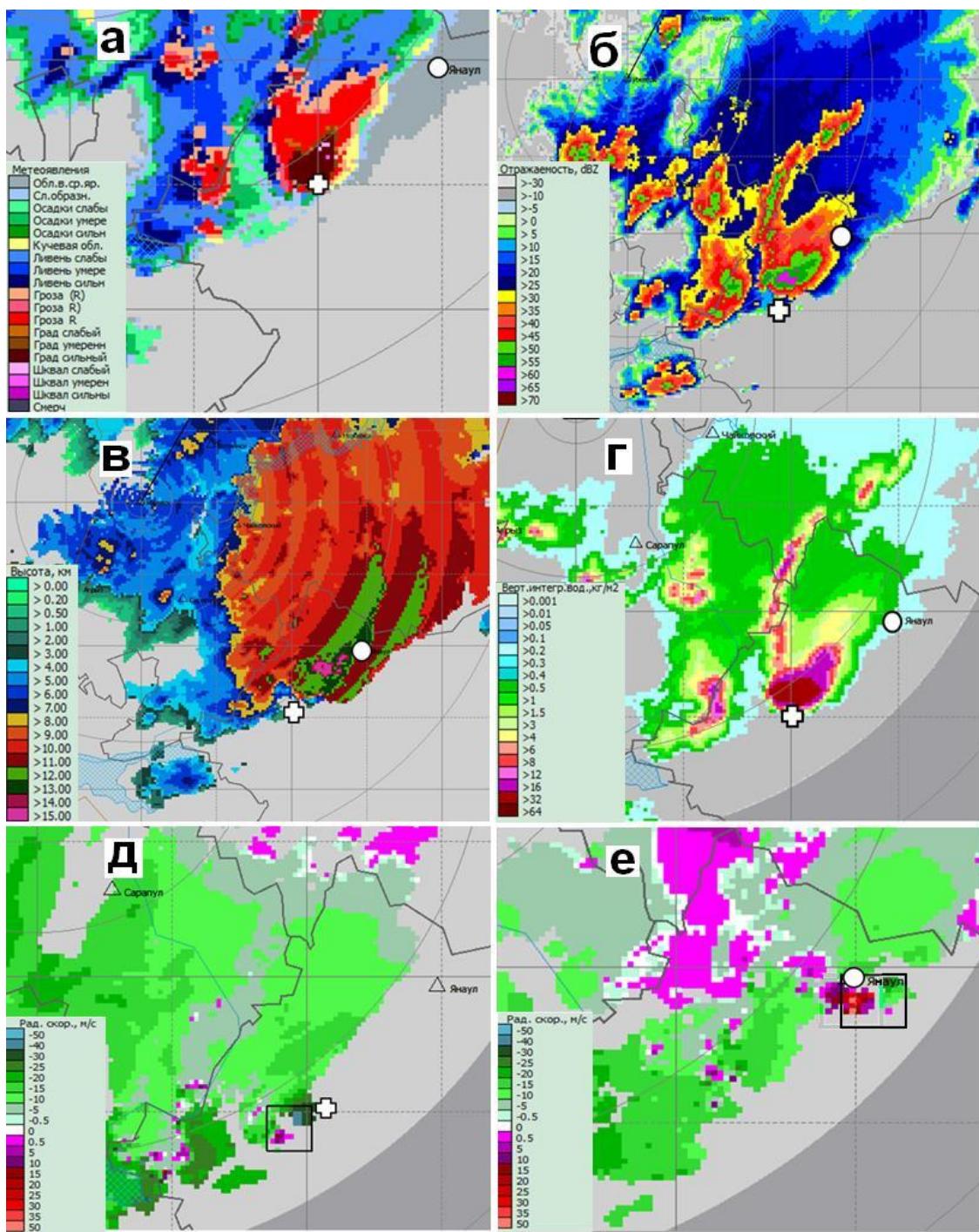


Рисунок 3.11 – Радиолокационные карты по данным ДМРЛ-С «Ижевск» для 29 августа 2014 г.

а – метеорологических явлений за 12 ч 10 мин ВСВ, б – dBZ_m за 12 ч 20 мин ВСВ,

в – H_{VGO} за 12 ч 20 мин ВСВ, г – VIL за 12 ч 13 мин ВСВ,

д и е – радиальной скорости на высоте 700 м за 12 ч 3 мин и за 12 ч 43 мин

(белым крестом отмечено с. Кариево, белым кругом – г. Янаул,

черным прямоугольником – мезоциркуляции)

На картах радиальной скорости просматривались зоны циркуляций четырех типов: по одной с положительной и отрицательной радиальной скоростью и две области с нулевой радиальной скоростью, соответствующие фронтальной и тыловой по отношению к локатору частям вихревого образования (рисунки 3.11д и 3.11е). В зоне положительной циркуляции радиальная скорость достигала максимальных значений (50 м/с) на высоте 1.5 км, а в зоне отрицательной циркуляции – на высоте 1 км (-55 м/с). Полученные пределы изменения радиальной скорости соответствуют категории F2 по шкале Фудзиты.

Расчет индексов конвективной неустойчивости LCL_{ML} , CIN_{ML} , $CAPE_{ML}$, WD_{BRN} , SRH_3 , EHI , SCP , STP_{el} для рассматриваемой смерчеопасной ситуации в Башкирии проводился на выходных данных модели WRF с шагом сетки 2 км при использовании второго из упомянутых выше вариантов параметризации пограничного слоя, который, как было установлено, показал свое преимущество перед первым. По результатам анализа полей индексов наиболее информативными оказались индексы EHI , SCP и STP_{el} . Следует отметить, что два последних индекса не рассматривались при анализе смерчеопасной ситуации в г. Обнинск.

Все отмеченные индексы достигали своих максимальных значений, превышающих заданный для них порог, в момент времени наиболее близкий к моменту регистрации смерча (рисунок 3.12). Характерное время, в течение которого индексы превышали пороговые значения, составляло порядка 1 ч, размер локализации смерчеопасных областей – несколько десятков километров, положение смерча воспроизводилось с точностью до 50 км.

Полученные выводы относятся к результатам моделирования, проведенного, как и в случае смерча в г. Обнинск, в режиме квазипрогноза – в качестве начальных и граничных условий использовались данные реанализа центра NCEP. Период моделирования составлял 49 ч. Подобные расчеты можно назвать эталонными, поскольку они лучше всего согласуются с данными наблюдений.

Дополнительно был протестирован наиболее часто применяемый на практике вариант инициализации модели и обновления ее граничных условий по прогностическим данным. Эксперименты с варьированием заблаговременности прогноза от 72 до 12 ч показали, что в целом общая картина временного хода индексов практически не изменяется, т.е. в определенный момент времени индексы достигают своих максимальных значений, превышающих пороговые. Однако в зависимости от выбранной заблаговременности этот момент достижения максимума смешался от момента регистрации смерча в ту или иную сторону. Чаще всего максимум в том или ином прогнозе фиксировался в интервале с 12 до 15 ч ВСВ.

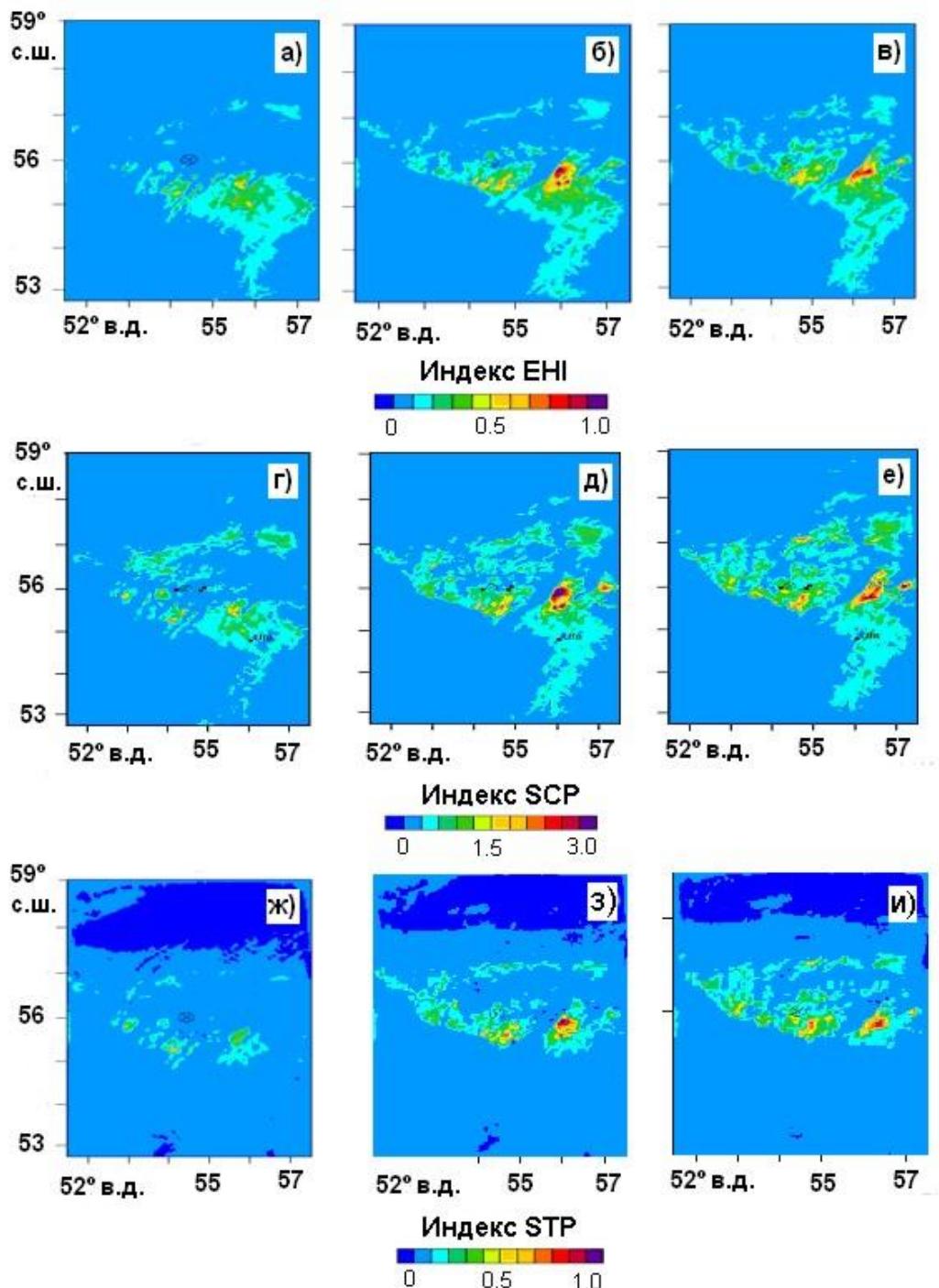


Рисунок 3.12 – Квазипрогностические поля индексов EHI, SCP и STP_{el} в моменты времени близкие к моменту регистрации смерча 29 августа 2014 г.

а, г, ж – в 11 ч 30 мин ВСВ; б, д, з – в 12 ч 30 мин ВСВ; в, е, и – в 13 ч 00 мин ВСВ
(центр расчетной области соответствует положению г. Янаул)

В работе [12] были проведены эксперименты по моделированию мезомасштабных конвективных систем (МКС) с сильными смерчами на базе модели WRF при использовании различных исходных данных и алгоритмов расчета (с вложенными сетками и без). Параметризация модели в основном совпадала с указанной в таблице 3.1 и отличалась лишь

значениями для поверхностного слоя и коротковолновой и длинноволновой радиации. В том числе был рассмотрен случай смерча в Башкирии. На вложенной сетке с шагом 1 км в квазипрогностическом режиме полученные для него в работе [12] оценки сдвига по времени и по пространству положений максимумов индексов CAPE_{SB}, CIN_{SB}, SRH₃, SCP и SWEAT от положения смерча согласовывались с полученными выше результатами. В целом, на основе результатов для данного смерча, а также для других проанализированных в работе [12] случаев смерчей на Европейской территории России в ней был сделан вывод о сильной зависимости качества воспроизведения МКС со смерчами моделью WRF от начальных и граничных условий, с которым, несомненно, следует согласиться. Как подтверждение этому, выше было получено, что расчеты в прогностическом режиме дают более существенное смещение прогноза по сравнению с расчетами в квазипрогностическом режиме, что, очевидно, обусловлено различной степенью проявления ошибок в исходных данных.

Помимо индексов конвективной неустойчивости для смерча в Башкирии были проведены расчеты прогностических полей радиолокационных параметров dBZ_m, НВГО и VIL. Прогноз считался с заблаговременностью 36 ч. На рисунке 3.13 справа показаны рассчитанные по модели поля, а слева для сравнения карты соответствующих параметров по данным ДМРЛ-С. На изображениях радиолокатора эллипсами отмечены области, соответствующие прогностическим изображениям. Положение смерча на изображениях радиолокатора практически идентично расположению максимума VIL. На прогностических изображениях положение смерча соответствует центру рисунков. Как видно, и на экране радиолокатора, и в прогностических полях в течение часа смерч смещался в северо-восточном направлении. Кроме того прослеживается качественное согласие прогностических и реальных полей, несмотря на сдвиг по пространству более чем на 100 км.

Вышеописанная процедура сравнения прогностических и реальных радиолокационных полей, как предполагается, может быть использована для коррекции прогноза, причем не только смерчей, но и других опасных явлений. Суть предлагаемой коррекции заключается в следующем. На начальном этапе по результатам сравнения рассчитывается сдвиг по времени и пространству. Впоследствии проводится анализ полей индексов, относящихся к будущим еще не наступившим моментам времени. Если для одного или нескольких таких моментов дается прогноз возможности возникновения опасного явления, то с учетом полученных значений сдвига на текущих радиолокационных картах указывается реальная конвективная система, из которой, в соответствии с имеющимся прогнозом, в будущем данное явление может возникнуть. Указанный подход при своей реализации может существенно увеличить заблаговременность предупреждения об опасных явлениях. Описание предлагаемого подхода было опубликовано в работах [72, 73].

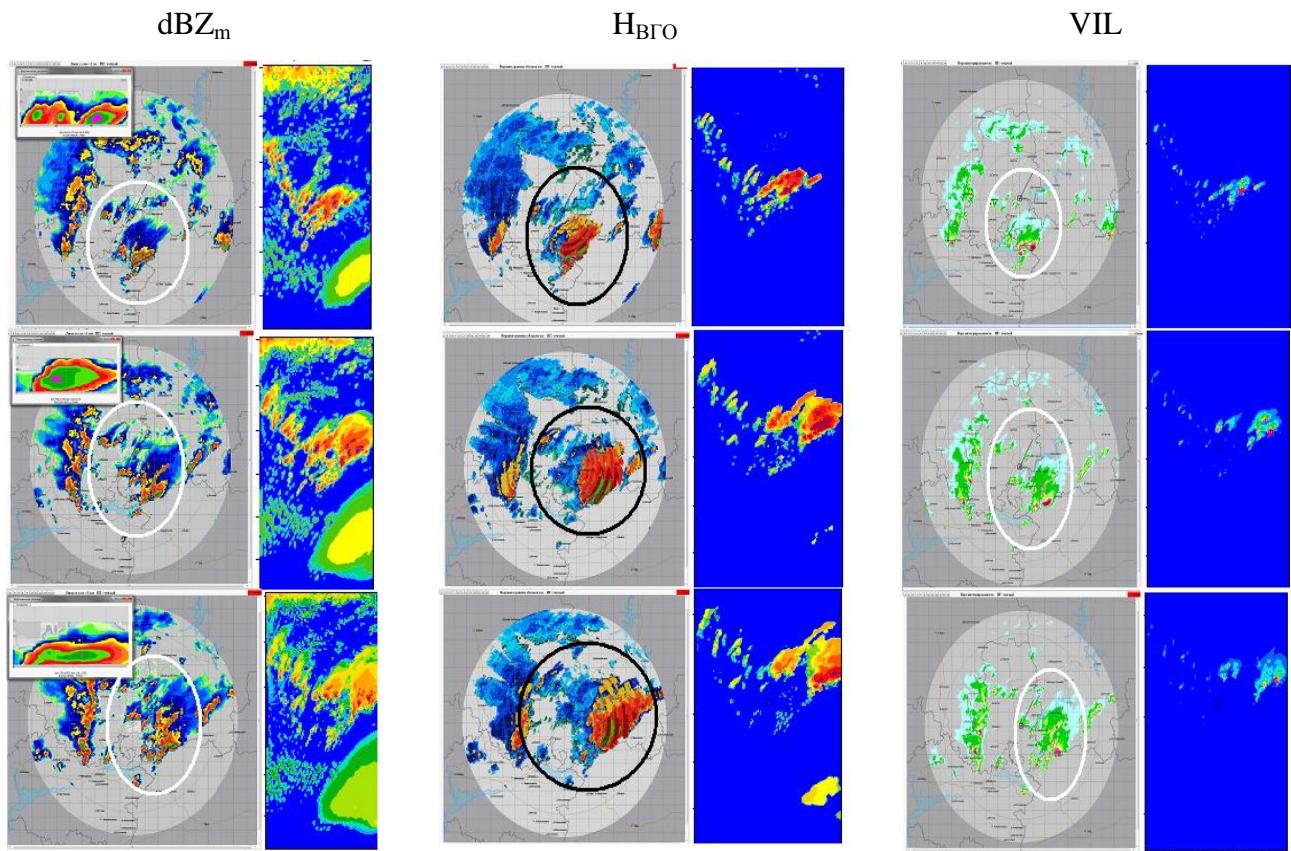


Рисунок 3.13 – Рассчитанные по модели прогностические поля dBZ_m, H_{BGO} и VIL (справа) и аналогичные поля по данным ДМРЛ-С (слева) на сроки 12 ч 00 мин, 12 ч 30 мин, 13 ч 00 мин
BCB (сверху вниз)

Для четырех смерчей, зарегистрированных в 2015 г. (таблица 3.5), был проведен совместный анализ полей индексов CAPE_{ML}, SRH₃, EHI, SCP, STP_{el} и поля вертикальной скорости W, непосредственно рассчитываемого в модели WRF, на высоте соответствующей ее максимальному значению в пределах расчетной области.

Таблица 3.5 – Перечень проанализированных смерчей

Обозна- чение	Дата	Время (BCB)	Долго- та, °	Широ- та, °	Субъект	Категория по шкале Фудзиты
T1	15.05.2015	12:58	40.80	57.01	Ивановская область	F1
T2	02.06.2015	12:50	46.06	57.50	Нижегородская область	F2
T3	08.06.2015	13:25	56.47	56.07	Республика Башкортостан	F1
T4	20.06.2015	16:30	38.00	56.25	Московская область	F1

По сравнению с предыдущими расчетами было увеличено число уровней модели по вертикали – с 28 до 41, а также уменьшены шаги внешней и вложенной сеток по горизонтали – с 6 и 2 км до 3 и 1 км соответственно. Моделирование осуществлялось в двух режимах:

квазипрогноз и прогноз. По результатам анализа квазипрогностических полей были подтверждены ранее полученные выводы о достижении индексами своих абсолютных максимальных значений (максимальных за все время моделирования), находящихся на уровне пороговых, в моменты времени близкие к моментам регистрации смерчей. Исключением стал случай T2, для него достигнутые в день смерча максимумы были не абсолютными, а локальными. Абсолютные максимумы индексов отмечались во второй половине дня 1 июня. Можно предположить, что в рассматриваемом регионе в этот день с большой долей вероятности мог возникнуть еще один смерч, наряду с тем, который был зафиксирован 2 июня.

Кроме того было установлено, что во временном ходе индексов SCP и STP_{el} характерный для них максимум отмечался лишь единожды (за исключением T2), в то время как другие индексы в течение остального времени имели дополнительные локальные максимумы, которые, возможно, были обусловлены суточным ходом метеорологических величин. Таким образом, на рассматриваемой выборке смерчей наиболее информативными оказались индексы SCP и STP_{el}, обеспечившие минимально возможное количество ложных прогнозов.

Совместный анализ полей индексов SCP, STP_{el} и поля W показал, что до момента регистрации смерча положения их максимумов были существенно разнесены в пространстве. Однако при приближении к этому моменту, когда в том числе достигались их абсолютные максимумы, это расхождение сводилось к минимуму (рисунок 3.14). Поскольку W не используется при расчете указанных индексов, то можно сделать вывод о том, что в рамках модели WRF значения индексов выше пороговых связаны с формированием локализованной интенсивной конвективной ячейки в окрестности их максимальных значений и в момент достижения этих значений. Это утверждение обосновывает возможность использования индексов для анализа и прогноза смерчеопасных ситуаций. Из полученных результатов также следует, что достижение максимума W может явиться дополнительным важным прогностическим признаком возникновения подобных ситуаций.

Результаты аналогичного анализа, проведенного с использованием прогностических полей индексов и W, согласуются с вышеотмеченными выводами для квазипрогностических расчетов с незначительной погрешностью смещения по времени (несколько часов) и более существенной в пространстве. Дополнительные расчеты еще для четырех смерчей, зарегистрированных на Европейской территории России в 2016 г., а также для вышеупомянутых смерчей в г. Обнинск и в Башкирии продемонстрировали аналогичные результаты, еще раз подтверждая сделанные выводы.

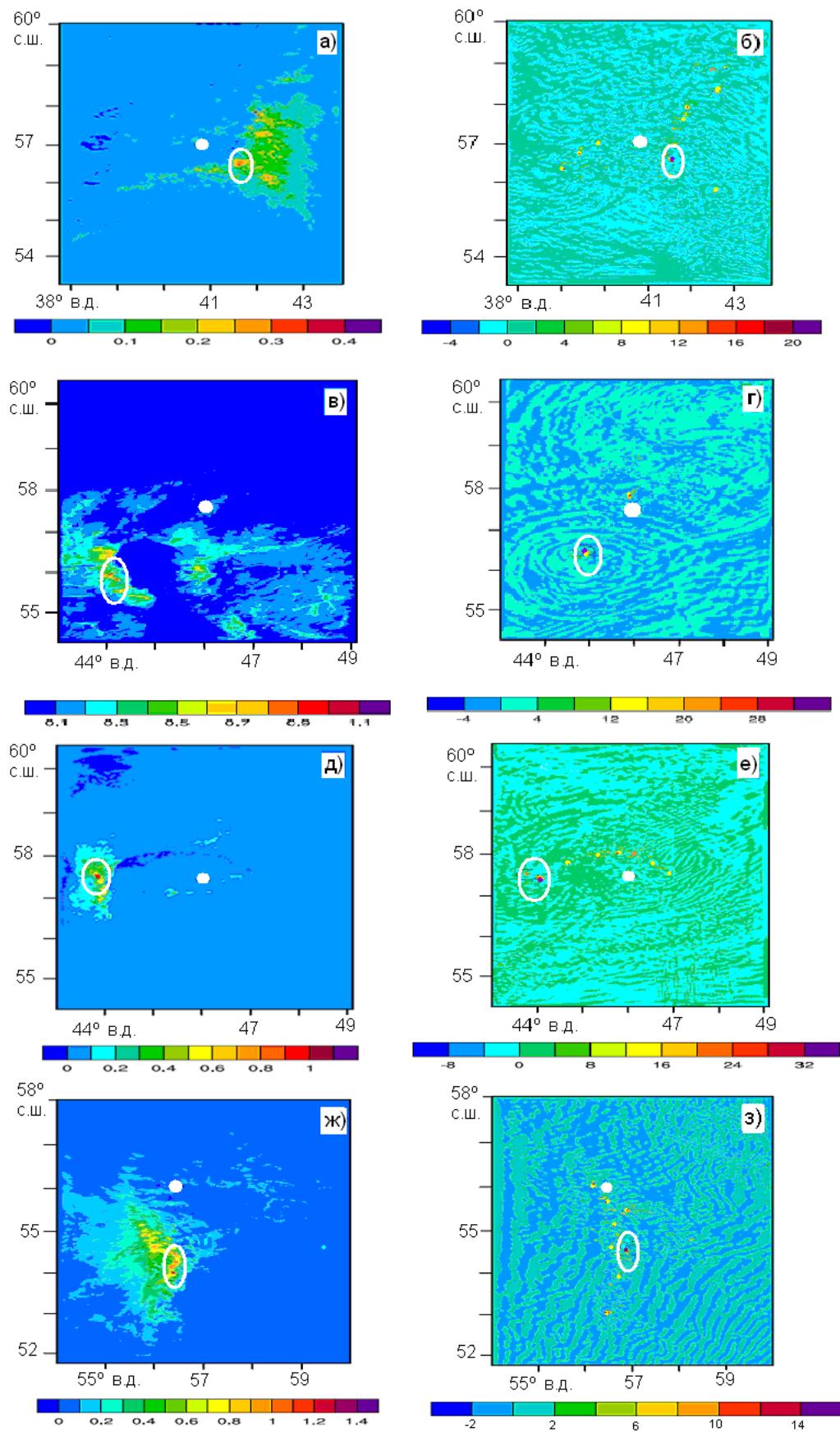


Рисунок 3.14 – Квазипрогностические поля индекса STP_{el} (а, в, д, ж) и вертикальной скорости W (б, г, е, з) в моменты достижения индексом абсолютных максимумов (очерчены эллипсами) для смерчей (выделены белыми кругами): а, б) Т1; в, г) Т2 (1 июня); д, е) Т2 (2 июня); ж, з) Т3

По результатам анализа полей вертикальной скорости для черноморских смерчей, зарегистрированных в 2014-2016 гг., было установлено, что положение максимума W было достаточно сильно смещено от положения смерча (рисунок 3.15а). С точностью до 100 км подтверждалось ранее установленное качественное согласие между положением максимума W и индексов SCP и STP_{el}. В ряде случаев значения этих индексов превышали заданный для них порог. Этим превышениям сопутствовали наиболее высокие значения максимума W (рисунок 3.15б), чаще всего они фиксировались при значениях скорости выше 18 м/с. Локализуемая по индексам SCP и STP_{el} смерчеопасная область находилась на расстоянии выше 200 км от места регистрации смерча. Очевидно, что эта область характеризовала возможность формирования мезоциклических смерчей вдали от рассматриваемого смерча и не была связана с ним. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенный выше признак достижения максимума W оказывается малоинформативным в случае прогноза малоинтенсивных немезоциклических смерчей.

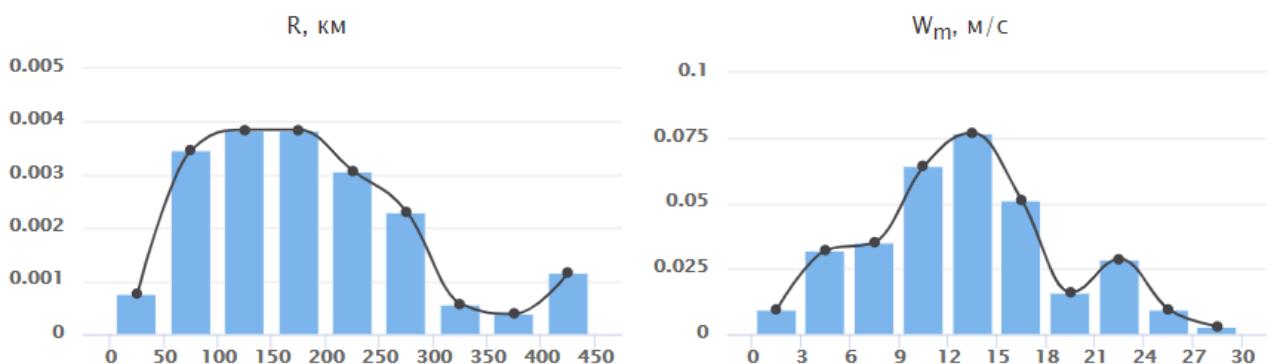


Рисунок 3.15 – Гистограммы распределения расстояний от места регистрации смерча до положения максимума вертикальной скорости (слева) и значений самого максимума (справа) для случаев смерчей у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым в 2014-2016 гг.

3.2 Индекс смерчеопасности для прибрежной акватории Черного моря

3.2.1 Метод определения регионального индекса смерчеопасности

Метод определения регионального индекса смерчеопасности был разработан с целью получения на его основе формулы расчета соответствующего индекса для прогноза водяных смерчей немезоциклического происхождения. Метод пригоден для любых акваторий, в пределах которых регистрируются смерчи данного типа. При соответствующем варьировании списка

используемых предикторов он может быть применен и для определения регионального индекса для прогноза сухопутных немезоциклических смерчей.

Метод базируется на распознавании смерчеопасной ситуации, под которой понимается такое состояние атмосферы, которое было бы благоприятно для формирования смерчей в рассматриваемом регионе. В основе данного распознавания лежит использование обучающей выборки, представленной данными об уже имевшихся в регионе случаях наблюдения смерчей. С ее помощью для каждого предиктора из выбранного перечня устанавливается территориально-привязанное пороговое значение, и осуществляется отбор наиболее информативных вариантов расчета предикторов, используемых в итоговой формуле расчета индекса смерчеопасности.

Метод состоит из четырех этапов. На первом этапе формируется список предикторов смерчеопасных ситуаций. Выбор предикторов осуществлялся с учетом особенностей механизма образования немезоциклических водяных смерчей, рассмотренных в подразделах 1.2.2 и 1.2.3, обобщений из подраздела 1.3.6, а также работ различных авторов по тематике прогноза водяных смерчей [91, 136, 145]. В итоговый перечень были включены следующие предикторы:

- разность температуры поверхности моря и температуры воздуха на нижнем уровне атмосферы (DT) – предиктор формирования восходящих потоков воздуха и общей неустойчивости атмосферы;
- потенциал вертикальной завихренности (DD) – предиктор горизонтального сдвига ветра, равный сумме абсолютных значений разности направлений ветра в смежных по осям X и Y узлах, отнесенной к шагу сетки (рисунок 3.16):

$$DD_{i,j} = \frac{|D_{i,j+1} - D_{i,j}|}{dy} + \frac{|D_{i+1,j} - D_{i,j}|}{dx}, \quad (3.2)$$

где $D_{i,j}$ – направление ветра в узле расчетной сетки, dx и dy – шаги сетки в горизонтальной плоскости.

- относительная влажность воздуха (RH) – предиктор формирования облаков с низкой нижней границей;
- вертикальный сдвиг ветра (S) и абсолютное значение разности скоростей ветра (DU) – предикторы устойчивости сформированного вихря.

Первые три предиктора были названы образующими, т. к. они характеризуют условия, благоприятные для запуска механизма формирования немезоциклического смерча над водной поверхностью, а последующие два – ограничивающими, поскольку они накладывают ограничения на условия поддержания сформированного вихря.

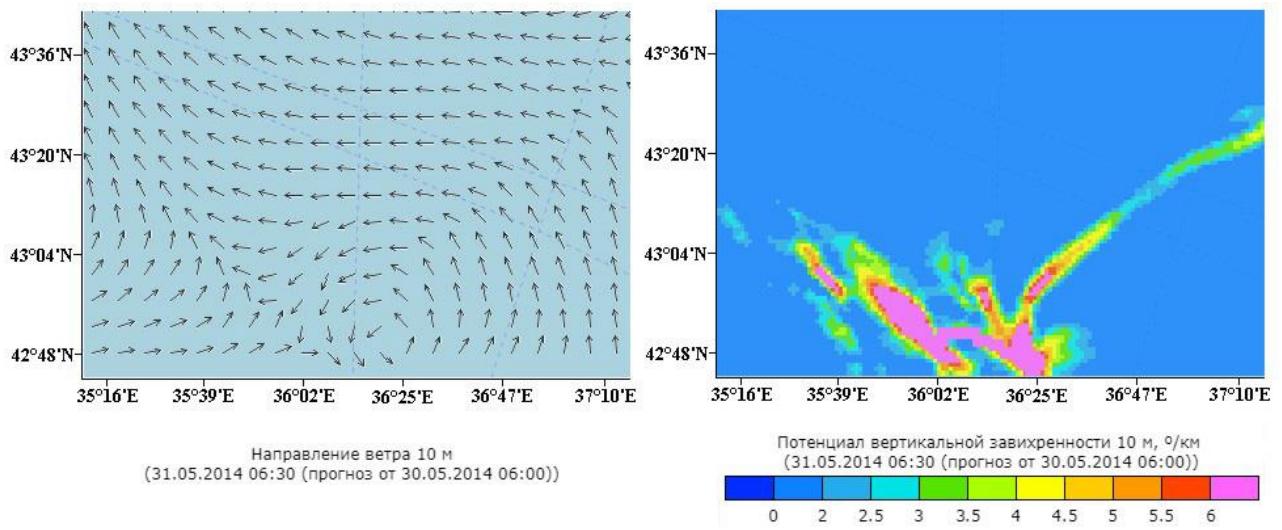


Рисунок 3.16 – Прогноз направления ветра по модели WRF (слева) и соответствующий ему прогноз потенциала вертикальной завихренности (справа) на уровне 10 м

На втором этапе для каждого предиктора в зависимости от его физической сущности устанавливается перечень уровней или границ слоя, в котором ведется его расчет (далее варианты предиктора) (таблица 3.6). Впоследствии вычисляются значения вариантов анализируемых предикторов по всем случаям смерчей из обучающей выборки. В качестве исходных данных для расчета используются поля метеорологических величин, полученные по модели высокого пространственно-временного разрешения. По окончании расчета для каждого варианта строится гистограмма распределения. По форме гистограммы выдвигается одна или несколько гипотез о возможном законе распределения и проводится статистическая проверка каждой гипотезы на базе критерия Пирсона [8].

На третьем этапе вычисляется соответствующий каждому варианту доверительный интервал выборочного среднего с уровнем значимости 99%. В случае выборки малого объема расчет границ доверительного интервала осуществляется с учетом установленного на втором этапе закона распределения, а для выборки большого объема ($N \geq 30$) – с учетом нормального распределения выборочного среднего.

В дальнейшем на основе границ полученных интервалов для каждого варианта устанавливается пороговое значение: для вариантов предикторов категории образующих (P1, P2 и P3) в качестве порогового выбирается нижняя граница доверительного интервала, а для вариантов предикторов категории ограничивающих (P4 и P5) – верхняя граница.

Таблица 3.6 – Список вариантов анализируемых предикторов смерчеопасных ситуаций

Обозначение предиктора	Название предиктора	Варианты предиктора	
		Обозна-чение варианта	Расчетный уровень
P1	Разность температуры поверхности моря и температуры воздуха на расчетном уровне, °С	P11	850 гПа
		P12	1 км
		P13	2 км
		P14	3 км
P2	Потенциал вертикальной завихренности, %/км	P21	10 м
		P22	осреднение в слое 0–1 км
		P23	осреднение в слое 0–2 км
		P24	осреднение в слое 0–3 км
P3	Относительная влажность воздуха, %	P31	осреднение в слое 0–1 км
P4	Абсолютное значение разности скоростей ветра на уровне 10 м и на расчетном уровне, м/с	P41	1 км
		P42	2 км
		P43	3 км
P5	Сдвиг ветра, м/(с·км)	P51	осреднение в слое 0–1 км
		P52	осреднение в слое 0–2 км
		P53	осреднение в слое 0–3 км

Правило распознавания смерчеопасной ситуации в рамках рассматриваемого метода определяется следующим образом: если значение хотя бы одного варианта для всех предикторов категории образующих больше или равно, а категории ограничивающих – меньше или равно соответствующему порогу (T):

$$WO = (P1i \geq T1i) \wedge (P2j \geq T2j) \wedge (P3k \geq T3k) \wedge (P4l \leq T4l) \wedge (P5m \leq T5m), \quad (3.3)$$

где $i = 1..4$, $j = 1..4$, $k = 1..3$, $l = 1..3$, $m = 1..3$, то можно говорить об идентификации смерчеопасной ситуации. Величина WO принимает следующие значения: 1 – наличие смерчеопасной ситуации, 0 – ее отсутствие. Следует подчеркнуть, что в качестве порогов для вариантов предикторов преднамеренно берутся не средние значения их выборок, которые хорошо описывают большинство рассматриваемых случаев, а границы их доверительных интервалов. Указанное решение направлено на повышение качества распознавания и сглаживание разброса значений (учет случаев, выходящих за рамки большинства).

Описанное выше правило характеризует распознавание смерчеопасной ситуации со 100%-ной вероятностью ее наступления. В условиях данной ситуации вероятность формирования смерча крайне высока (в пределе стремится к 100%). Однако ввиду сложного механизма его образования рассматриваемый набор предикторов не может считаться достаточным. Не исключается и ситуация возникновения смерча при выполнении неполного набора условий, накладываемых на значения предикторов. В связи с этим для проведения четвертого этапа устанавливаются четыре градации прогноза смерчеопасной ситуации (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Градации прогноза смерчеопасной ситуации

Градация	Правило распознавания	Вероятность формирования смерчей
0	$(P1i < T1i) \vee (P2j < T2j) \vee (P3k < T3k)$	0%
1	$(P1i \geq T1i) \wedge (P2j \geq T2j) \wedge (P3k \geq T3k)$	60%
2	$(P1i \geq T1i) \wedge (P2j \geq T2j) \wedge (P3k \geq T3k) \wedge (P4l \leq T4l) \vee (P1i \geq T1i) \wedge (P2j \geq T2j) \wedge (P3k \geq T3k) \wedge (P5m \leq T5m)$	80%
3	$(P1i \geq T1i) \wedge (P2j \geq T2j) \wedge (P3k \geq T3k) \wedge (P4l \leq T4l) \wedge (P5m \leq T5m)$	100%

Градация «0» характеризует ситуацию, при которой не выполняется хотя бы одно из условий на значения предикторов категории образующих, градация «1» — ситуацию, при которой выполняются все три образующих условия, градация «2» — ситуацию, при которой выполняются все три образующих условия и хотя бы одно из ограничивающих, градация «3» — ситуацию, при которой выполняются все три образующих условия и оба ограничивающих. При оценке вероятности формирования смерчей для установленных градаций принимается во внимание факт равнозначности анализируемых предикторов, т. е., считается, что каждый предиктор вносит равный 20% вклад в итоговую вероятность.

Заключительный четвертый этап включает в себя выбор наилучших вариантов анализируемых предикторов. С этой целью рассматриваются всевозможные комбинации данных вариантов при совместном использовании всех пяти предикторов: $P1i P2j P3k P4l P5m$. На базе каждой из сформированных комбинаций для моментов наблюдения смерчей из собранного архива проводятся расчеты градаций прогноза смерчеопасной ситуации во всех узлах используемой расчетной сетки. Если для какого-либо узла устанавливаются сразу несколько градаций, то в качестве итоговой выбирается максимальная среди них.

Далее для каждого случая смерча по всем комбинациям вычисляются наименьшие расстояния R1, R2 и R3 от места его регистрации до точек с градациями соответственно «1», «2» и «3» (рисунок 3.17).

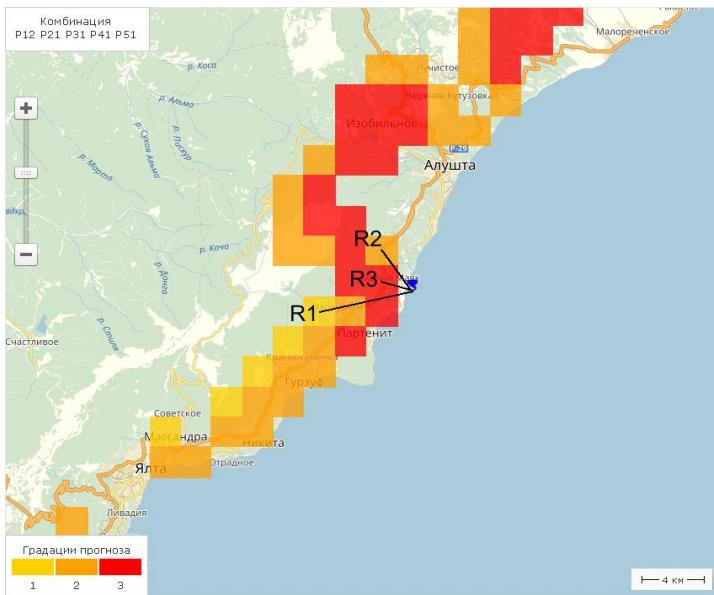


Рисунок 3.17 – Вычисление наименьших расстояний от места регистрации смерча до точек каждой градации прогноза

Впоследствии для каждой комбинации подсчитывается число случаев смерчей, для которых эта комбинация в рамках рассматриваемой градации оказалась наилучшей – характеризовалась наименьшим расстоянием до места регистрации смерча (далее выигрышные случаи). Для принятия окончательного решения о выборе наилучшей комбинации используется решающая функция вида:

$$f(N1, N2, N3) = 0.6 * N1 + 0.8 * N2 + N3, \quad (3.4)$$

где N1, N2, N3 – число выигрышных случаев комбинации по соответственно градациям «1», «2» и «3». В качестве весовых коэффициентов решающей функции используется вероятность формирования смерчей, соответствующая рассматриваемой градации. В качестве наилучшей выбирается комбинация с наибольшим значением решающей функции: $P1 * P2 * P3 * P4 * P5 *$.

На основе выбранной наилучшей комбинации вариантов предикторов формируется формула для расчета индекса смерчеопасности WRI (Waterspout Risk Index):

$$WRI = 0.2 * [(P1^* \geq T1^*) + (P2^* \geq T2^*) + (P3^* \geq T3^*) + (P4^* \leq T4^*) + (P5^* \leq T5^*)], \quad (3.5)$$

где $T1^*$, $T2^*$, $T3^*$, $T4^*$, $T5^*$ – пороговые значения, установленные на третьем этапе соответственно для наилучших вариантов $P1^*$, $P2^*$, $P3^*$, $P4^*$, $P5^*$.

При расчете индекса смерчеопасности WRI учитывается сумма вкладов от выполнения условий, накладываемых на его предикторы. Вклад от выполнения условия выражается

единичным значением, в противном случае – нулевым. Вклад в значение индекса от выполнения ограничивающих условий для DU и S учитывается только в том случае, если одновременно выполняются все три образующих условия для DT, DD, RH, т.к. только в этом случае имеет смысл говорить об устойчивости сформированного вихря.

Область возможных значений индекса WRI определяется множеством [0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1], элементы которого соответствуют вероятности формирования смерчей.

Следует подчеркнуть, что используемая формула расчета индекса WRI (3.5) и правило расчета данного индекса на ее основе являются более предпочтительными по сравнению с формулой:

$$WRI = \frac{P1^*}{T1^*} \cdot \frac{P2^*}{T2^*} \cdot \frac{P3^*}{T3^*} \cdot \frac{T4^*}{P4^*} \cdot \frac{T5^*}{P5^*}, \quad (3.6)$$

часто встречающейся среди индексов конвективной неустойчивости атмосферы.

В формуле индекса WRI (3.5) учитывается требование на выполнение комбинации условий с акцентом на обязательное выполнение образующих условий, что в физическом плане более правильно. В вышеуказанной формуле (3.6) в качестве решающего значения для выдачи прогноза выступает единичное значение индекса, без рассмотрения того, какой вклад в это значение внес тот или иной предиктор. При аномально высоком (низком) значении одного или нескольких предикторов (не обязательно образующих) и значениях остальных предикторов, не выходящих за рамки пороговых, по формуле 3.6 может идентифицироваться ложная смерчеопасная ситуация. При использовании формулы 3.5 возможность этого исключается.

Особенностью описанного метода является зависимость формулы расчета индекса смерчеопасности от используемой в процессе ее получения обучающей выборки. В целом при неизменности перечня рассматриваемых предикторов смерчей на различных выборках формула индекса будет отличаться лишь составом лучших вариантов этих предикторов и значениями установленных для них порогов. В оперативной практике рекомендуется проводить ежегодное уточнение этих переменных за счет добавления в обучающую выборку новых данных о смерчах в пределах анализируемой территории.

3.2.2 Применение метода на прибрежной акватории Черного моря

С целью реализации упомянутых выше рекомендаций по ежегодному уточнению переменных, входящих в состав формулы расчета индекса WRI, а также для изучения зависимости качества прогноза смерчей по данному индексу от объема используемой для его построения обучающей выборки, были получены два варианта расчета индекса: на базе архива смерчей у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым за период с 2014

по 2015 гг. (выборка А) и за период с 2014 по 2016 гг. (выборка Б). Выборка А включает в себя данные о 74 смерчах (70 достоверных и 4 вероятных случая), выборка Б – данные о 109 смерчах (95 достоверных и 14 вероятных случаев). В данном подразделе приводятся результаты применения вышеописанного метода при использовании указанных выборок, а в последующем дается оценка качества прогноза смерчей на основе полученных в итоге вариантов расчета индекса WRI.

Расчет вариантов предикторов осуществлялся с использованием ранее полученных результатов моделирования с шагом сетки 2×2 км (подраздел 3.1.3). На рисунках 3.18 и 3.19 показаны гистограммы распределения значений данных вариантов соответственно для выборки А и Б. Статистическая проверка гипотез о законе распределения на базе критерия Пирсона показала, что значения соответствующих вариантов на различных выборках имеют одинаковый закон распределения (таблица 3.8). Единственным исключением стал вариант Р43. Черной линией на рисунках 3.18 и 3.19 показана сглаживающая кривая эмпирической плотности распределения, а красной – установленная в ходе проверки гипотез теоретическая плотность.

В таблице 3.9 приведены статистические данные по вариантам предикторов, в том числе границы доверительного интервала выборочного среднего, используемые для задания пороговых значений. Ввиду большого объема выборок вычисление данных границ производилось с учетом нормального распределения выборочного среднего.

В таблицах 3.10 и 3.11 показаны первые пять комбинаций вариантов предикторов с наибольшим значением решающей функции соответственно для выборки А и Б. В столбце R_{min} для каждой градации рассматриваемой комбинации указано осредненное по всем случаям смерчей из используемой выборки минимальное расстояние от узла данной градации до места регистрации смерча, отражающее пространственную погрешность прогноза.

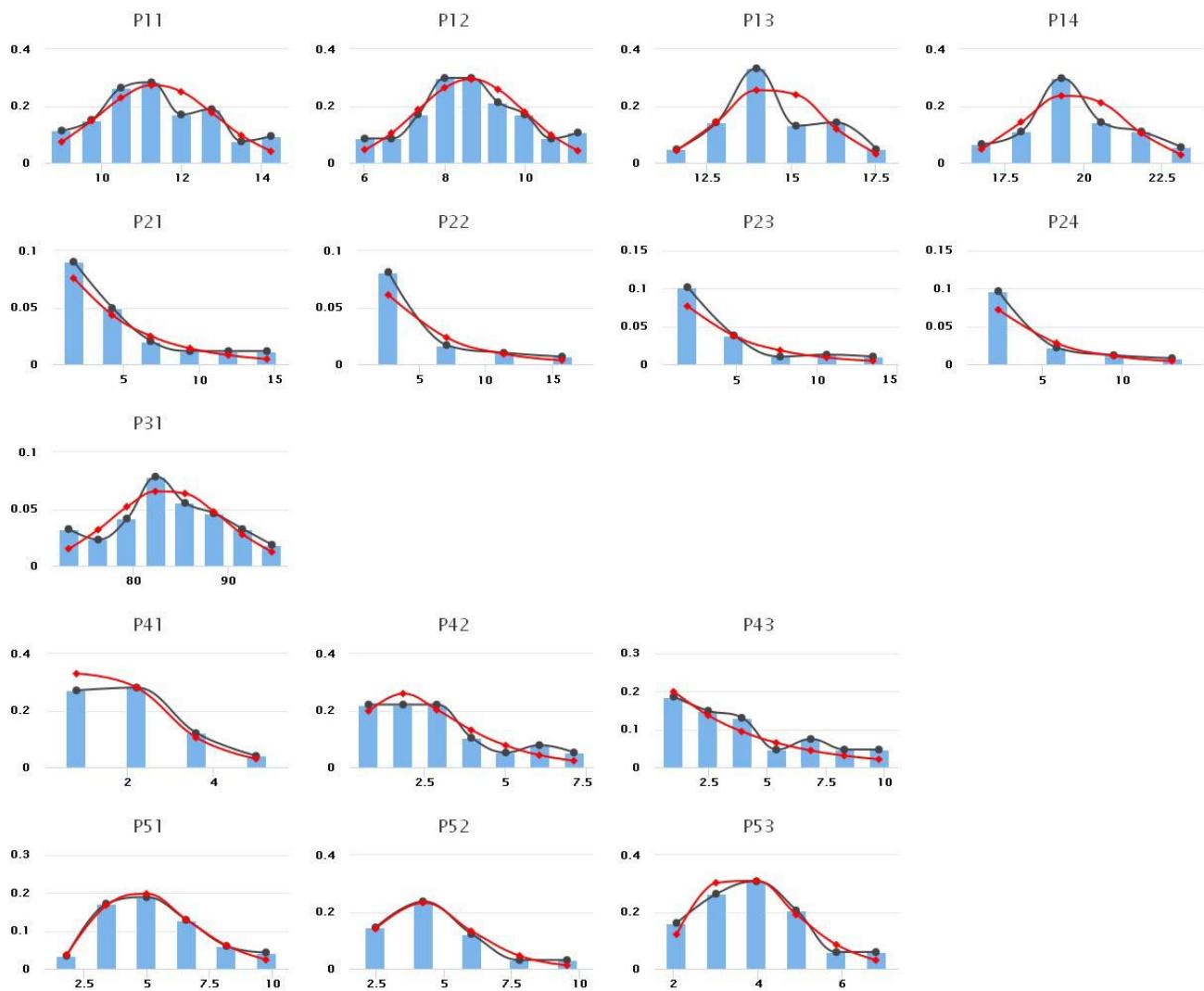


Рисунок 3.18 – Гистограммы распределения значений вариантов анализируемых предикторов (выборка А), черная кривая – эмпирическая плотность распределения, красная кривая – теоретическая плотность распределения

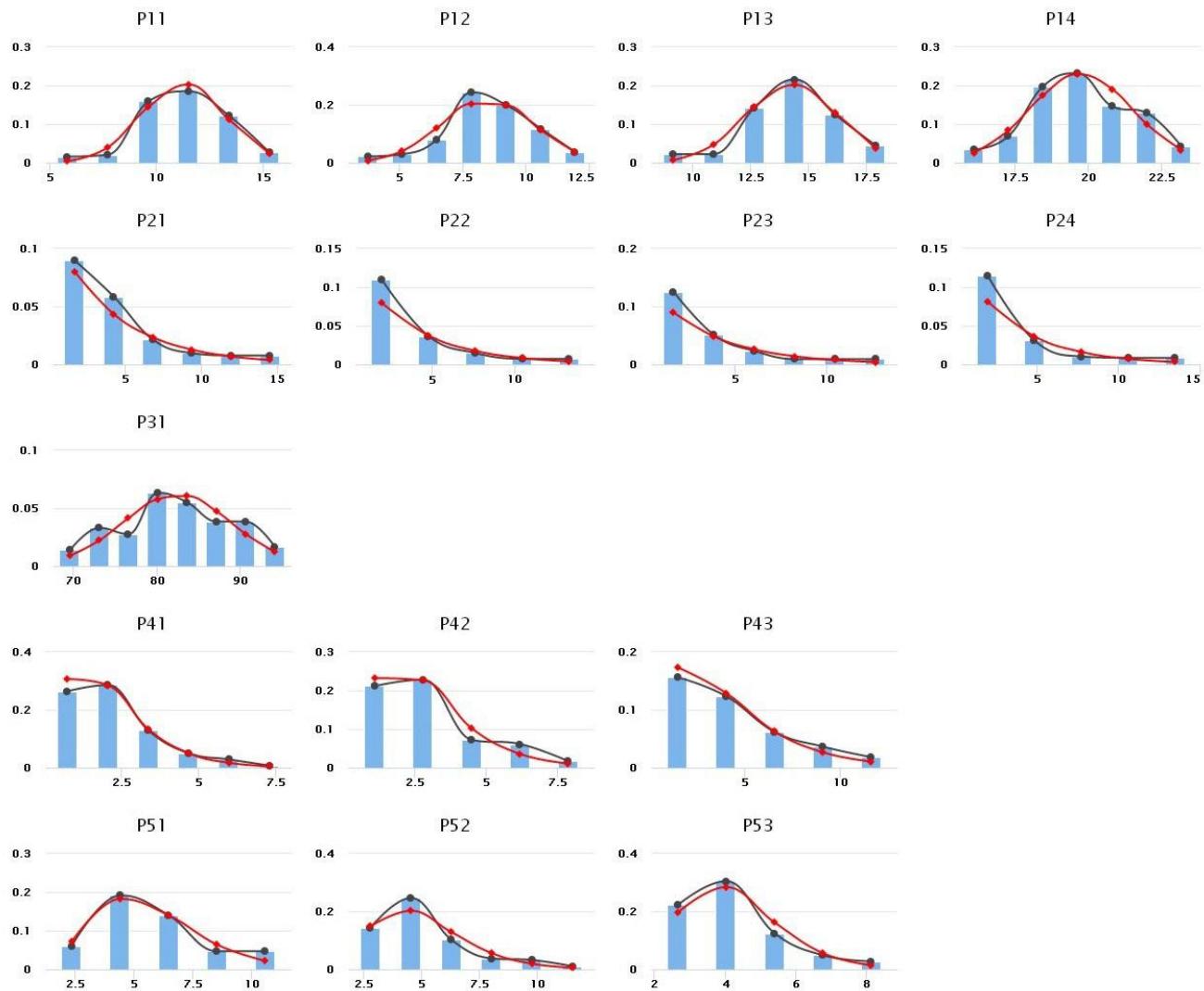


Рисунок 3.19 – Гистограммы распределения значений вариантов анализируемых предикторов (выборка Б), черная кривая – эмпирическая плотность распределения, красная кривая – теоретическая плотность распределения

Таблица 3.8 – Закон распределения значений вариантов анализируемых предикторов (Н – нормальный, Э – экспоненциальный, Г – гамма-распределение)

Таблица 3.9 – Статистические данные по вариантам предикторов

Предиктор	Вариант	Значение								Границы доверительного интервала*			
		Среднее		Минимальное		Максимальное		Среднее квадратичное отклонение					
		Выб. А	Выб. Б	Выб. А	Выб. Б	Выб. А	Выб. Б	Выб. А	Выб. Б	Выб. А	Выб. Б	Выб. А	Выб. Б
P1	P11	11.373	11.223	8.640	5.539	14.598	16.202	1.457	1.949	10.927	10.727	11.819	11.733
	P12	8.628	8.459	5.694	3.074	11.522	12.560	1.355	1.844	8.213	7.981	9.043	8.937
	P13	14.435	14.269	11.039	8.319	17.650	18.439	1.485	1.973	13.980	13.763	14.890	14.776
	P14	19.698	19.742	16.112	15.527	23.631	23.631	1.641	1.732	19.195	19.292	20.200	20.191
P2	P21	4.569	4.196	0.402	0.395	15.783	15.783	7.426	6.618	3.399	3.342	5.739	5.049
	P22	4.562	4.357	0.538	0.538	17.645	17.645	8.667	8.079	3.207	3.304	5.918	5.410
	P23	4.025	3.801	0.501	0.501	14.922	14.922	7.279	6.844	2.887	2.918	5.164	4.684
	P24	3.799	3.570	0.495	0.495	14.849	14.849	6.902	6.547	2.728	2.729	4.871	4.410
P3	P31	83.562	82.381	71.741	69.289	95.713	95.713	5.976	6.480	81.732	80.741	85.392	84.020
P4	P41	2.051	2.156	0.236	0.236	5.718	7.390	1.271	1.410	1.662	1.805	2.440	2.508
	P42	2.883	2.853	0.257	0.257	7.571	8.590	1.904	1.745	2.308	2.416	3.458	3.290
	P43	3.903	4.115	0.240	0.240	10.344	12.861	2.847	3.023	3.043	3.368	4.763	4.862
P5	P51	5.316	5.673	1.336	1.336	10.562	11.545	2.096	2.332	4.683	5.084	5.949	6.263
	P52	4.645	4.995	1.927	1.927	10.431	12.343	1.806	2.092	4.104	4.473	5.187	5.517
	P53	3.910	4.222	1.968	1.968	7.281	8.776	1.259	1.446	3.527	3.858	4.293	4.586

*Примечание: Жирным шрифтом выделены значения, которые были выбраны в качестве пороговых для соответствующих вариантов предикторов.

Таблица 3.10 – Первые пять наилучших комбинаций вариантов предикторов (выборка А)

Комбинация	Число выигрышных случаев			R_{min} , км			Значение решающей функции
	града-ция 1	града-ция 2	града-ция 3	града-ция 1	града-ция 2	града-ция 3	
P12 P21 P31 P41 P51	29	22	31	24	20	17	66
P14 P21 P31 P41 P51	29	20	29	24	18	17	62.4
P13 P21 P31 P41 P51	29	19	29	24	19	23	61.6
P12 P21 P31 P42 P51	21	23	30	30	18	20	61
P12 P21 P31 P43 P51	17	22	32	35	18	27	59.8

Таблица 3.11 – Первые пять наилучших комбинаций вариантов предикторов (выборка Б)

Комбинация	Число выигрышных случаев			R_{min} , км			Значение решающей функции
	града-ция 1	града-ция 2	града-ция 3	града-ция 1	града-ция 2	града-ция 3	
P12 P21 P31 P41 P51	50	36	45	26	19	18	103.8
P13 P21 P31 P41 P51	51	32	45	25	19	19	101.2
P14 P21 P31 P41 P51	50	34	43	26	20	20	100.2
P11 P21 P31 P41 P51	43	29	44	39	27	21	93
P13 P21 P31 P42 P51	31	34	39	28	19	21	84.8

Из таблиц 3.10 и 3.11 видно, что наиболее информативной комбинацией вариантов предикторов как на базе обучающей выборки А, так и на базе обучающей выборки Б оказалась комбинация P12 P21 P31 P41 P51, включающая в себя следующий набор вариантов:

- разность температуры поверхности моря и температуры воздуха на уровне 1 км (DT_1);
- потенциал вертикальной завихренности на уровне 10 м (DD_{10});
- относительная влажность воздуха, осредненная в слое 0–1 км (RH_1);
- абсолютное значение разности скоростей ветра на уровнях 10 м и 1 км (DU_1);
- сдвиг ветра, осредненный в слое 0–1 км (S_1).

Следует отметить, что все варианты предикторов, входящие в первую тройку комбинаций, за исключением разности температур связаны с нижним 1-километровым слоем атмосферы, что, по-видимому, подчеркивает важную роль данного слоя для распознавания смерчеопасных ситуаций, способствующих возникновению смерчей над Черным морем. Кроме того из таблиц 3.10 и 3.11 видно, что для большинства комбинаций прослеживается следующая зависимость: чем больше градация прогноза (вероятность) смерчеопасной ситуации, тем ближе

к фактическому месту регистрации смерча дается этот прогноз, т.е. тем меньше его пространственная погрешность. Таким образом, используемый подход к оценке вероятности формирования смерчей хорошо согласуется с действительностью.

С учетом выбранной комбинации формулы для расчета индекса WRI приобретают следующий вид:

$$WRI_{2014-2015} = 0.2 * [(DT_1 \geq 8.2) + (DD_{10} \geq 3.4) + (RH_1 \geq 81.7) + (DU_1 \leq 2.4) + (S_1 \leq 6.0)] \quad (3.7)$$

$$WRI_{2014-2016} = 0.2 * [(DT_1 \geq 8.0) + (DD_{10} \geq 3.3) + (RH_1 \geq 80.7) + (DU_1 \leq 2.5) + (S_1 \leq 6.3)] \quad (3.8)$$

Вариант (3.8) описывает более широкую область смерчеопасных значений по сравнению с (3.7): пороговые значения предикторов категории образующих уменьшились на 2-3%, а категории ограничивающих – увеличились на 4-5%. Данное расширение, по-видимому, было обусловлено особенностями условий формирования смерчей в 2016 г., которые возникали при более низких значениях образующих предикторов и более высоких значениях ограничивающих чем в 2014-2015 гг. В целом, установленные различия не столь существенны, и, как предполагается, по мере накопления новых данных о смерчах они могут незначительно варьироваться в ту или иную сторону.

3.2.3 Оценка эффективности нового индекса смерчеопасности

Для оценки эффективности полученных вариантов расчета индекса WRI (3.7) и (3.8) были применены те же подходы, что и в подразделе 3.1.3. Единственное, что нуждается в уточнении – это выбор решающего значения для выдачи прогноза. Аналогично индексу KHS, для индекса WRI в качестве решающего был выбран уровень 60% от его максимума: $WRI \geq 0.6$. В таблице 3.12 приведены результаты расчета Π_a и R_{min} по каждому сезону смерчей и всему анализируемому периоду в целом. Для возможности сопоставления полученных результатов расчет указанных показателей для варианта $WRI_{2014-2015}$ осуществлялся не только в пределах использованной для его определения обучающей выборки (2014 и 2015 гг.), но и за 2016 г.

На основании данных таблицы 3.12 можно сделать следующий ряд выводов. Во-первых, значение Π_a для варианта $WRI_{2014-2016}$ по всем сезонам и всем алгоритмам A1, A2, A3 несколько выше или равно аналогичному значению для варианта $WRI_{2014-2015}$. Что касается пространственной погрешности прогноза, то и здесь вариант $WRI_{2014-2016}$ показывает несколько лучшие результаты. Таким образом, использование в процессе получения формулы расчета индекса WRI обучающей выборки большего временного охвата способствовало повышению качества прогноза смерчей по данному индексу. Отмеченное улучшение, как уже было упомянуто выше, было достигнуто за счет расширения области смерчеопасных значений. При

дальнейших упоминаниях об индексе WRI подразумевается его расчет в соответствии с вариантом WRI₂₀₁₄₋₂₀₁₆.

Во-вторых, значения оцениваемых показателей варианта WRI₂₀₁₄₋₂₀₁₆ ($\Pi_{\text{я}} = 80\%$, $R_{\min} = 12$ км (в среднем по всему периоду по обоим подходам и алгоритму А1)) сопоставимы с аналогичными значениями для индекса NSP и метода номограммы Силады (таблицы 3.3 и 3.4). По этой причине индекс WRI можно отнести к числу информативных индексов и использовать его для прогноза смерчевых ситуаций, связанных с формированием немезоциклонных смерчей над Черным морем.

Таблица 3.12 – Оценка эффективности вариантов расчета индекса WRI

		Первый подход		Второй подход	
		WRI ₂₀₁₄₋₂₀₁₅	WRI ₂₀₁₄₋₂₀₁₆	WRI ₂₀₁₄₋₂₀₁₅	WRI ₂₀₁₄₋₂₀₁₆
$\Pi_{\text{я}}, \%$	хотя бы один узел (A1)	2014 г.	93	93	80
		2015 г.	98	100	80
		2016 г.	69	71	44
		весь период	87	88	68
	не менее 5% узлов (A2)	2014 г.	55	62	56
		2015 г.	82	87	71
		2016 г.	46	49	32
		весь период	61	66	53
	не менее 10% узлов (A3)	2014 г.	52	52	48
		2015 г.	73	73	64
		2016 г.	43	43	24
		весь период	56	56	45
$R_{\min}, \text{км}$	2014 г.	13	11	16	14
	2015 г.	12	11	7	7
	2016 г.	16	15	22	19
	весь период	14	12	13	11

По результатам разработки метода определения регионального индекса смерчевого опасности и его применения на прибрежной акватории Черного моря в журнале «Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова» вып. 584 за 2017 г. была опубликована соответствующая статья [21].

3.3 Этапы работы методики оценки смерчеопасности

Предлагаемая автоматизированная методика оценки смерчеопасности вблизи Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым включает в себя три этапа. На первом этапе осуществляется выделение смерчеопасных областей с различными зонами риска с использованием результатов расчетов по мезомасштабной модели высокого пространственно-временного разрешения (WRF или COSMO-Ru). По результатам данного этапа строится прогноз смерчеопасности. Второй этап расчета по методике предусматривает классификацию облачных ячеек, обнаруженных в режиме реального времени по спутниковым данным (Meteosat-10/11), по степени их смерчеопасности. В ходе этого этапа каждой облачной ячейке присваиваются категории риска возникновения из нее смерча того или иного типа. На третьем этапе по результатам оценки смерчеопасности по времени и пространству в автоматическом режиме формируются предупреждения о смерчах, а также выявляются наиболее смерчеопасные облачные ячейки. Ниже дается детальное описание каждого из перечисленных этапов.

3.3.1 Выделение смерчеопасных областей с различными зонами риска

В соответствии с ранее упомянутой классификацией индексов, используемых для прогноза смерчеопасных ситуаций, в методике рассматривается выделение смерчеопасных областей трех типов (таблица 3.13).

Как видно из таблицы 3.13, каждой области соответствует свой перечень определяющих индексов и их пороговых значений. В перечень определяющих индексов областей НМС и ОН были включены те индексы, которые показали наилучшие результаты в ходе ранее проведенного тестирования (подразделы 3.1.3 и 3.2.3). Здесь и далее для краткости метод SWN рассматривается как бинарный индекс. Перечень индексов области МС был составлен из всего множества рассмотренных в подразделе 1.3.1 индексов мезоциклонных смерчей, ввиду отсутствия данных об их эффективности в черноморском регионе.

В процессе выделения областей каждого типа анализируются значения индексов рассматриваемой области в узлах расчетной сетки. Для каждого узла подсчитывается количество индексов N_{ep} , для которых в зависимости от физической сущности индекса его значение в данном узле либо больше или равно, либо меньше или равно установленному для него пороговому значению:

$$N_{ep} = \sum_{k=1}^{Nap} (P_k \geq T_k), \quad (3.9)$$

где N_{ap} – общее количество индексов рассматриваемой области, $P_{k i,j}$ – значение k -ого индекса рассматриваемой области в узле расчетной сетки, T_k – пороговое значение k -ого индекса рассматриваемой области.

Таблица 3.13 – Индексы, определяющие смерчеопасные области, и их пороговые значения

Тип смерчеопасной области		Индексы и их пороговые значения
Обозначение	Описание	
HMC	смерчеопасная область, в пределах которой возможно формирование смерчей немезоциклонного происхождения	$NSP \geq 1$ $WRI = 1$ $SWN = 1$
MC	смерчеопасная область, в пределах которой возможно формирование смерчей мезоциклонного происхождения	$WD_{BRN} \geq 50$ $S_1^* \geq 10$ $SRH_1 \geq 100$ $SRH_3 \geq 150$ $VGP \geq 0.3$ $EHI \geq 1$ $SCP \geq 1$ $STP_{fl} \geq 1$ $STP_{el} \geq 1$
OH	область общей неустойчивости атмосферы	$CAPE_{MU} \geq 1000$ $CIN_{MU} \leq 200$ $LCL_{SB} \leq 800$

*Примечание: Из перечня вариантов индекса среднего сдвига ветра был выбран наиболее изученный и часто используемый вариант S_1 .

Для характеристики степени согласованности работы индексов в каждом узле расчетной сетки вычисляется параметр, названный категорией риска (таблица 3.14). На его основе смерчеопасная область делится на зоны риска, за каждой из которых по аналогии с уровнями опасности закрепляется своя цветовая заливка (рисунок 3.20). Если смерчеопасная ситуация не прогнозируется ни по одному из индексов, входящих в перечень рассматриваемой области, то устанавливается нулевая категория риска (зеленый уровень).

Таблица 3.14 – Категории риска смерчеопасных областей

Обозначение	Характеристика	Правило присвоения	Вероятность смерча
первая категория	повышенный риск	$0 < N_{ep} \leq \frac{1}{3} N_{ap}$	33%
вторая категория	высокий риск	$\frac{1}{3} N_{ap} < N_{ep} \leq \frac{2}{3} N_{ap}$	66%
третья категория	крайне высокий риск	$\frac{2}{3} N_{ap} < N_{ep} \leq N_{ap}$	100%

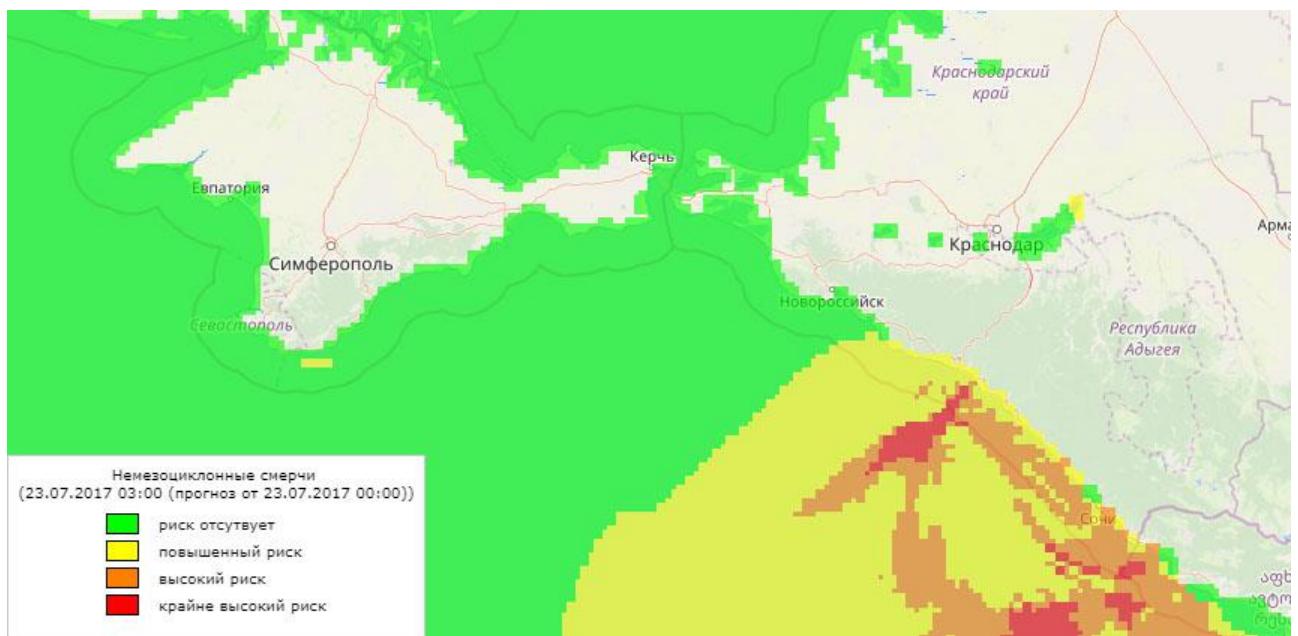


Рисунок 3.20 – Пример расчета зон риска смерчей немезоциклонного происхождения (модель WRF, шаг сетки 4 км)

При определении категорий риска предполагается, что каждый из индексов рассматриваемой области, ввиду специфики своего расчета, вносит независимый равный вклад в общий прогноз смерчеопасности. Из этого следует, что чем больше индексов спрогнозировали смерчеопасную ситуацию, тем больше риск ее наступления и соответственно тем больше риск формирования смерчей. В подразделе 4.2.1 рассматривается конкретный случай регистрации семейства смерчей, и для него приводятся поля каждого из индексов смерчеопасной области и итоговое поле зон риска, которые демонстрируют обоснованность используемого предположения.

Таким образом, по результатам выполнения первого этапа строится прогноз смерчеопасности, относящийся к областям различных типов. Прогноз имеет вероятностный характер и локализует зоны различной степени риска возможного возникновения смерчей. При

последующем анализе область ОН рассматривается в комплексе с областью МС или НМС. Сама по себе она дает лишь общее представление о том, в каких узлах расчетной сетки отмечается неустойчивое состояние атмосферы, являющееся необходимым, но не достаточным условием для формирования смерчей.

3.3.2 Присвоение категорий риска облачным ячейкам

На втором этапе осуществляется пространственное наложение прогноза смерчеопасности на потенциально несущие смерч области (облачные ячейки), обнаруживаемые в режиме реального времени по алгоритму RDT с использованием спутниковых данных (Meteosat-10/11), и формирование новых зон риска (рисунок 3.21).

По каждому типу смерчей (мезоциклоные и немезоциклоные) ячейке присваивается своя категория риска. Для характеристики ячейки используется максимальная категория риска среди множества соответствующих категорий прогноза смерчеопасности в принадлежащих ей узлах расчетной сетки, в которых прогнозируется хотя бы минимальная степень неустойчивости:

$$crNM_{cell} = \max_{i, j \in A \wedge crGI_{i,j} > 0} (crNM_{i,j}) \quad (3.10)$$

$$crM_{cell} = \max_{i, j \in A \wedge crGI_{i,j} > 0} (crM_{i,j}), \quad (3.11)$$

где $crNM_{cell}$ и crM_{cell} – категория риска формирования из ячейки соответственно смерчей немезоциклоного и мезоциклоного происхождения, $crNM_{i,j}$, $crM_{i,j}$, $crGI_{i,j}$ – значение категории риска смерчей в узле расчетной сетки соответственно для области НМС, МС и ОН, А – область ячейки.

Отдельное рассмотрение категорий риска смерчей каждого типа взамен использования единой категории объясняется различной трактовкой прогнозируемого риска. Присвоение ячейке ненулевой категории риска по смерчам мезоциклоного происхождения следует, в общем, рассматривать как риск ее эволюционирования в суперячейку с возможным комплексом опасных явлений и в том числе смерчей. Что касается смерчей немезоциклоного происхождения, то для них прогнозируемый риск отражает реальную опасность их формирования.

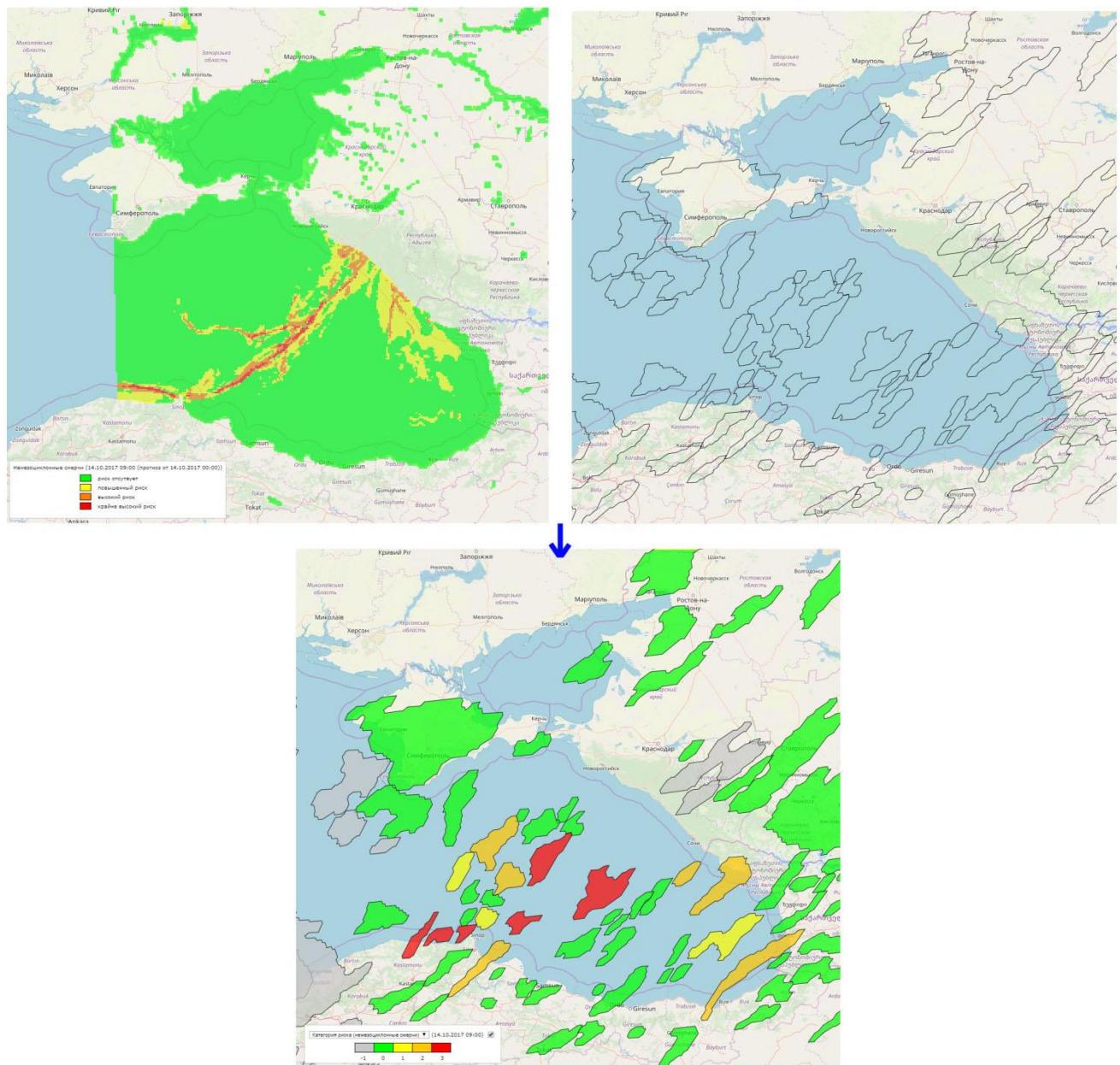


Рисунок 3.21 – Пример присвоения облачным ячейкам категории риска формирования из них смерчей немезоциклонального происхождения (модель COSMO-Ru2, шаг сетки 2.2 км)

3.3.3 Формирование предупреждений о возможном возникновении смерчей и выявление наиболее смерчеопасных облачных ячеек

На третьем этапе реализуется алгоритм автоматического формирования предупреждений о смерчах. Предупреждения выдаются по областям прибрежной акватории Черного моря (рисунок 3.4) и уточняются по мере получения новых результатов расчетов по модели. Заблаговременность выдачи предупреждений определяется используемыми параметрами моделирования. В предупреждениях указывается на вероятность возникновения смерчей того или иного типа. Предупреждения даются при второй или третьей категории риска.

В процессе формирования предупреждений для каждой прибрежной области по алгоритмам, идентичным (3.10) и (3.11), рассчитываются категории риска смерчей мезоциклонного и немезоциклонного происхождения для всех моментов времени выдачи результатов моделирования. После этого определяются непрерывные временные диапазоны, в течение которых по конкретной области прогнозируется одна и та же категория риска по смерчам того или иного типа. Для разграничения предупреждений идентичных по временному и пространственному охвату, сформированных с использованием выходных данных от различных счетов по модели, в их структуру включается временная отметка начала моделирования (Приложение №5).

По результатам анализа динамики смерчеопасности облачных ячеек на третьем этапе работы методики в реальном времени также выявляются наиболее вероятные ячейки, из которых могут возникнуть смерчи. Как и в случае с предупреждениями рассматриваются только те ячейки, которым была присвоена вторая или третья категория риска. Для каждой ячейки определяются непрерывные временные диапазоны присвоения ей одной и той же категории риска по смерчам того или иного типа. Наиболее смерчеопасными считаются ячейки с риском возникновения из них смерчей, сохраняющимся на протяжении длительного периода времени.

Для оценки информативности предлагаемого алгоритма выявления смерчеопасных ячеек были проведены расчеты категорий риска для материнских облачных ячеек смерчей, отмечавшихся у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым в 2014-2016 гг., а также анализ его динамики. В 81% случаев в моменты возникновения смерчей их материнские ячейки имели ненулевую категорию риска по смерчам немезоциклонного происхождения (в 51% случаев – третью, в 18% случаев – вторую и в 31% случаев – первую). В 82% случаев эта ненулевая категория была присвоена изначально в момент первого обнаружения ячейки и сохранялась вплоть до момента формирования смерча. Иными словами, заблаговременность возможного выявления смерчевых ячеек для рассматриваемого периода в основном определялась продолжительностью их жизни до регистрации смерчей. Как было установлено ранее (подраздел 2.3.4), для большинства ячеек эта продолжительность лежала в интервале 0-30 мин. Полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность выдачи предупреждения о возможном возникновении смерча уже с первых минут появления его материнского облака. Указанная оценка возможной заблаговременности подобного предупреждения превосходит известную заблаговременность оповещения о возникшем смерче по радиолокационным данным (10-20 мин).

По результатам разработки методики оценки смерчеопасности вблизи Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым был сделан соответствующий доклад на

XV Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса» [23].

3.4 Оперативная технология расчета по методике оценки смерчеопасности

Разработанная автоматизированная методика была реализована в оперативной технологии, обеспечивающей сбор всех необходимой для ее работы метеорологической информации и являющейся готовым решением по использованию данной методики на практике. Технология подготовлена к испытаниям в рамках плана испытаний методов, методик и технологий Росгидромета. Основными потребителями выходной продукции технологии являются синоптики региональных УГМС, обеспечивающих выпуск предупреждений об угрозах формирования смерчей над Черным морем.

По результатам разработки технологии в журнале «Гидрометеорологические исследования и прогнозы» № 1 (367) за 2018 г. была опубликована соответствующая статья [28].

3.4.1 Схема работы технологии

На рисунке 3.22 показана схема работы технологии, реализованная на вычислительных мощностях НПО «Тайфун». В левой части рисунка перечислены поставщики информации и получаемые от них данные, справа от них показаны сервера, на которых функционирует программное обеспечение технологии, а под ними автоматизированное рабочее место (АРМ) синоптика.

В перечень серверов технологии входят сервер обработки данных и сервер БД. На сервере обработки данных функционирует программный комплекс обработки и представления данных, составляющий основу работы технологии, а также программное обеспечение веб-сервера Apache, необходимое для работы подсистемы визуализации данного комплекса. На сервере БД функционирует программное обеспечение СУБД MongoDB. Также этот сервер отвечает за хранение архива данных, формируемых по результатам работы технологии. На АРМ синоптика функционирует веб-браузер, посредством которого осуществляется обращение к ранее упомянутой подсистеме визуализации.

Технология настроена на работу в непрерывном оперативном режиме. По мере поступления новых порций данных осуществляется их обработка, результаты которой сразу же становятся доступны для использования. За счет этого синоптик может в реальном времени

оценить текущий и прогнозируемый уровень смерчеопасности и при необходимости выдать соответствующее предупреждение.

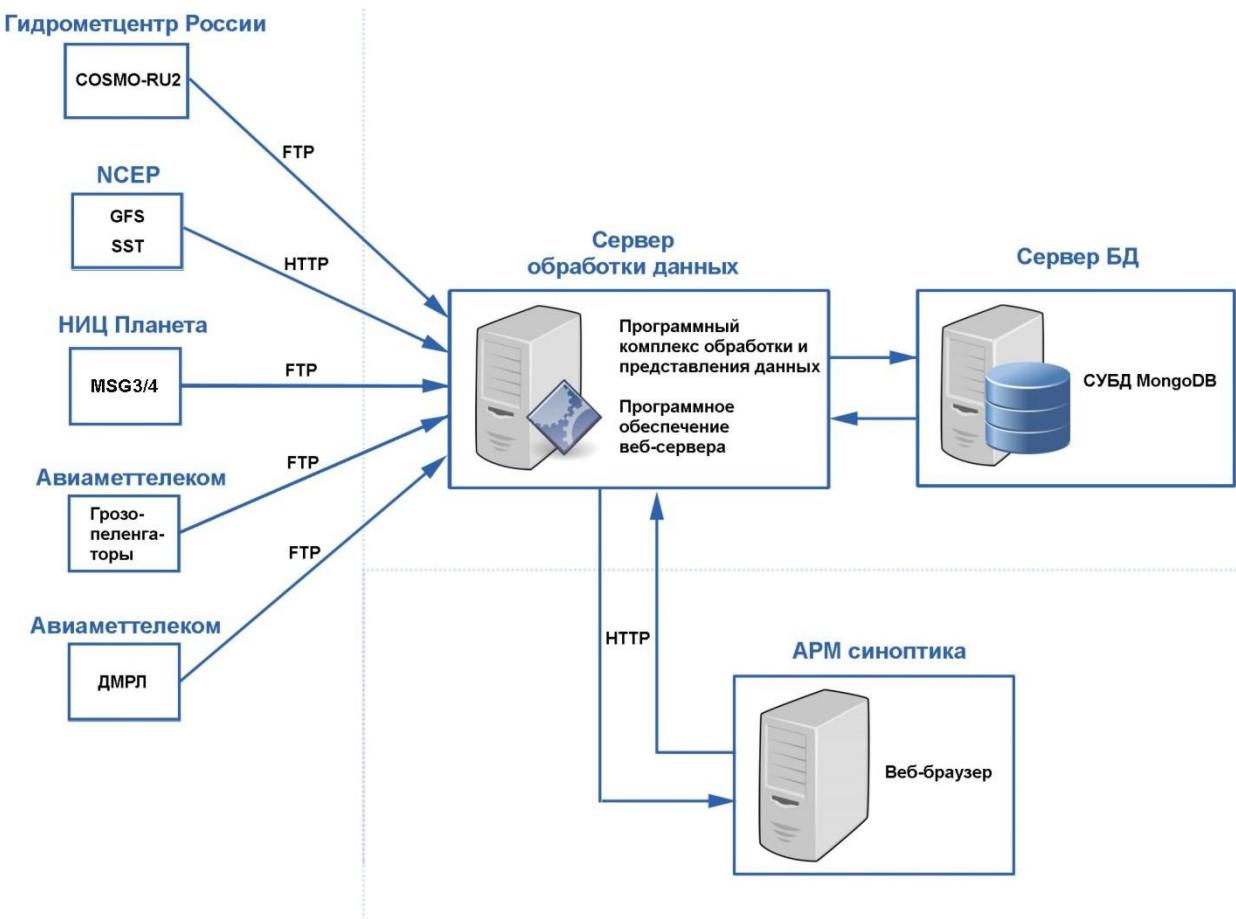


Рисунок 3.22 – Схема работы технологии

3.4.2 Состав входных и выходных данных

В перечень исходных данных, необходимых для работы технологии входят:

- спутниковые данные спектральных каналов VIS0.6, WV6.2, WV7.3, IR8.7, IR10.8, IR12.0 с геостационарного метеорологического спутника Meteosat-10/11 (MSG3/4);
- радиолокационные данные от действующих в черноморском регионе ДМРЛ;
- грозопеленгационные данные ГПС «Алвес» и «LS 8000» (при наличии, используются для общего представления текущей метеорологической обстановки);
- данные о температуре поверхности Черного моря, реализована поддержка работы с данными объективного анализа SST, формируемыми NCEP;
- данные численного моделирования атмосферы, реализована поддержка работы с данными двух типов:

- прогностические данные по модели GFS, включающие в себя стандартный набор параметров, выкладываемых на сервере NCEP, для их последующего использования в качестве начальных и граничных условий при проведении расчетов по модели WRF, настроенной на счет в пределах черноморского региона;
- прогностические данные по модели COSMO-Ru2 по Южному Федеральному округу, включающие в себя следующий набор параметров: на расчетных уровнях – давление, температура воздуха, удельная влажность, геопотенциальная высота, компоненты скорости ветра Vx и Vy; на уровне 2 м – температура и относительная влажность воздуха; на уровне 10 м – компоненты скорости ветра Vx и Vy; на поверхности земли – температура воздуха, давление и высота поверхности.

В технологии осуществляется параллельная обработка результатов расчетов по каждой из упомянутых моделей (WRF и COSMO-Ru2). Наличие указанной возможности позволило провести валидацию методики на различных моделях.

В перечень выходной продукции технологии входят:

- поля известных индексов, используемых для прогноза смерчеопасных ситуаций (NSP, SWN, WD_{BRN}, S₁, SRH₁, SRH₃, VGP, EHI, SCP, STP_{fl}, STP_{el}, CAPE_{MU}, CIN_{MU}, LCL_{SB}), а также поля разработанного в рамках диссертации индекса WRI и зоны риска трех упомянутых в подразделе 3.3.1 смерчеопасных областей для каждого момента времени выдачи результатов моделирования;
- предупреждения о возможном формировании смерчей по областям прибрежной акватории Черного моря на период моделирования;
- данные об облачных ячейках, обнаруженных на заданном цикле сканирования по спутниковым данным, включающие в себя пространственные и атрибутивные характеристики ячейки, в том числе значения категорий риска формирования из них смерчей мезоциклонального и немезоциклонального происхождения;
- перечень наиболее вероятных облачных ячеек, из которых могут возникнуть смерчи.

Выходная продукция технологии, получаемая по результатам обработки прогностических данных по модели COSMO-Ru2, формируется дважды в сутки, как правило, в интервале времени с 6 до 7 ч и с 18 до 19 ч по ВСВ, а по модели WRF – раз в сутки, как правило, в интервале времени с 6 до 7 ч по ВСВ. Выходная продукция, получаемая по результатам обработки спутниковых данных, формируется каждые 15 мин по мере поступления новой порции этих данных.

3.4.3 Программный комплекс обработки и представления данных

Программный комплекс обработки и представления данных является основным элементом в работе технологии. В состав данного комплекса входят: оперативная база данных, подсистема предварительной подготовки данных, подсистема расчета смерчевых предикторов, подсистема оценки смерчеопасности и подсистема визуализации (рисунок 3.23).

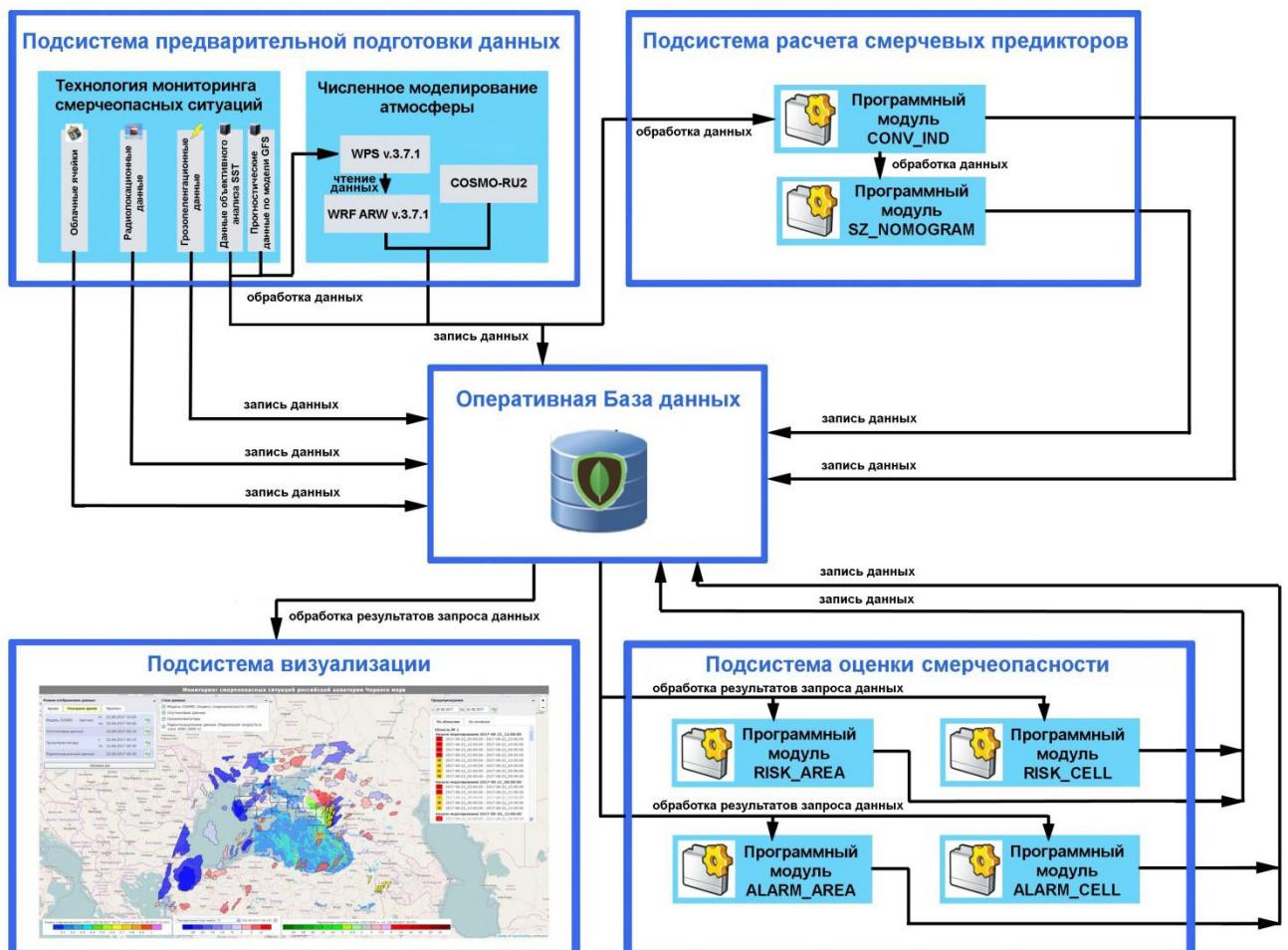


Рисунок 3.23 – Структура программного комплекса обработки и представления данных

Разработка программного комплекса велась в среде ОС семейства UNIX. В процессе разработки были использованы языки программирования C, Fortran, PHP и командная оболочка bash.

Оперативная БД является ядром программного комплекса, хранящим в себе результаты работы всех его подсистем. Ввиду того, что в состав программного комплекса вошли ранее рассмотренные в подразделе 2.2.2 сервисы технологии мониторинга смерчеопасных ситуаций, оперативная БД данного комплекса была построена на базе уже существующей БД указанной технологии. В структуру БД дополнительно была включена коллекция `alarm` для хранения предупреждений о смерчах.

Наполнение оперативной БД осуществляется в режиме реального времени по мере поступления новых порций исходных данных или результатов их обработки. По аналогии с работой сервиса Сб технологии мониторинга смерчеопасных ситуаций реализуется экспорт из БД данных с истекшим сроком давности и запись их в файлы в формате JSON в специально отведенное для архива место на жестком диске.

В состав подсистемы предварительной подготовки данных входят сервисы технологии мониторинга смерчеопасных ситуаций, а также новый разработанный сервис для работы с данными объективного анализа SST и блок запуска расчетов по модели WRF.

Моделирование проводится один раз в сутки на базе результатов счета по модели GFS от 00 ч. ВСВ. При моделировании используются те же настройки, что и ранее (таблица 3.1), за исключением параметра *sst_update* – в режиме оперативного моделирования значение этого параметра устанавливается равным 0, т.е. поле SST остается неизменным на протяжении всего периода моделирования. Расчеты осуществляются на внешней (шаг 16×16 км, размер 105×76) и вложенной в нее более мелкой сетке (шаг 4×4 км, размер 197×93) на 32 вертикальных уровнях. Период моделирования составляет двое суток, результаты счета выдаются каждый час. Для сравнения результаты расчетов по модели COSMO-Ru2 выдаются на сетке с разрешением 2.2 км с 3-х часовым шагом по времени, а заблаговременность прогноза составляет до 42 ч. На рисунке 3.24 показана область охвата вложенной сетки модели WRF (слева) и расчетная область модели COSMO-Ru2 (справа).

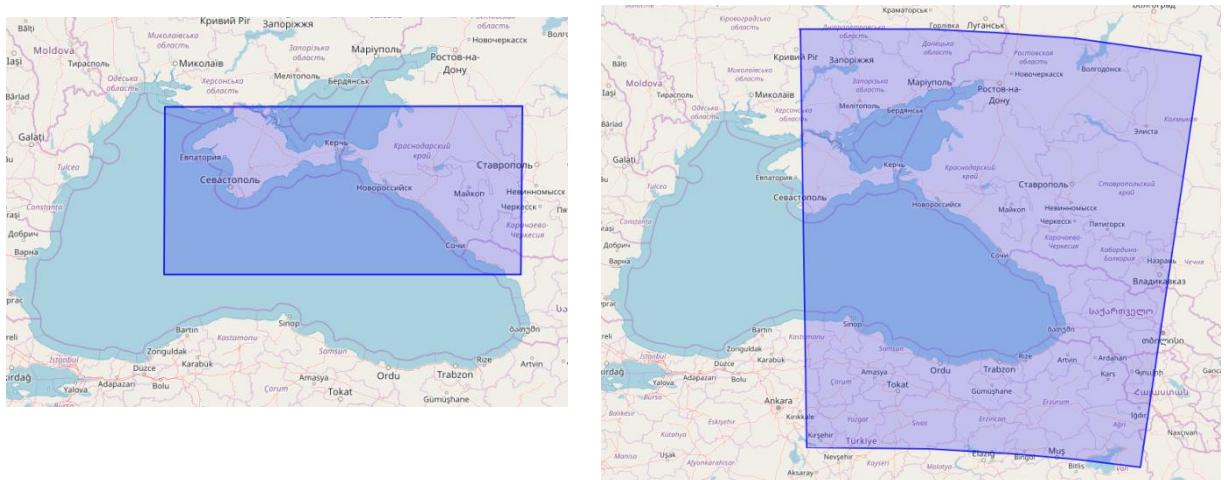


Рисунок 3.24 – Области расчета по модели WRF (слева) и COSMO-Ru2 (справа)

Подсистема расчета смерчевых предикторов включает в себя два программных модуля CONV_IND и SZ_NOMOGRAM. Подробное описание алгоритмов работы данных модулей было рассмотрено ранее в подразделе 3.1.2.

Подсистема оценки смерчеопасности является программной реализацией одноименной методики. Она включает в себя четыре программных модуля: RISK_AREA, RISK_CELL, ALARM_AREA, ALARM_CELL, предназначенных соответственно для выделения смерчеопасных областей с различными зонами риска (подраздел 3.3.1), присвоения категорий риска облачным ячейкам (подраздел 3.3.2), формирования предупреждений о смерчах по областям прибрежной акватории Черного моря и для выявления наиболее смерчеопасных облачных ячеек (подраздел 3.3.3).

Подсистема визуализации реализована в виде веб-приложения, позволяющего в удобном и наглядном виде просматривать все наборы данных, которые формируются по результатам работы программного комплекса и записываются в оперативную БД (рисунок 3.25).

По результатам разработки программного комплекса был сделан соответствующий доклад на Второй научно-практической конференции «Современные информационные технологии в гидрометеорологии и смежных с ней областях» [26].

Выходы по главе 3

Разработан алгоритм эффективного использования на прибрежной акватории Черного моря современных методов диагностирования смерчей и прогнозирования смерчеопасных ситуаций. В перечень реализуемых и тестируемых методов вошли метод, базирующийся на расчете индексов конвективной неустойчивости атмосферы, и метод номограммы Силадьи. Ранее при верификации записей архива смерчей 2014-2016 гг. свою эффективность в рассматриваемом регионе показал предложенный метеорологической службой Франции алгоритм RDT распознавания облачных ячеек.

По результатам тестирования индексов конвективной неустойчивости атмосферы, рассчитанных на выходных данных модели WRF с шагом сетки 2 км, к наиболее информативным для выборки смерчей 2014-2016 гг. были отнесены отдельные индексы общей неустойчивости атмосферы ($CAPE_{MU}$, CIN_{MU} , LCL_{SB}) и немезоциклических смерчей (NSP). Индексы мезоциклических смерчей, ввиду специфики используемых в них предикторов и их пороговых значений, не характерных для немезоциклических смерчей, оказались неинформативными. Метод номограммы Силадьи показал результаты сопоставимые с результатами для индекса NSP.

В рамках отдельной работы, проведенной совместно с Новицким М.А., Шмерлиным Б.Я. и др., протестирована эффективность индексов мезоциклических смерчей на случаях регистрации более интенсивных сухопутных смерчей на Европейской территории России.

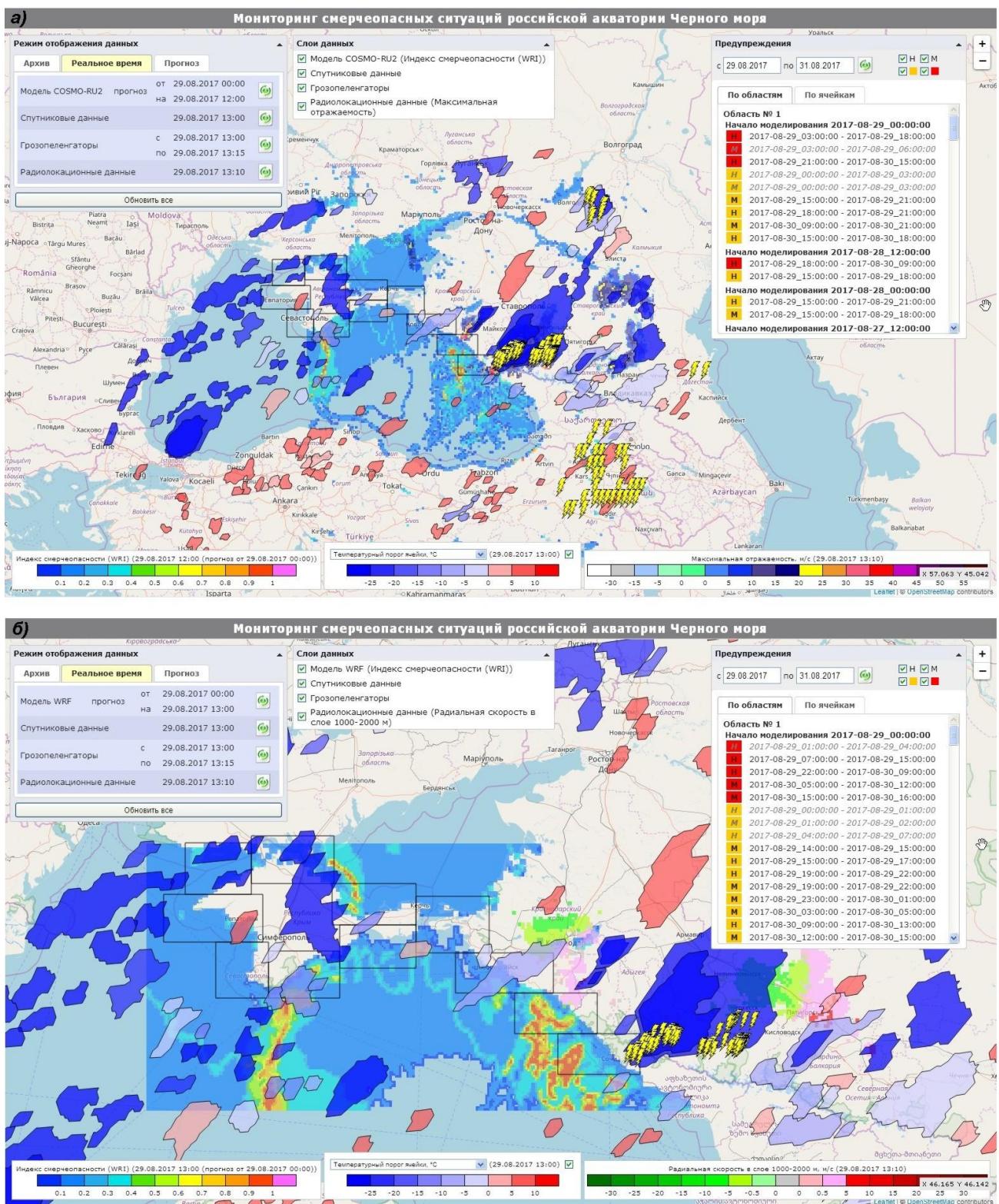


Рисунок 3.25 – Подсистема визуализации программного комплекса обработки и представления данных: а) модель COSMO-Ru2 б) модель WRF

По ее результатам выявлены наиболее информативные индексы данной группы (SCP и STP_{el}). Показана возможность рассмотрения достижения максимума вертикальной скорости в качестве еще одного важного признака распознавания смерчеопасной ситуации, связанной с

интенсивными смерчами. Для черноморских смерчей этот признак оказался малоинформативным. Предложен подход к коррекции прогноза смерчеопасных ситуаций с привлечением радиолокационных данных.

Разработан метод определения регионального индекса смерчеопасности для прогноза водяных смерчей немезоциклонального происхождения (WRI). Предложен перечень физически обоснованных предикторов смерчей данного типа (в том числе новый предиктор смерчеобразования), при соответствующем варьировании которого указанный метод может быть распространен и на сухопутные смерчи. По результатам применения разработанного метода на прибрежной акватории Черного моря при использовании обучающей выборки смерчей различного временного охвата (2014-2015 гг. и 2014-2016 гг.) получены два варианта расчета индекса WRI. В ходе оценки эффективности данных вариантов установлено, что использование выборки большего объема способствовало повышению качества прогноза смерчей по индексу WRI за счет уточнения пороговых значений, входящих в его состав предикторов смерчей.

Предложена автоматизированная методика оценки смерчеопасности вблизи Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым, предусматривающая построение прогноза смерчеопасности, относящегося к смерчеопасным областям различных типов (общей неустойчивости, немезоциклональных смерчей, мезоциклональных смерчей), анализ смерчеопасности облачных ячеек в режиме реального времени и формирование предупреждений о возможном образовании смерчей. Базовые подходы к оценке смерчеопасности, реализованные в рамках данной методики, при необходимости могут быть использованы для разработки соответствующих методик и для других, в том числе сухопутных, регионов Российской Федерации.

Разработан готовый для испытаний в рамках плана испытаний методов, методик и технологий Росгидромета и последующего практического внедрения вариант использования вышеуказанной методики в оперативной работе синоптиков в виде соответствующей компьютерной технологии. Помимо реализации алгоритмов работы методики указанная технология обеспечивает сбор всей необходимой для ее работы метеорологической информации. Входящий в состав технологии программный комплекс обработки и представления данных, как и саму технологию в целом, можно рассматривать как масштабируемую программную платформу для дальнейших исследований по тематике прогноза смерчей и других опасных явлений как вблизи Черноморского побережья, так и при соответствующей настройке в других регионах Российской Федерации.

4 Тестирование методики оценки смерчеопасности в непрерывном режиме счета

4.1 Схема тестирования и перечень анализируемых показателей

Тестирование методики осуществлялось в два этапа: I этап – с июля 2017 г. для модели WRF и с августа 2017 г. для модели COSMO-Ru2 по февраль 2018 г., II этап – с марта по октябрь 2018 г. Каждый этап тестирования охватывал период со смерчами (июль – октябрь 2017 г. и июнь – октябрь 2018 г.) и без них (ноябрь 2017 г. – май 2018 г.).

По результатам тестирования оценивалось качество прогноза смерчеопасности, построенного на базе комплексации прогнозов смерчей по различным индексам, и, как следствие, качество предупреждений о смерчах, а также качество прогноза по каждому из индексов в отдельности. Качество выявления наиболее смерчеопасных ячеек оценивалось для соответствующих материнских ячеек смерчей.

Регистрировавшиеся в 2017 г. и 2018 г. смерчи, как и в предыдущие годы, имели немезоциклонное происхождение. По этой причине анализировались предупреждения по смерчам соответствующего типа, а также немезоциклонные индексы. Исключением стал интенсивный смерч, возникший 25 июля 2018 г. вблизи г. Новороссийск, который по свидетельствам очевидцев вышел на сушу. Анализ возможности прогноза связанной с ним смерчеопасной ситуации проводился с использованием индексов мезоциклонных смерчей.

Для оценки качества прогноза смерчей на базе отдельных индексов в соответствии с [35, 38, 66] рассчитывались следующие показатели:

- общая оправдываемость прогноза смерчей

$$U = \frac{a+d}{a+b+c+d} \cdot 100 \quad (4.1)$$

- оправдываемость прогноза наличия смерчей

$$U_{\text{я}} = \frac{a}{a+b} \cdot 100 \quad (4.2)$$

- предупрежденность наличия смерчей

$$\Pi_{\text{я}} = \frac{a}{a+c} \cdot 100 \quad (4.3)$$

- критерий качества прогноза (критерий Пирси-Обухова)

$$T = \frac{a}{a+c} - \frac{b}{b+d} \quad (4.4)$$

Величина Т принимает значения от -1 до 1. Для идеального прогноза Т = 1.

- критерий надежности Багрова

$$H = \frac{U - U_0}{1 - U_0}, \quad (4.5)$$

$$\text{где } U_0 = \frac{(a+b)(a+c)+(c+d)(b+d)}{(a+b+c+d)^2} \text{ – оправдываемость случайных прогнозов} \quad (4.6)$$

Величина H позволяет оценить успешность метода прогноза с учетом случайных прогнозов. Установлено, что прогнозы с $H < 0.33$ являются ненадежными [35].

Кроме того рассчитывались:

- вероятность ложного обнаружения (probability of false detection (false alarm rate)) [94]

$$POFD = \frac{b}{b+d} \cdot 100 \quad (4.7)$$

- пространственная погрешность прогноза R_{\min} .

В (4.1)-(4.7) фигурируют величины a , b , c и d , являющиеся элементами таблицы сопряженности (таблица 3.2).

Для оценки качества прогноза смерчеопасности использовался метод ROC-кривых (Relative Operating Characteristic) [11], представляющий собой расширение метода заполнения таблицы сопряженности для вероятностных прогнозов. Мерой качества прогноза в данном случае является площадь под кривой на графике, отображающем по оси абсцисс долю ложных тревог (false alarm rate (в вышеуказанных обозначениях POFD)), а по оси ординат – долю успешных прогнозов (hit rate (в вышеуказанных обозначениях Пя)) [94]. График строится по всем точкам предварительно выбранных пороговых значений вероятности и проходит через точки $(0, 0)$ и $(1, 1)$. Значение площади $S_{ROC} = 0.8$ соответствует хорошей прогностической системе, а $S_{ROC} = 0.7$ – полезной [11].

Кроме того для прогноза смерчеопасности рассчитывалась оценка Брайера (Brier Score), отражающая среднеквадратическую ошибку прогнозов [11, 59]:

$$p_B = \frac{1}{N} \sum_i^N (p_i - f_i)^2, \quad (4.8)$$

где N – количество сравниваемых прогнозов (анализируемых разностей вероятностей), p_i – прогнозируемая вероятность события, f_i – наблюдаемая вероятность события, принимающая одно из двух значений: 0 – событие не произошло, 1 – событие произошло.

На основании полученного значения p_B рассчитывалась общая оправдываемость прогностической системы:

$$p_O = (1 - p_B) \cdot 100 \quad (4.9)$$

Для периодов без смерчей анализировались значения показателей U , $POFD$ и p_o , а для периодов со смерчами рассматривались все показатели вышеупомянутого набора. Ввиду установленных больших различий в частоте регистрации смерчей у Черноморского побережья

Краснодарского края и Республики Крым расчет показателей качества прогноза проводился для отдельных районов акватории Черного моря, примыкающих к тому или иному субъекту. К району Краснодарского края были отнесены области 1-4, а к району Республики Крым – области 5-11 на рисунке 4.1.

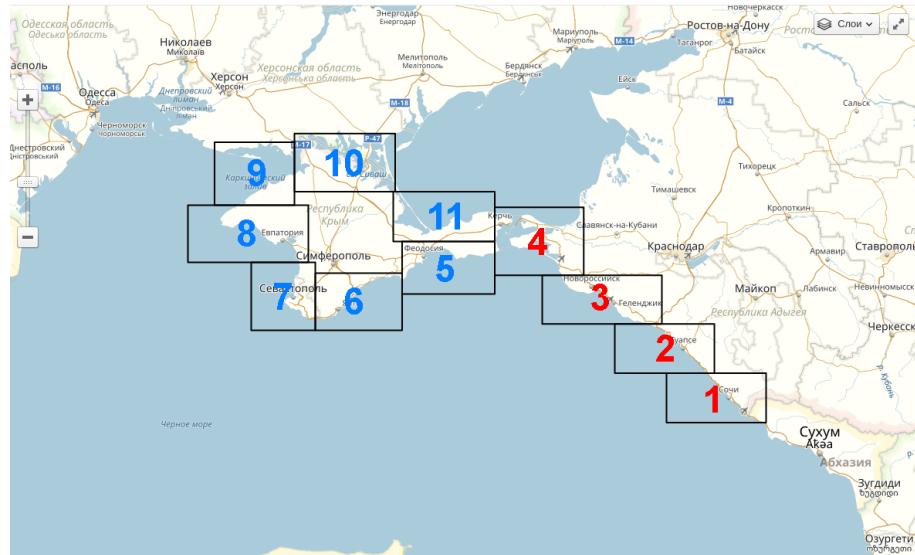


Рисунок 4.1 – Распределение областей по районам (красным отмечены области, отнесенные к району Краснодарского края, синим – области, отнесенные к району Республики Крым)

При оценке учитывались предупреждения, а также факты превышения индексами пороговых значений, продолжительность которых охватывала как минимум два непрерывных срока счета по модели. Для каждого месяца подсчитывалось количество дней, для которых по рассматриваемому району давался прогноз возможности возникновения смерчей и без них. Впоследствии эти данные сопоставлялись с информацией о зарегистрированных смерчах, и формировались таблицы сопряженности. Для предупреждений также анализировалась указанная в них вероятность появления смерчей.

4.2 Результаты работы методики на I этапе тестирования

4.2.1 Период со смерчами

В 2017 г. у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым был зафиксирован 51 смерч (Приложение №1). Помимо данных ESWD при составлении списка смерчей была использована информация из донесений к штормовым предупреждениям (ШП), выданным региональными синоптиками. При подсчете показателей качества прогноза смерчей временные рамки октября были условно продлены до 2 ноября для включения в этот месяц двух последних в 2017 г. смерчей.

По сообщениям очевидцев 29 августа 2017 г. примерно в 11:45 по ВСВ в условиях плотной затянутой облачности вблизи побережья Адлера над морем возникло сразу несколько воронок смерчей (рисунок 4.2). 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.



Рисунок 4.2 – Семейство смерчей 29 августа 2017 г. вблизи г. Сочи (Адлер) [фото vk.com]

На рисунке 4.3 для рассматриваемого семейства смерчей показаны смерчеопасные области по методу номограммы Силадьи, поля индексов WRI, NSP и зоны риска немезоциклонных смерчей, полученные по результатам обработки прогнозических данных по модели COSMO-Ru2 для момента времени 29.08.2017 12:00 ВСВ и начала счета 29.08.2017 00:00 ВСВ. По модели WRF отмечались схожие результаты. Пиктограммой в форме воронки обозначено место регистрации смерчей.

Зона максимального риска формирования немезоциклонных смерчей (рисунок 4.3а) 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 рисунке 4.3а).

Смерчеопасная область на базе номограммы Силадьи (рисунок 4.3б) хоть и включала рассматриваемый случай, но была слишком обширна и характеризовала возможность появления смерчей практически вдоль всего побережья Краснодарского края. Что касается индексов WRI (рисунок 4.3в) и NSP (рисунок 4.3г), то их смерчеопасные области были значительно меньше по охвату, и именно их пересечение и определило выделенную в конечном итоге зону максимального риска.

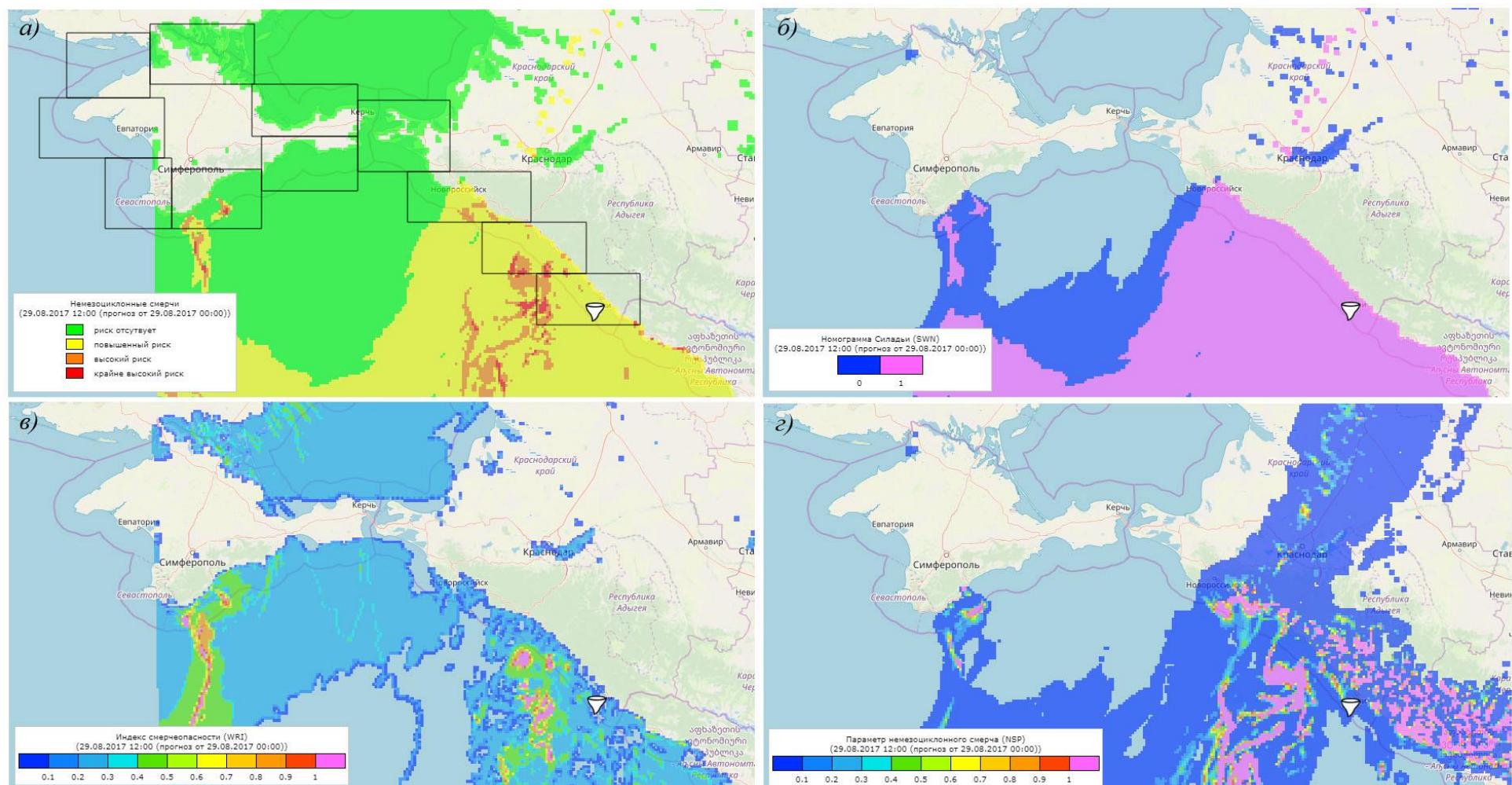


Рисунок 4.3 – Зоны риска немезионных смерчей, а также поля определяющих индексов соответствующей смерчеопасной области на примере семейства смерчей 29 августа 2017 г. вблизи г. Сочи (Адлер) (модель COSMO-Ru2)

а) зоны риска б) смерчеопасные области по методу номограммы Силады в) индекс WRI г) индекс NSP

Предупреждения о смерчах, сформированные по методике, хорошо согласовывались с предупреждением, выпущенным синоптиками (Приложение №5).

Рассмотренный пример демонстрирует обоснованность использования в методике композиции (пересечения) индексов при построении конечных зон риска в противовес рассмотрению каждого из них по отдельности. Данное решение способствовало более точной локализации области возможного формирования смерчей.

На рисунке 4.4 показаны облачные ячейки, обнаруженные по результатам обработки спутниковых данных по алгоритму RDT, а также радиолокационные изображения высоты ВГО для момента регистрации рассматриваемого семейства смерчей.

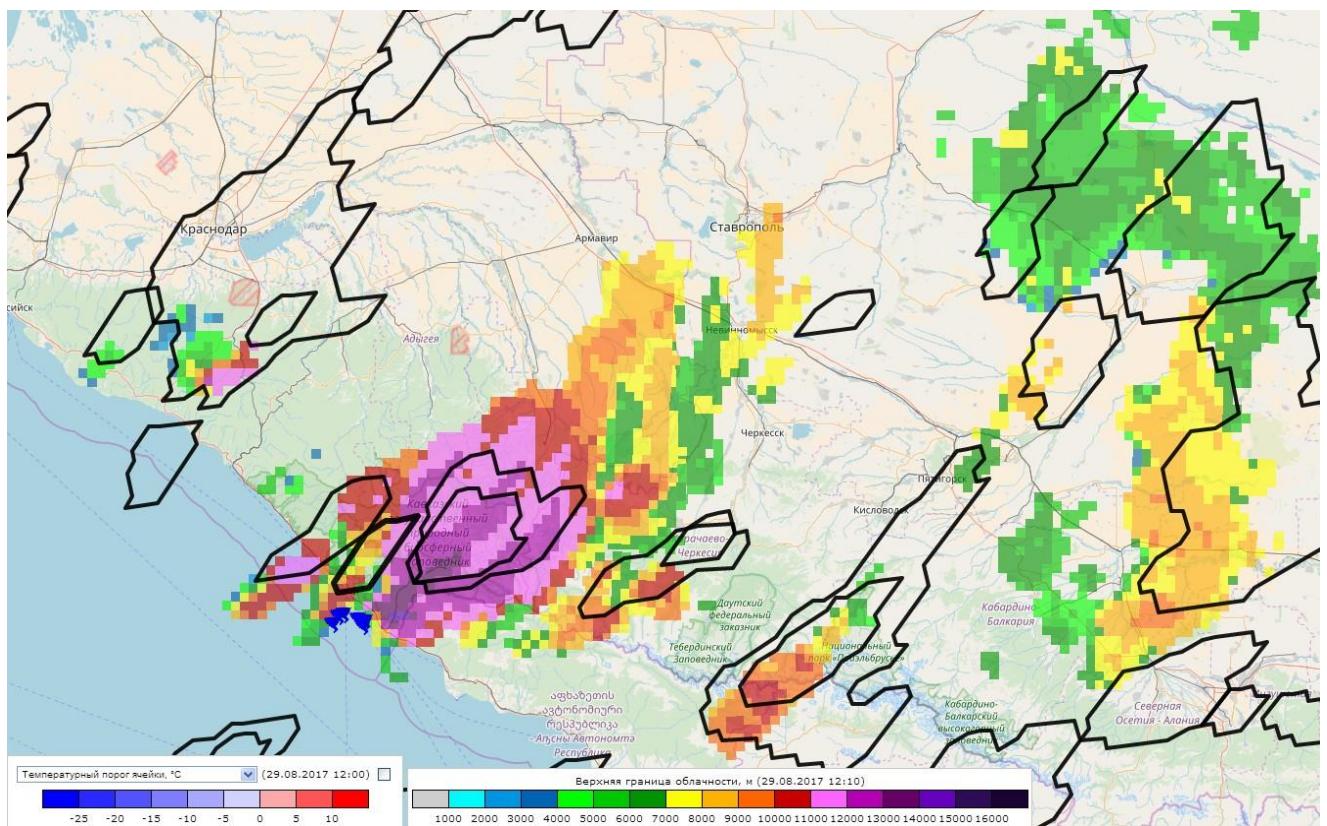


Рисунок 4.4 – Облачные ячейки, обнаруженные по результатам обработки спутниковых данных по алгоритму RDT (заливка областей не используется), и радиолокационные изображения высоты ВГО для момента регистрации семейства смерчей 29 августа 2017 г. вблизи г. Сочи (Адлер)

Из рисунка 4.4 видно, что, в целом, прослеживается качественное согласие между областями облачных ячеек по спутникам и по радиолокаторам, однако полного соответствия не наблюдается. В ряде случаев отмечается некоторое смещение этих областей в пространстве. Для одних ячеек их области по спутникам несколько больше по охвату соответствующих им областей по радиолокаторам, а для других наоборот, как в случае материнской ячейки

семейства смерчей, они раздроблены по сравнению с тем, что видит радиолокатор, на ряд более мелких областей. Указанные особенности свидетельствуют о целесообразности комплексного рассмотрения этих данных.

На рисунках 4.5 и 4.6 показаны графики общей оправдываемости прогноза смерчей (усредненные значения и интервалы разброса значений по всем заблаговременностям) по индексам WRI, NSP, по методу номограммы Силадьи SWN, прогноза смерчеопасности (предупреждений о смерчах), а также прогноза по модифицированной версии индекса WRI_m, о которой пойдет речь в подразделе 4.3, для каждого района акватории на базе соответственно модели WRF и COSMO-Ru2 за все время тестирования. Рассматриваемая здесь и далее заблаговременность относится не к моментам регистрации смерчей, а к началу счета по модели. К примеру, заблаговременность в 24 ч соответствует результатам расчетов по модели, проведенных в день, предшествующий дню появления смерча, 0 ч – непосредственно в этот день. Для модели WRF возможные варианты заблаговременности определялись значениями 0 и 24 ч, а для модели COSMO-Ru2 – 0, 12, 24 и 36 ч.

Из рисунков 4.5 и 4.6 видно, что используемый в методике подход к построению прогноза смерчеопасности на базе композиции по времени и по пространству прогнозов по различным индексам для обеих моделей позволил достичь более высоких значений общей оправдываемости прогноза по сравнению с результатами каждого из индексов в отдельности. График значений общей оправдываемости предупреждений стремится к графику наиболее эффективного индекса месяца, а в ряде месяцев располагается и выше его. Кроме того из рисунков 4.5 и 4.6 видно, что в сезон смерчей 2017 г. разработанный в рамках диссертации индекс WRI показывает более высокие результаты по сравнению с другими известными индексами. Исключением стал октябрь, в течение которого индекс WRI оказался наихудшим. В подразделе 4.2.2 рассматриваются возможные причины подобного поведения данного индекса.

На рисунках 4.7 и 4.8 показаны графики вероятности ложного обнаружения смерчей (усредненные значения и интервалы разброса значений по всем заблаговременностям) по индексам WRI, NSP, по методу номограммы Силадьи, а также по модифицированной версии индекса WRI_m для каждого района акватории на базе соответственно модели WRF и COSMO-Ru2 за все время тестирования. Из рисунков 4.7 и 4.8 видно, что, как и в случае общей оправдываемости прогноза, индекс WRI за весь сезон смерчей 2017 г., за исключением октября, оказался наиболее эффективным среди всех рассматриваемых индексов. Значения POFD данного индекса в июле-сентябре 2017 г. варьировались в пределах от 25 до 50%.

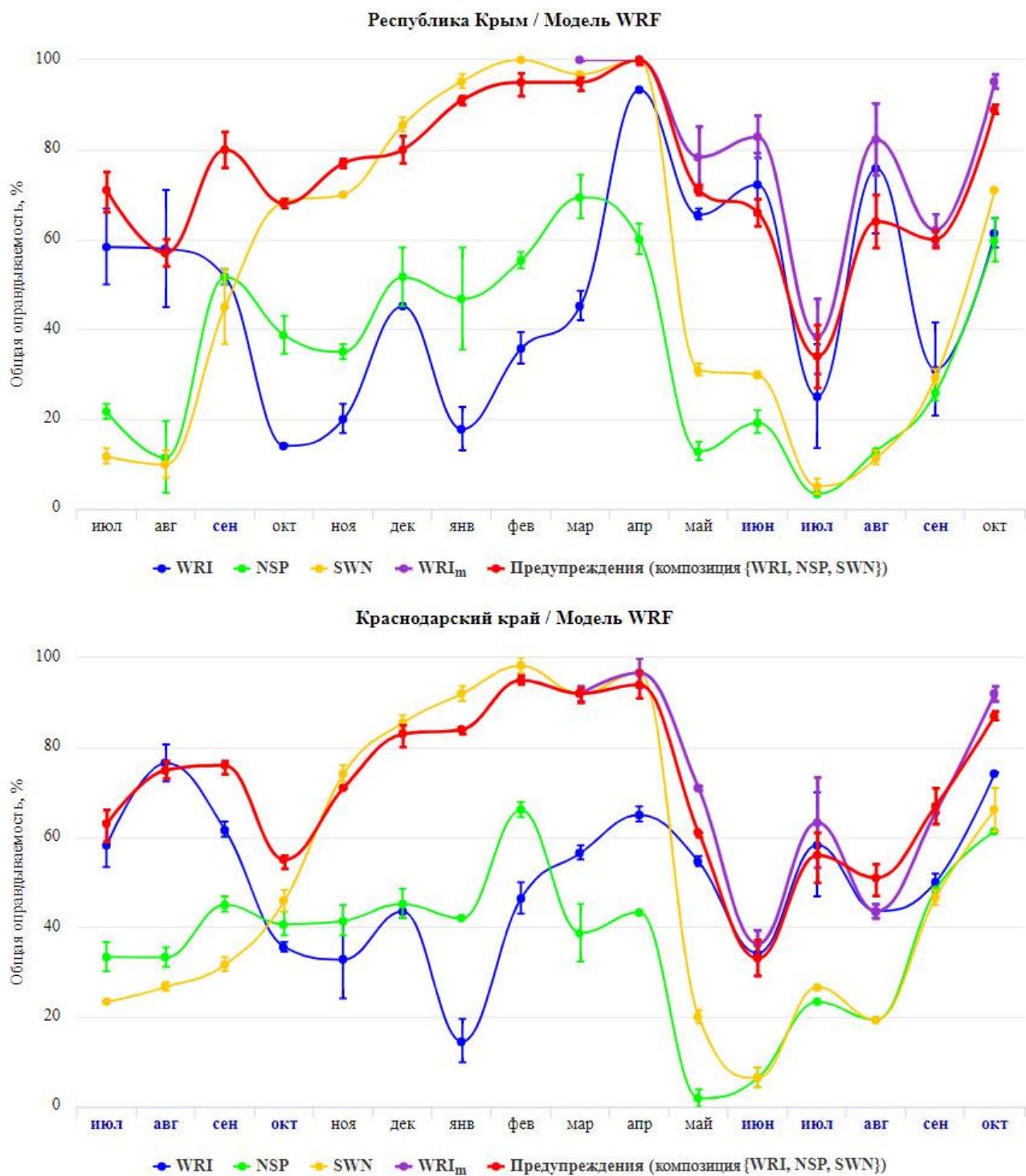
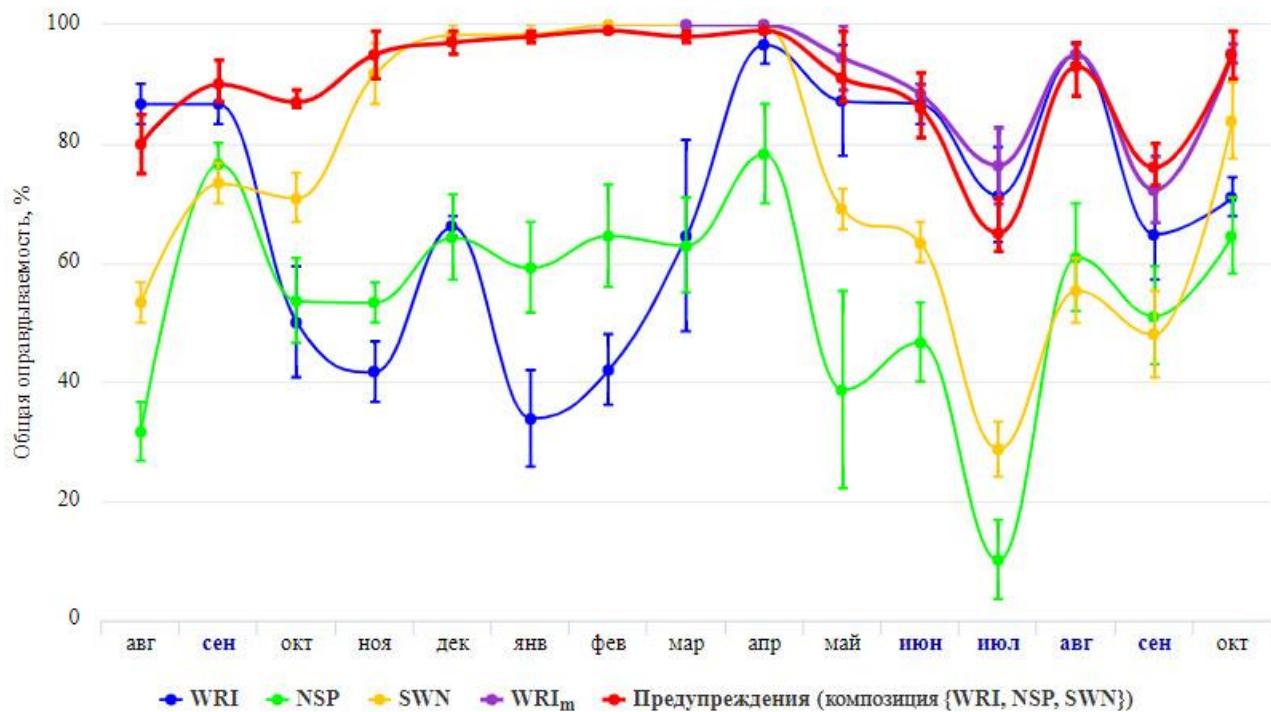


Рисунок 4.5 – Общая оправдываемость прогноза смерчей по индексам WRI, NSP, по методу номограммы Силадьи SWN и на базе из композиции (для предупреждений о смерчах), а также по модифицированной версии индекса WRI_m с использованием результатов расчетов по модели WRF для Республики Крым и Краснодарского края за период с июля 2017 г. по октябрь 2018 г. (синим шрифтом на оси времени выделены названия месяцев, в которых возникали смерчи)

Республика Крым / Модель COSMO-Ru2



Краснодарский край / Модель COSMO-Ru2

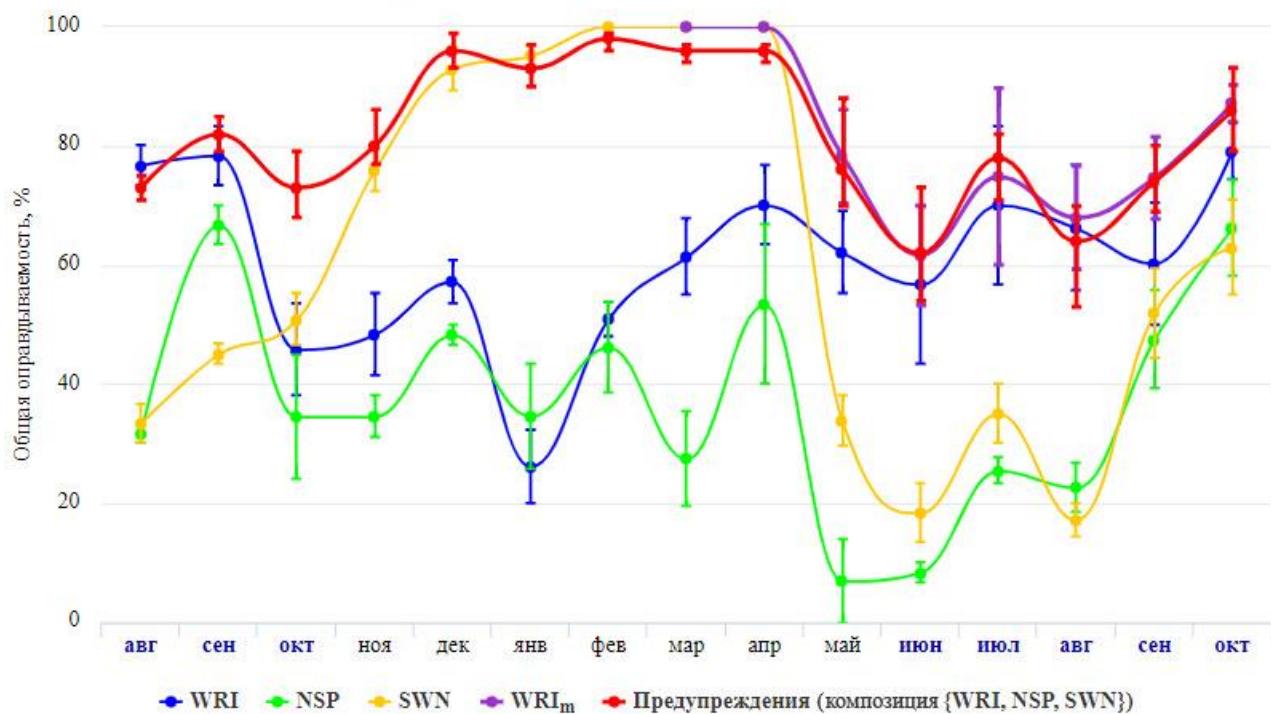
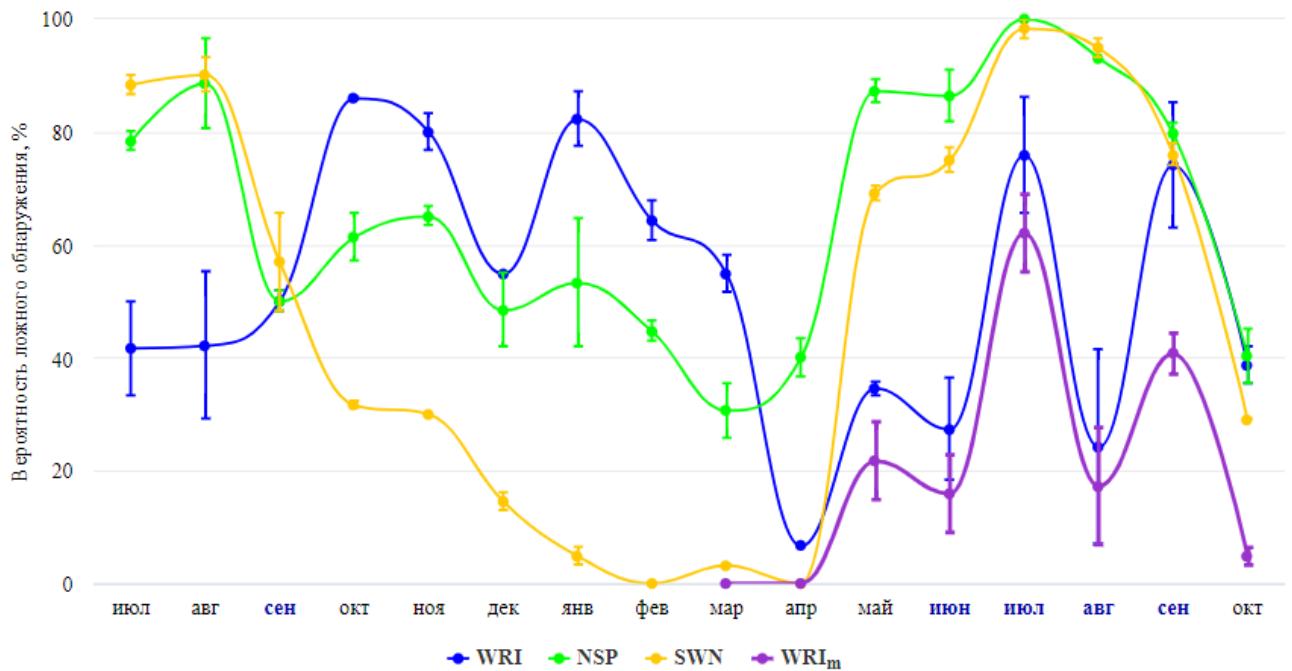


Рисунок 4.6 – Общая оправдываемость прогноза смерчей по индексам WRI, NSP, по методу номограммы Силадьи SWN и на базе из композиции (для предупреждений о смерчах), а также по модифицированной версии индекса WRI_m с использованием результатов расчетов по модели COSMO-Ru2 для Республики Крым и Краснодарского края за период с августа 2017 г. по октябрь 2018 г. (синим шрифтом на оси времени выделены названия месяцев, в которых возникали смерчи)

Республика Крым / Модель WRF



Краснодарский край / Модель WRF

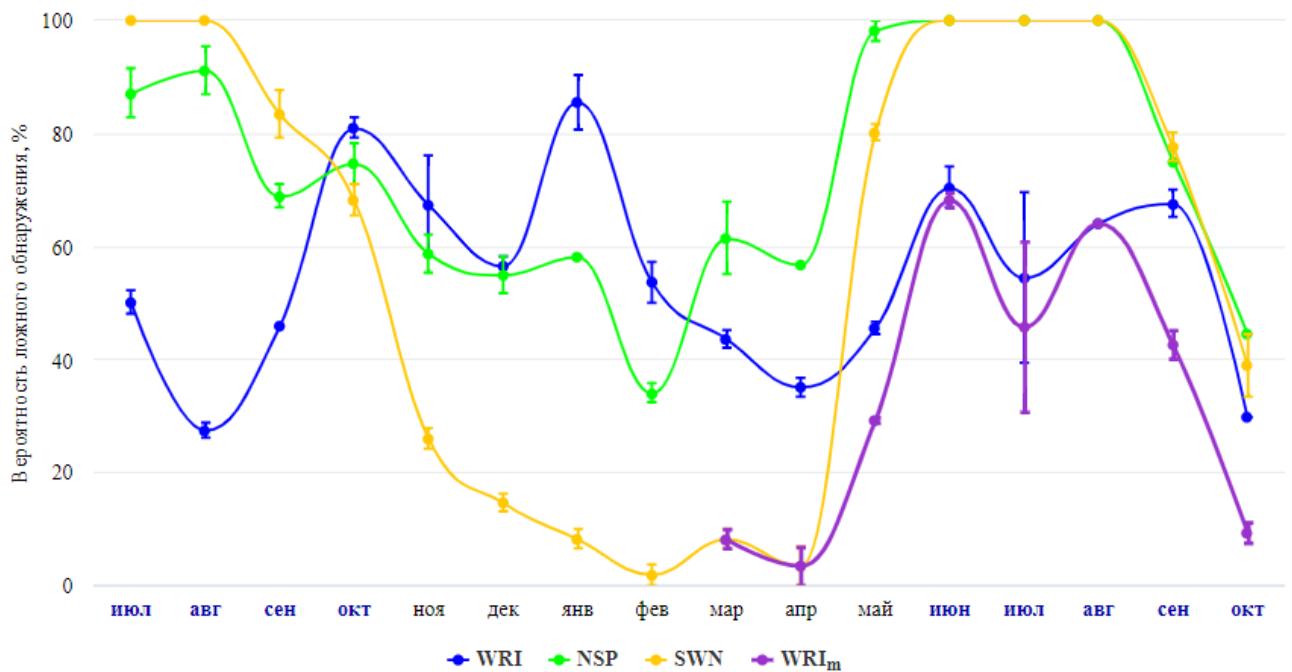
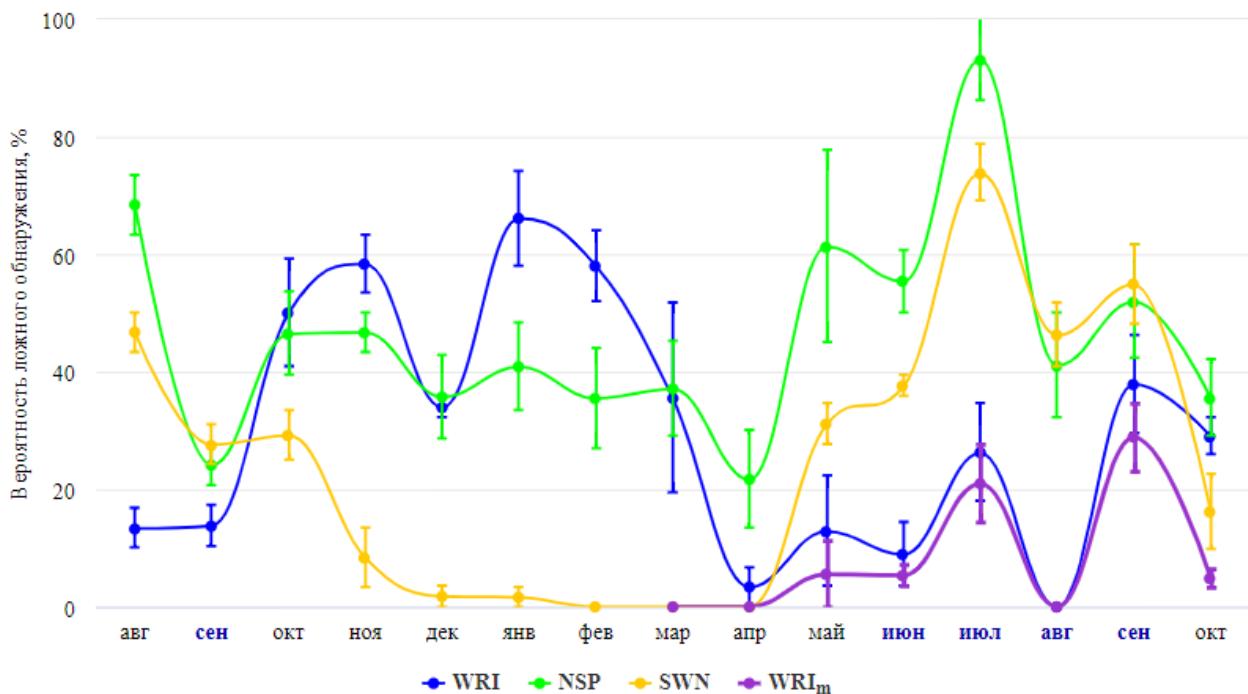


Рисунок 4.7 – Вероятность ложного обнаружения смерчей по индексам WRI, NSP, по методу номограммы Силадьи SWN и по модифицированной версии индекса WRI_m с использованием результатов расчетов по модели WRF для Республики Крым и Краснодарского края за период с июля 2017 г. по октябрь 2018 г. (синим шрифтом на оси времени выделены названия месяцев, в которых возникали смерчи)

Республика Крым / Модель COSMO-Ru2



Краснодарский край / Модель COSMO-Ru2

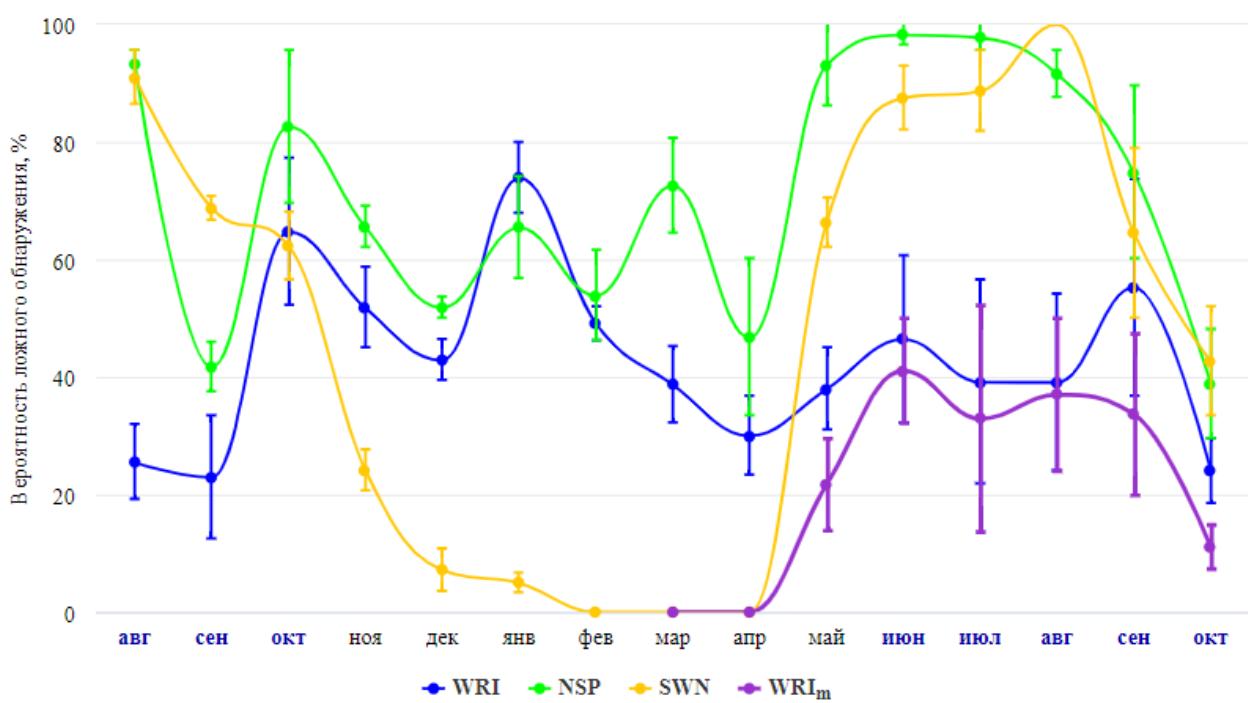


Рисунок 4.8 – Вероятность ложного обнаружения смерчей по индексам WRI, NSP, по методу номограммы Силады SWN и по модифицированной версии индекса WRI_m с использованием результатов расчетов по модели COSMO-Ru2 для Республики Крым и Краснодарского края за период с августа 2017 г. по октябрь 2018 г. (синим шрифтом на оси времени выделены названия месяцев, в которых возникали смерчи)

В таблицах 4.1-4.9 приведены минимальные и максимальные значения показателей качества прогноза смерчей по индексам WRI и NSP, а также по методу номограммы Силадьи, полученные при использовании выходных данных различной заблаговременности счета по модели для каждого месяца со смерчами в 2017 г., а в таблице 4.10 – за весь период со смерчами этого года на примере заблаговременности в 24 ч.

Из таблиц 4.1-4.9 видно, что значения рассматриваемых показателей заметно варьируются как от месяца к месяцу, так и в зависимости от используемой заблаговременности. В течение всего сезона смерчей 2017 г. за исключением октября по всем показателям кроме предупрежденности наличия смерчей и пространственной погрешности прогноза индекс WRI оказался наилучшим. Наиболее высокие значения показателей качества прогноза по данному индексу были достигнуты в августе. Этот месяц как по количеству смерчей, так и по количеству дней со смерчами, стал самым смерчеопасным месяцем 2017 г. В октябре на первом месте по качеству прогноза оказался метод номограммы Силадьи SWN.

При расчетах пространственной погрешности прогноза смерчеопасности (четвертая строка таблицы 4.9) рассматривались узлы, в которых как минимум по двум индексам давался прогноз формирования смерчей. Для модели WRF значение этой погрешности в среднем по всем случаям в Крыму и в Краснодарском крае составило 44 км, а для модели COSMO-Ru2 – 56 км (таблица 4.9, столбец avg). Наибольший вклад в эту погрешность, очевидно, внес индекс WRI ввиду того, что, большинство смерчей возникало в непосредственной близости к зоне именно максимального риска (рисунок 4.3а).

Отсутствие единой системы регистрации случаев возникновения смерчей у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым обуславливает возможную неполноту использованной при оценке выборки смерчей. Это предположение согласуется с увеличением количества смерчей в 2017 г. по сравнению с данными за период 2014-2016 гг., которое, очевидно, было обусловлено привлечением дополнительного источника данных о смерчах, что еще раз подчеркивает субъективность проводимой оценки. Как следствие, полученные оценки POFD за период со смерчами могут быть заведомо завышены, а других рассмотренных показателей качества – заведомо занижены. В частности, это относится к рассчитанным значениям Н, которые для большинства индексов оказались ниже порога случайного прогноза, равного 0.33.

Таблица 4.1 – Оправдываемость прогноза наличия смерчей, %
(WRF, 2017 г.)

Индекс	июль		август		сентябрь		октябрь	
	min	max	min	max	min	max	min	max
Республика Крым								
WRI	-	-	-	-	6	7	-	-
NSP	-	-	-	-	6	7	-	-
SWN	-	-	-	-	5	7	-	-
Краснодарский край								
WRI	29	39	50	57	31	35	24	24
NSP	25	27	29	29	26	27	25	26
SWN	23	23	26	28	21	22	26	29

Таблица 4.3 – Предупрежденность наличия смерчей, % (WRF, 2017 г.)

Индекс	июль		август		сентябрь		октябрь	
	min	max	min	max	min	max	min	max
Республика Крым								
WRI	-	-	-	-	100	100	-	-
NSP	-	-	-	-	100	100	-	-
SWN	-	-	-	-	100	100	-	-
Краснодарский край								
WRI	71	100	100	100	83	100	100	100
NSP	100	100	100	100	100	100	100	100
SWN	100	100	100	100	83	100	100	100

Таблица 4.2 – Оправдываемость прогноза наличия смерчей, %
(COSMO-Ru2, 2017 г.)

Индекс	август		сентябрь		октябрь	
	min	max	min	max	min	max
Республика Крым						
WRI	-	-	17	25	-	-
NSP	-	-	11	14	-	-
SWN	-	-	10	13	-	-
Краснодарский край						
WRI	50	60	43	57	20	29
NSP	28	29	35	40	21	27
SWN	28	30	26	27	29	32

Таблица 4.4 – Предупрежденность наличия смерчей, %
(COSMO-Ru2, 2017 г.)

Индекс	август		сентябрь		октябрь	
	min	max	min	max	min	max
Республика Крым						
WRI	-	-	100	100	-	-
NSP	-	-	100	100	-	-
SWN	-	-	100	100	-	-
Краснодарский край						
WRI	100	100	67	100	67	100
NSP	100	100	100	100	100	100
SWN	100	100	83	100	100	100

Таблица 4.5 – Критерий Пирси-Обухова (WRF, 2017 г.)

Индекс	июль		август		сентябрь		октябрь	
	min	max	min	max	min	max	min	max
Республика Крым								
WRI	-	-	-	-	0.483	0.517	-	-
NSP	-	-	-	-	0.483	0.517	-	-
SWN	-	-	-	-	0.345	0.517	-	-
Краснодарский край								
WRI	0.193	0.522	0.464	0.739	0.375	0.542	0.174	0.208
NSP	0.087	0.174	0.048	0.13	0.292	0.333	0.217	0.292
SWN	0	0	0	0	0.042	0.125	0.292	0.348

Таблица 4.6 – Критерий Пирси-Обухова (COSMO-Ru2, 2017 г.)

Индекс	август		сентябрь		октябрь	
	min	max	min	max	min	max
Республика Крым						
WRI	-	-	0.828	0.897	-	-
NSP	-	-	0.724	0.793	-	-
SWN	-	-	0.690	0.759	-	-
Краснодарский край						
WRI	0.557	0.682	0.542	0.667	0.060	0.288
NSP	0.045	0.091	0.542	0.625	0.043	0.304
SWN	0.045	0.136	0.292	0.333	0.318	0.435

Таблица 4.7 – Критерий Багрова (WRF, 2017 г.)

Индекс	июль		август		сентябрь		октябрь	
	min	max	min	max	min	max	min	max
Республика Крым								
WRI	-	-	-	-	0.003	0.059	-	-
NSP	-	-	-	-	0.059	0.060	-	-
SWN	-	-	-	-	0.039	0.060	-	-
Краснодарский край								
WRI	0.122	0.331	0.393	0.601	0.231	0.315	0.073	0.100
NSP	0.043	0.094	0.026	0.065	0.136	0.172	0.104	0.136
SWN	0	0	0	0	0.042	0.125	0.292	0.348

Таблица 4.8 – Критерий Багрова (COSMO-Ru2, 2017 г.)

Индекс	август		сентябрь		октябрь	
	min	max	min	max	min	max
Республика Крым						
WRI	-	-	0.227	0.366	-	-
NSP	-	-	0.138	0.204	-	-
SWN	-	-	0.129	0.185	-	-
Краснодарский край						
WRI	0.443	0.559	0.438	0.500	0.060	0.180
NSP	0.025	0.046	0.315	0.400	0.017	0.156
SWN	0.025	0.083	0.136	0.172	0.160	0.239

Таблица 4.9 – Усредненная по сезону 2017 г. пространственная погрешность прогноза смерчей различной заблаговременности (0-36 ч), км

Метод	Модель WRF			Модель COSMO-Ru2				
	24 ч	0 ч	avg	36 ч	24 ч	12 ч	0 ч	avg
Индекс WRI	45	52	49	38	80	47	85	63
Индекс NSP	31	26	29	37	23	36	28	31
Номограмма SWN	16	11	14	2	14	13	20	12
Композиция прогнозов	38	49	44	37	43	49	95	56

Таблица 4.10 – Значения показателей качества прогноза смерчей по определяющим индексам области НМС за период со смерчами 2017 г. (заблаговременность счета – 24 ч)

Индекс	Модель	U, %	POFD, %	Uя, %	Пя, %	T	H
Республика Крым							
WRI	WRF	41	59	1	100	0.405	0.011
	COSMO-Ru2	81	20	6	100	0.805	0.086
NSP	WRF	29	72	1	100	0.284	0.006
	COSMO-Ru2	50	51	2	100	0.494	0.022
SWN	WRF	30	71	1	100	0.293	0.008
	COSMO-Ru2	64	37	3	100	0.632	0.038
Краснодарский край							
WRI	WRF	56	53	32	85	0.324	0.207
	COSMO-Ru2	70	34	43	85	0.512	0.378
NSP	WRF	36	82	26	100	0.176	0.083
	COSMO-Ru2	44	72	29	100	0.279	0.150
SWN	WRF	32	88	25	100	0.121	0.056
	COSMO-Ru2	41	77	28	100	0.235	0.123

Значения POFD по модели WRF для района Республики Крым находились примерно на одном и том же уровне, что и для Краснодарского края (таблица 4.10). Таким образом, благоприятные для формирования смерчей условия в пределах этих районов по разработанной методике прогнозировались примерно с одной и той же частотой. По этой причине можно предположить, что установленное ранее существенное отличие повторяемости смерчей в Крыму и в Краснодарском крае отчасти является следствием вышеупомянутой субъективности их учета. С высокой долей вероятности в 2017 г. в Крыму возникало больше смерчей, чем было учтено при оценке.

Временные рамки действия прогнозируемых смерчеопасных ситуаций, как правило, охватывали достаточно продолжительный период (более 3 ч), который иногда растягивался на весь день. В течение этого периода и формировались смерчи. Этот факт позволяет исключить из рассмотрения временную погрешность прогноза смерчей. Наличие указанной особенности позволило с успехом идентифицировать все смерчеопасные ситуации, с которыми были связаны реальные случаи появления смерчей, как на базе продукции модели WRF с достаточно высоким часовым шагом по времени, так и на базе продукции модели COSMO-Ru2 с более низким 3-х часовыми временным шагом.

Разработанная методика, как видно из графиков U и POFD (рисунки 4.5-4.8), а также таблиц 4.1-4.10 показала свою эффективность как на модели WRF, так и на модели COSMO-Ru2. При этом использование результатов расчетов по модели COSMO-Ru2 способствовало получению более качественного прогноза смерчей по сравнению с тем, который формируется на базе модели WRF, несмотря на выше упомянутое различие во временном шаге продукции этих моделей. Очевидно, что в условиях продолжительного периода действия смерчеопасных ситуаций значение временного шага оказалось не существенным. Более решающую роль в обеспечении качественного прогноза, по-видимому, сыграло высокое разрешение модели COSMO-Ru2 по пространству, а также используемая в ней параметризация физических процессов. Необходимо также принять во внимание возможное занижение количества ложных прогнозов смерчей, и, как следствие, завышение оправдываемости прогноза их появления по модели COSMO-Ru2 по сравнению с моделью WRF для района Республики Крым вследствие того, что область расчета модели COSMO-Ru2 включает в себя не весь этот район, а только лишь большую часть восточного побережья Крыма (рисунок 3.24).

Анализ полей индексов области ОН показал, что практически каждый день в течение периода со смерчами по обеим моделям отмечались случаи превышения этими индексами своих пороговых значений. Для них была характерна 100%-ная предупрежденность смерчей, которая согласуется с ранее полученными оценками за период 2014-2016 гг. Тем не менее, большое количество ложных прогнозов исключает возможность их отдельного рассмотрения для прогноза смерчеопасных ситуаций вблизи Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым. Установленные для индексов области ОН каждодневные превышения пороговых значений, по-видимому, были обусловлены суточным ходом метеорологических величин.

На рисунке 4.9 показаны ROC-кривые предупреждений о смерчах для района Республики Крым, а на рисунках 4.10 и 4.11 – для района Краснодарского края, отражающие, как уже было упомянуто выше, соотношение доли ложных тревог и доли успешных предупреждений для различных порогов вероятности. Штриховой линией на рисунках 4.9-4.11

показана непосредственно ROC-кривая, а сплошной диагональной линией – так называемый предел полезности предупреждений, характеризующийся площадью равной 0.5. Этот предел соответствует ситуации, при которой количество ложных тревог равно количеству успешных предупреждений. ROC-кривые, лежащие выше указанного уровня, описывают действительно полезную прогностическую систему, а те, которые лежат ниже – систему, в которой отсутствует полезный сигнал.

Из рисунков 4.9-4.11 видно, что для подавляющего большинства ROC-кривых доля успешных предупреждений была равна единице для всех порогов вероятности смерчей. Это означает, что для моментов возникновения смерчей по всем индексам области НМС давался согласованный по времени и по пространству прогноз смерчеопасной ситуации (Приложения №2 и №5). Остальные ROC-кривые соответствовали случаям, когда итоговый прогноз формировался за счет одного или двух индексов. В целом, смерчей без соответствующих предупреждений хотя бы по одной из заблаговременностей счета по модели отмечено не было. Таким образом, все смерчи по обоим районам были успешно предупреждены. Что касается эффективности предупреждений, то все они были даны с заблаговременностью более 2 часов с учетом времени на счет по модели. По этой причине их эффективность соответствовала приведенным на рисунках 4.5 и 4.6 значениям оправдываемости (красная кривая).

Значения доли ложных тревог на ROC-кривых варьировались в широком диапазоне от 25 до 86%. Площади всех ROC-кривых по обеим моделям были строго больше 0.5. Для некоторых заблаговременностей счета по модели COSMO-Ru2 по ряду месяцев площадь ROC-кривой превышала порог хорошей прогностической системы равный 0.8. Средняя площадь по всем месяцам и по всем заблаговременностям составила для модели WRF по Крыму – 0.604, по Краснодарскому краю – 0.608, а для модели COSMO-Ru2 – 0.653 и 0.659 соответственно.

Отмеченные показатели свидетельствуют 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 в 0.7, что дает основание для последующей работы по ее повышению, в частности, за счет уменьшения доли ложных тревог.

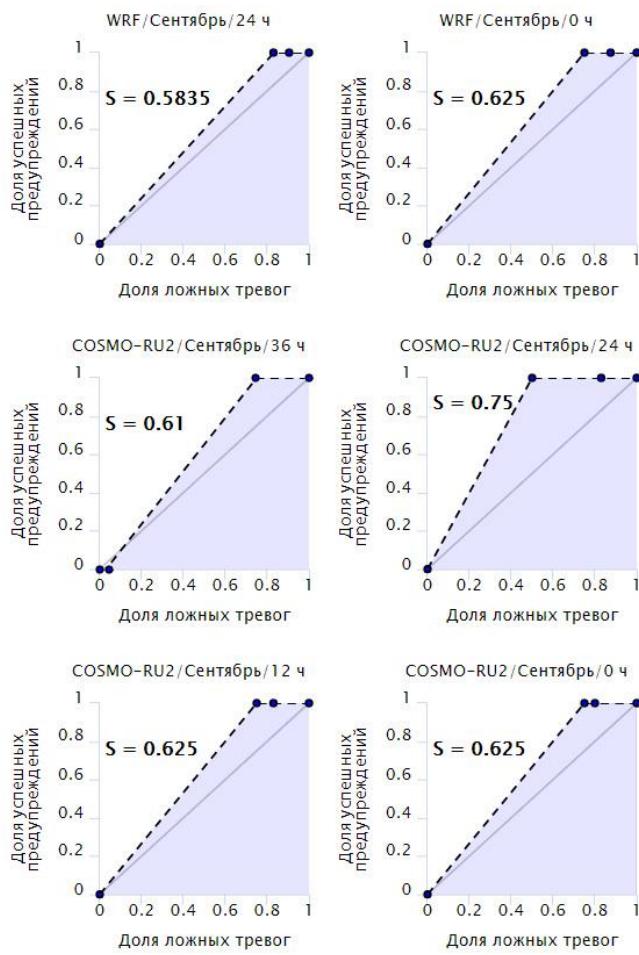


Рисунок 4.9 – ROC-кривые предупреждений о смерчах для района Республики Крым (2017 г.)

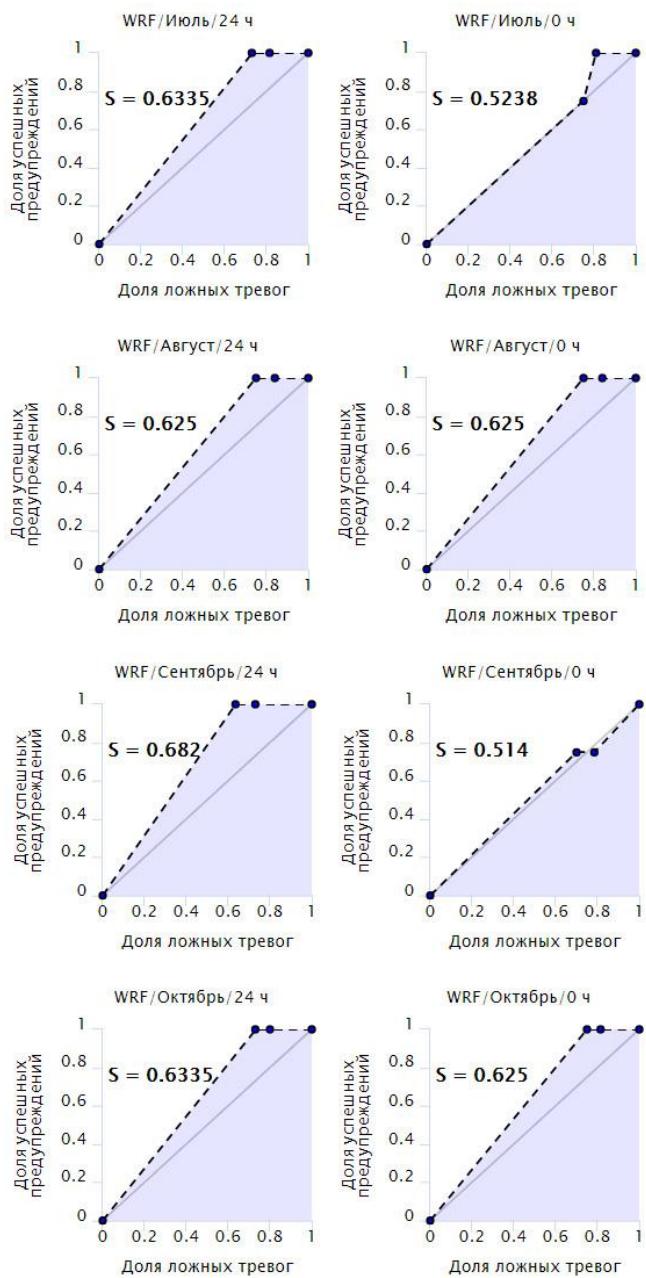


Рисунок 4.10 – ROC-кривые предупреждений о смерчах для района Краснодарского края
(модель WRF, 2017 г.)

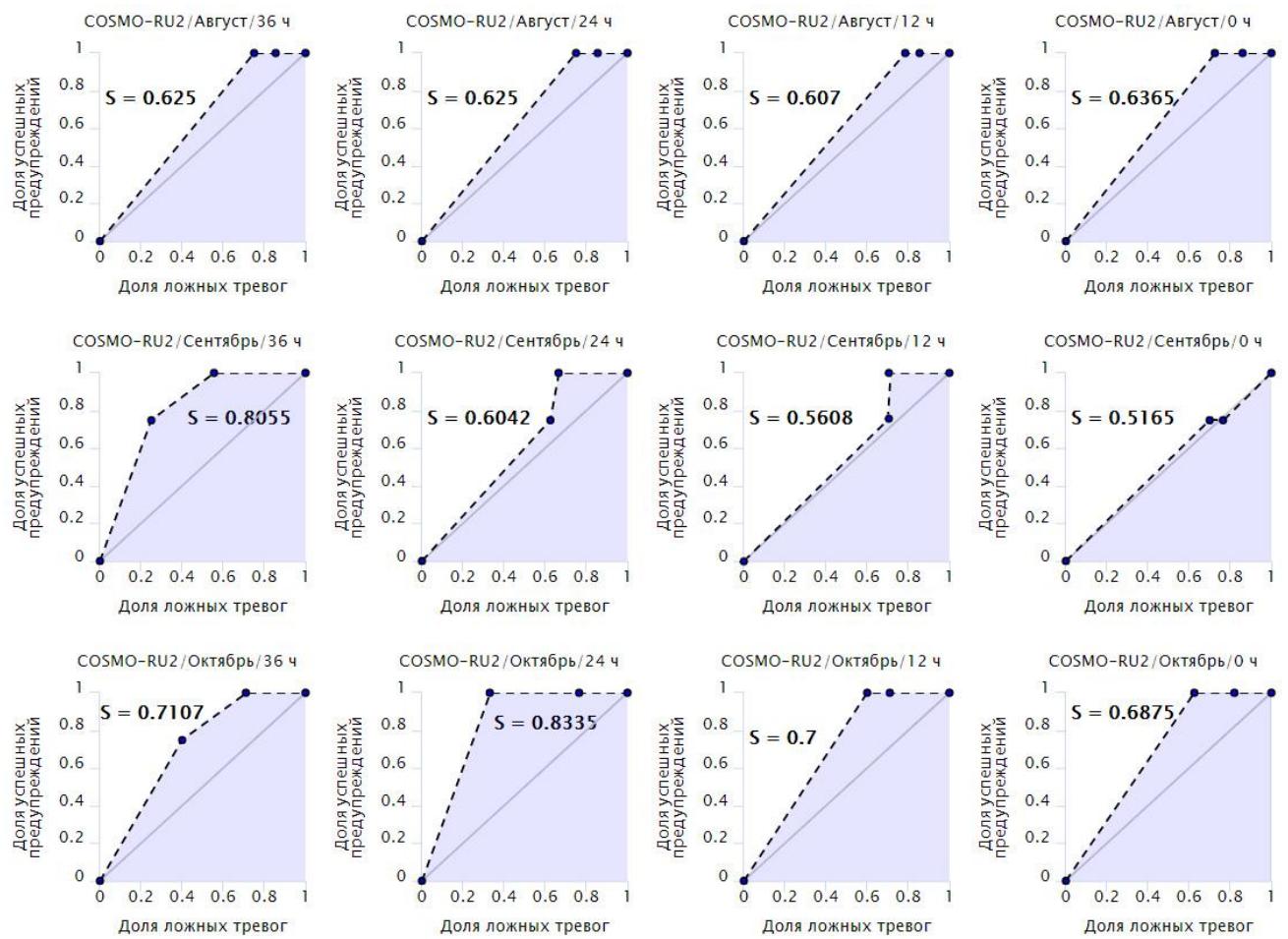


Рисунок 4.11 – ROC-кривые предупреждений о смерчах для района Краснодарского края
(модель COSMO-Ru2, 2017 г.)

По причине отсутствия ряда спутниковых данных проводился анализ неполного набора материнских ячеек смерчей. На базе модели WRF анализировалась категория риска 12 ячеек. В момент возникновения из них смерчей 5 ячейкам была присвоена третья категория риска, 1 ячейке – вторая и 6 ячейкам – первая. Ввиду более поздних сроков начала работы технологии с данными по модели COSMO-Ru2 на ее основе анализировалась категория риска 8 ячеек. В момент возникновения из них смерчей 1 ячейке была присвоена третья категория риска, 6 ячейкам – первая и 1 ячейке – нулевая. Для большинства ячеек категория риска определялась в момент их первого обнаружения и оставалась неизменной вплоть до момента появления смерча, в ряде случаев она с течением времени повышалась. Таким образом, эффективность выявления материнских ячеек смерчей составила для модели WRF – 50%, а для модели COSMO-Ru2 – 13%.

Большое количество материнских ячеек, которым присваивалась первая категория риска, объясняется особенностями их пространственного положения, а также спецификой расчета индексов области НМС. В частности, эти ячейки возникали над сушей и в моменты

формирования из них смерчей охватывали поверхность моря лишь в пределах погрешностей вычисления их границ, которая по результатам тестирования методики в среднем составила 9 км (Приложение №3). При этом необходимо учитывать, что местоположение смерчей по сообщениям очевидцев также было определено с погрешностью в большинстве случаев равной 3 км. Индекс NSP рассчитывается во всех узлах используемой сетки, в то время как расчет индексов WRI и SWN ограничивается водной поверхностью. Вследствие этого недостающим до моря ячейкам и присваивалась первая категория риска.

Таким образом, в процессе присвоения категорий риска облачным ячейкам для учета возможных пространственных погрешностей вычисления границ данных ячеек, а также прогноза смерчеопасности будет целесообразно расширить область поиска максимума в алгоритмах (3.10) и (3.11), включив в нее помимо самой области ячейки еще и дополнительную буферную зону вокруг нее, что и было предложено ниже в подразделе 4.3.

Для оценки практической значимости разработанной методики на I этапе тестирования был проведен расчет показателей качества ШП об угрозах возникновения смерчей над Черным морем, выданных региональными синоптиками в 2017 г. Каждое ШП рассматривалось как детерминированный прогноз смерчей, который давался на определенный день месяца. При этом если период действия такого предупреждения охватывал более чем один день, то оно разбивалось на ряд последовательных прогнозов, относящихся к конкретному дню.

В 2017 г. по Краснодарскому краю было выдано 20 ШП, которые в соответствии с вышеупомянутым алгоритмом можно представить в виде 23 прогнозов смерчей. Из них 18 ШП (20 прогнозов) оправдались (последние столбцы таблицы из Приложения №1 за 2017 г.), 11 ШП (13 прогнозов) были эффективными. Всего в 2017 г. отмечалось 32 дня со смерчами, следовательно, количество неоправдавшихся прогнозов отсутствия смерчей было равно 12, а количество оправдавшихся прогнозов отсутствия смерчей – 120 (по количеству дней без ШП, в течение которых смерчи действительно не отмечались, за период с 1 июня по 2 ноября). По Крыму предупреждений не было. В таблице 4.11 приведены итоговые значения показателей качества ШП и для сравнения значения за период со смерчами 2017 г. аналогичных показателей для разработанной методики.

Из таблицы 4.11 видно существенное преимущество методики по заблаговременности предупреждений о смерчах и их предупрежденности. Однако, очевидно, за счет более высокой доли ложных прогнозов оправдываемость формируемых по ней предупреждений оказалась несколько ниже соответствующих значений полученных синоптиками.

Таблица 4.11 – Значения оправдываемости (U) и заблаговременности (Z) предупреждений о смерчах, а также их предупрежденности (Пя) в 2017 г. по результатам работы синоптиков и разработанной автоматизированной методики для Краснодарского края

Источник предупреждений	U, %	Z*, ч	Пя, %
Синоптики	90	7	63
Методика (модель WRF)	67	26	100
Методика (модель COSMO-Ru2)	76	31	100

*Примечание: Указаны усредненные значения, для методики с учетом времени на счет по модели.

4.2.2 Период без смерчей

Период без смерчей на I этапе тестирования продлился с ноября 2017 г. по февраль 2018 г. Как видно из таблицы 4.12 в этот период наиболее эффективным методом, обеспечившим минимальное количество ложных прогнозов, оказался метод номограммы Силады SWN. Разработанный индекс WRI напротив показал наихудшие результаты.

Таблица 4.12 – Значения показателей качества прогноза смерчей по определяющим индексам области НМС за период без смерчей на I этапе тестирования (ноябрь 2017 г. – февраль 2018 г.) (заблаговременность счета – 24 ч)

Индекс	Модель	Республика Крым		Краснодарский край	
		U, %	POFD, %	U, %	POFD, %
WRI	WRF	28	72	29	71
	COSMO-Ru2	45	55	44	56
NSP	WRF	45	55	49	51
	COSMO-Ru2	62	38	40	60
SWN	WRF	88	12	87	13
	COSMO-Ru2	96	4	88	12

Эффективность SWN свидетельствует о важной роли предиктора глубины конвекции для прогноза смерчей. В соответствии с номограммой (рисунок 1.23) в теплый период при относительно небольшой разности температур SST и T_{850} смерчи формируются из достаточно мощных по вертикали материнских облаков. В более холодный период, когда значение этой разности существенно увеличивается, смерчи могут возникнуть и из слабо развитых облаков (в пределе протяженностью менее 1 км).

Таким образом, полученное канадским специалистом Силады эмпирическое правило распознавания смерчеопасных ситуаций, несмотря на большое количество ложных прогнозов за период со смерчами, показало свою значимость в рассматриваемом регионе в более холодный и значительно менее смерчеопасный период. Кроме того, как было установлено ранее (подраздел 3.1.3), оно позволило с успехом спрогнозировать редкий для декабря смерч вблизи г. Сочи в 2016 г. Из рисунков 4.5 и 4.6 видно, что указанный метод, в том числе, может быть использован для определения временных границ начала и окончания сезона смерчей. В трапецидальной форме оранжевого графика оправдываемости прогноза по методу SWN верхнее основание характеризует условия с минимальным риском смерчей, а боковые стороны – переходный период от данной категории к максимальному риску. По всей видимости, этот график, кроме прочего, отражает годовой ход условий развития глубокой конвекции (чем меньше оправдываемость, тем выше вероятность данных условий и наоборот), т.к. высокая смерчеопасность прогнозируется именно в теплый период, когда эти условия наиболее распространены.

Низкая эффективность индекса WRI объясняется малой информативностью предиктора разности SST и T₁ в холодный период, когда значения этой разности чаще всего выходят за рамки установленных порогов, за счет чего и идентифицируется ложная смерчеопасная ситуация. Судя по полученным результатам (рисунки 4.5 и 4.6) в более теплый период частота подобных превышений значительно сокращается, и индекс становится информативным. Таким образом, для повышения качества прогноза по индексу WRI вне периода со смерчами по аналогии с методом номограммы Силады будет целесообразно ввести в его состав новый предиктор глубины конвекции, что и было предложено ниже в подразделе 4.3.

В целом, как и в сезон смерчей, за период без них по модели COSMO-Ru2 отмечаются более высокие результаты, чем по модели WRF. Средняя оправдываемость прогноза смерчеопасности по всем месяцам рассматриваемого периода, по всем заблаговременностям и по обоим районам составила по модели COSMO-Ru2 – 95%, а по модели WRF – 85%.

4.3 Усовершенствование методики оценки смерчеопасности

В ходе I этапа тестирования методики были получены значения радиолокационных параметров dBZ_m, Н_{ВГО}, VIL, W_m и C_я для 22 материнских ячеек смерчей, зарегистрировавшихся в 2017 г. На рисунке 4.12 показаны гистограммы распределения, сглаживающие их кривые, а также процентное соотношение диапазонов значений первых четырех параметров указанной выборки дополненной ранее упомянутыми в подразделе 2.3.4 значениями для 11 ячеек, отмечавшихся в 2014-2016 гг. Что касается параметра C_я, то в 55% случаев объединенной

выборки он соответствовал грозе, в 30% случаев – осадкам, а в оставшихся 15% случаев – ливню.

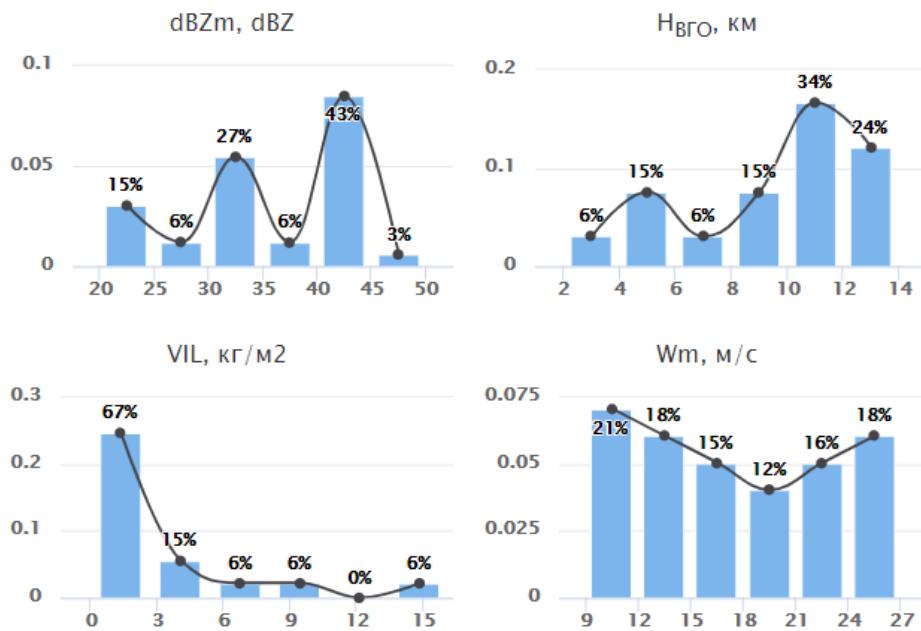


Рисунок 4.12 – Гистограммы распределения значений радиолокационных параметров материнских ячеек смерчей

Из рисунка 4.12 видно, что распределения параметров dBZ_m , H_{BGO} и VIL имеют ярко выраженный максимум, в то время как распределение W_m более схоже с равномерным. Для параметра VIL характерен большой разброс значений, причем в подмножестве его максимума $[0, 3]$ выделяется диапазон $[1, 1.5]$ которому соответствуют 30% рассматриваемых ячеек.

На основании полученных распределений для параметров dBZ_m , H_{BGO} и C_α , используемых в методике распознавания ЗАК со смерчами и сильными шквалами [32], были выбраны новые пороговые значения, отражающие характерные черты смерчевых облаков над Черным морем:

$$P(dBZ_m, H_{BGO}, C_\alpha) = \begin{cases} dBZ_m \geq 40 \text{ dBZ} \\ H_{BGO} \geq 10 \text{ km} \\ C_\alpha \in [\text{осадки, ливень, гроза}] \end{cases} \quad (4.10)$$

Поскольку параметр W_m рассчитывается на базе dBZ_m и H_{BGO} , то можно утверждать, что вышеуказанные пороги характеризуют область значений $W_m \geq 20 \text{ м/с}$.

Полученное распределение параметра VIL определяет возможность его использования для идентификации смерчеопасной области наряду с dBZ_m , H_{BGO} и C_α . В качестве порогового для него было выбрано значение $1 \text{ kg}/\text{m}^2$. Таким образом, с учетом нового параметра перечень параметров распознавания (4.10) может быть представлен в следующем виде:

$$P(dBZ_m, H_{BGO}, VIL, C_A) = \begin{cases} dBZ_m \geq 40 \text{ dBZ} \\ H_{BGO} \geq 10 \text{ км} \\ VIL \geq 1 \text{ кг/m}^2 \\ C_A \in [\text{осадки, ливень, гроза}] \end{cases} \quad (4.11)$$

Величина Р принимает значение равное единице, если все перечисленные параметры распознавания превышают установленные для них пороговые значения, т.е. имеется риск смерча, и ноль – в противном случае.

Правило (4.11) может быть использовано для диагностирования потенциально несущих смерч облаков, в пределах которых по радиолокационным данным выявляются области риска. При этом положение смерча может и не совпадать с данными областями, можно лишь утверждать, что с высокой долей вероятности он возникнет в непосредственной близости от них (рисунок 4.13).

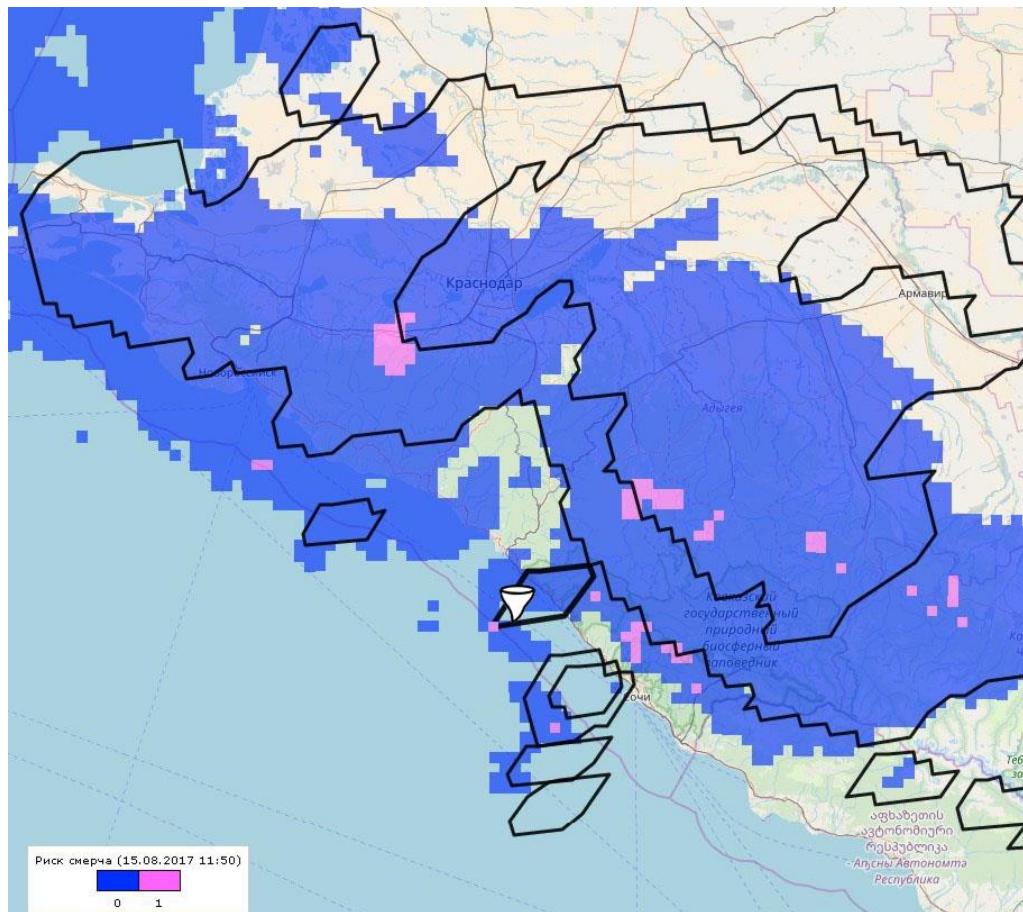


Рисунок 4.13 – Облачные ячейки, обнаруженные по результатам обработки спутниковых данных по алгоритму RDT, и результаты расчета категории риска смерча по радиолокационным данным на примере смерча 15 августа 2017 г. вблизи г. Сочи (Лазаревское)

С учетом полученного правила (4.11) предлагается усовершенствовать методику оценки смерчеопасности, включив в ее работу оперативное выявление областей риска смерчей по

радиолокационным данным (ДМРЛ-С) с последующим присвоением соответствующей категории облачным ячейкам, обнаруженным по алгоритму RDT. Таким образом, каждая ячейка будет характеризоваться тремя категориями риска: на базе прогноза смерчеопасности по смерчам каждого типа и на базе данных ДМРЛ-С. Последняя из упомянутых категорий будет распространяться на смерчи обоих типов и будет постоянно уточняться в режиме реального времени. Для района Краснодарского края, охваченного радиолокационными наблюдениями, с целью снижения количества случаев ложного выявления смерчевых ячеек предлагается оставить для рассмотрения только те ячейки, для которых риск по модельным данным подтверждался бы соответствующим риском по данным ДМРЛ-С.

Для повышения эффективности выявления потенциальных материнских ячеек смерчей при присвоении ячейкам категорий риска предлагается учитывать дополнительную буферную зону вокруг области ячейки. Размер данной зоны будет зависеть от класса присваиваемой категории. При присвоении категории риска по данным ДМРЛ-С размер устанавливается равным 9 км, что соответствует формированию новой области ячейки с учетом полученной оценки пространственной погрешности вычисления границ ячеек по алгоритму RDT. При присвоении категорий риска на базе прогноза смерчеопасности размер будет складываться из уже упомянутых 9 км и пространственной погрешности данного прогноза: для модели WRF – 44 км, а для модели COSMO-Ru2 – 56 км.

Для снижения количества ложных прогнозов вне периода со смерчами по разработанному в диссертации индексу WRI предлагается ввести в его состав новый образующий предиктор глубины конвекции CD. Для получения порогового значения для данного предиктора была использована обучающая выборка смерчей у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым за период 2014-2016 гг. На рисунке 4.14 показана гистограмма распределения значений предиктора CD на указанной выборке. Чёрным цветом на рисунке 4.14 изображена сглаживающая кривая эмпирической плотности распределения, красным – теоретическая плотность нормального закона распределения.

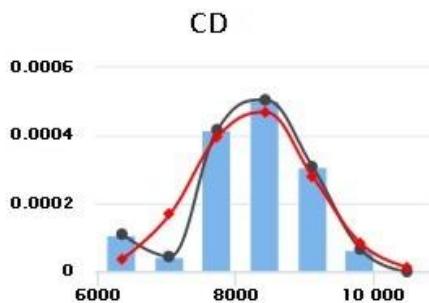


Рисунок 4.14 – Гистограмма распределения значений глубины конвекции для ячеек смерчей, зарегистрированных у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым в 2014-2016 гг., в м

В соответствии с описанным в подразделе 3.2.1 алгоритмом для полученного множества значений CD был рассчитан доверительный интервал выборочного среднего. Нижняя граница данного интервала определялась значением 7.6 км, которое впоследствии закрепилось в качестве порогового для CD. Следует отметить, что данное значение, в целом, согласуется с ранее известными оценками вертикальной мощности смерчевых облаков над Черным морем (8.5-11 км) [51]. С учетом нового предиктора модифицированная формула расчета индекса WRI принимает следующий вид:

$$WRI_m = \frac{1}{6} * I(DT_1 \geq 8) + (DD_{10} \geq 3.3) + (RH_1 \geq 80.7) + (CD \geq 7.6) + (DU_1 \leq 2.5) + (S_1 \leq 6.3) \quad (4.12)$$

Область значений нового индекса WRI_m определяется дискретным множеством [0, 1/6, 1/3, 1/2, 2/3, 5/6, 1]. Вклад в значение индекса от выполнения ограничивающий условий для DU_1 и S_1 учитывается только в том случае, если выполняются все четыре образующих условия DT_1 , DD_{10} , RH_1 и CD .

По результатам I этапа тестирования методики и ее последующего усовершенствования был сделан соответствующий доклад на международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика А.М. Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» [25].

4.4 Результаты работы методики на II этапе тестирования

Во время II этапа тестирования проводился одновременный расчет индекса WRI по (3.8) и WRI_m по (4.12). Для определения области НМС использовался прежний состав индексов {WRI, NSP, SWN}.

4.4.1 Период со смерчами

В 2018 г. у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым был зафиксирован 61 смерч (Приложение №1). Как и в 2017 г., помимо данных ESWD при составлении списка смерчей была использована информация из донесений к ШП, выданным региональными синоптиками. Кроме того учитывались сообщения о смерчах, опубликованные в популярных социальных сетях. Как правило, в подобных сообщениях отсутствовала информация о времени регистрации смерча, однако в рассматриваемой ситуации был важен сам факт его появления в определенный день месяца. По сравнению с 2017 г. значительно увеличилось количество зарегистрированных смерчей в Крыму: в 2018 г. – 10 смерчей, в 2017 г. – 3 смерча. При этом в целом по всему побережью России количество дней со смерчами практически не изменилось: в 2018 г. – 33 дня, в 2017 г. – 32 дня.

Поздним вечером 25 июля 2018 г. Новороссийск накрыла мощная конвективная система. По сообщениям очевидцев она дала начало интенсивному смерчу, вышедшему на сушу и разрушившему часть прибрежной инфраструктуры пляжа Алексино [93]. Точные данные о пути и времени жизни смерча отсутствуют. На рисунке 4.15 для рассматриваемого случая показаны поля некоторых индексов мезоциклических смерчей и зоны риска соответствующей смерчеопасной области, построенные по результатам обработки прогностических данных по модели WRF для момента времени 25.07.2018 18:00 ВСВ и начала счета 25.07.2018 00:00 ВСВ. Схожие результаты отмечались и по модели COSMO-Ru2.

Из рисунка 4.15а видно, что смерч регистрировался на окраине одной из зон максимального риска формирования мезоциклических смерчей. Смерчеопасная область по индексу SCP (рисунок 4.15б) была несколько шире соответствующей области по индексу STP_{fl} (рисунок 4.15в), а по индексу STP_{el} она не идентифицировалась (рисунок 4.15г). Положения максимумов трех рассматриваемых индексов (очерчены кругом) были смещены от положения смерча на расстояние от 20 до 70 км. Для остальных индексов мезоциклических смерчей, входящих в состав области МС, отмечались схожие результаты. Все они спрогнозировали рассматриваемый случай. Что касается индексов немезоциклических смерчей, то они оказались неинформативными.

На рисунке 4.16 показаны радиолокационные изображения dBZ_m, Н_{ВГО}, VIL и Ся для момента регистрации вышеупомянутого смерча. Сравнение данных изображений с прогностическими полями свидетельствует о хорошем качественном согласии прогноза и реально возникшей ситуации, несмотря на некоторый сдвиг по пространству. В частности, как видно из рисунка 4.15а, по модели локализовались две зоны максимального риска мезоциклических смерчей, которые в действительности соответствовали двум достаточно мощным (с Н_{ВГО} свыше 12 км) ячейкам, одна из которых, давшая начало смерчу, по всем признакам относились к классу суперячеек.

Анализ сформированных по методике предупреждений о мезоциклических смерчах за весь июль 2018 г. показал, что наиболее информативными оказались предупреждения максимальной категории риска, относящиеся к непрерывному продолжительному периоду времени (свыше 8 часов) и прослеживающиеся на последовательных этапах счета по модели. Подобные предупреждения выдавались по Краснодарскому краю на 10 и 25 июля. Они соответствовали согласованному по времени и по пространству прогнозу смерчеопасной ситуации по подавляющему большинству индексов области МС.

На 10 июля предупреждения не оправдались. Прогнозируемая на этот день зона максимального риска образования суперячеек с возможными смерчами была не так обширна как зона 25 июля.

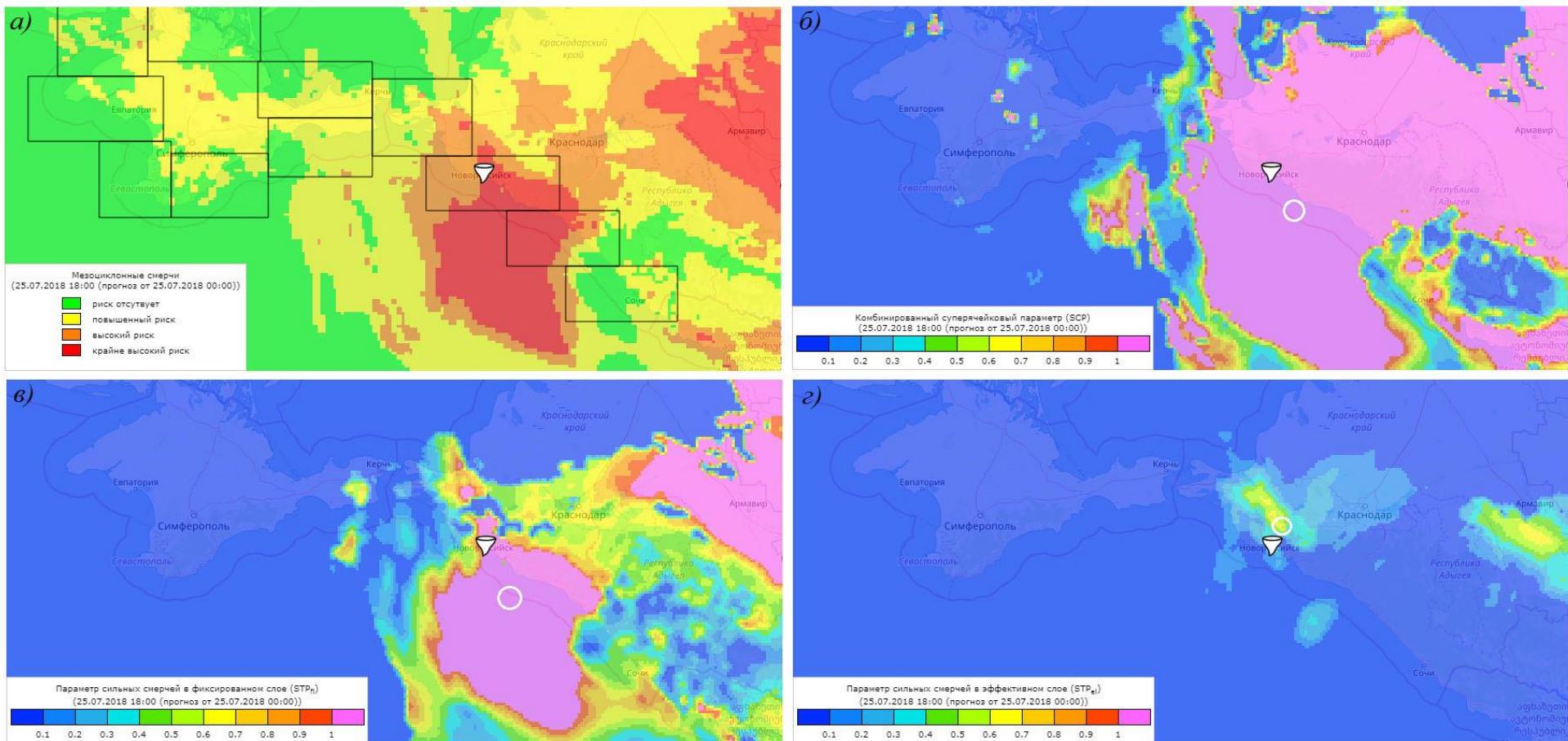


Рисунок 4.15 – Зоны риска мезоциклонных смерчей, а также поля некоторых определяющих индексов соответствующей смерчеопасной области на примере смерча 25 июля 2018 г. вблизи г. Новороссийск (модель WRF)

а) зоны риска б) индекс SCP (max = 16.315) в) индекс STP_{fl} (max = 4.413) г) индекс STP_{el} (max = 0.753)

(центр каждого круга соответствует положению максимума рассматриваемого индекса)

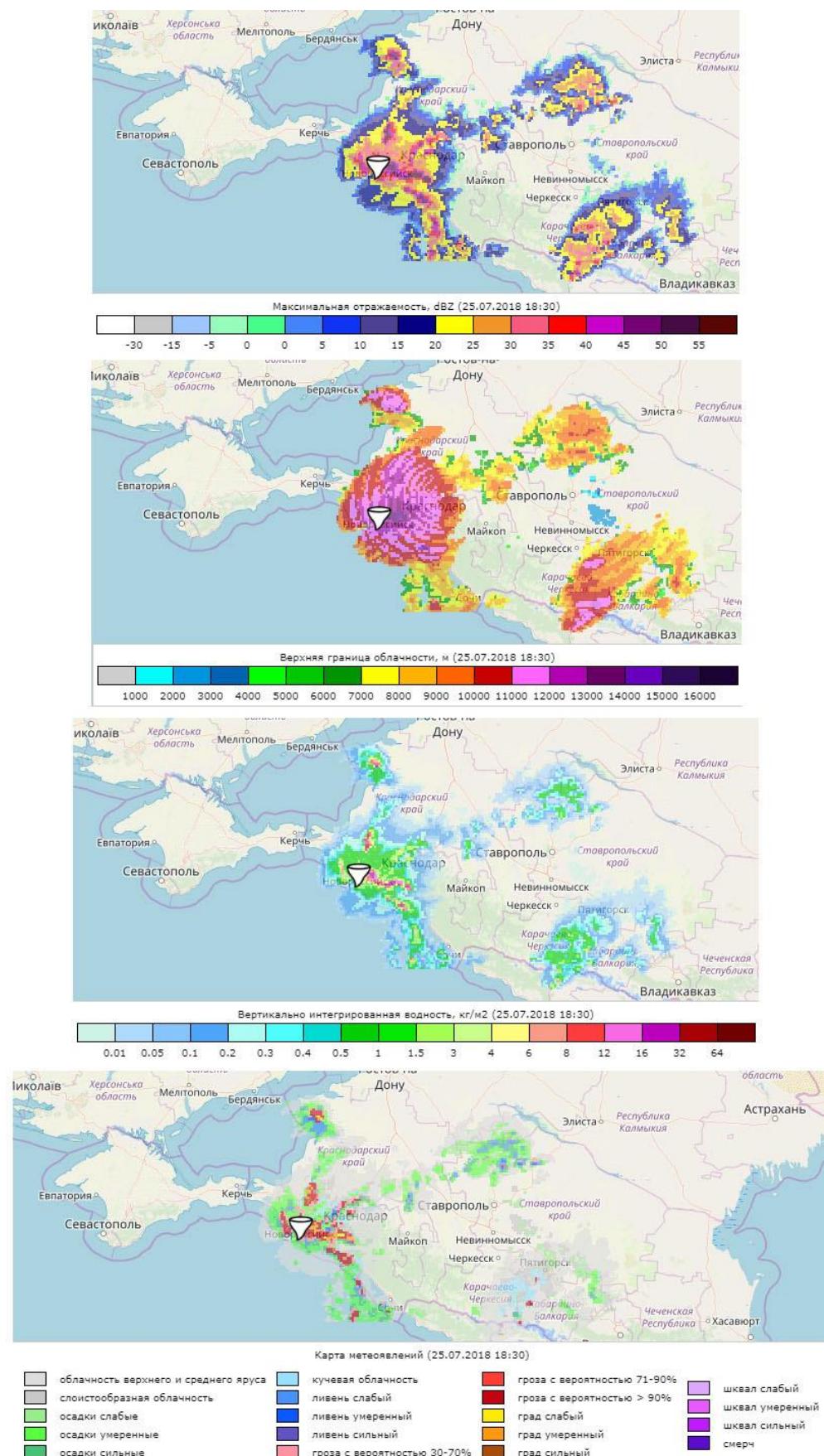


Рисунок 4.16 – Радиолокационные изображения максимальной отражаемости, ВГО, вертикально интегрированной водности и карты метеоявлений (сверху вниз) для момента регистрации смерча вблизи г. Новороссийск 25 июля 2018 г.

Предупреждения с максимальным риском на 25 июля относились ко второй половине дня (Приложение №5), что, в целом, соответствовало действительности, поскольку первые очаги формирования мощных грозовых облаков по данным ДМРЛ-С стали появляться ближе к 12 ч по ВСВ. Предупреждения меньшей категории риска в течение рассматриваемого месяца фиксировались с большей частотой, из чего следует, что некоторые индексы области МС давали ложные прогнозы. В частности, чаще других фиксировались превышения пороговых значений для индексов сдвига ветра WD_{BRN} и S_1 .

Возвращаясь к немезоциклонным смерчам, первый подобный случай у Черноморского побережья России в 2018 г. был зарегистрирован во второй половине апреля (Приложение №1). Однако ввиду его единичности при дальнейшем рассмотрении временные рамки сезона смерчей ограничивались периодом июнь – октябрь. Указанный случай был успешно спрогнозирован всеми индексами области НМС. Для индекса WRI_m по предиктору CD превышений не отмечалось, т.к. облако смерча было не слишком развито по вертикали. По этой причине вероятность его формирования по этому индексу оценивалась в 50%.

Из рисунков 4.5-4.8 и таблиц 4.13-4.21 видно, что, как и в ходе I этапа тестирования, на II этапе за период со смерчами наиболее эффективным по всем рассматриваемым показателям качества прогноза, за исключением показателя предупрежденности наличия смерчей и пространственной погрешности прогноза, оказывается индекс WRI . При этом его модифицированная версия WRI_m показывает более высокие результаты по сравнению с исходной. Низкие результаты для Крыма по WRI и WRI_m для модели COSMO-Ru2 (таблица 4.22) были обусловлены возникновением 40% смерчей в Крыму на границе или вне области расчета данной модели. За счет использования адаптированных к рассматриваемому региону пороговых значений предикторов, входящих в состав индексов WRI и WRI_m , выделяемая на их основе смерчеопасная область менее обширно локализована в пространстве, чем у остальных индексов (рисунок 4.3). Как следствие, ввиду наличия пространственной погрешности прогноза для пограничных смерчей она могла находиться за пределами расчетной области, и на некоторых заблаговременностях счета по модели COSMO-Ru2 эти смерчи не прогнозировались.

На фоне общего повышения качества прогноза смерчей по индексу WRI_m по сравнению с исходной версией WRI по Т и Н отмечается незначительное снижение предупрежденности наличия смерчей (таблица 4.22) и повышение пространственной погрешности их прогноза по модифицированной версии (таблица 4.21). Тем не менее, в целом, можно считать, что модификация индекса оказалась полезной. По этой причине будет целесообразно включить индекс WRI_m в состав определяющих индексов области НМС взамен ранее использованного варианта WRI .

Таблица 4.13 – Оправдываемость прогноза наличия смерчей, % (WRF, 2018 г.)

Индекс	июнь		июль		август		сентябрь		октябрь	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Республика Крым										
WRI	11	20	0	5	14	33	8	11	-	-
WRI _m	17	33	0	6	20	33	14	17	-	-
NSP	5	9	3	3	7	7	8	9	-	-
SWN	6	11	3	3	7	7	9	9	-	-
Краснодарский край										
WRI	6	13	30	44	20	24	36	38	33	33
WRI _m	6	13	33	46	20	24	47	47	57	67
NSP	4	9	23	23	19	19	38	38	25	25
SWN	4	9	27	27	19	19	36	38	25	31

Таблица 4.14 – Оправдываемость прогноза наличия смерчей, % (COSMO-Ru2, 2018 г.)

Индекс	июнь		июль		август		сентябрь		октябрь	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Республика Крым										
WRI	0	20	0	0	0	0	8	20	-	-
WRI _m	0	0	0	0	0	0	10	18	-	-
NSP	6	13	3	4	7	18	7	12	-	-
SWN	8	17	4	5	6	14	6	13	-	-
Краснодарский край										
WRI	11	18	35	58	21	40	39	50	33	44
WRI _m	13	18	37	70	22	40	50	60	43	60
NSP	7	7	23	25	15	21	35	38	24	33
SWN	7	8	28	31	14	20	33	41	22	31

Таблица 4.15 – Предупрежденность наличия смерчей, % (WRF, 2018 г.)

Индекс	июнь		июль		август		сентябрь		октябрь	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Республика Крым										
WRI	50	100	0	100	50	100	100	100	-	-
WRI _m	50	100	0	100	50	100	100	100	-	-
NSP	100	100	100	100	100	100	100	100	-	-
SWN	100	100	100	100	100	100	100	100	-	-
Краснодарский край										
WRI	100	100	100	100	67	83	89	89	100	100
WRI _m	100	100	86	100	67	83	78	89	100	100
NSP	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
SWN	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Таблица 4.16 – Предупрежденность наличия смерчей, % (COSMO-Ru2, 2018 г.)

Индекс	июнь		июль		август		сентябрь		октябрь	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Республика Крым										
WRI	0	50	0	0	0	0	100	100	-	-
WRI _m	0	0	0	0	0	0	50	100	-	-
NSP	100	100	100	100	100	100	100	100	-	-
SWN	50	100	100	100	100	100	100	100	-	-
Краснодарский край										
WRI	100	100	100	100	50	100	88	100	100	100
WRI _m	100	100	100	100	50	100	75	100	75	100
NSP	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
SWN	100	100	88	100	100	100	86	100	100	100

Таблица 4.17 – Критерий Пирси-Обухова (WRF, 2018 г.)

Индекс	июнь		июль		август		сентябрь		октябрь	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Республика Крым										
WRI	0.318	0.636	-0.862	0.345	0.431	0.586	0.148	0.370	-	-
WRI _m	0.409	0.773	-0.690	0.448	0.431	0.724	0.556	0.630	-	-
NSP	0.091	0.182	0	0	0.069	0.069	0.185	0.222	-	-
SWN	0.227	0.273	0	0.034	0.034	0.069	0.222	0.259	-	-
Краснодарский край										
WRI	0.261	0.333	0.304	0.609	0.027	0.193	0.189	0.239	0.704	0.704
WRI _m	0.304	0.333	0.391	0.553	0.027	0.193	0.378	0.439	0.889	0.926
NSP	0	0	0	0	0	0	0.250	0.250	0.556	0.556
SWN	0	0	0	0	0	0	0.200	0.250	0.556	0.667

Таблица 4.18 – Критерий Пирси-Обухова (COSMO-Ru2, 2018 г.)

Индекс	июнь		июль		август		сентябрь		октябрь	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Республика Крым										
WRI	-0.071	0.357	-0.345	-0.179	0	0	0.538	0.704	-	-
WRI _m	-0.071	-0.036	-0.276	-0.143	0	0	0.241	0.769	-	-
NSP	-0.107	0.5	0	0.138	0.5	0.679	0.385	0.577	-	-
SWN	0.107	0.643	0.214	0.31	0.483	0.593	0.385	0.519	-	-
Краснодарский край										
WRI	0.393	0.679	0.435	0.783	0.208	0.560	0.263	0.600	0.704	0.815
WRI _m	0.5	0.679	0.478	0.864	0.208	0.560	0.526	0.657	0.602	0.852
NSP	0	0.036	0	0.045	0.043	0.125	0.105	0.400	0.519	0.704
SWN	0.071	0.179	0.018	0.182	0	0	0.138	0.357	0.481	0.667

Таблица 4.19 – Критерий Багрова (WRF, 2018 г.)

Индекс	июнь		июль		август		сентябрь		октябрь	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Республика Крым										
WRI	0.127	0.183	-0.073	0.039	0.148	0.328	0.027	0.069	-	-
WRI _m	0.219	0.360	-0.068	0.057	0.247	0.328	0.155	0.201	-	-
NSP	0.020	0.022	-0.003	-0.003	0.011	0.011	0.029	0.043	-	-
SWN	0.026	0.044	-0.003	0.006	0.008	0.011	0.043	0.046	-	-
Краснодарский край										
WRI	0.026	0.078	0.175	0.421	0.015	0.096	0.131	0.18	0.375	0.375
WRI _m	0.03	0.078	0.225	0.419	0.015	0.096	0.329	0.362	0.663	0.780
NSP	-0.002	0.003	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	0.167	0.167	0.238	0.238
SWN	-0.002	0.003	0.005	0.005	-0.004	-0.004	0.137	0.167	0.238	0.341

Таблица 4.20 – Критерий Багрова (COSMO-Ru2, 2018 г.)

Индекс	июнь		июль		август		сентябрь		октябрь	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Республика Крым										
WRI	-0.047	0.195	-0.077	-0.064	-0.12	0.100	0.086	0.235	-	-
WRI _m	-0.047	-0.045	-0.080	-0.044	-0.12	0.100	0.087	0.216	-	-
NSP	-0.023	0.111	-0.005	0.015	0.072	0.22	0.072	0.095	-	-
SWN	0.032	0.202	0.017	0.025	0.059	0.151	0.048	0.133	-	-
Краснодарский край										
WRI	0.074	0.220	0.270	0.627	0.141	0.409	0.187	0.430	0.375	0.535
WRI _m	0.111	0.220	0.300	0.762	0.141	0.409	0.419	0.566	0.460	0.598
NSP	0.004	0.005	-0.004	0.028	0.019	0.039	0.066	0.264	0.216	0.375
SWN	0.006	0.024	0.003	0.106	-0.003	0.006	0.087	0.248	0.196	0.341

Таблица 4.21 – Усредненная по сезону 2018 г. пространственная погрешность прогноза смерчей различной заблаговременности (0-36 ч), км

Метод	Модель WRF			Модель COSMO-Ru2				
	24 ч	0 ч	avg	36 ч	24 ч	12 ч	0 ч	avg
Индекс WRI	80	65	73	45	78	64	74	65
Индекс WRI _m	83	70	77	60	86	71	80	74
Индекс NSP	34	32	33	38	27	25	16	27
Номограмма SWN	10	13	12	19	27	19	15	20
Композиция прогнозов	47	63	55	50	45	40	67	51

Для Краснодарского края наилучшее качество прогноза смерчей по всем индексам и моделям отмечалось в октябре, а для Крыма подобной однозначности не наблюдалось. В целом, по сравнению с прошлым годом значения рассматриваемых показателей качества незначительно ухудшились при сохранении тенденции на преимущество использования результатов расчетов по модели COSMO-Ru2 перед моделью WRF за исключением результатов по Крыму. В большей степени отмеченное ухудшение было свойственно индексам NSP и SWN в пределах Крыма за счет высокой доли ложных прогнозов. Что касается пространственной погрешности прогноза смерчей, то она практически не изменилась (таблица 4.23). Индексы области ОН, как и ранее, оказались малоинформативными в сезон смерчей.

На рисунках 4.17-4.20 показаны ROC-кривые предупреждений о смерчах. По указанной выше причине наименьшая площадь ROC-кривых отмечалась по модели COSMO-Ru2 для Крыма. По сравнению с 2017 г. увеличилось количество предупреждений с 66% вероятностью формирования смерчей вблизи побережья Краснодарского края. В этих случаях согласованный по времени и по пространству прогноз смерчеопасной ситуации давался по двум из трех индексов области НМС.

Значения доли ложных тревог на ROC-кривых варьировались в широком диапазоне от 0 до 96%. Средняя площадь ROC-кривых по всем месяцам и по всем заблаговременностям составила для модели WRF по Крыму – 0.559, по Краснодарскому краю – 0.684, а для модели COSMO-Ru2 – 0.402 и 0.646 соответственно.

Предупрежденность смерчей по разработанной методике на базе модели WRF для обоих районов составила 100%, а на базе модели COSMO-Ru2 для Краснодарского края – 100%, для Крыма – 80% (не были предупреждены 2 смерча, зарегистрированные в июне и в августе вблизи г. Севастополь). Все предупреждения были эффективными.

Таблица 4.22 – Значения показателей качества прогноза смерчей по определяющим индексам области НМС за период со смерчами 2018 г. (заблаговременность счета – 24 ч)

Индекс	Модель	U, %	POFD, %	U _я , %	П _я , %	T	H
Республика Крым							
WRI	WRF	43	59	6	83	0.246	0.032
	COSMO-Ru2	77	20	3	17	-0.038	-0.013
WRI _m	WRF	64	36	9	80	0.438	0.077
	COSMO-Ru2	85	13	5	17	0.040	0.020
NSP	WRF	26	77	5	100	0.232	0.019
	COSMO-Ru2	47	55	7	100	0.451	0.062
SWN	WRF	28	75	6	100	0.254	0.021
	COSMO-Ru2	57	44	7	83	0.397	0.068
Краснодарский край							
WRI	WRF	51	58	27	89	0.315	0.162
	COSMO-Ru2	74	30	39	92	0.620	0.405
WRI _m	WRF	63	44	35	88	0.443	0.290
	COSMO-Ru2	78	24	43	85	0.608	0.441
NSP	WRF	33	83	23	100	0.172	0.070
	COSMO-Ru2	35	79	21	100	0.213	0.087
SWN	WRF	35	81	24	100	0.191	0.081
	COSMO-Ru2	37	75	21	96	0.207	0.087

Таблица 4.23 – Пространственная погрешность прогноза смерчей, усредненная за периоды со смерчами по всем заблаговременностям счета по модели, км

Метод	Модель WRF		Модель COSMO-Ru2	
	2017 г.	2018 г.	2017 г.	2018 г.
Индекс WRI	49	73	63	65
Индекс WRI _m	-	77	-	74
Индекс NSP	29	33	31	27
Номограмма SWN	14	12	12	20
Композиция прогнозов	44	55	56	51

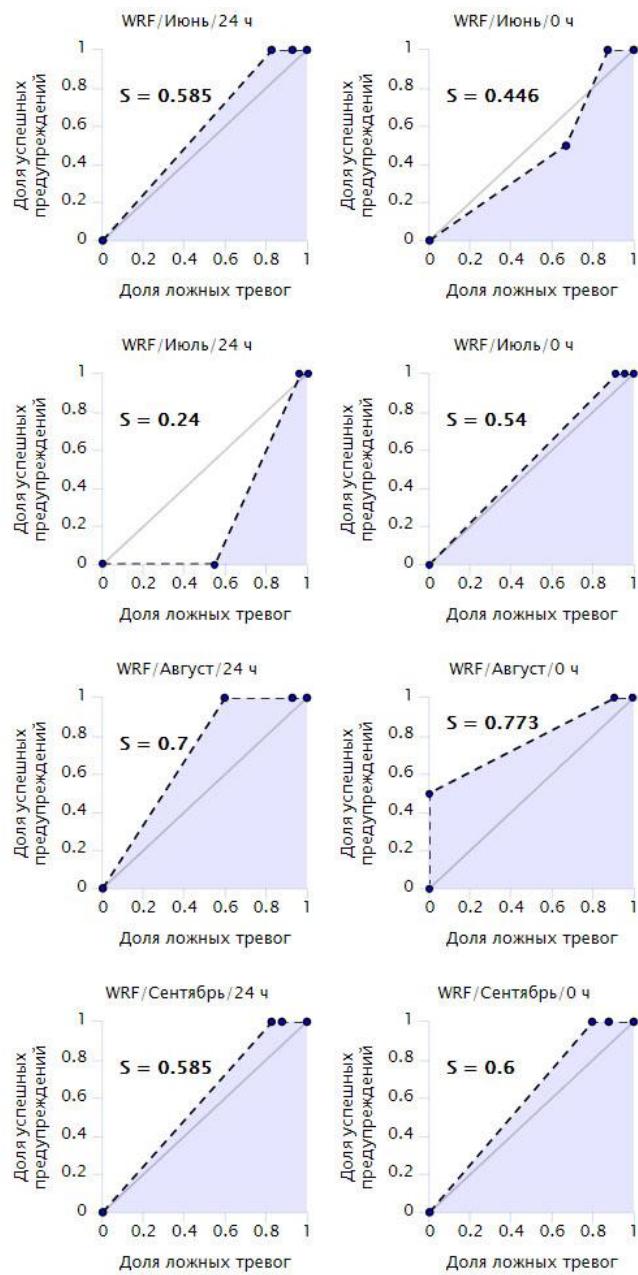


Рисунок 4.17 – ROC-кривые предупреждений о смерчах для района Республики Крым
(модель WRF, 2018 г.)

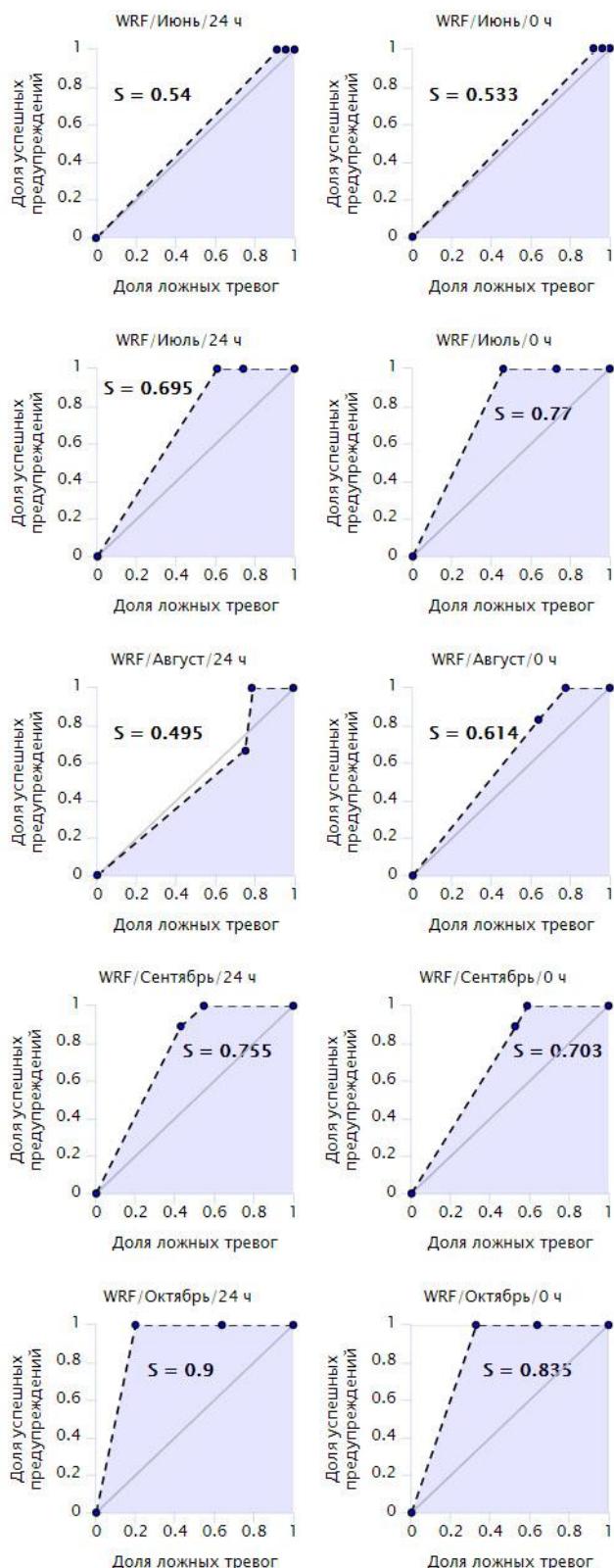


Рисунок 4.18 – ROC-кривые предупреждений о смерчах для района Краснодарского края
(модель WRF, 2018 г.)

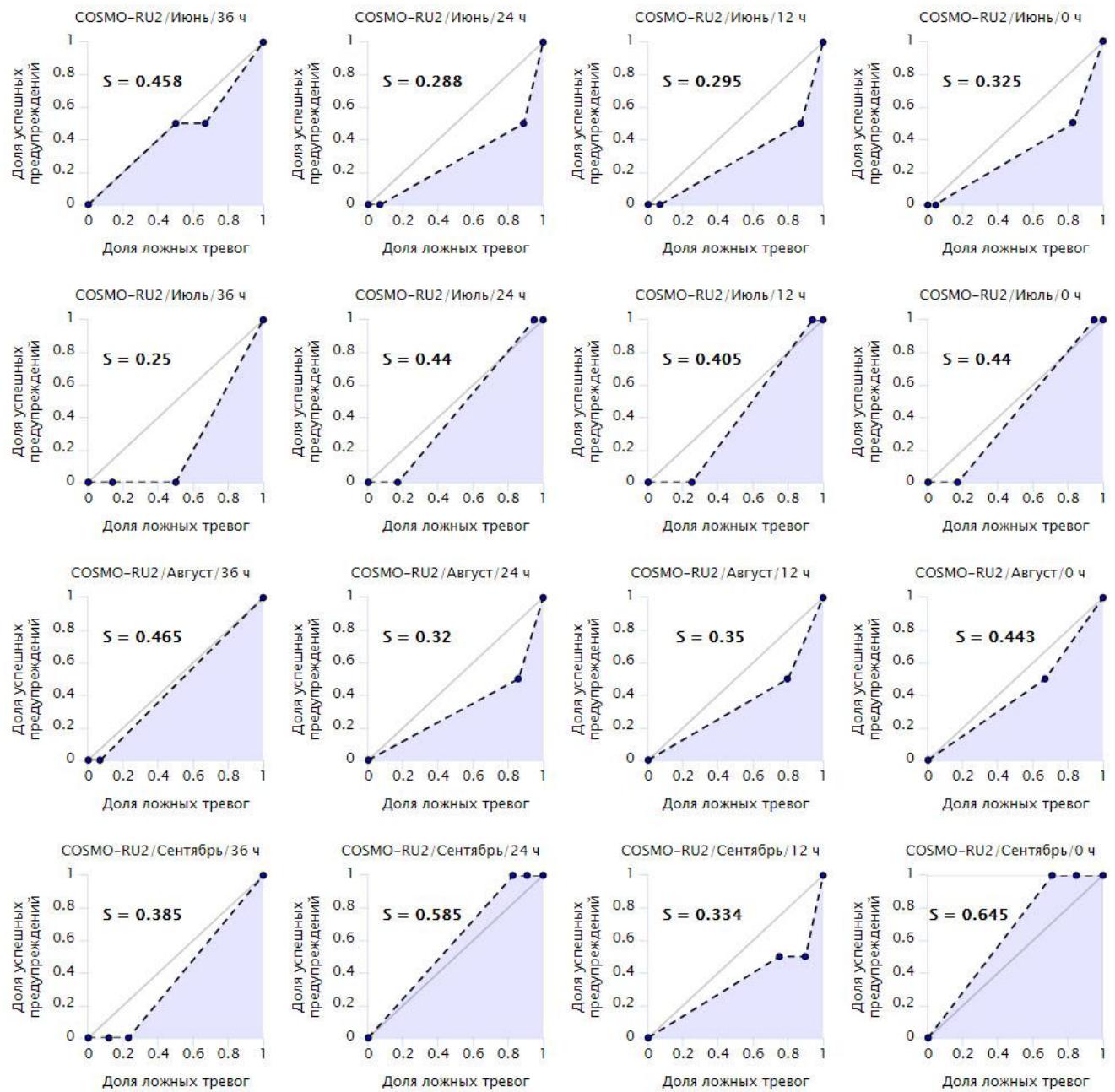


Рисунок 4.19 – ROC-кривые предупреждений о смерчах для района Республики Крым

(модель COSMO-Ru2, 2018 г.)

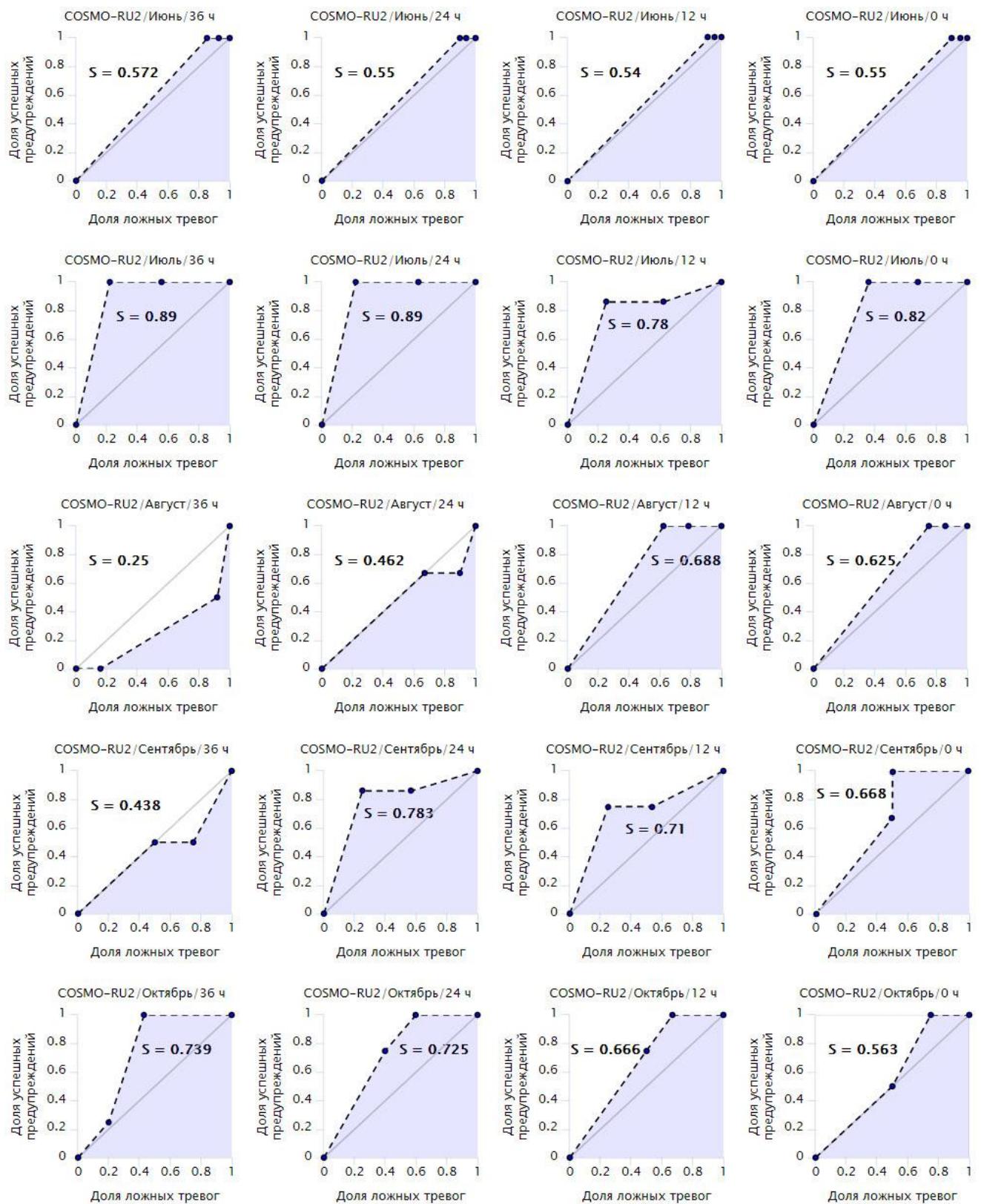


Рисунок 4.20 – ROC-кривые предупреждений о смерчах для района Краснодарского края
(модель COSMO-Ru2, 2018 г.)

В процессе оценки качества выявления смерчевых ячеек было проанализировано 47 материнских ячеек смерчей с определенным временем их возникновения, из них 41 ячейка в Краснодарском крае и 6 ячеек в Крыму (Приложение №3). По модели WRF в момент возникновения смерча 35 ячейкам была присвоена третья категория риска, 7 ячейкам – вторая, 3 ячейкам – первая и 2 ячейкам – нулевая. По модели COSMO-Ru2 отмечалось следующее распределение: 29 ячеек третьей категории риска, 10 ячеек второй, 6 ячеек первой и 2 ячейки нулевой. Как и на I этапе тестирования, для подавляющего большинства ячеек категория риска формирования из них смерчей определялась в момент их первого обнаружения и оставалась неизменной вплоть до появления смерча. Для небольшого ряда ячеек категория риска с течением времени повышалась. Таким образом, эффективность выявления материнских ячеек смерчей составила для модели WRF – 89%, а для модели COSMO-Ru2 – 83%, что существенно выше аналогичных значений в 2017 г. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенное решение об учете пространственной погрешности прогноза смерчеопасности и вычисления границ ячеек оказалось полезным.

По результатам анализа категорий риска, присвоенных в соответствии с правилом (4.11) материнским ячейкам смерчей, отмечавшихся в 2018 г. у Черноморского побережья Краснодарского края, было установлено, что в моменты их возникновения 27 ячеек идентифицировались как смерчеопасные (Приложение №4). Среди них для 10 ячеек смерчеопасная категория присваивалась одновременно с появлением смерча. Для оставшихся 17 ячеек данное присвоение осуществлялось с некоторой степенью заблаговременности: для 7 ячеек – менее 1 ч, для 6 ячеек – от 1 до 2 ч, для 4 ячеек – более 2 ч. Средняя заблаговременность составила около 1 ч.

Большинство нераспознанных смерчевых ячеек регистрировалось ближе к концу сезона смерчей – начиная с середины сентября и весь октябрь. Эти ячейки характеризовались более низкими значениями радиолокационных параметров по сравнению с принятыми в качестве пороговых в (4.11), в частности ВГО этих ячеек, как правило, не превышала 10 км. Указанное обстоятельство согласуется с годовым ходом графиков оправдываемости прогноза смерчей и вероятности их ложного обнаружения по методу номограммы Силадьи SWN, который, как уже было упомянуто ранее, может служить хорошим индикатором начала и окончания сезона смерчей и периода формирования систем глубокой конвекции в целом. Из рисунков 4.5-4.8 видно, что именно с сентября 2018 г. для Краснодарского края по рассматриваемому методу отмечается стабильный рост оправдываемости и снижение вероятности ложного обнаружения, свидетельствующие об уменьшении повторяемости формирования облаков большой вертикальной протяженности.

Таким образом, эффективность распознавания смерчеопасной области по правилу (4.11) составила 66%. Данное правило можно рассматривать как полезный диагностический признак смерчевых ячеек, кроме того оно может быть использовано и для наукастинга (с заблаговременностью порядка одного часа) смерчей в теплый конвективный период.

Из таблицы 4.24 видно, что учет риска смерча по ДМРЛ-С при выявлении смерчевых ячеек в Краснодарском крае в 2018 г. способствовал значительному сокращению количества дней с неоправдавшимися выявленными случаями. Следует подчеркнуть, что при подсчете данного количества не принимался во внимание тот факт, какая категория риска (вторая или третья) по модельным данным присваивалась ячейке. По этой причине отмечаемое для отдельных месяцев преимущество модели WRF перед моделью COSMO-Ru2 не противоречит ранее полученным результатам, а может лишь свидетельствовать о более частом выявлении с использованием результатов расчетов по модели COSMO-Ru2 ложных смерчевых ячеек второй категории риска.

Таблица 4.24 – Количество дней с неоправдавшимися случаями выявления по методике смерчевых ячеек в Краснодарском крае в 2018 г. с учетом риска смерча по ДМРЛ-С и без него

Месяц	Модель WRF		Модель COSMO-Ru2	
	с учетом	без учета	с учетом	без учета
июнь	8	14	9	15
июль	8	16	10	17
август	7	15	8	13
сентябрь	3	13	3	13
октябрь	2	7	1	10

В 2018 г. за период с 1 июня по 31 октября региональными синоптиками было выдано 33 ШП (54 прогноза) о возможном образовании смерчей над Черным морем вблизи побережья Краснодарского края. Из них 25 ШП (26 прогнозов) оправдались, 21 ШП (23 прогноза) были выданы с заблаговременностью более 2 ч (последние столбцы таблицы из Приложения №1 за 2018 г.). За вышеуказанный период в Краснодарском крае отмечалось 29 дней со смерчами, следовательно, количество неоправдавшихся прогнозов отсутствия смерчей было равно 3, а количество оправдавшихся прогнозов отсутствия смерчей – 96 (по количеству дней без ШП, в течение которых смерчи действительно не отмечались, за вышеуказанный период). По Крыму предупреждений не было. В таблице 4.25 приведены итоговые значения показателей качества ШП и для сравнения значения за период со смерчами аналогичных показателей для разработанной методики.

Из таблицы 4.25 видно, что, как и ранее, по методике достигается более высокая предупрежденность смерчей и заблаговременность выдачи предупреждений об их возможном формировании по сравнению с работой синоптиков. Однако в отличие от результатов 2017 г. разрыв в значениях вышеупомянутых показателей был не так велик. В 2018 г. большая часть ШП о смерчах выдавалась совместно с предупреждениями о комплексе неблагоприятных метеорологических явлений (сильные дожди, ливни, гроза, град и шквалистое усиление ветра). По этой причине не все те предупреждения, которые оправдывались для указанного комплекса, оказывались оправдавшимися и для смерчей. Как следствие, применительно к смерчам за счет увеличения количества ложных предупреждений их оправдываемость снизилась с 90% в 2017 г. до 80% в 2018 г. Ее значение в 2018 г. было в некоторой степени сопоставимо с результатами по методике с использованием модели COSMO-Ru2.

Таблица 4.25 – Значения оправдываемости (U) и заблаговременности (Z) предупреждений о смерчах, а также их предупрежденности (Пя) в 2018 г. по результатам работы синоптиков и разработанной автоматизированной методики для Краснодарского края

Источник предупреждений	U, %	Z*, ч	Пя, %
Синоптики	80	24	90
Методика (модель WRF)	59	27	100
Методика (модель COSMO-Ru2)	73	29	100

*Примечание: Указаны усредненные значения, для методики с учетом времени на счет по модели.

Полученные результаты I и II этапа тестирования за период со смерчами демонстрируют принципиальную возможность выдачи по разработанной методике предупреждений об угрозах формирования смерчей над Черным морем с заблаговременностью до 30 ч (при использовании результатов расчетов по модели COSMO-Ru2), сводя к минимуму вероятность их пропуска, а также возможность выявления смерчевых облаков в среднем за час до момента появления смерча.

4.4.2 Период без смерчей

На II этапе тестирования фактический период без смерчей продлился с марта по май 2018 г. Однако, судя по ходу графика SWN (рисунки 4.5 и 4.6) благоприятные для формирования смерчей условия стали отмечаться уже в мае. Вполне возможно, что в этом месяце возникали никем не учтенные случаи появления смерчей. Помимо SWN явно выраженное повышение прогнозируемого уровня смерчеопасности вблизи Черноморского

побережья Краснодарского края и Республики Крым в мае хорошо прослеживается и по ходу графика индекса NSP.

Из таблицы 4.26 видно, что за условно принятый период без смерчей (без учета мая 2018 г.) наилучшие результаты показывает модифицированная версия индекса WRI_m, а также метод номограммы Силадьи SWN, наихудшие – индекс NSP. В отличие от периода без смерчей на I этапе тестирования соответствующий период на II этапе был более близок к началу теплого сезона. По-видимому, по этой причине результаты для индекса WRI оказались выше аналогичных результатов для индекса NSP. Средняя оправдываемость прогноза смерчеопасности за март и апрель 2018 г. по всем заблаговременностям и по обоим районам составила по модели COSMO-Ru2 – 98%, а по модели WRF – 96%.

Таблица 4.26 – Значения показателей качества прогноза смерчей по определяющим индексам области НМС за условно принятый период без смерчей на II этапе тестирования (март – апрель 2018 г.) (заблаговременность счета – 24 ч)

Индекс	Модель	Республика Крым		Краснодарский край	
		U, %	POFD, %	U, %	POFD, %
WRI	WRF	67	33	59	41
	COSMO-Ru2	80	20	69	31
WRI _m	WRF	100	0	92	8
	COSMO-Ru2	100	0	100	0
NSP	WRF	69	31	38	62
	COSMO-Ru2	75	25	48	52
SWN	WRF	98	2	92	8
	COSMO-Ru2	100	0	100	0

В целом, по результатам I и II этапа тестирования видно, что среди трех рассматриваемых индексов области НМС наименее информативным является индекс NSP. В сезон смерчей он показывает высокую вероятность их ложного обнаружения, как впрочем, и метод номограммы Силадьи SWN, однако последний в отличие от первого отчасти компенсирует свою неэффективность за период со смерчами хорошим качеством прогноза за период без смерчей. Что касается сопоставления индексов NSP и WRI, то и здесь первый значительно уступает второму как по качеству прогноза в сезон смерчей, так и за период без них (при использовании модифицированной версии WRI_m).

Таким образом, в рамках дальнейшего усовершенствования методики оценки смерчеопасности вблизи Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым предлагается сформировать новый состав индексов области НМС – {WRI_m, SWN}. Первый

индекс новой комбинации (WRI_m) показывает хорошее качество прогноза в теплый смерчеопасный период, когда образование смерчей связано с облаками большой вертикальной протяженности, а второй (SWN), в свою очередь, более эффективен для прогноза редких случаев смерчей в холодный и значительно менее смерчеопасный период. Использование новой комбинации индексов, как ожидается, позволит уменьшить количество ложных предупреждений по методике.

Выходы по главе 4

Проведено тестирование разработанной методики оценки смерчеопасности в непрерывном режиме счета с июля 2017 г. по октябрь 2018 г. По результатам первых восьми месяцев тестирования предложена усовершенствованная версия методики, предусматривающая распознавание смерчеопасных областей по радиолокационным данным, учет пространственной погрешности прогноза смерчеопасности и вычисления границ облачных ячеек при присвоении им категорий риска, а также использование модифицированной формулы расчета индекса WRI . Эффективность предложенных изменений подтверждена результатами последующего тестирования с марта по октябрь 2018 г.

Используемый в методике подход к построению прогноза смерчеопасности на базе комплексации по времени и по пространству прогнозов смерчей по различным индексам позволил достичь более высоких значений общей оправдываемости прогноза по сравнению с результатами каждого из индексов в отдельности. Большинство предупреждений о смерчах, сформированных по методике и относящихся к реальным случаям их образования, соответствовало максимальному риску появления смерчей. Для предупреждений по методике отмечалась более высокая заблаговременность оповещения о возможных смерчах, а также более высокая их предупрежденность по сравнению с предупреждениями, выпущенными синоптиками.

Разработанный в настоящей диссертации региональный индекс смерчеопасности WRI показывает наилучшее качество прогноза смерчей среди других известных индексов как в теплый смерчеопасный период, так и за период без смерчей (при использовании модифицированной формулы расчета индекса WRI_m). Учет нового предиктора глубины конвекции обосновывает возможность пропуска смерчей по данному индексу в более холодный и значительно менее смерчеопасный период, в течение которого смерчи обычно возникают из слабо развитых по вертикали облаков. Подобные случаи над Черным морем, как правило, достаточно редки. Ранее они были успешно спрогнозированы по методу номограммы Силадьи.

Этот метод, как было установлено, кроме прочего, может быть использован для определения временных границ начала и окончания сезона смерчей.

Разработанная методика показывает свою эффективность как на модели WRF, так и на модели COSMO-Ru2. Использование результатов расчетов по модели COSMO-Ru2 способствует получению более качественного прогноза смерчей по сравнению с тем, который формируется на базе модели WRF. Неполный охват территории Крыма в модели COSMO-Ru2 в некоторых случаях приводит к пропуску смерчей, возникающих вблизи его западного побережья. Благоприятные для формирования смерчей условия в Крыму по методике при использовании модели WRF прогнозируются примерно с такой же частотой, что и в Краснодарском крае, что свидетельствует о возможности существования неучтенных при оценке случаев смерчей в Крыму. Отсутствие единой системы регистрации случаев возникновения смерчей у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым, в целом, обуславливает субъективность проводимой оценки качества их прогноза.

Пространственная погрешность формируемого по методике прогноза смерчеопасности по обеим моделям варьируется в небольшом диапазоне вблизи 50 км. Моменты появления смерчей согласуются с временными рамками действия прогнозируемых смерчеопасных ситуаций. Как правило, отмечается достаточно продолжительный период действия подобных ситуаций, что позволяет без потери качества прогноза использовать для его построения продукцию модели COSMO-Ru2, несколько уступающую по временному шагу продукции модели WRF.

Предложенное правило распознавания смерчеопасных областей по радиолокационным данным показывает высокую эффективность в теплый период глубокой конвекции. Заблаговременность выявления смерчевых облаков в большинстве случаев не превышает одного часа.

По результатам тестирования уточнен состав индексов области возможного образования немезоциклонных смерчей, который, как ожидается, позволит уменьшить количество ложных предупреждений по методике.

Заключение

К наиболее значимым результатам, полученным в ходе выполнения диссертационной работы, можно отнести следующее:

1. Разработана автоматизированная технология мониторинга смерчеопасных ситуаций вблизи Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым, обеспечивающая ведение архива данных наблюдательной сети. В рамках работы технологии реализован алгоритм верификации сообщений о смерчах. Создан подробный архив смерчей над Черным морем за период 2014-2018 гг. На основе архивных данных определены и статистически обоснованы характеристики смерчей, дающие представление о перспективах их возникновения. Получены количественные оценки условий формирования смерчей, согласующиеся с известными данными. Впервые получены распределения параметров смерчевых облаков над Черным морем по спутниковым данным и пороговые значения для распознавания смерчеопасных областей по данным ДМРЛ-С. Подтверждена нередко наблюдалась грозовая активность смерчевых облаков.

2. Предложен алгоритм использования известных методов диагностики и прогнозирования смерчей на прибрежной акватории Черного моря. Определены информативные для данной акватории прогностические индексы для выявления общей неустойчивости атмосферы и образования немезоциклических смерчей. Проанализированы случаи более интенсивных сухопутных смерчей на Европейской территории России.

3. Разработан метод определения регионального индекса для прогноза водяных смерчей немезоциклического происхождения, в основе которого лежит выбор образующих смерч предикторов и предикторов, характеризующих устойчивость сформировавшегося вихря, а также задание адаптированных для исследуемого региона пороговых значений данных предикторов. Получена формула расчета индекса смерчеопасности WRI для прибрежной акватории Черного моря.

4. Разработана автоматизированная методика оценки смерчеопасности вблизи Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым, предусматривающая комплексацию прогнозов смерчей по известным индексам смерчеобразования и по новому региональному индексу WRI для расчета зон риска их возникновения и формирования в автоматическом режиме предупреждений о смерчах, а также выявление в реальном времени по спутниковым (Meteosat-10/11) и радиолокационным данным (ДМРЛ-С) облаков, из которых могут возникнуть смерчи. Методика реализована в оперативной технологии расчета, готовой к испытаниям.

5. Проведено тестирование разработанной методики в непрерывном режиме счета с июля 2017 г. по октябрь 2018 г. Получены оценки качества прогноза смерчей по каждому из индексов, используемых в методике, а также эффективности ее работы в целом. Подтверждена эффективность разработанного регионального индекса смерчеопасности WRI (критерий Пирси-Обухова – 0.608, критерий Багрова – 0.441 для прибрежной акватории Краснодарского края на выходных данных модели COSMO-Ru2 при заблаговременности счета 24 ч) и преимущество его использования перед другими известными индексами. Отмечены преимущества разработанной методики по заблаговременности предупреждений о смерчах и их предупрежденности в сравнении с предупреждениями, выпущенными синоптиками в 2017-2018 гг.

Список сокращений

АРМ	– автоматизированное рабочее место
ВММ	– высотная метеорологическая мачта
ВСВ	– всемирное скоординированное время
ГПС	– грозопеленгационная сеть
ДМРЛ	– доплеровский метеорологический радиолокатор
ЗАК	– зона активной конвекции
КК	– Краснодарский край
М	– предупреждение о возможном формировании мезоциклонных смерчей
МС	– мезоциклонный смерч
Н	– предупреждение о возможном формировании немезоциклонных смерчей
НИЦ	– научно-исследовательский центр
НМС	– немезоциклонный смерч
НПО	– научно-производственное объединение
ОМЯ	– опасные метеорологические явления
ОН	– общая неустойчивость
ОС	– операционная система
ПО	– программное обеспечение
РК	– Республика Крым
СМИ	– средства массовой информации
СУБД	– система управления базами данных
УГМС	– Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
ШП	– штормовое предупреждение
BT	– Brightness Temperature
BURF	– Binary Universal Form for the Representation of meteorological data
COSMO	– The Consortium for Small-scale Modeling
ESWD	– European Severe Weather Database
FTP	– File Transfer Protocol
GFS	– Global Forecast System
GRIB	– GRIdded Binary or General Regularly-distributed Information in Binary form
HTTP	– HyperText Transfer Protocol
HRIT	– High Rate Information Transmission
IR	– Infrared Channel
JSON	– JavaScript Object Notation

MDA	– Mesocyclone Detection Algorithm
MSG	– Meteosat Second Generation
NCEP	– National Centers for Environmental Prediction
NSSL	– National Severe Storms Laboratory
RDT	– Rapid Development Thunderstorms
SAFNWC	– Satellite Application Facility on Support to Nowcasting and Very Short Range Forecasting
SST	– Sea Surface Temperature
TDA	– Tornado Detection Algorithm
TORRO	– Tornado and Storm Research Organization
TRT	– Thunderstorm Radar Tracking
VIS	– Visible Channel
WPS	– WRF Preprocessing System
WRF	– The Weather Research and Forecasting Model
WV	– Water Vapor Channel

Список литературы

1. Аджиев, А.Х. Система грозопеленгации на Северном Кавказе / А.Х. Аджиев, В.Н. Стасенко, В.О. Тапасханов // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 1. – С. 5 – 11.
2. Алексеева, А.А. Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристики ливневых осадков и града по радиолокационной информации / А.А. Алексеева, Б.Е. Песков // Труды Гидрометцентра России. – 2016. – Вып. 360. – С. 135 – 148.
3. Алексеева А.А. Распознавание конвективных стихийных явлений погоды на основе цифровой информации с ИСЗ с целью их сверхкраткосрочного прогноза / А.А. Алексеева // Труды Гидрометцентра России. – 2000. – Вып. 335. – С. 59 – 73.
4. Алексеенко, С.В. Введение в теорию концентрированных вихрей / С.В. Алексеенко, П.А. Куйбин, В.Л. Окулов. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003. – 503 с.
5. Андрушченко, В.А. Интенсивные атмосферные вихри: Проблема оценки и управления рисками. Методы предотвращения / В.А. Андрушченко, И.В. Мурашкин, Ю.Д. Шевелев. – М: Ленанд, 2017. – 304 с.
6. Асмус, В.В. Развитие космического комплекса гидрометеорологического обеспечения на базе геостационарных спутников серии «Электро-Л» / В.В. Асмус, В.Н. Дядюченко, В.А. Загребаев, О.Е. Милехин, В.И. Соловьев, А.Б. Успенский // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». – 2012. – В. 12. – С. 3 – 14.
7. Атмосфера. Справочник: под редакцией Ю.С. Седунова. – Л: Гидрометеоиздат, 1991. – 510 с.
8. Бендат, Д. Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ. / Д. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
9. Богаткин, О.Г. Авиационные прогнозы погоды. – 2-е изд., стереотипное / О.Г. Богаткин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 288 с.
10. Будилина, Е.Н. Смерчи и шквалы умеренных широт / Е.Н. Будилина, Л.З. Прох, А.И. Снитковский. – Л.: Гидрометиздат, 1976. – 32 с.
11. Бундель, А.Ю. Оценка среднесрочных прогнозов количества осадков по данным ансамблевого интегрирования при помощи спектральной модели Гидрометцентра России / А.Ю. Бундель // Труды Гидрометцентра России. – 2008. – Вып. 342. – С. 134 – 143.
12. Быков, А.В. Моделирование и прогноз опасных метеорологических явлений конвективного происхождения на Урале: дис. ... канд. геог. наук. – Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, 2018. – 151 с.

13. Вараксин, А.Ю. Торнадо / А.Ю. Вараксин, М.Э. Ромаш, В.Н. Копейцев. – М.: Физматлит, 2011. – 344 с.
14. Васильев, А.А. Смерчи 9 июня 1984 г. / А.А. Васильев, Б.Е. Песков, А.И. Снитковский. – Л.: Гидрометиздат, 1985. – 40 с.
15. Вильфанд, Р.М. Система COSMO-RU негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития / Р.М. Вильфанд, Г.С. Ривин, И.А. Розинкина // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 8. – С. 6 – 20.
16. Временные методические указания по использованию грозопеленгационных данных в синоптической практике Росгидромета: утв. заместителем руководителя Росгидромета 05.10.2015 г. // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – Санкт-Петербург, 2015. – 45 с.
17. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике: вторая редакция // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – Москва, 2017. – 121 с.
18. Глушкова, Н.И. Исследование условий, благоприятных для развития разрушительного смерча с сильными ливнями / Н.И. Глушкова, А.А. Алексеева // Труды Гидрометцентра СССР. – 1989. – Вып. 299. – С. 25 – 31.
19. Дмитриева, Т.Г. Синоптические условия, научастинг и модельные прогнозы сильных шквалов и смерчей в Башкирии 1 июня 2007 г. и 29 августа 2014 г. / Т.Г. Дмитриева, Б.Е. Песков // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 10. – С. 16 – 29.
20. Интенсивные атмосферные вихри и их динамика / Под ред. И.И. Мохова, М.В. Курганского, О.Г. Чхетиани. – М.: ГЕОС, 2018. – 482 с.
21. Калмыкова, О.В. Индекс смерчеопасности российской акватории Черного моря / О.В. Калмыкова, В.М. Шершаков // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. – 2017. – Вып. 284. – С. 142 – 163.
22. Калмыкова, О.В. Исследование и разработка системы прогнозирования смерчеопасных ситуаций акватории Черного моря России / О.В. Калмыкова // Труды XIX Международного Форума по проблемам науки техники и образования: под редакцией В.В. Вишневского. – М.: Академия наук о Земле, 2015. – С. 108 – 110.
23. Калмыкова, О.В. Методика оценки и прогноза смерчеопасности на российской акватории Черного моря [Электронный ресурс] / О.В. Калмыкова // Пятнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса». Институт космических исследований РАН. Москва, 13

- 17 ноября 2017 г.: тезисы докладов. – Москва, 2017. – Режим доступа: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6045 (дата обращения 19.08.2019).
24. Калмыкова, О.В. Общие характеристики смерчей российской акватории Черного моря за период с 2014 по 2015 гг. / О.В. Калмыкова, В.М. Шершаков // Труды ГГО им. А.И. Войкова. – 2016. – Вып. 281. – С. 165 – 175.
 25. Калмыкова, О.В. Прогноз смерчей на российской акватории Черного моря / О.В. Калмыкова // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Международная конференция, посвященная столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова. Москва. 16-18 мая 2018 г. Сборник тезисов докладов. – М.: Физматкнига, 2018. – С. 78.
 26. Калмыкова, О.В. Программный комплекс обработки и представления данных для поддержки принятия решений о выдаче предупреждений о возможном формировании смерчей над Черным морем / О.В. Калмыкова // Тезисы докладов второй научно-практической конференции «Современные информационные технологии в гидрометеорологии и смежных с ней областях» 21 – 23 ноября 2017 г. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2017. – С. 116 – 117.
 27. Калмыкова, О.В. Технология мониторинга смерчеопасных ситуаций на российской акватории Черного моря / О.В. Калмыкова, В.М. Шершаков // Метеорология и Гидрология. – 2016. – № 10. – С. 93 – 102.
 28. Калмыкова, О.В. 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 // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2018. – № 1 (367). – С. 146 – 167.
 29. Калмыкова, О.В. Характеристики смерчевых облаков над Черным морем по спутниковым данным за период 2014-2016 гг. / О.В. Калмыкова // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления»). Ростов-на-Дону. 13-23 июня 2019 г. Материалы международной научной конференции. – Ростов-на-Дону: Издательство ЮНЦ РАН, 2019. С. 58 – 61.
 30. Курганский, М.В. Смерч под Ханты-Мансийском: пока исключение или уже симптом? / М.В. Курганский, А.В. Чернокульский, И.И. Мохов // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 8. – С. 40 – 50.
 31. Кушин, В.В. Смерч / В.В. Кушин. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 128 с.

32. Лапчева, В.Ф. Условия развития зон активной конвекции со смерчами и сильными шквалами / В.Ф. Лапчева // Труды Гидрометцентра СССР. – 1989. – Вып. 299. – С. 32 – 50.
33. Мазуров, Г.И. Анализ характеристик смерчей в России за полтора столетия / Г.И. Мазуров, В.А. Васильев, В.И. Акселевич // Метеоспектр. – 2011. – № 4. – С. 149 – 155.
34. Метеостанции [Электронный ресурс] // ФГБУ «Крымское УГМС». – Режим доступа: http://meteo.crimea.ru/?page_id=99 (дата обращения 19.08.2019).
35. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. Руководящий документ РД 52.27.284-91: утв. Комитетом гидрометеорологии при Кабинете Министров СССР 25 января 1991 г.
36. Наливкин, Д.В. Смерчи / Д.В. Наливкин. – М.: Наука, 1984. – 112 с.
37. Наливкин, Д.В. Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность / Д.В. Наливкин. – Л.: Наука, 1969. – 487 с.
38. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. Руководящий документ РД 52.27.724-2009. – Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. – 62 с.
39. Новицкий, М.А. Башкирский смерч: возможности анализа и прогноза смерчеопасной ситуации / М.А. Новицкий, Ю.Б. Павлюков, Б.Я. Шмерлин, С.В. Махнорылова, Н.И. Серебрянник, С.А. Петриченко, Л.А. Тереб, О.В. Калмыкова // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 10. – С. 32 – 42.
40. Новицкий, М.А. Использование конвективных индексов, а также метеорологических данных от различных источников для анализа смерчеопасной ситуации в Обнинске 23 мая 2013 года / М.А. Новицкий, Б.Я. Шмерлин, С.А. Петриченко, Л.А. Тереб, Л.К. Кулижникова, О.В. Калмыкова // Метеорология и Гидрология. – 2015. – №2. – С. 13 – 20.
41. Новицкий, М.А. О совместном расчете полей вертикальной скорости и конвективных индексов в модели WRF для анализа и прогноза смерчеопасных ситуаций / М.А. Новицкий, Б.Я. Шмерлин, С.А. Петриченко, Л.А. Тереб, О.В. Калмыкова // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 9. – С. 14 – 25.
42. О внедрении на радиолокационной сети Росгидромета «Основных технических требований к системе обнаружения опасных атмосферных явлений и штормового оповещения на базе метеорологических радиолокаторов»: приказ Росгидромета от 21 июня 2004 г. N 95.
43. О работе аэрологической сети РФ в 2017 году. Программа и качество наблюдений // Центральная аэрологическая обсерватория. – Долгопрудный, 2018. – 28 с.

44. Об итогах работы сети ДМРЛ Росгидромета в 2017 году. Методическое письмо: утв. и.о. директора ФГБУ «ЦАО» // Центральная аэрологическая обсерватория. – Долгопрудный, 2018. – 117 с.
45. Об утверждении Перечней стационарных пунктов наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС», а также его филиалов (по состоянию на 1 января 2017 года): приказ Департамента Росгидромета по ЮФО и СКФО от 02.02.2017 № 12 – Приложение № 9: Перечень стационарных пунктов наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением Краснодарского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиала ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС».
46. Общесистемные решения по сбору, анализу, контролю и предоставлению радиолокационной информации от ДМРЛ-С. Технический проект: утв. заместителем руководителя Росгидромета 31.01.2014 г. // Центральная аэрологическая обсерватория. – Долгопрудный, 2013. – 64 с.
47. Остапцова, Н.Г. О проблемах прогнозирования опасных явлений в Северо-Кавказском УГМС [Электронный ресурс] / Н.Г. Остапцова // Совещание-семинар по вопросу прогнозирования опасных гидрометеорологических явлений и оценке прогнозов погоды общего назначения. Гидрометцентр России. Москва, 21 – 22 декабря 2005 г.: тезисы докладов. – Москва, 2005 г. – Режим доступа: <http://method.meteorf.ru/event/dec05/doklad2/doklad2.html> (дата обращения 19.08.2019).
48. Переходцева, Э.В. Гидродинамико-статистический прогноз и экспертная система прогноза смерчей на Европейской территории России / Э.В. Переходцева, Л.В. Золин // Труды Гидрометцентра России. – 2008. – Вып. 342. – С. 45 – 54.
49. Переходцева, Э.В. Модель вероятностного комплексного прогноза смерчей и сильных шквалов для Европейской территории России [Электронный ресурс] / Э.В. Переходцева // Пятнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса». Институт космических исследований РАН. Москва, 13 – 17 ноября 2017 г.: тезисы докладов. – Москва, 2017. – Режим доступа: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6456 (дата обращения 19.08.2019).
50. Переходцева, Э.В. Статистические модели распознавания и прогнозирования метеоусловий, приводящих к возникновению сильных шквалов, смерчей и сильных летних осадков на Европейской территории России / Э.В. Переходцева // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий: сборник трудов VII Международной конференции. – Воронеж, 2014. – С. 277 – 280.

51. Попов, Н.И. Смерчи на побережье Черного моря / Н.И. Попов // Метеорология и гидрология. – 1955. – № 5. – С. 35 – 37.
52. Природные опасности России: монография в 6 т. / Под общ. ред. В. И. Осипова, С. К. Шойгу; РАН и др. – М.: КРУК, 2000. – Т. 5: Гидрометеорологические опасности / Под ред. Г.С. Голицына, А.А. Васильева. – 2001. – 295 с.
53. Прох, Л.З. Смерчи и шквалы / Л.З. Прох. – М.: Знание, 1981. – 48 с.
54. Рекомендации по оценке характеристик смерча для объектов использования атомной энергии. Руководства по безопасности РБ-022-01: утв. постановлением Госатомнадзора России от 28 декабря 2001 г. N 17 // Вестник Госатомнадзора России. – 2002. – № 1. – С. 59 – 90.
55. Ривин, Г.С. Мезомасштабная модель COSMO-Ru2 и результаты ее оперативных испытаний / Г.С. Ривин, И.А. Розинкина, А.Н. Багров, Д.В. Блинов, А.А. Кирсанов, Е.В. Кузьмина, М.В. Шатунова, М.М. Чумаков, Д.Ю. Алферов, А.Ю. Бундель, М.Ю. Зайченко, М.А. Никитин // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2017. – № 44. – С. 25 – 55.
56. Ривин, Г.С. Система COSMO-RU негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития / Г.С. Ривин, И.А. Розинкина, Р.М. Вильфанд, Д.Ю. Алферов, Е.Д. Астахова, Д.В. Блинов, А.Ю. Бундель, Е.В. Казакова, А.А. Кирсанов, М.А. Никитин, В.Л. Перов, Г.В. Суркова, А.П. Ревокатова, М.В. Шатунова, М.М. Чумаков // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 6. – С. 58 – 70.
57. Снегуров, А.В. Грозопеленгационные системы Росгидромета на Европейской территории России / А.В. Снегуров, В.С. Снегуров, В.Н. Стасенко, А.Х. Аджиев, В.О. Тапасханов // Тезисы докладов VII всероссийского метеорологического съезда. – Санкт-Петербург, 2014. – С. 39 – 40.
58. Снитковский, А.И. Смерчи на территории СССР / А.И. Снитковский // Метеорология и гидрология. – 1987. – № 9. – С. 12 – 25.
59. Хандожко, Л.А. Оценка успешности метеорологических прогнозов / Л.А. Хандожко. – Л.: Ленинградский политехнический институт, 1977. – 68 с.
60. Хромов, С.П. Метеорологический словарь / С.П. Хромов, Л.И. Мамонтов. – Л: Гидрометеоиздат, 1974. – 569 с.
61. Хромов, С.П. Метеорология и климатология: Учебник / С.П. Хромов, М.А. Петросянц. – 8-е издание. – М.: Издательство Московского университета, 2013. – 584 с.

62. Чернокульский, А.В. Анализ условий смерчегенеза в Северной Евразии с использованием простого индекса конвективной неустойчивости атмосферы / А.В. Чернокульский, М.В. Курганский, И.И. Мохов // Доклады Академии наук. – 2017. – Том 477. – № 6. – с. 722 – 727.
63. Чернокульский, А.В. Смерчи в Северной Евразии: современная климатология и риски формирования в контексте глобального потепления / А.В. Чернокульский, М.В. Курганский, И.И. Мохов, А.Н. Шихов // Турбулентность, динамика атмосферы и климата: сборник трудов / под ред. Г.С. Голицына, И.И. Мохова, С.Н. Куличкова, М.В. Курганского, И.А. Репиной, О.Г. Чхетиани. – М.: Физматкнига, 2018. – С. 281 – 290.
64. Чернокульский, А.В. Современная климатология воздушных и водных смерчей в регионах Северной Евразии [Электронный ресурс] / А.В. Чернокульский, М.В. Курганский, А.Н. Шихов, Д.И. Захарченко, Е.В. Селезнёва // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: тезисы доклада. – Москва, 2016. – Режим доступа: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5732 (дата обращения 19.08.2019).
65. Чернокульский, А.В. Условия формирования и характеристики сильного смерча на Южном Урале 29 августа 2014 г. / А.В. Чернокульский, М.В. Курганский, Д.И. Захарченко, И.И. Мохов // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 12. – С. 29 – 37.
66. Ширяев, М.В. Прогноз категорий опасности метеорологических явлений / М.В. Ширяев, К.Г. Рубинштейн // Труды Гидрометцентра России. – 2012. – Вып. 347. – С. 128 – 140.
67. Шихов, А.Н. Анализ условий развития сильных смерчей в Прикамье / А.Н. Шихов, А.В. Быков // География и регион: материалы международной научно-практической конференции (23–25 сентября 2015 г.): в 6 т. / Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2015. – Т. IV. Гидрометеорология. Картография и геоинформатика. – С. 169 – 175.
68. Шихов, А.Н. База данных об опасных и неблагоприятных явлениях погоды в Пермском крае как региональный аналог ESWD / А.Н. Шихов, А.В. Быков // Географический вестник. – 2014. – № 4. – С. 102 – 109.
69. Шихов, А.Н. Идентификация мезомасштабных конвективных облачных систем со смерчами по спутниковым данным / А.Н. Шихов, А.В. Чернокульский, А.А. Спрыгин, И.О. Ажиgov // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – № 1. – С. 223 – 236.
70. Шихов, А.Н. Идентификация случаев возникновения смерчей в лесной зоне по многолетним рядам данных дистанционного зондирования Земли / А.Н. Шихов, А.В.

- Тарасов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13. – № 3. – С. 84 – 94.
71. Шихов, А.Н. Смерчи и шквалы на Урале в июне 2017 года: анализ по спутниковым данным / А.Н. Шихов, И.О. Ажигов, А.В. Быков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. – 2018. Т.15. – № 1. – С. 272 – 281.
72. Шмерлин, Б.Я. О новом подходе к прогнозированию смерчеопасных ситуаций и других конвективных явлений / Б.Я. Шмерлин, М.А. Новицкий, О.В. Калмыкова // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Международная конференция, посвященная столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова. Москва. 16-18 мая 2018 г. Сборник тезисов докладов. – М.: Физматкнига, 2018. – С. 98.
73. Шмерлин, Б.Я. О новом подходе к прогнозированию смерчеопасных ситуаций и других конвективных явлений / Б.Я. Шмерлин, М.А. Новицкий, О.В. Калмыкова // Турбулентность, динамика атмосферы и климата: сборник трудов / под ред. Г.С. Голицына, И.И. Мохова, С.Н. Куличкова, М.В. Курганского, И.А. Репиной, О.Г. Чхетиани. – М.: Физматкнига, 2018. – С. 301 – 309.
74. Шнюков, Е.Ф. Катастрофы в Черном море / Е.Ф. Шнюков, Л.И. Митин, В.П. Цемко. – Киев: Манускрипт, 1994. – 296 с.
75. Algorithm Theoretical Basis Document for Rapid Development Thunderstorms. SAF/NWC/CDOP2/MFT/SCI/ATBD/11, Issue 3, Rev. 0, 15 July 2013 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.nwcsaf.org/AemetWebContents/ScientificDocumentation/Documentation/MSG/SAF-NWC-CDOP2-MFT-SCI-ATBD-11_v3.0.pdf (дата обращения 19.08.2019).
76. Autones, F. Tuning the Rapid Developing Thunderstorm product for Meteosat Second Generation, and comparing to GOES-East and to Rapid Scan Service [Электронный ресурс] / F. Autones, S. Senesi, C. Morel // The World Weather Research Program Symposium on Nowcasting and Very Short Range Forecasting: abstracts of conference. – Toulouse (France), 2005. – Режим доступа: http://www.meteo.fr/cic/wsn05/resumes_longs/2.02-70.pdf (дата обращения 19.08.2019).
77. Allaby, M. Tornadoes / M. Allaby. – New York: Facts on File Inc., 2004. – P. 176.
78. Antonescu, B. Tornadoes in Europe: Synthesis of the Observational Datasets / B. Antonescu, D.M. Schultz, F. Lomas // Monthly Weather Review. – 2016. – Vol. 144. – P. 2445 – 2480.
79. Baumgardt D.A. Preliminary evaluation of a parameter to forecast environment conducive to non-mesocyclone tornadogenesis [Электронный ресурс] / D.A. Baumgardt, K. Cook // 23rd Conference on Severe Local Storms: abstracts of conference. – St. Louis (USA), 2006. –

Режим доступа: <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/115294.pdf> (дата обращения 19.08.2019).

80. Bluestein, H.B. Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics / H.B. Bluestein. – Berlin: Springer-Verlag, 2013. – P. 456.
81. Bolton, D. The computation of Equivalent Potential Temperature / D. Bolton // Monthly Weather Review. – 1980. – V. 108. – No. 7. – P. 1046 – 1053.
82. Brotzge, J.A. Tornado Probability of Detection and Lead Time as a Function of Convective Mode and Environmental Parameters / J.A. Brotzge, S.E. Nelson, R.L. Thompson, B.T. Smith // Weather and Forecasting. – 2013. – V. 28. – No. 5. – P. 1261 – 1276.
83. Brown, R.A. Improved Detection of Severe Storms Using Experimental Fine-Resolution WSR-88D Measurements / R.A. Brown, B.A. Flikinger, E. Forren, D.M. Schultz, D. Sirmans, P.L. Spencer, V.T. Wood, C.L. Ziegler // Weather and Forecasting. – 2005. – Vol. 20. – No. 1. – P. 3 – 14.
84. Caruso, J.M. Tornadoes in Nonmesocyclone Environments with Pre-existing Vertical Vorticity along Convergence Boundaries [Электронный ресурс] / J.M. Caruso, J.M. Davies // Electronic Journal of Operational Meteorology. – 2005. Vol. 6 (4). – Режим доступа: <http://nwafiles.nwas.org/ej/pdf/2005-EJ4.pdf> (дата обращения 19.08.2019).
85. Convective Season Environmental Parameters and Indices [Электронный ресурс] // National Oceanic and Atmospheric Administration. National Weather Service. – Режим доступа: <https://www.weather.gov/lmk/indices> (дата обращения 19.08.2019).
86. Core documentation of the COSMO-model [Электронный ресурс] // Consortium for Small-scale Modeling. – Режим доступа: <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm> (дата обращения 19.08.2019).
87. Davies-Jones, R. A review of supercell and tornado dynamics / R. Davies-Jones // Atmospheric Research. – 2015. – Vol. 158–159. – P. 274 – 291.
88. Davies-Jones, R. Tornadoes and Tornadic Storms / R. Davies-Jones, R.J. Trapp, H.B. Bluestein // Severe Convective Storms / C.A. Doswell. – Washington: American Meteorological Society, 2001. – P. 167 – 221.
89. Doswell, C.A. On use of Indices and Parameters in Forecasting Severe Storms / C.A. Doswell, D.M. Schultz // Electronic Journal of Severe Storms Meteorology. – 2006. – Vol. 1 – No. 3. – P. 1 – 14.
90. Doswell, C.A. Tornado Forecasting: A Review / C.A. Doswell, S.J. Weiss, R.H. Johns // The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards / C.R. Church, D. Burgess, C.A. Doswell, R. Davies-Jones. – Washington: American Geophysical Union, 2013. – P. 557 – 571.

91. Dotzek, N. Waterspouts over the North and Baltic Seas: Observations and climatology, prediction and reporting / N. Dotzek, S. Emeis, C. Lefebvre, J. Gerpott // Meteorologische Zeitschrift. – 2010. – Vol. 19. – No. 1. – P. 115 – 129.
92. Enhanced F Scale for Tornado Damage [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/ef-scale.html> (дата обращения 19.08.2019).
93. European Severe weather Database [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eswd.eu> (дата обращения 19.08.2019).
94. Forecast Verification methods Across Time and Space Scales [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cawcr.gov.au/projects/verification/> (дата обращения 19.08.2019).
95. Fujita Tornado Damage Scale [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/f-scale.html> (дата обращения 19.08.2019).
96. Golden, J.H. Scale-Interaction Implication for the Waterspout Life Cycle. II / J.H. Golden // Journal of Applied Meteorology. – 1974. – Vol. 13. – No. 6 – P. 693 – 709.
97. Golden, J.H. The life cycle of Florida Keys waterspouts. I / J.H. Golden // Journal of Applied Meteorology. – 1974. – Vol. 13. – No. 6 – P. 676 – 692.
98. Golden, J.H. Waterspouts / J.H. Golden // Encyclopedia of Atmospheric Sciences: Editor-in-Chief J.R. Holton, second edition, volume 3 – New York: Academic Press, 2015. – P. 369 – 383.
99. Goliger, A.M. A review of worldwide occurrence of tornadoes / A.M. Goliger, R.V. Milford // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1998. – Vol. 74-76. – P. 111 – 121.
100. Grazulis, T.P. The Tornado: Nature's ultimate windstorm / T.P. Grazulis. – Norman: University of Oklahoma Press, 2001. – P. 340.
101. Grieser, J. Convection Parameters [Электронный ресурс] / J. Grieser. – Режим доступа: <http://www.juergen-grieser.de/CovectiveParameters/ConvectionParameters.pdf> (дата обращения 19.08.2019).
102. Groenemeijer, P. A climatology of Tornadoes in Europe: Results from the European Severe Weather Database / P. Groenemeijer, T. Kuhne // American Meteorological Society. – 2014. – Vol. 142. – P. 4775 – 4790.
103. Haklander, A.J. Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands / A.J. Haklander, A.V. Delden // Atmospheric research. – 2003. – Vol. 67–68. – P. 273 – 299.
104. Hering, A.M. Fully automated thunderstorm warnings and operational nowcasting at MeteoSwiss [Электронный ресурс] / A.M. Hering, L. Nisi, G.D. Bruna, M. Gaia, D. Nerini, P. Ambrosetti, U. Hamann, S. Trefalt, U. Germann // 8th European Conference on Severe

- Storms: conference paper. – Wiener Neustadt (Austria), 2015. – Режим доступа: <http://meetingorganizer.copernicus.org/ECSS2015/ECSS2015-80.pdf> (дата обращения 19.08.2019).
105. Hering, A.M. Nowcasting Thunderstorms in Complex Cases Using Radar Data [Электронный ресурс] / A.M. Hering, S. Senesi, P. Ambrosetti, I. Bernard-Bouissieres // The World Weather Research Programme's symposium on nowcasting and very short range forecasting: abstracts of conference. – Toulouse (France), 2005. – Режим доступа: http://www.meteo.fr/cic/wsn05/resumes_long/2.14-73.pdf (дата обращения 19.08.2019).
 106. Infrasonic Detection of Tornadoes and Tornadic Storms [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.esrl.noaa.gov/psd/programs/infrasound/isnet/Infrasonic_Detection_of_Tornadoes.pdf (дата обращения 19.08.2019).
 107. InfraSonics Network [Электронный ресурс] // Earth System Research Laboratory. – Режим доступа: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/programs/infrasound/isnet/> (дата обращения 19.08.2019).
 108. Interface Control Document for the External and Internal Interfaces of the SAF NWC/MSG. SAF/NWC/CDOP2/INM/SW/ICD/1, Issue 7, Rev. 0, 15 July 2013 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nwcsaf.org/aemetRest/downloadAttachment/2619> (дата обращения 19.08.2019).
 109. Kalpana-1 [Электронный ресурс] // Department of Space Indian Space Research Organization. – Режим доступа: <http://www.isro.gov.in/Spacecraft/kalpana-1> (дата обращения 19.08.2019).
 110. Keul, A.G. Prognosis of Central-Eastern Mediterranean Waterspouts [Электронный ресурс] / A.G. Keul, M.V. Sioutas, W. Szilagyi // 4th European Conference on Severe Storms: preprints. – Trieste (Italy), 2007. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/222401229_Prognosis_of_Central-Eastern_Mediterranean_waterspouts (дата обращения 19.08.2019).
 111. Kilty, K.T. The Rankine combined vortex [Электронный ресурс] / K.T. Kilty. – Режим доступа: <http://www.kilty.com/pdfs/models.pdf> (дата обращения 19.08.2019).
 112. Kuiper, J. A New Index To Calculate Risk of Waterspout Development [Электронный ресурс] / J. Kuiper, M. Haven // 4th European Conference on Severe Storms: preprints. – Trieste (Italy), 2007. – Режим доступа: <https://www.essl.org/ECSS/2007/abs/06-Forecasts/1179250265.kuiper.pdf> (дата обращения 19.08.2019).
 113. Kunz, M. The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms / M. Kunz // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2007. – Vol. 7. – Is. 2. – P. 327 – 342.

114. Lakshmanan, V. A Neural Network for Detecting and Diagnosing Tornadic Circulations using the Mesocyclone Detection and Near Storm Environment Algorithms [Электронный ресурс] / V. Lakshmanan, G.J. Stumpf, A. Witt // 21th International Conference on Interactive Information Processing Systems for Meteorology, Oceanography, and Hydrology. – Washington: American Meteorological Society, 2005. – Режим доступа: <https://ams.confex.com/ams/pdffiles/82772.pdf> (дата обращения 19.08.2019).
115. Lemon, L.R. Severe Thunderstorm Evolution and Mesocyclone Structure as Related to Tornadogenesis / L.R. Lemon, C.A. Doswell // Monthly Weather Review. – 1979. – Vol. 107. – P. 1184 – 1197.
116. Markowski, P.M. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes / P.M. Markowski, Y.P. Richardson. – New Jersey: Wiley, 2010. – P. 407.
117. Markowski, P.M. Tornadogenesis: Our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research / P.M. Markowski, Y.P. Richardson // Atmospheric Research. – 2009. – Vol. 93. – P. 3 – 10.
118. Marzban, C. A Neural Network for Tornado Prediction Based on Doppler Radar-Derived Attributes / C. Marzban, G.J. Stumpf // Journal of Applied Meteorology. – 1996. – Vol. 35. – No. 5. – P. 617 – 626.
119. Matsangouras, I.T. Analysis of waterspout environmental conditions and of parent-storm behavior based on satellite data over the southern Aegean Sea of Greece / I.T. Matsangouras, P.T. Nastos, H.B. Bluestein, I. Pytharoulis, K. Papachristopoulou, M.M. Miglietta // International Journal of Climatology. – 2017. – Vol. 37. – No. 2. – P. 1022 – 1039.
120. Mitchell, E.D. The National Severe Storms Laboratory Tornado Detection Algorithm / E.D. Mitchell, S.V. Vasiloff, G.J. Stumpf, A. Witt, M.D. Eilts, J.T. Johnson, K.W. Thomas // Weather and Forecasting. – 1998. – Vol. 13. – No. 2 – P. 352 – 366.
121. NCEP Products Inventory [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/> (дата обращения 19.08.2019).
122. Nisi, L. Nowcasting severe convection in the Alpine region: the COALITION approach / L. Nisi, P. Ambrosetti, L. Clementi // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2014. – Vol. 140. – Is. 682. – P. 1684 – 1699.
123. Novitskii, M.A. Using the Indices of Convective Instability for Analyzing and Forecasting a Tornado-Risk Situations / M.A. Novitskii, B.Ya. Shmerlin, S.A. Petrichenko, L.A. Tereb, O.V. Kalmikova // Proceedings of International Conference «Fluxes and Structures in Fluids». Kaliningrad, June 23-26, 2015. – M.: MAKS Press, 2015. – P. 158 – 161.

124. Pielke, R.A. Atmospheric Vortices / R.A. Pielke, J.L. Eastman, L.D. Grasso, J.B. Knowles, M.E. Nicholls, R.L. Walko, X. Zeng // Fluid Vortices / S.I. Green. – Dordrecht: Springer, 1995. – P. 617 – 650.
125. Rasmussen, E.N. A Baseline Climatology of Sounding-Derived Supercell and Tornado Forecast Parameters / E.N Rasmussen, D.O. Blanchard // Weather and Forecasting. – 1998. – Vol. 13. – No. 4. – P. 1148 – 1164.
126. Rasmussen, E.N. Refined Supercell and Tornado Forecast Parameters / E.N. Rasmussen // Weather and Forecasting. – 2003. – Vol. 18 – P. 530 – 535.
127. Real-time, global, sea surface temperature (RTG_SST) analysis [Электронный ресурс] // National Centers for Environmental Prediction/Marine Modeling and Analysis Branch. – Режим доступа: ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/sst/rtg_high_res/ (дата обращения 19.08.2019).
128. Renko, T. An assessment of waterspout occurrence in the Eastern Adriatic basin in 2010: Synoptic and mesoscale environment and forecasting method / T. Renko, T. Kozari, M. Tudor // Atmospheric Research. – 2013. – V. 123. – P. 71 – 81.
129. SAF NWC/MSG Output Products Format Definition. SAF/NWC/CDOP2/INM/SW/ICD/3, Issue 7, Rev. 0, 15 July 2013 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nwcsaf.org/aemetRest/downloadAttachment/2623> (дата обращения 19.08.2019).
130. Satellite Application Facility on support to Nowcasting and Very Short-Range Forecasting [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nwcsaf.org> (дата обращения 19.08.2019).
131. Schmetz, J. An Introduction to Meteosat Second Generation (MSG) / J. Schmetz, P. Pili, S. Tjemkes, D. Just, J. Kerkmann, S. Rota, A. Ratier // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2002. – Vol. 83. – No. 7. – P. 977 – 992.
132. Shikhov, A.N. A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe / A.N. Shikhov, A.V. Chernokulsky // Remote Sensing of Environment. – 2018. – Vol. 204. – P. 553 – 567.
133. Simmons, K.M. Normalized tornado damage in the United States: 1950 – 2011 / K.M. Simmons, D. Sutter, R. Pielke // Environmental Hazards. – 2013. – Vol. 12. – No. 2. – P. 132 – 147.
134. Sioutas, M. The International Centre for Waterspout Research [Электронный ресурс] / M. Sioutas, W. Szilagy, A. Keul // 5th European Conference on Severe Storms: preprints. – Landshut (Germany), 2009. – Режим доступа: <https://www.essl.org/ECSS/2009/preprints/P10-02-sioutas.pdf> (дата обращения 19.08.2019).

135. Sioutas, M. Waterspout outbreaks over areas of Europe and North America: Environment and predictability / M. Sioutas, W. Szilagyi, A. Keul // Atmospheric Research. – 2013. – Vol. 123. – P. 167 – 179.
136. Smith, B.B. Waterspouts [Электронный ресурс] / B.B. Smith. – Режим доступа: <https://www.weather.gov/apx/waterspout> (дата обращения 19.08.2019).
137. Stumpf, G.J. The National Severe Storms Laboratory Mesocyclone Detection Algorithm for the WSR-88D / G.J. Stumpf, A. Witt, E.D. Mitchell, P.L. Spencer, J.T. Johnson, M.D. Eilts, K.W. Thomas, D.W. Burgess // Weather and Forecasting. – 1998. – Vol. 13. – No. 2 – P. 304 – 326.
138. SVR Parameters [Электронный ресурс] // NOAA's National Weather Service. – Режим доступа: http://www.weather.gov/media/lmk/soo/svr_parameters.pdf (дата обращения 19.08.2019).
139. Szilagyi, W. A waterspout forecasting technique [Электронный ресурс] / W. Szilagyi // 5th European Conference on Severe Storms: preprints. – Landshut (Germany), 2009. – Режим доступа: <https://www.essl.org/ECSS/2009/preprints/O05-14-sziladgyi.pdf> (дата обращения: 19.08.2019).
140. Szilagyi, W. Automation of the Waterspout Nomogram [Электронный ресурс] / W. Szilagyi, K.K. Chung // The 46th congress of the Canadian Meteorological and Oceanographic Society and American Meteorological Society conferences on weather analysis and numerical prediction: presentation. – Montreal (Canada), 2012. – Режим доступа: <http://pretemp.altervista.org/alterpages/files/ws3.pdf> (дата обращения 19.08.2019).
141. The Global Forecast System (GFS) – Global Spectral Model (GSM). Documentation [Электронный ресурс] // National Weather Service. Environmental Modeling Center. – Режим доступа: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/doc.php> (дата обращения 19.08.2019).
142. The International Tornado Intensity Scale [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.torro.org.uk/tscale.php> (дата обращения 19.08.2019).
143. Thompson, R.L. Evaluation and Interpretation of the Supercell Composite and Significant Tornado Parameters at the Storm Prediction Center [Электронный ресурс] / R.L. Thompson, R. Edwards, J.A. Hart. – Режим доступа: <http://www.spc.noaa.gov/publications/thompson/sigtor.pdf> (дата обращения 19.08.2019).
144. Thompson, R.L. Explanation of SPC Severe Weather Parameters [Электронный ресурс] / R.L. Thompson. – Режим доступа: <http://www.spc.noaa.gov/sfctest/help/sfcoa.html> (дата обращения 19.08.2019).
145. Thornton, M.A. A new Spin on Waterspout Forecasting [Электронный ресурс] / M.A. Thornton. – Режим доступа: <http://www.sailingscuttlebutt.com/2015/08/20/a-new-spin-on-waterspout-forecasting/> (дата обращения 19.08.2019).

146. Tudor, M. Waterspout forecasting indices over the Adriatic Sea computed from operational ALADIN model data [Электронный ресурс] / M. Tudor, T. Renko, T. Kozaric. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/284009498_Waterspout_forecasting_indices_over_the_Adriatic_Sea_computed_from_operational_ALADIN_model_data (дата обращения 19.08.2019).
147. U.S. Tornado Climatology [Электронный ресурс] // National Centers for Environmental Information. – Режим доступа: <https://www.ncdc.noaa.gov/climate-information/extreme-events/us-tornado-climatology> (дата обращения 19.08.2019).
148. Wakimoto, R.M. Non-supercell Tornado / R.M. Wakimoto, J.W. Wilson // Monthly Weather Review. – 1989. – Vol. 117. – No. 6. – P. 1113 – 1140.
149. Weisman, M.L. The dependence of Numerically Simulated Convective Storms on Vertical Wind Shear and Buoyancy / M.L. Weisman, J.B. Klemp // Monthly Weather Review. – 1982. – V. 110. – No. 6. – P. 504 – 520.
150. WRF-ARW Version 3 Modeling System User's Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf (дата обращения 19.08.2019).

*Приложение №1***Список смерчей, зарегистрированных у Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым в 2014-2018 гг.*****2014 г.***

Дата	Время (BCB)	Временная погрешность	Ближайший населенный пункт	Долгота	Широта	Пространственная погрешность	Категория достоверности случая
31.05.2014	06:45	5 мин	п. Бондаренково, Республика Крым (РК)	34.39°	44.60°	3 км	достоверный
10.06.2014	09:53	-	вод. Старотитаровский лиман, Краснодарский край (КК)	37.16°	45.28°	1 км	достоверный
11.06.2014	07:40	5 мин	с. Голубицкая, КК	37.28°	45.41°	3 км	вероятный
13.06.2014	14:00	15 мин	г. Сочи (Совет-Квадже), КК	39.17°	43.98°	3 км	вероятный
14.06.2014	09:45	5 мин	х. Бетта, КК	38.39°	44.36°	1 км	достоверный
14.06.2014	11:00	3 ч	п. Новомихайловский, КК	38.50°	44.10°	10 км	достоверный
22.06.2014	02:00	15 мин	г. Сочи (Морской порт), КК	39.65°	43.59°	3 км	вероятный
22.06.2014	12:30	5 мин	г. Новороссийск (Дюрсо), КК	37.50°	44.64°	3 км	вероятный
22.06.2014	13:30	5 мин	с. Широкая балка, КК	37.65°	44.64°	3 км	достоверный
07.07.2014	09:00	15 мин	п. Волна, КК	36.73°	45.09°	3 км	достоверный
07.07.2014	09:00	15 мин	с. Тамань, КК	36.71°	45.24°	1 км	достоверный
08.07.2014	05:45	15 мин	г. Сочи, КК	39.70°	43.60°	1 км	достоверный
08.07.2014	06:45	15 мин	г. Сочи, КК	39.71°	43.58°	1 км	достоверный
08.07.2014	09:00	15 мин	г. Туапсе, КК	38.89°	44.03°	3 км	достоверный
08.07.2014	09:00	15 мин	г. Сочи, КК	39.65°	43.56°	3 км	достоверный

Дата	Время (BCB)	Временная погрешность	Ближайший населенный пункт	Долгота	Широта	Пространственная погрешность	Категория достоверности случая
08.07.2014	09:40	15 мин	п. Тюменский, КК	38.94°	44.12°	3 км	достоверный
18.07.2014	06:15	1 ч	г. Сочи, КК	39.60°	43.60°	10 км	достоверный
18.07.2014	07:20	1 ч	г. Туапсе, КК	39.01°	44.11°	-	достоверный
19.07.2014	04:00	15 мин	г. Новороссийск, КК	37.85°	44.67°	1 км	достоверный
20.07.2014	06:07	5 мин	с. Тамань, КК	36.54°	45.22°	3 км	достоверный
21.07.2014	16:02	15 мин	г. Анапа, КК	37.32°	44.89°	-	достоверный
22.07.2014	10:00	30 мин	п. Пересыпь, КК	37.16°	45.40°	3 км	достоверный
22.08.2014	09:00	1 ч	п. Мирный, РК	32.79°	45.14°	3 км	достоверный
08.09.2014	-	-	г. Сочи, КК	39.24°	43.59°	-	возможный
09.09.2014	15:55	5 мин	с. Дивноморское, КК	38.01°	44.42°	3 км	достоверный
10.09.2014	05:50	-	г. Туапсе, КК	39.00°	44.08°	3 км	достоверный
11.09.2014	-	-	п. Криница, КК	38.30°	44.38°	-	возможный
12.09.2014	-	-	п. Большой Утриш, КК	37.30°	44.77°	-	возможный
19.09.2014	14:00	30 мин	г. Сочи, КК	39.65°	43.60°	3 км	достоверный
22.09.2014	07:30	15 мин	п. Агой, КК	38.98°	44.14°	1 км	достоверный
23.09.2014	06:30	30 мин	с. Оленевка, РК	32.46°	45.37°	3 км	достоверный
21.12.2014	09:55	5 мин	г. Сочи (Лазаревское), КК	39.29°	43.88°	3 км	достоверный

2015 г.

Дата	Время (BCB)	Временная погрешность	Ближайший населенный пункт	Долгота	Широта	Пространственная погрешность	Категория достоверности случая
03.04.2015	09:00	15 мин	с. Архипо-Осиповка, КК	38.52°	44.33°	-	достоверный
04.04.2015	15:20	-	г. Туапсе (мыс Кадош), КК	39.02°	44.10°	-	достоверный
20.04.2015	15:10	5 мин	п. Гизель-Дере, КК	39.11°	44.06°	-	достоверный
09.05.2015	12:00	15 мин	п. Джубга, КК	38.70°	44.27°	3 км	достоверный
17.06.2015	09:00	10 мин	с. Нижнезаморское (Казантипский залив), РК	36.09°	45.38°	-	достоверный
19.06.2015	11:40	10 мин	п. Гурфуз, РК	34.33°	44.54°	-	достоверный
25.06.2015	16:20	30 мин	г. Сочи, КК	39.60°	43.60°	3 км	достоверный
26.06.2015	06:25	5 мин	г. Сочи (Лазаревское), КК	39.25°	43.92°	3 км	достоверный
26.06.2015	09:11	5 мин	г. Сочи (Лазаревское), КК	39.20°	43.89°	3 км	достоверный
26.06.2015	12:53	5 мин	г. Сочи (Лазаревское), КК	39.10°	43.90°	3 км	достоверный
26.06.2015	13:40	-	г. Сочи (Лазаревское), КК	39.10°	43.91°	-	достоверный
26.06.2015	15:00	15 мин	г. Сочи (Лазаревское), КК	39.10°	43.73°	3 км	достоверный
26.06.2015	16:23	-	г. Сочи (Лоо), КК	39.42°	43.70°	3 км	достоверный
26.06.2015	16:35	-	г. Сочи (Лоо), КК	39.39°	43.66°	3 км	достоверный
26.06.2015	16:49	-	г. Сочи (Лоо), КК	39.45°	43.71°	3 км	достоверный
26.06.2015	17:00	15 мин	г. Сочи (Головинка), КК	39.43°	43.79°	-	достоверный
27.06.2015	11:30	30 мин	п. Гизель-Дере, КК	39.11°	44.06°	1 км	достоверный
28.06.2015	09:00	15 мин	п. Лермонтово, КК	38.70°	44.30°	1 км	достоверный
28.06.2015	09:30	10 мин	п. Новомихайловский, КК	38.77°	44.24°	1 км	достоверный

Дата	Время (BCB)	Временная погрешность	Ближайший населенный пункт	Долгота	Широта	Пространственная погрешность	Категория достоверности случая
28.06.2015	14:00	15 мин	п. Лермонтово, КК	38.71°	44.30°	1 км	достоверный
29.06.2015	07:00	15 мин	с. Широкая балка, КК	37.68°	44.65°	-	достоверный
15.07.2015	03:30	15 мин	с. Голубицкая, КК	37.33°	45.38°	3 км	достоверный
15.07.2015	05:45	15 мин	с. Голубицкая, КК	37.27°	45.34°	1 км	достоверный
15.07.2015	06:00	5 мин	г. Анапа, КК	37.13°	44.92°	3 км	достоверный
15.07.2015	06:30	5 мин	г. Анапа, КК	37.23°	44.91°	3 км	достоверный
15.07.2015	06:50	10 мин	г. Анапа, КК	37.24°	44.87°	-	достоверный
15.07.2015	12:00	30 мин	с. Небуг, КК	38.97°	44.16°	1 км	достоверный
15.07.2015	16:30	5 мин	г. Сочи (Лоо), КК	39.38°	43.66°	3 км	достоверный
16.07.2015	11:41	5 мин	п. Приморский, КК	36.93°	45.30°	1 км	достоверный
28.07.2015	13:00	15 мин	с. Небуг, КК	38.80°	44.17°	3 км	достоверный
28.07.2015	14:05	5 мин	с. Агой, КК	38.95°	44.14°	3 км	достоверный
28.07.2015	16:00	15 мин	г. Туапсе, КК	39.01°	44.09°	1 км	достоверный
18.08.2015	06:00	1 ч	п. Джубга (бухта Инал), КК	38.58°	44.32°	3 км	достоверный
18.08.2015	07:00	10 мин	п. Лермонтово, КК	38.65°	44.26°	3 км	достоверный
18.08.2015	10:45	15 мин	п. Веселовка, КК	36.95°	45.04°	3 км	достоверный
18.08.2015	10:52	5 мин	п. Веселовка, КК	36.79°	45.06°	3 км	достоверный
18.08.2015	11:30	15 мин	с. Кабардинка, КК	37.88°	44.65°	1 км	достоверный
19.08.2015	06:00	10 мин	с. Ольгинка, КК	38.80°	44.19°	3 км	достоверный
23.08.2015	05:00	30 мин	г. Сочи (Головинка), КК	39.25°	43.78°	3 км	достоверный
23.08.2015	05:00	10 мин	г. Сочи (Дагомыс), КК	39.60°	43.62°	3 км	достоверный

Дата	Время (BCB)	Временная погрешность	Ближайший населенный пункт	Долгота	Широта	Пространственная погрешность	Категория достоверности случая
23.08.2015	05:30	30 мин	г. Сочи, КК	39.50°	43.60°	3 км	достоверный
24.08.2015	12:30	15 мин	г. Сочи, КК	39.55°	43.63°	3 км	достоверный
24.08.2015	13:16	5 мин	г. Сочи (Адлер), КК	39.77°	43.44°	3 км	достоверный
02.10.2015	-	-	г. Геленджик, КК	38.03°	44.54°	-	возможный
02.10.2015	12:10	-	г. Сочи (Лазаревское), КК	39.30°	43.89°	-	достоверный
03.10.2015	09:21	-	г. Сочи (Лазаревское), КК	39.30°	43.89°	-	достоверный

2016 г.

Дата	Время (BCB)	Временная погрешность	Ближайший населенный пункт	Долгота	Широта	Пространственная погрешность	Категория достоверности случая
11.05.2016	11:38	5 мин	п. Новомихайловский, КК	38.79°	44.26°	3 км	достоверный
11.05.2016	11:48	5 мин	п. Лермонтово, КК	38.74°	44.28°	3 км	достоверный
24.05.2016	14:12	5 мин	х. Криница, КК	38.27°	44.40°	3 км	достоверный
04.06.2016	22:00	15 мин	г. Сочи, КК	39.62°	43.60°	3 км	вероятный
01.07.2016	-	-	г. Феодосия, РК	35.39°	45.03°	-	возможный
01.07.2016	-	-	г. Сочи (Адлер), КК	39.90°	43.44°	-	возможный
01.07.2016	-	-	г. Сочи (Лазаревское), КК	39.32°	43.90°	-	возможный
11.07.2016	08:45	30 мин	г. Сочи (Лоо), КК	39.59°	43.65°	3 км	достоверный
15.07.2016	-	-	г. Сочи (Лоо), КК	39.59°	43.65°	-	возможный
19.07.2016	11:00	3 ч	с. Ольгинка, КК	38.78°	44.23°	-	достоверный
21.07.2016	11:30	30 мин	с. Голубицкая, КК	37.39°	45.38°	3 км	достоверный

Дата	Время (BCB)	Временная погрешность	Ближайший населенный пункт	Долгота	Широта	Пространственная погрешность	Категория достоверности случая
24.07.2016	02:25	15 мин	г. Туапсе, КК	39.07°	44.08°	-	достоверный
12.08.2016	09:00	6 ч	г. Анапа, КК	37.29°	44.92°	3 км	достоверный
18.08.2016	11:36	-	с. Тамань, КК	36.71°	45.27°	3 км	достоверный
24.08.2016	05:00	1 ч	г. Новороссийск, КК	37.82°	44.64°	3 км	достоверный
27.08.2016	05:00	1 ч	г. Сочи, КК	39.67°	43.53°	3 км	достоверный
27.08.2016	05:00	1 ч	г. Сочи, КК	39.66°	43.56°	3 км	достоверный
27.08.2016	05:00	1 ч	г. Сочи, КК	39.67°	43.62°	1 км	достоверный
31.08.2016	08:00	30 мин	г. Сочи, КК	39.68°	43.54°	3 км	достоверный
31.08.2016	08:00	1 ч	г. Сочи, КК	39.72°	43.56°	1 км	достоверный
31.08.2016	14:40	30 мин	г. Сочи (Адлер), КК	39.89°	43.45°	1 км	достоверный
31.08.2016	16:11	5 мин	г. Сочи, КК	39.69°	43.63°	-	достоверный
04.09.2016	09:00	1 ч	г. Сочи, КК	39.64°	43.62°	3 км	достоверный
15.09.2016	09:00	1 ч	с. Ольгинка, КК	38.75°	44.15°	3 км	достоверный
15.09.2016	13:00	1 ч	г. Сочи, КК	39.58°	43.58°	3 км	вероятный
15.09.2016	14:00	1 ч	г. Сочи, КК	39.58°	43.61°	1 км	вероятный
15.09.2016	14:00	1 ч	г. Сочи (Лоо), КК	39.57°	43.67°	1 км	вероятный
18.09.2016	05:00	1 ч	п. Гизель-Дере, КК	39.09°	44.05°	3 км	вероятный
18.09.2016	05:00	1 ч	г. Туапсе, КК	39.03°	44.08°	1 км	вероятный
18.09.2016	05:00	1 ч	г. Туапсе (мыс Кадош), КК	39.00°	44.10°	1 км	вероятный
18.09.2016	05:00	1 ч	г. Туапсе (мыс Кадош), КК	38.99°	44.12°	1 км	вероятный
18.09.2016	09:00	6 ч	г. Новороссийск, КК	37.70°	44.50°	10 км	достоверный

Дата	Время (BCB)	Временная погрешность	Ближайший населенный пункт	Долгота	Широта	Пространственная погрешность	Категория достоверности случая
18.09.2016	11:00	1 ч	с. Тамань, КК	36.68°	45.25°	1 км	достоверный
19.09.2016	19:46	-	г. Анапа, КК	36.90°	44.90°	-	достоверный
19.09.2016	19:46	-	г. Анапа, КК	36.70°	44.95°	-	достоверный
19.09.2016	19:46	-	г. Анапа, КК	36.60°	44.98°	-	достоверный
13.10.2016	12:00	3 ч	г. Севастополь, РК	33.48°	44.64°	1 км	вероятный
13.10.2016	12:00	3 ч	г. Севастополь, РК	33.46°	44.62°	1 км	вероятный
14.10.2016	-	-	г. Сочи, КК	39.50°	43.62°	-	возможный
03.12.2016	06:00	1 ч	г. Сочи, КК	39.69°	43.58°	3 км	достоверный

2017 г.

Дата	Время (BCB)	Временная погрешность	Ближайший населенный пункт	Долгота	Широта	Пространственная погрешность	Предупреждение от синоптиков	
							Доведено (BCB)	Заблаговременность
11.06.2017	07:00	1 ч	п. Горный Воздух, КК	38.59°	44.29°	3 км	-	-
15.06.2017	22:00	30 мин	г. Сочи, КК	39.71°	43.56°	1 км	-	-
16.06.2017	06:00	15 мин	п. Новомихайловский, КК	38.76°	44.20°	3 км	-	-
16.06.2017	15:00	1 ч	п. Джубга, КК	38.70°	44.31°	-	-	-
17.06.2017	05:15	15 мин	г. Судак, РК	34.98°	44.81°	-	-	-
17.06.2017	06:50	15 мин	с. Солнечная Долина, РК	35.17°	44.86°	3 км	-	-
17.06.2017	08:00	30 мин	п. Криница, КК	38.30°	44.38°	1 км	-	-
17.06.2017	09:20	15 мин	х. Бетта, КК	38.40°	44.36°	1 км	-	-

Дата	Время (BCB)	Временная погрешность	Ближайший населенный пункт	Долгота	Широта	Пространст- венная погрешность	Предупреждение от синоптиков	
							Доведено (BCB)	Заблаговре- менность
23.06.2017	10:25	1 ч	с. Ольгинка, КК	38.80°	44.10°	3 км	23.06.2017 08:16	2 ч 09 мин
23.06.2017	17:00	-	г. Туапсе, КК	39.02°	44.06°	-	23.06.2017 08:16	8 ч 44 мин
04.07.2017	16:36	-	г. Туапсе, КК	39.01°	44.06°	-	04.07.2017 07:10	9 ч 26 мин
05.07.2017	03:46	5 мин	г. Сочи (Адлер), КК	39.80°	43.43°	3 км	04.07.2017 07:10	20 ч 36 мин
08.07.2017	08:00	3 ч	г. Туапсе, КК	38.90°	44.12°	3 км	08.07.2017 07:20	40 мин
08.07.2017	09:40	-	г. Сочи, КК	39.71°	43.59°	-	08.07.2017 07:20	2 ч 20 мин
10.07.2017	04:00	1 ч	с. Голубицкая, КК	37.29°	45.38°	3 км	-	-
20.07.2017	10:20	-	г. Туапсе, КК	39.01°	44.06°	-	20.07.2017 06:45	3 ч 35 мин
23.07.2017	10:00	3 ч	г. Сочи, КК	39.60°	43.65°	1 км	-	-
29.07.2017	06:10	-	г. Туапсе, КК	38.97°	44.08°	-	29.07.2017 01:40	4 ч 30 мин
29.07.2017	09:20	-	г. Новороссийск, КК	37.86°	44.68°	-	29.07.2017 06:15	3 ч 05 мин
15.08.2017	12:00	30 мин	г. Сочи (Лазаревское), КК	39.12°	43.89°	-	15.08.2017 12:55	-
15.08.2017	13:20	-	г. Туапсе, КК	39.01°	44.06°	-	15.08.2017 12:55	25 мин
15.08.2017	14:30	-	г. Сочи (Хоста), КК	39.86°	43.51°	-	15.08.2017 12:55	1 ч 35 мин
16.08.2017	06:00	-	г. Сочи, КК	39.71°	43.06°	-	15.08.2017 12:55	17 ч 05 мин
17.08.2017	04:00	-	г. Туапсе, КК	39.03°	44.10°	-	17.08.2017 04:10	-
18.08.2017	13:00	-	с. Мысхако, КК	37.71°	44.56°	-	18.08.2017 12:00	1 ч
22.08.2017	04:20	-	г. Туапсе, КК	39.06°	44.10°	-	22.08.2017 04:45	-
22.08.2017	07:00	-	г. Сочи, КК	39.67°	43.55°	-	22.08.2017 06:35	25 мин
23.08.2017	05:34	-	п. Джубга, КК	38.64°	44.21°	-	22.08.2017 04:45	24 ч 49 мин

Дата	Время (BCB)	Временная погрешность	Ближайший населенный пункт	Долгота	Широта	Пространст- венная погрешность	Предупреждение от синоптиков	
							Доведено (BCB)	Заблаговре- менность
29.08.2017	12:00	3 ч	г. Сочи, КК	39.70°	43.49°	3 км	29.08.2017 09:10	2 ч 50 мин
29.08.2017	12:00	3 ч	г. Сочи, КК	39.67°	43.48°	3 км	29.08.2017 09:10	2 ч 50 мин
29.08.2017	12:00	3 ч	г. Сочи, КК	39.64°	43.45°	3 км	29.08.2017 09:10	2 ч 50 мин
29.08.2017	12:00	3 ч	г. Сочи (Адлер), КК	39.81°	43.44°	3 км	29.08.2017 09:10	2 ч 50 мин
29.08.2017	12:00	1 ч	г. Сочи (Адлер), КК	39.78°	43.47°	3 км	29.08.2017 09:10	2 ч 50 мин
29.08.2017	12:00	1 ч	г. Сочи (Адлер), КК	39.82°	43.46°	3 км	29.08.2017 09:10	2 ч 50 мин
31.08.2017	02:20	-	г. Туапсе, КК	39.03°	44.10°	-	30.08.2017 12:10	14 ч 10 мин
01.09.2017	05:20	-	г. Геленджик, КК	38.48°	44.30°	-	30.08.2017 12:10	41 ч 10 мин
06.09.2017	09:00	-	ст. Благовещенская, КК	37.13°	45.07°	-	06.09.2017 11:40	-
06.09.2017	13:30	-	г. Туапсе, КК	39.03°	44.10°	-	06.09.2017 11:40	1 ч 50 мин
07.09.2017	03:40	-	г. Сочи (Хоста), КК	39.86°	43.51°	-	06.09.2017 14:30	13 ч 10 мин
14.09.2017	07:00	-	п. Лермонтово, КК	38.72°	44.27°	3 км	-	-
23.09.2017	09:00	3 ч	с. Шепси, КК	39.12°	44.03°	1 км	-	-
23.09.2017	09:00	3 ч	с. Поповка, РК	33.01°	45.29°	3 км	-	-
27.09.2017	12:30	-	г. Сочи (Адлер), КК	39.56°	43.61°	10 км	27.09.2017 12:30	0 мин
27.09.2017	14:00	-	г. Сочи, КК	39.71°	43.58°	-	27.09.2017 12:30	1 ч 30 мин
01.10.2017	13:40	-	г. Сочи (Адлер), КК	39.72°	43.44°	3 км	-	-
02.10.2017	09:19	-	г. Сочи (Адлер), КК	39.65°	43.48°	3 км	-	-
14.10.2017	09:30	-	г. Сочи (Адлер), КК	39.85°	43.43°	3 км	-	-
22.10.2017	09:30	-	г. Анапа, КК	37.32°	44.95°	3 км	-	-

Дата	Время (BCB)	Временная погрешность	Ближайший населенный пункт	Долгота	Широта	Пространст- венная погрешность	Предупреждение от синоптиков	
							Доведено (BCB)	Заблаговре- менность
31.10.2017	09:00	-	г. Сочи, КК	39.71°	43.58°	-	31.10.2017 08:10	50 мин
02.11.2017	08:49	-	г. Туапсе, КК	39.05°	44.07°	1 км	02.11.2017 08:35	1 ч 25 мин
02.11.2017	10:00	-	г. Сочи, КК	39.71°	43.58°	-	02.11.2017 09:35	25 мин

2018 г.

Дата	Время (BCB)	Временная погрешность	Ближайший населенный пункт	Долгота	Широта	Пространст- венная погрешность	Предупреждение от синоптиков	
							Доведено (BCB)	Заблаговре- менность
22.04.2018	11:00	-	г. Сочи, КК	39.65°	43.55°	-	22.04.2018 10:55	5 мин
23.06.2018	13:00	1 ч	г. Анапа, КК	37.30°	44.89°	3 км	22.06.2018 11:00	26 ч
24.06.2018	03:30	-	г. Туапсе, КК	38.95°	44.03°	-	22.06.2018 11:00	40 ч 30 мин
25.06.2018	04:00	1 ч	г. Керчь, РК	36.56°	45.30°	3 км	-	-
30.06.2018	09:00	30 мин	г. Севастополь, РК	33.41°	44.62°	3 км	-	-
06.07.2018	09:00	30 мин	ст. Благовещенская, КК	37.09°	45.03°	3 км	-	-
15.07.2018	05:30	30 мин	с. Тамань, КК	36.68°	45.21°	3 км	13.07.2018 10:55	42 ч 35 мин
15.07.2018	11:30	-	г. Туапсе, КК	39.03°	44.10°	-	13.07.2018 10:55	48 ч 35 мин
16.07.2018	14:40	15 мин	г. Геленджик, КК	37.91°	44.55°	3 км	13.07.2018 10:55	75 ч 45 мин
16.07.2018	14:40	15 мин	г. Геленджик, КК	37.98°	44.53°	3 км	13.07.2018 10:55	75 ч 45 мин
17.07.2018	08:20	-	г. Сочи, КК	39.50°	43.73°	-	17.07.2018 13:10	-
17.07.2018	14:40	-	г. Сочи (Лазаревское), КК	39.71°	43.59°	-	17.07.2018 13:10	1 ч 30 мин

Дата	Время (BCB)	Временная погрешность	Ближайший населенный пункт	Долгота	Широта	Пространст- венная погрешность	Предупреждение от синоптиков	
							Доведено (BCB)	Заблаговре- менность
18.07.2018	-	-	с. Тамань, КК	36.72°	45.22°	-	16.07.2018 13:07	34 ч 53 мин
19.07.2018	13:25	-	х. Дюрсо, КК	37.56°	44.68°	-	18.07.2018 17:20	20 ч 05 мин
19.07.2018	16:00	-	г. Геленджик, КК	38.06°	44.55°	-	18.07.2018 17:20	22 ч 40 мин
20.07.2018	06:00	-	п. Большой Утриш, КК	37.38°	44.76°	-	20.07.2018 05:15	45 мин
20.07.2018	07:15	30 мин	с. Архипо-Осиповка, КК	38.56°	44.35°	1 км	20.07.2018 05:15	2 ч
25.07.2018	09:00	30 мин	г. Ялта, РК	34.22°	44.45°	3 км	-	-
25.07.2018	18:30	30 мин	г. Новороссийск, КК	37.80°	44.68°	1 км	25.07.2018 13:25	5 ч 05 мин
03.08.2018	11:00	-	г. Сочи (Дагомыс), КК	39.63°	43.63°	-	03.08.2018 08:20	2 ч 40 мин
03.08.2018	11:15	-	г. Туапсе, КК	38.94°	44.05°	-	01.08.2018 12:05	47 ч 10 мин
07.08.2018	-	-	п. Гаспра, РК	34.11°	44.43°	-	-	-
08.08.2018	06:00	-	г. Сочи, КК	39.62°	43.52°	-	07.08.2018 12:50	17 ч 10 мин
09.08.2018	04:00	-	г. Сочи, КК	39.70°	43.59°	-	07.08.2018 12:50	39 ч 10 мин
09.08.2018	11:00	30 мин	г. Севастополь, РК	33.78°	44.14°	-	-	-
11.08.2018	-	-	г. Новороссийск, КК	37.79°	44.73°	-	-	-
12.08.2018	-	-	с. Тамань, КК	36.72°	45.22°	-	-	-
12.08.2018	10:20	-	г. Сочи (Хоста), КК	39.79°	43.46°	-	12.08.2018 08:15	2 ч 05 мин
12.08.2018	14:30	30 мин	г. Сочи (Лазаревское), КК	39.33°	43.86°	3 км	12.08.2018 08:15	6 ч 15 мин
31.08.2018	16:00	-	г. Сочи (Хоста), КК	39.79°	43.46°	-	31.08.2018 06:00	10 ч
01.09.2018	-	-	г. Сочи (Лазаревское), КК	39.33°	43.90°	-	01.09.2018 05:30	-
06.09.2018	06:30	30 мин	г. Коктебель, РК	35.28°	44.93°	3 км	-	-

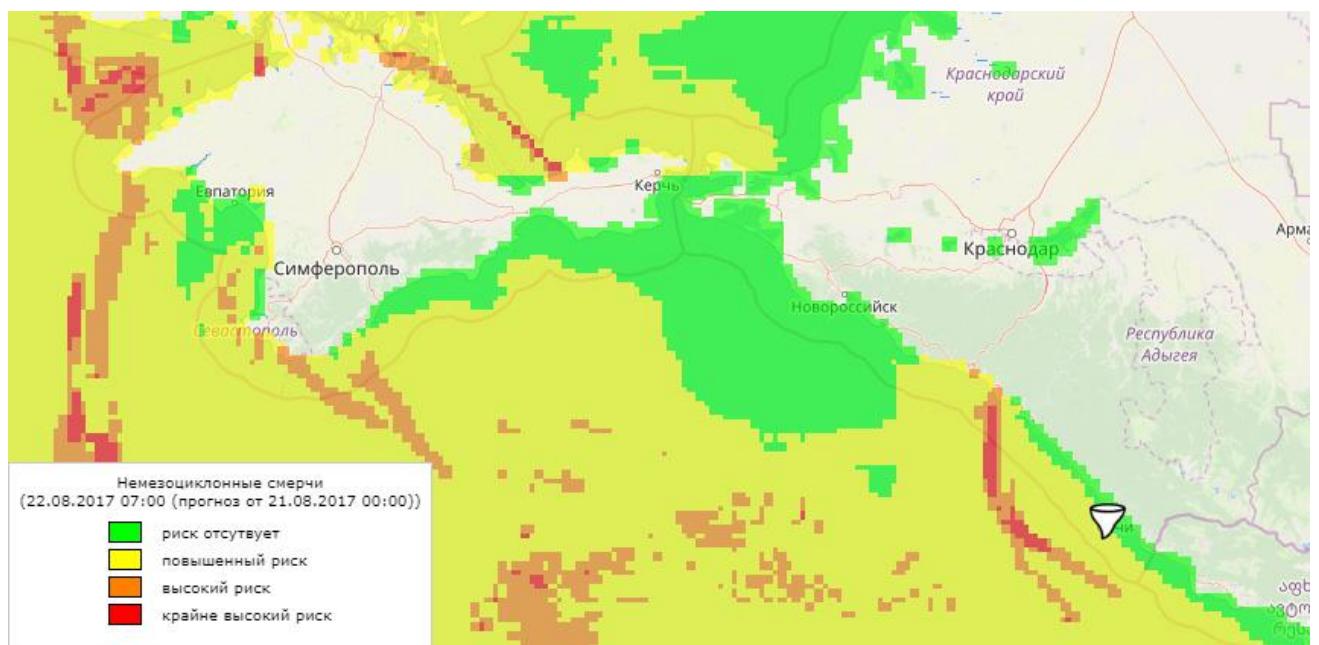
Дата	Время (ВСВ)	Временная погрешность	Ближайший населенный пункт	Долгота	Широта	Пространст- венная погрешность	Предупреждение от синоптиков	
							Доведено (ВСВ)	Заблаговре- менность
06.09.2018	17:00	15 мин	г. Феодосия, РК	35.42°	45.03°	1 км	-	-
06.09.2018	17:00	15 мин	г. Феодосия, РК	35.45°	45.05°	1 км	-	-
06.09.2018	19:15	-	г. Сочи, КК	39.71°	43.58°	-	-	-
07.09.2018	-	-	г. Судак, РК	34.97°	44.84°	-	-	-
07.09.2018	-	-	г. Алушта, РК	34.41°	44.67°	-	-	-
07.09.2018	03:40	-	г. Туапсе, КК	38.98°	44.07°	-	06.09.2018 06:20	21 ч 20 мин
07.09.2018	06:13	-	г. Сочи (Адлер), КК	39.90°	43.44°	-	06.09.2018 08:30	21 ч 43 мин
07.09.2018	08:03	-	г. Туапсе, КК	39.07°	44.09°	-	06.09.2018 06:20	25 ч 43 мин
07.09.2018	11:00	-	п. Нижнее Джемете, КК	37.29°	44.96°	-	06.09.2018 06:20	28 ч 40 мин
07.09.2018	11:45	30 мин	п. Джубга, КК	38.70°	44.28°	3 км	06.09.2018 06:20	29 ч 25 мин
08.09.2018	-	-	г. Анапа, КК	37.31°	44.90°	-	06.09.2018 06:20	41 ч 40 мин
08.09.2018	13:00	1 ч	г. Туапсе, КК	39.03°	44.10°	3 км	06.09.2018 06:20	54 ч 40 мин
11.09.2018	06:09	-	г. Туапсе, КК	39.03°	44.05°	-	11.09.2018 05:08	1 ч 01 мин
11.09.2018	06:22	-	г. Сочи (Адлер), КК	39.79°	43.40°	-	11.09.2018 06:20	02 мин
11.09.2018	06:36	-	г. Туапсе, КК	39.06°	44.07°	-	11.09.2018 05:08	1 ч 28 мин
11.09.2018	07:30	30 мин	г. Сочи, КК	39.66°	43.60°	3 км	11.09.2018 06:20	1 ч 10 мин
11.09.2018	08:25	30 мин	г. Сочи (Лазаревское), КК	39.27°	43.91°	3 км	11.09.2018 06:20	2 ч 05 мин
15.09.2018	07:33	-	с. Небуг, КК	39.00°	44.16°	-	14.09.2018 04:58	26 ч 35 мин
15.09.2018	08:01	-	г. Туапсе, КК	39.04°	44.08°	-	14.09.2018 04:58	27 ч 03 мин
16.09.2018	-	-	с. Ольгинка, КК	38.88°	44.19°	-	14.09.2018 04:58	43 ч 02 мин

Дата	Время (BCB)	Временная погрешность	Ближайший населенный пункт	Долгота	Широта	Пространст- венная погрешность	Предупреждение от синоптиков	
							Доведено (BCB)	Заблаговре- менность
16.09.2018	03:16	-	г. Сочи, КК	39.68°	43.54°	-	14.09.2018 06:15	45 ч 01 мин
16.09.2018	13:30	-	г. Туапсе, КК	39.00°	44.08°	-	14.09.2018 04:58	56 ч 32 мин
17.09.2018	-	-	г. Сочи (Лоо), КК	39.58°	43.70°	-	16.09.2018 07:45	16 ч 15 мин
24.09.2018	06:18	-	г. Сочи (Адлер), КК	39.89°	43.43°	-	24.09.2018 05:30	48 мин
03.10.2018	06:50	-	г. Сочи (Дагомыс), КК	39.60°	43.61°	-	02.10.2018 08:40	22 ч 10 мин
03.10.2018	11:56	-	г. Туапсе, КК	38.98°	44.07°	-	02.10.2018 06:05	29 ч 51 мин
04.10.2018	06:00	-	г. Сочи (Хоста), КК	39.77°	43.47°	-	02.10.2018 08:40	45 ч 20 мин
23.10.2018	08:10	-	г. Сочи (Дагомыс), КК	39.57°	43.60°	-	23.10.2018 02:45	5 ч 25 мин
24.10.2018	05:00	-	г. Сочи (Хоста), КК	39.77°	43.46°	-	23.10.2018 09:30	19 ч 30 мин

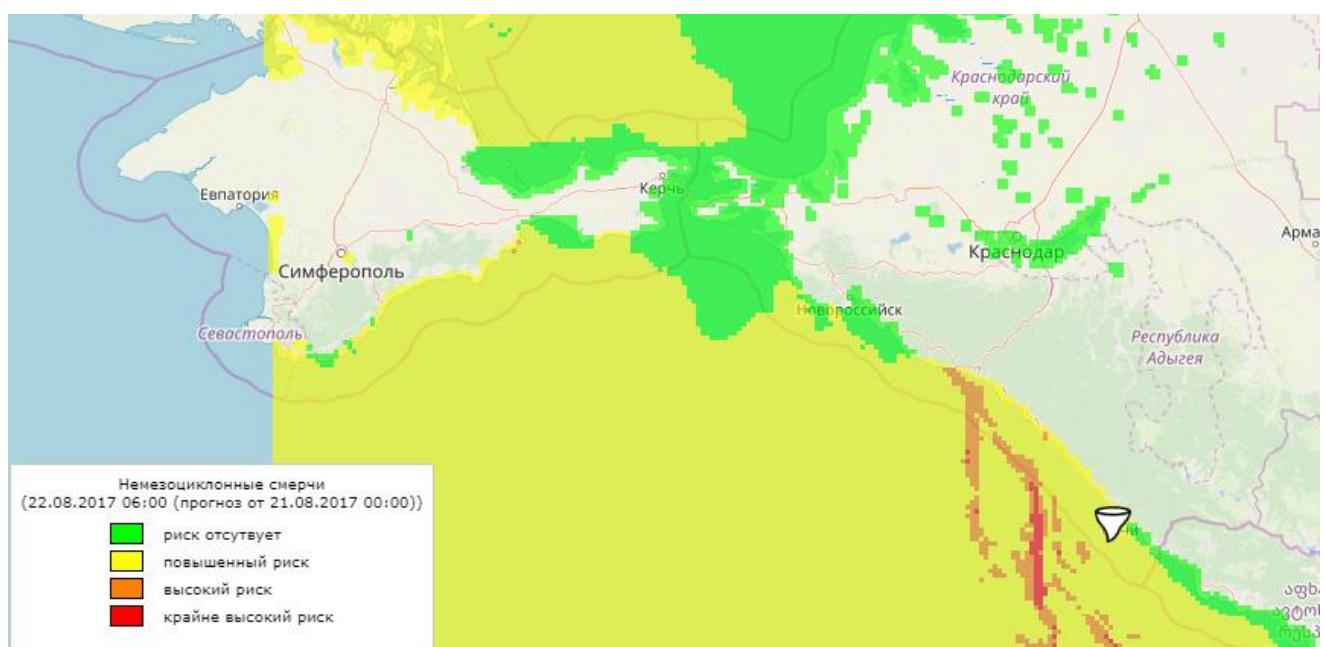
Зоны риска смерчей

Смерч 22 августа 2017 г. 07:00 ВСВ вблизи г. Сочи, КК

Модель WRF



Модель COSMO-Ru2

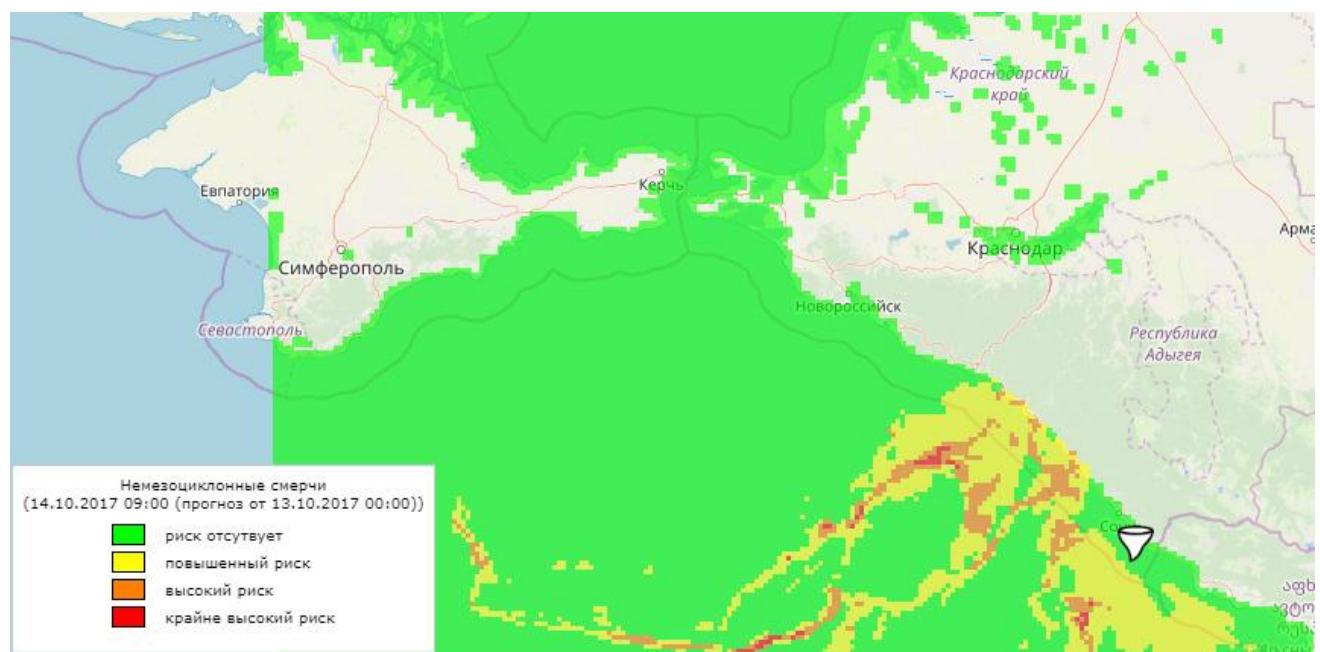


Смерч 14 октября 2017 г. 09:30 ВСВ вблизи г. Сочи (Адлер), КК

Модель WRF

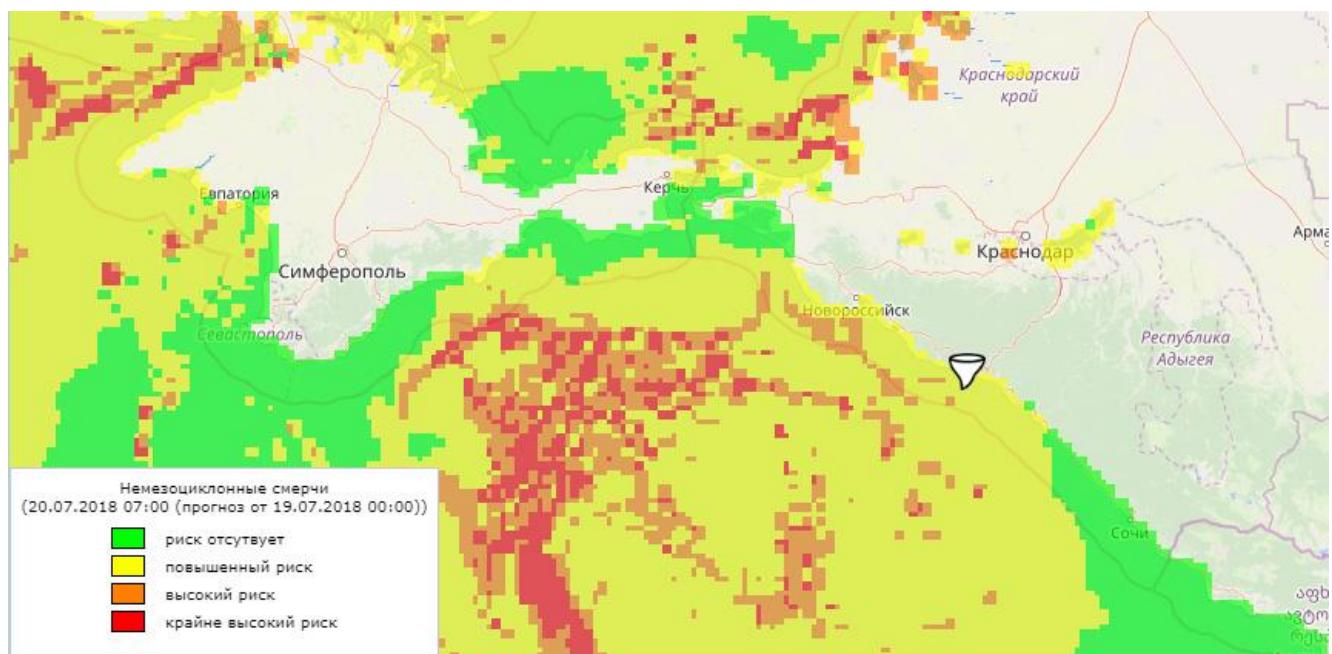


Модель COSMO-Ru2

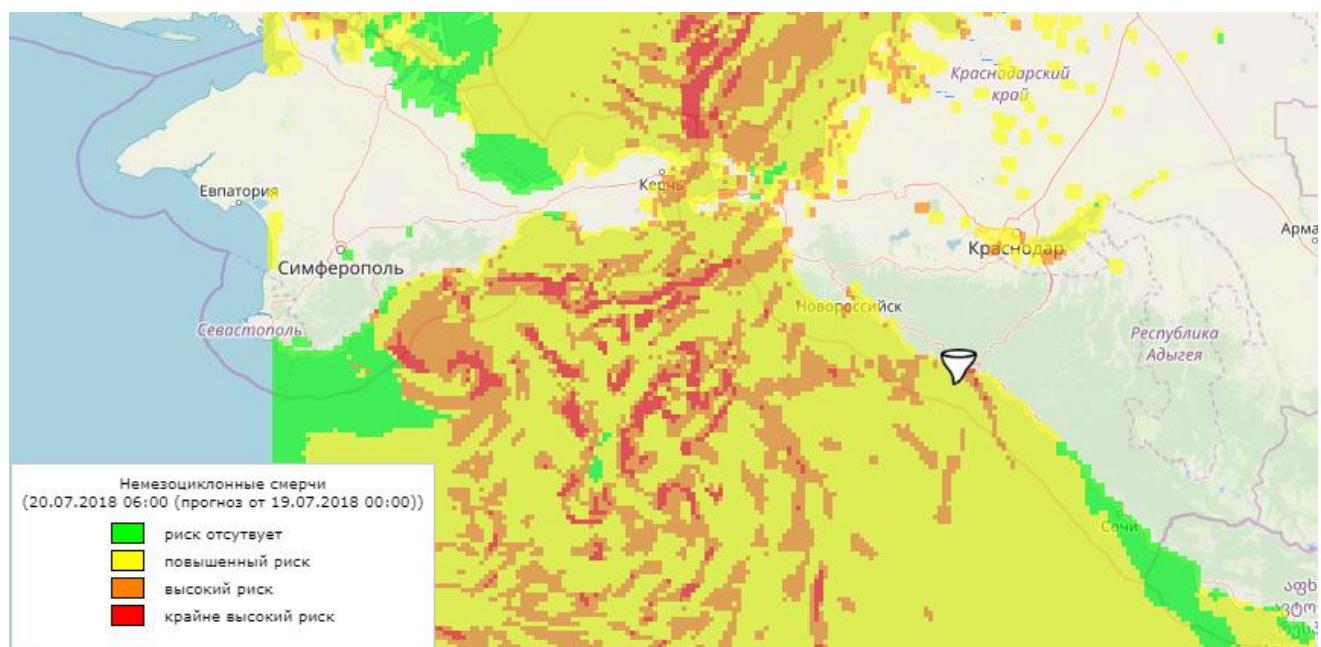


Смерч 20 июля 2018 г. 07:15 ВСВ вблизи с. Архипо-Осиповка, КК

Модель WRF

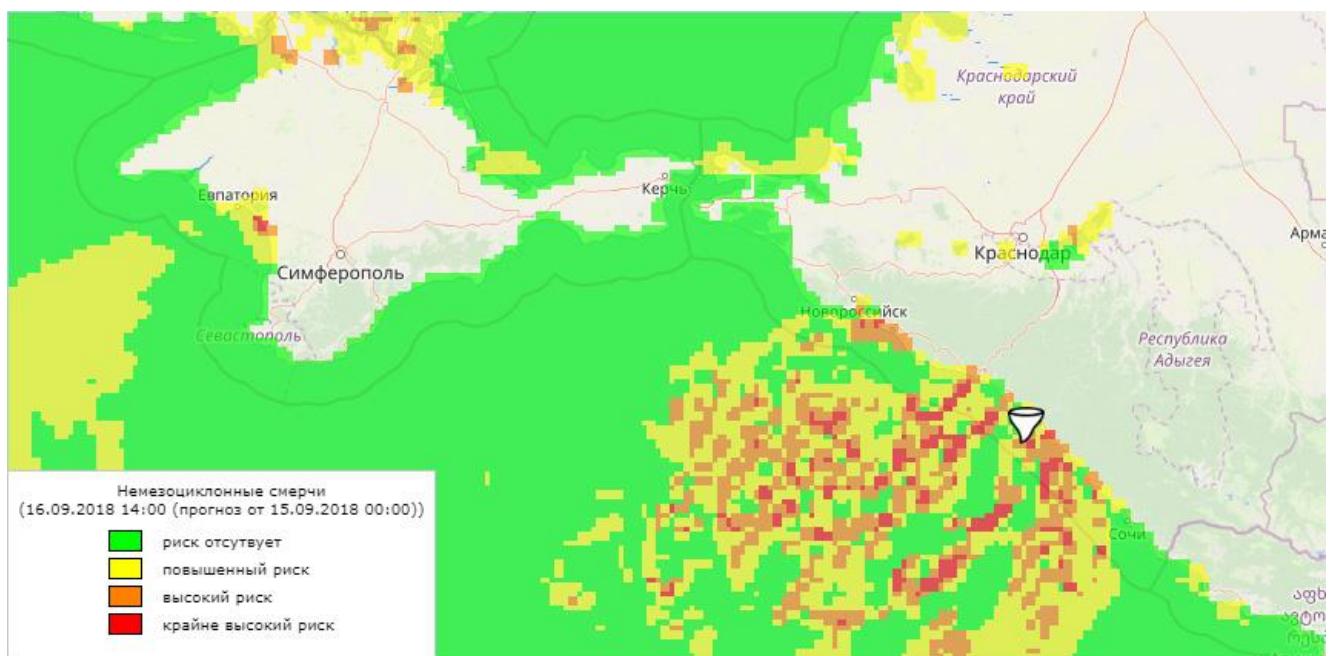


Модель COSMO-Ru2

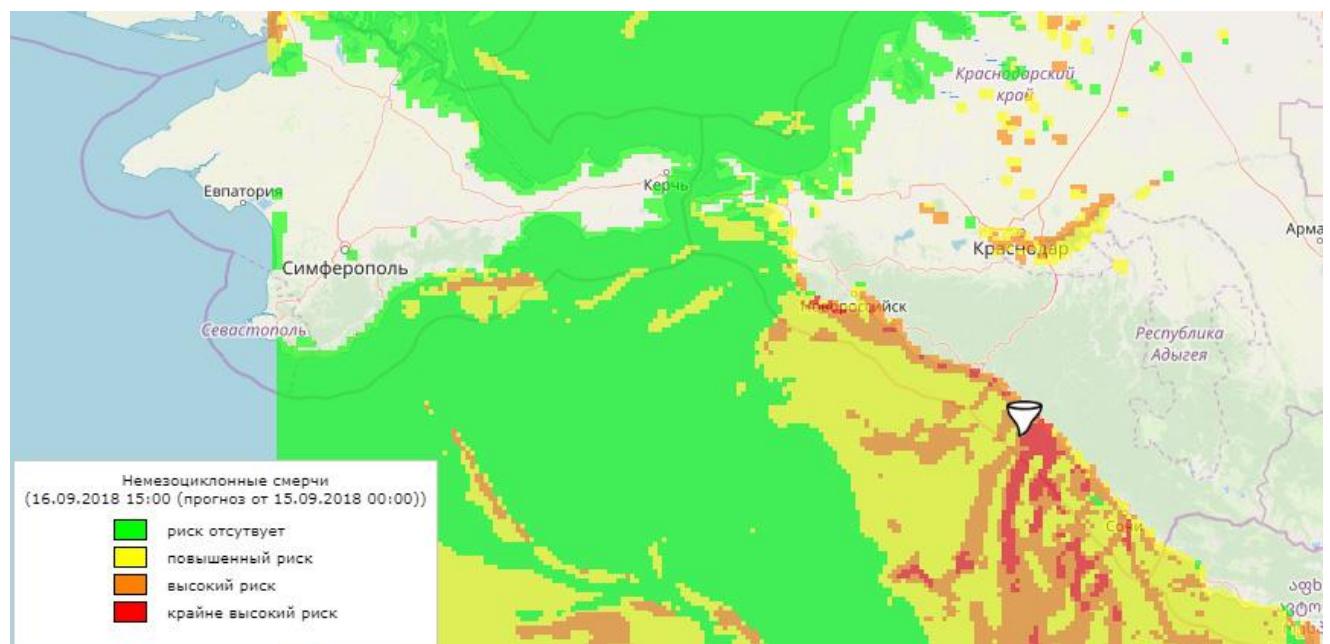


Смерч 16 сентября 2018 г. 13:30 ВСВ вблизи г. Туапсе, КК

Модель WRF

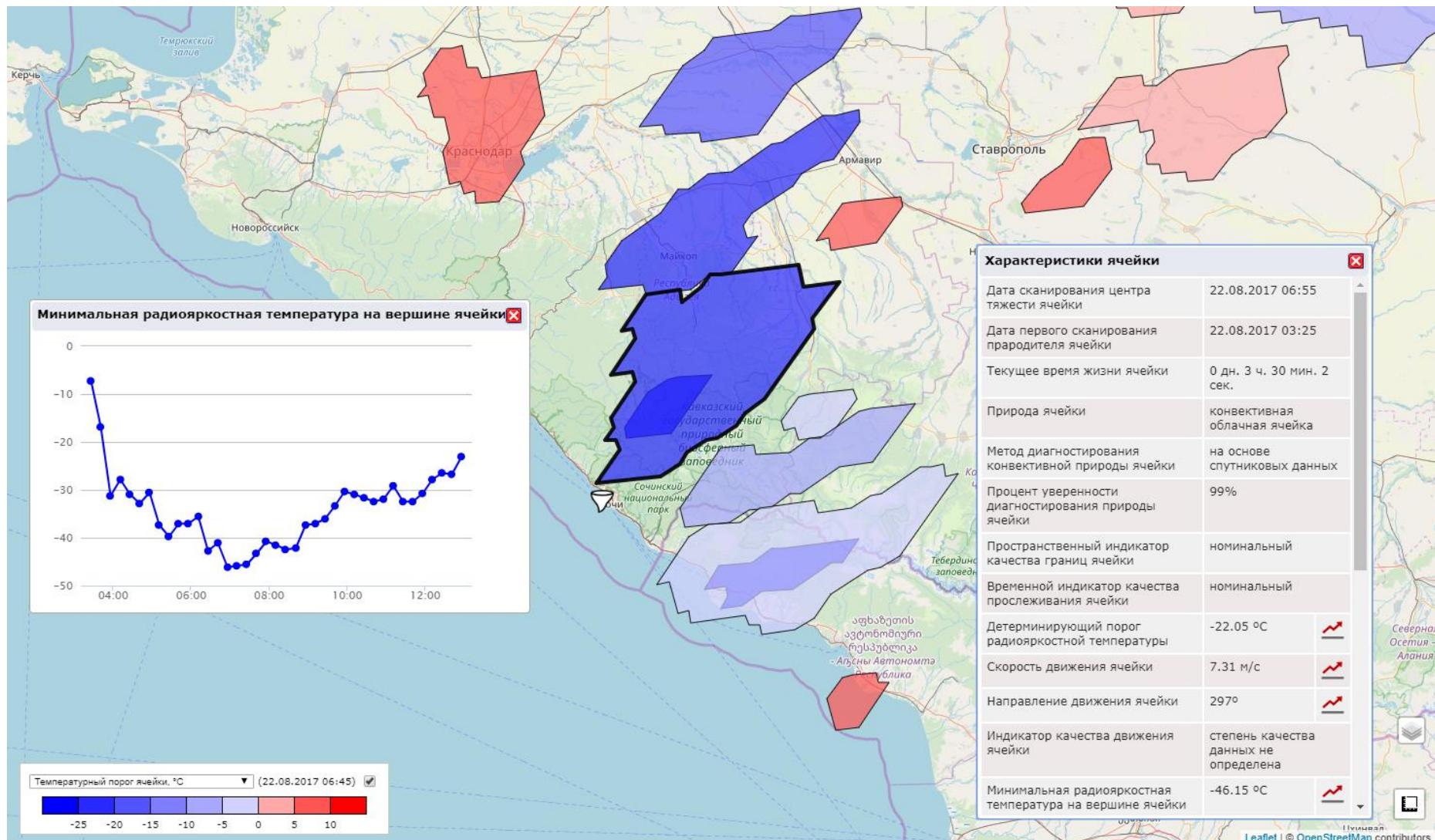


Модель COSMO-Ru2

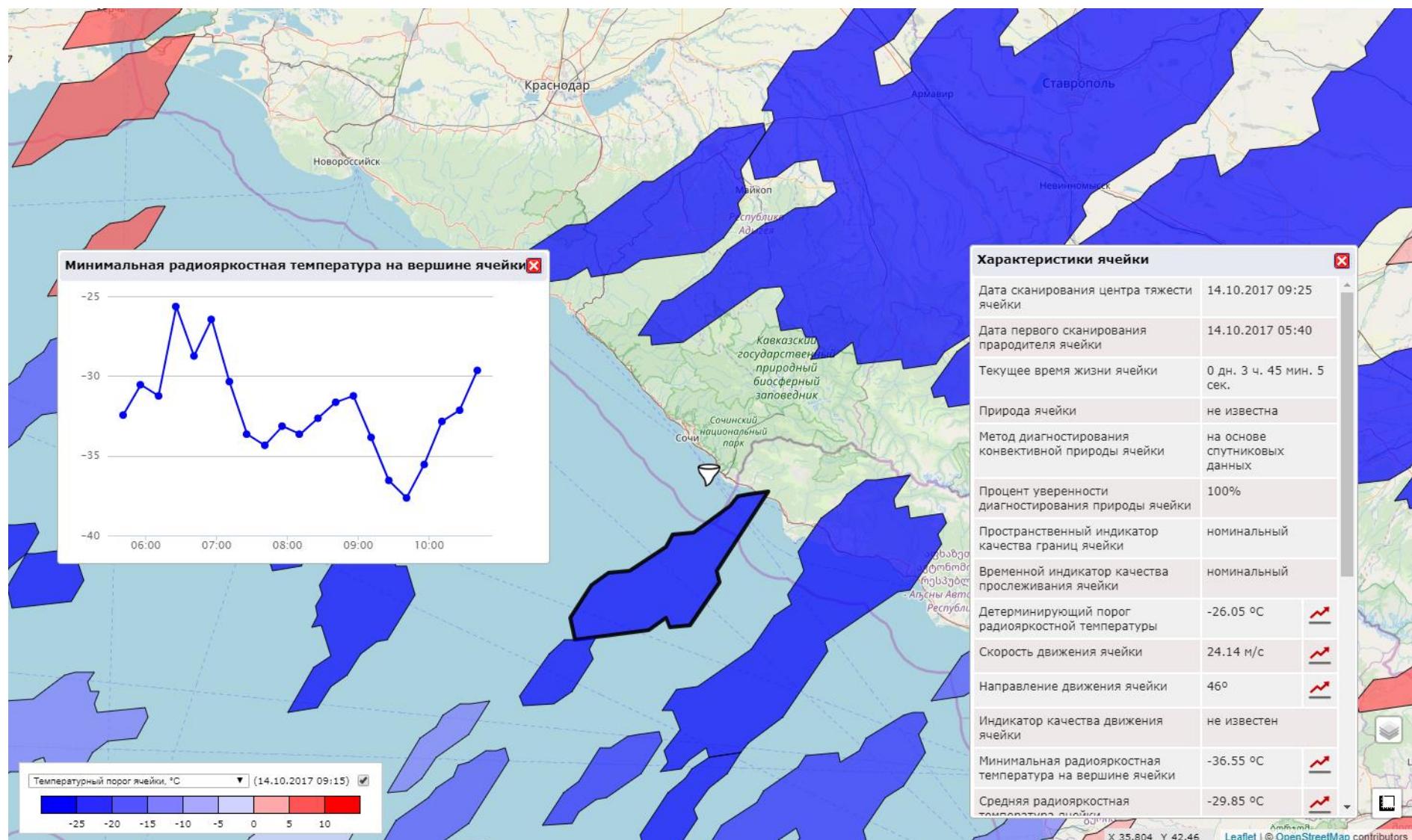


Материнские ячейки смерчей

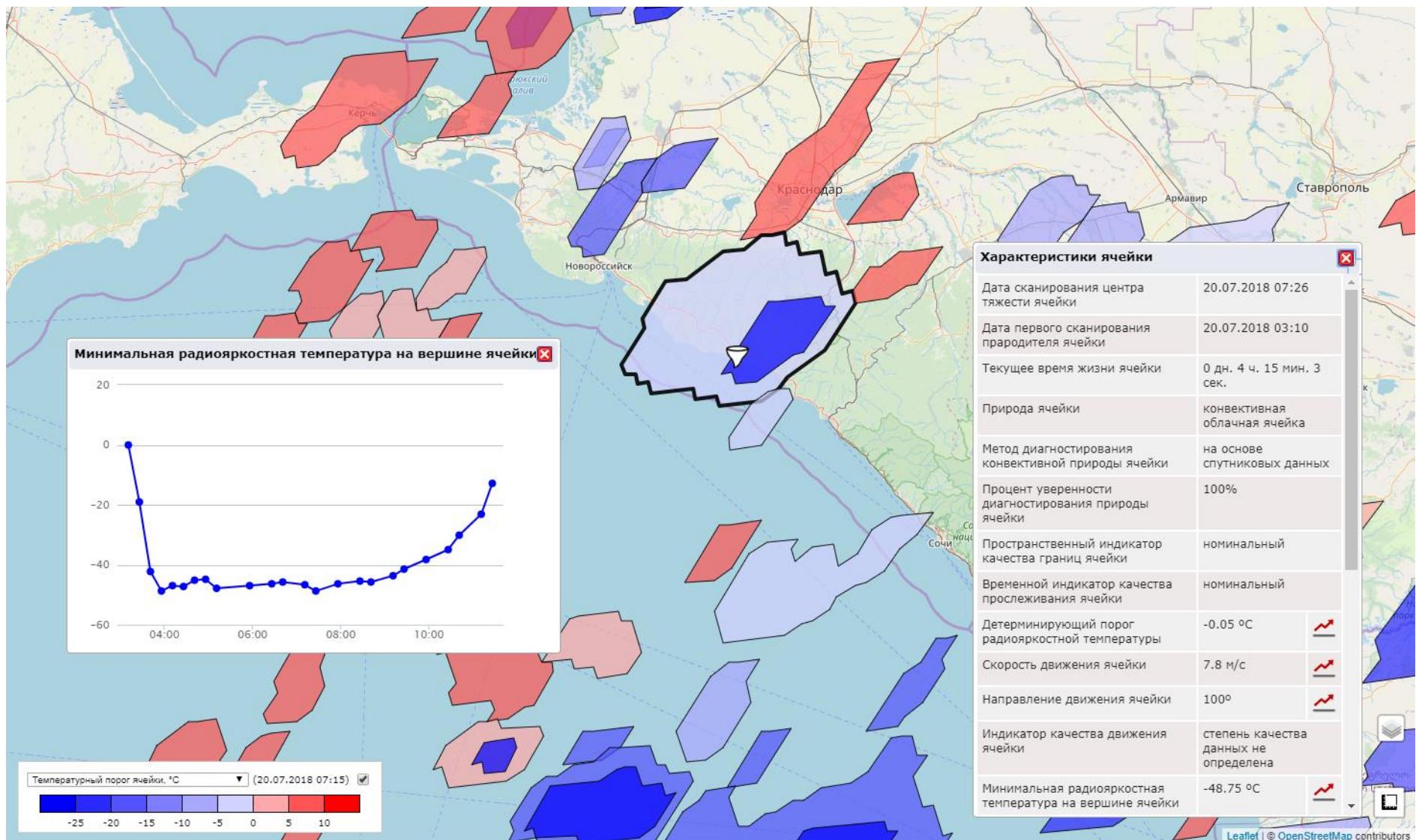
Смерч 22 августа 2017 г. 07:00 ВСВ вблизи г. Сочи, КК



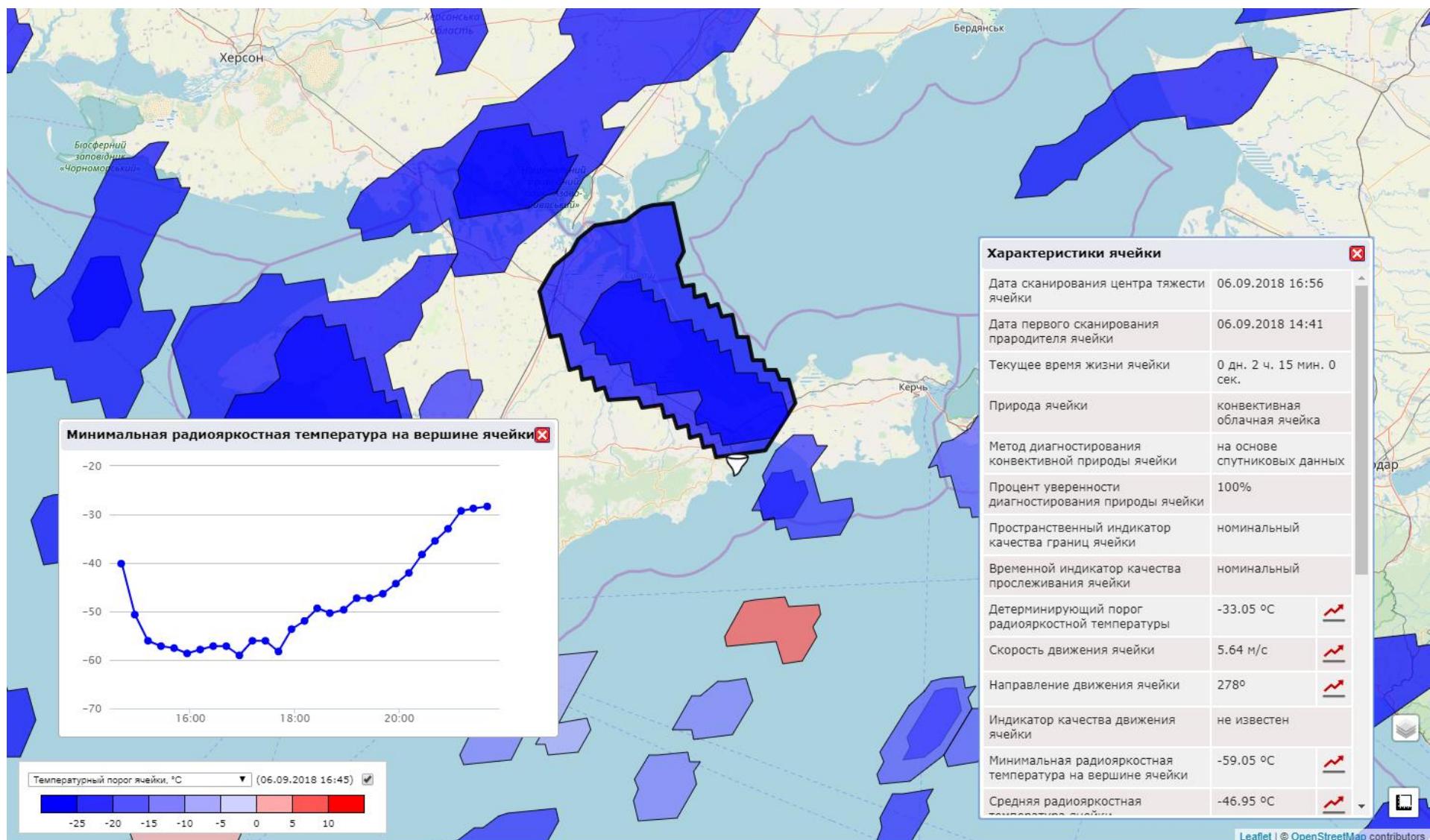
Смерч 14 октября 2017 г. 09:30 ВСВ вблизи г. Сочи (Адлер), КК



Смерч 20 июля 2018 г. 07:15 ВСВ вблизи с. Архипо-Осиповка, КК



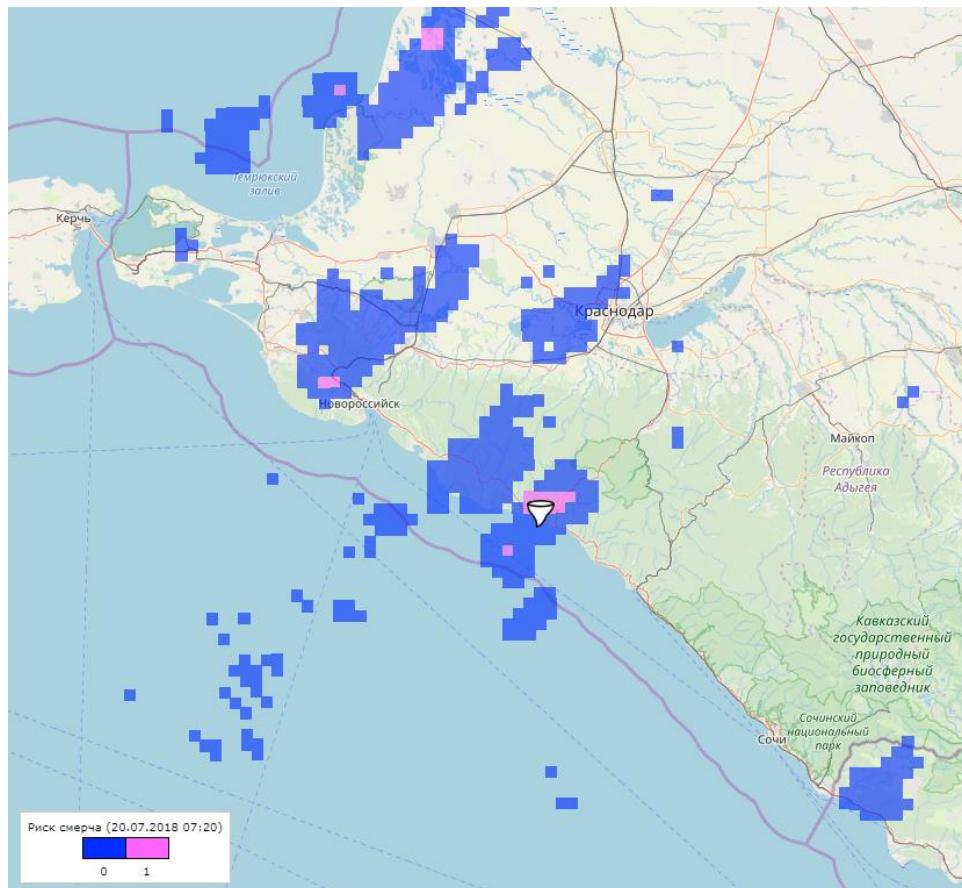
Смерч 6 сентября 2018 г. 17:00 ВСВ вблизи г. Феодосия, РК



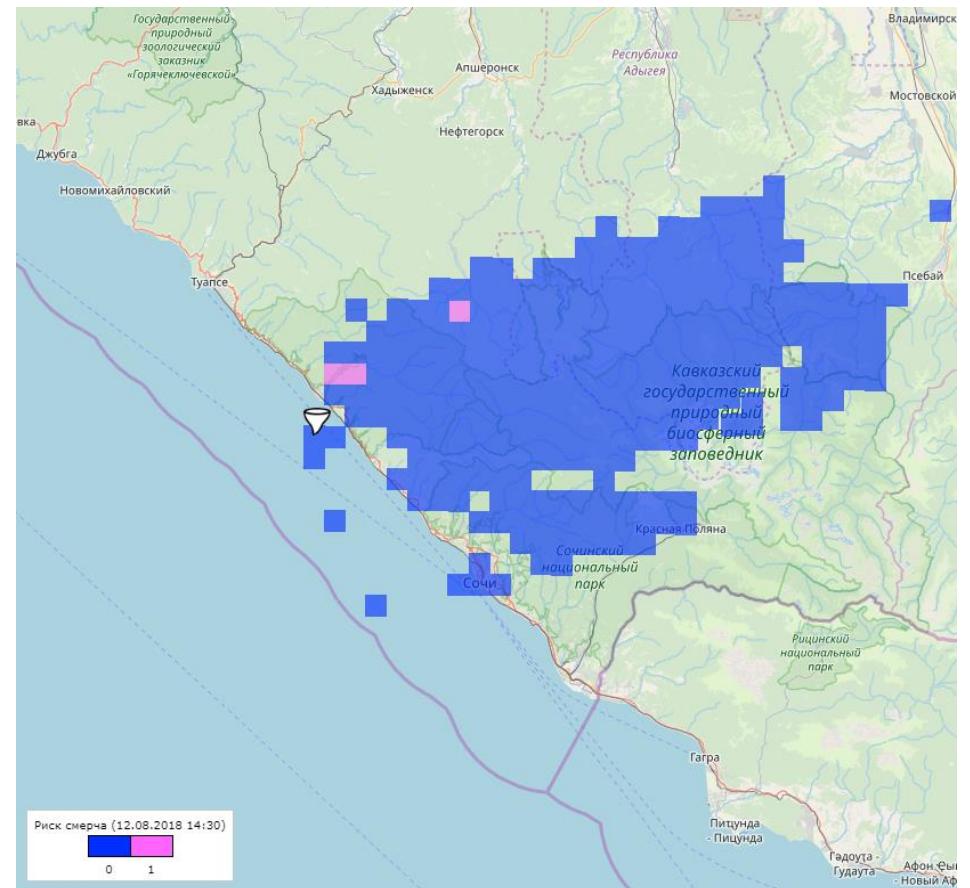
Приложение №4

Смерчоопасные области по радиолокационным данным

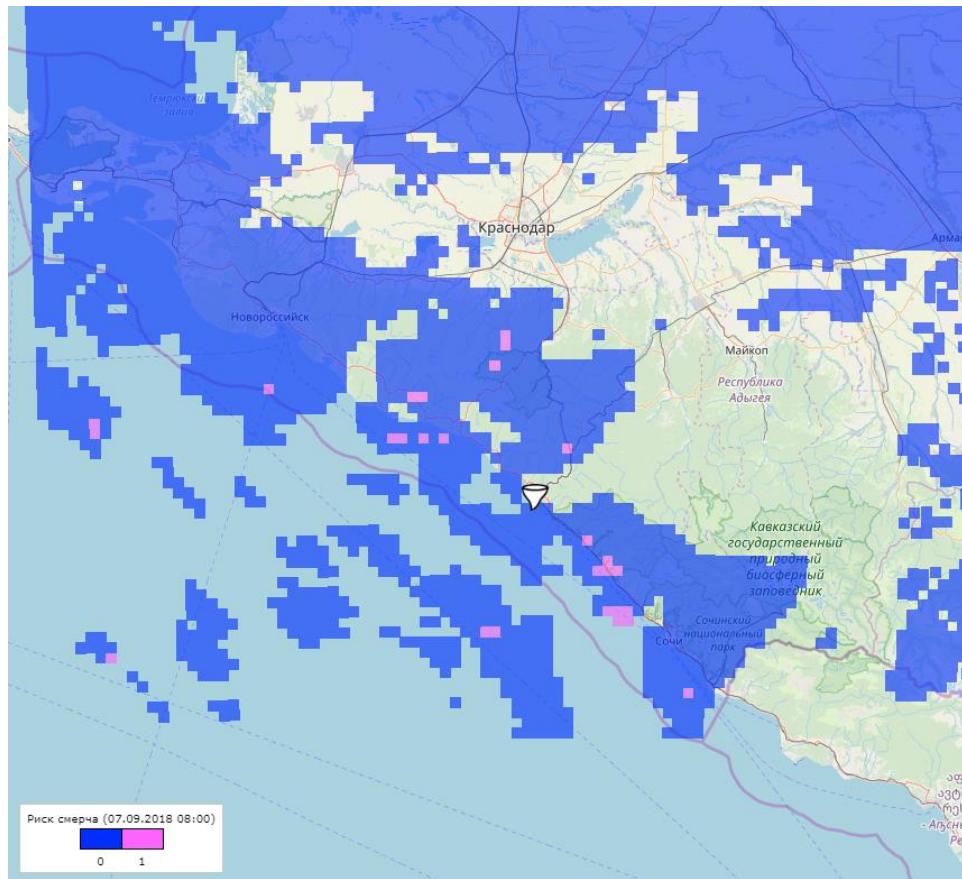
Смерч 20 июля 2018 г. 07:15 ВСВ вблизи с. Архипо-Осиповка, КК



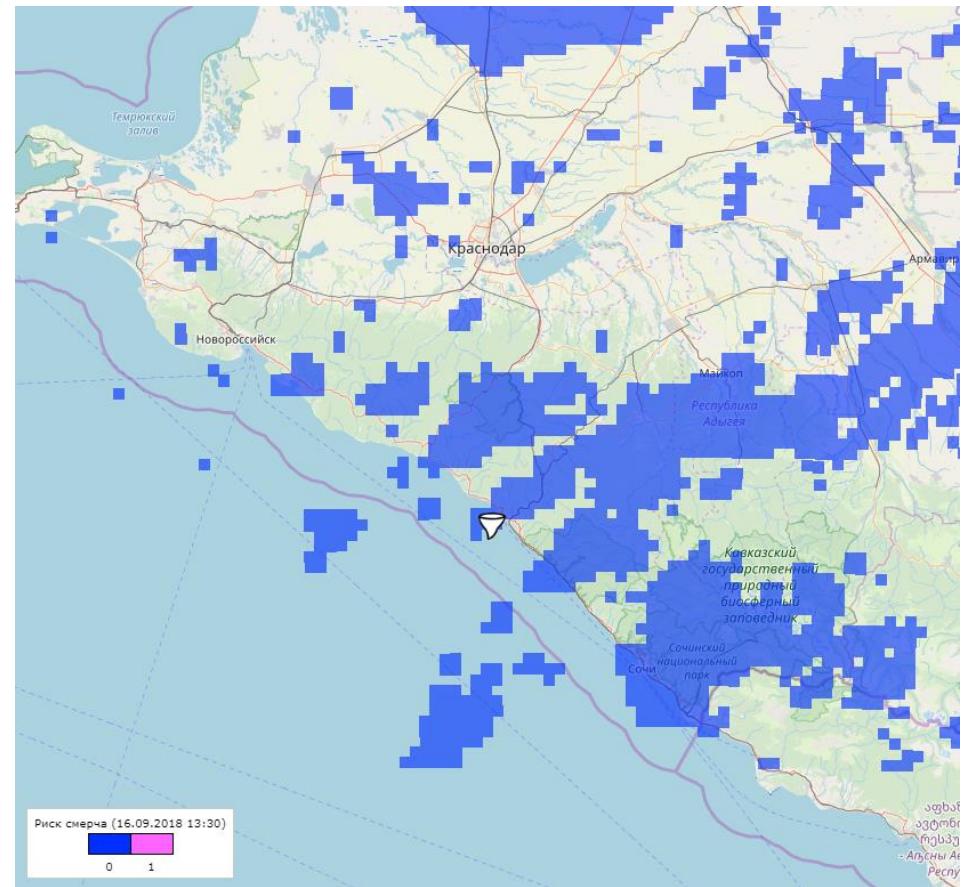
Смерч 12 августа 2018 г. 14:30 ВСВ вблизи г. Сочи (Лазаревское), КК



Смерч 7 сентября 2018 г. 08:03 ВСВ вблизи г. Туапсе, КК



Смерч 16 сентября 2018 г. 13:30 ВСВ вблизи г. Туапсе, КК



Предупреждения о возможном формировании смерчей

Смерчи 29 августа 2017 г. 12:00 ВСВ вблизи г. Сочи, КК

Методика (модель WRF)

Начало моделирования 28.08.2017 00 ч

Н 28.08.2017 19 ч – 29.08.2017 16 ч

Н 29.08.2017 16 – 17 ч

Н 29.08.2017 20 – 23 ч

Н 29.08.2017 23 ч – 30.08.2017 01 ч

Начало моделирования 29.08.2017 00 ч

Н 29.08.2017 00 – 01 ч

Н 29.08.2017 01 – 04 ч

Н 29.08.2017 04 – 07 ч

Н 29.08.2017 07 – 15 ч

Н 29.08.2017 15 – 17 ч

Н 29.08.2017 19 – 22 ч

Н 29.08.2017 22 ч – 30.08.2017 09 ч

Н 30.08.2017 09 – 13 ч

Н 30.08.2017 15 – 16 ч

Н 30.08.2017 18 – 22 ч

Н 30.08.2017 22 ч – 31.08.2017 01 ч

Начало моделирования 30.08.2017 00 ч

Н 30.08.2017 01 – 03 ч

Н 30.08.2017 03 – 07 ч

Н 30.08.2017 07 – 12 ч

Н 30.08.2017 15 – 16 ч

Н 30.08.2017 22 – 23 ч

Н 30.08.2017 23 ч – 31.08.2017 08 ч

Н 31.08.2017 08 – 17 ч

Н 31.08.2017 17 ч – 01.09.2017 01 ч

Начало моделирования 31.08.2017 00 ч

Н 31.08.2017 02 – 04 ч

Н 31.08.2017 05 – 07 ч

Н 31.08.2017 07 – 08 ч

Н 31.08.2017 08 – 09 ч

Н 31.08.2017 09 – 10 ч

Н 31.08.2017 10 – 16 ч

Н 31.08.2017 19 ч – 01.09.2017 01 ч

Методика (модель COSMO-Ru2)

Начало моделирования 27.08.2017 12 ч

Н 29.08.2017 00 – 09 ч

Начало моделирования 28.08.2017 00 ч

Н 28.08.2017 21 ч – 29.08.2017 15 ч

Н 29.08.2017 15 – 21 ч

Начало моделирования 28.08.2017 12 ч

Н 28.08.2017 18 ч – 29.08.2017 15 ч

Н 29.08.2017 15 – 18 ч

Н 29.08.2017 18 ч – 30.08.2017 09 ч

Начало моделирования 29.08.2017 00 ч

Н 29.08.2017 00 – 03 ч

Н 29.08.2017 03 – 18 ч

Н 29.08.2017 18 – 21 ч

Н 29.08.2017 21 ч – 30.08.2017 15 ч

Н 30.08.2017 15 – 18 ч

Начало моделирования 29.08.2017 12 ч

Н 29.08.2017 12 – 15 ч

Н 29.08.2017 15 ч – 30.08.2017 15 ч

Н 30.08.2017 15 – 18 ч

Н 30.08.2017 21 ч – 31.08.2017 00 ч

Н 31.08.2017 00 – 03 ч

Начало моделирования 30.08.2017 00 ч

Н 30.08.2017 00 – 03 ч

Н 30.08.2017 03 – 15 ч

Н 30.08.2017 21 ч – 31.08.2017 00 ч

Н 31.08.2017 00 – 12 ч

Н 31.08.2017 12 – 15 ч

Начало моделирования 30.08.2017 12 ч

Н 30.08.2017 12 ч – 31.08.2017 06 ч

Н 31.08.2017 06 – 18 ч

Н 31.08.2017 21 ч – 01.09.2017 00 ч

Начало моделирования 31.08.2017 00 ч

Н 31.08.2017 00 – 03 ч

Н 31.08.2017 03 – 09 ч

Н 31.08.2017 09 – 15 ч

Начало моделирования 31.08.2017 12 ч

Н 31.08.2017 12 – 15 ч

Н 31.08.2017 15 – 21 ч

Синоптики: 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 п. Магри – Веселое имеется опасность формирования смерчей. Доведено органам власти, МЧС и другим заинтересованным организациям 09:10-09:25 ВСВ.

Суперячейка и смерч 25 июля 2018 г. 18:30 ВСВ вблизи г. Новороссийск, КК

Методика (модель WRF)

Начало моделирования 24.07.2018 00 ч

- M** 24.07.2018 22 ч – 25.07.2018 02 ч
- M** 25.07.2018 03 – 05 ч
- M** 25.07.2018 07 – 14 ч
- M** 25.07.2018 14 – 15 ч
- M** 25.07.2018 15 – 16 ч
- M** 25.07.2018 16 – 23 ч
- M** 25.07.2018 23 ч – 26.07.2018 01 ч

Начало моделирования 25.07.2018 00 ч

- M** 25.07.2018 11 – 12 ч
- M** 25.07.2018 12 – 13 ч
- M** 25.07.2018 13 ч – 26.07.2018 00 ч
- M** 26.07.2018 00 – 07 ч
- M** 26.07.2018 19 ч – 27.07.2018 01 ч

Начало моделирования 26.07.2018 00 ч

- M** 26.07.2018 01 – 03 ч
- M** 26.07.2018 13 – 17 ч
- M** 26.07.2018 17 – 18 ч
- M** 26.07.2018 18 – 19 ч
- M** 26.07.2018 19 – 21 ч
- M** 26.07.2018 21 ч – 27.07.2018 01 ч
- M** 27.07.2018 16 ч – 28.07.2018 01 ч

Начало моделирования 27.07.2018 00 ч

- M** 27.07.2018 13 – 14 ч
- M** 27.07.2018 15 – 17 ч
- M** 27.07.2018 17 – 19 ч
- M** 27.07.2018 19 ч – 28.07.2018 03 ч

Методика (модель COSMO-Ru2)

Начало моделирования 24.07.2018 00 ч

- M** 24.07.2018 18 ч – 25.07.2018 03 ч
- M** 25.07.2018 12 – 18 ч
- M** 25.07.2018 18 – 21 ч

Начало моделирования 24.07.2018 12 ч

- M** 25.07.2018 12 – 15 ч
- M** 25.07.2018 15 ч – 26.07.2018 00 ч
- M** 26.07.2018 00 – 03 ч
- M** 26.07.2018 03 – 06 ч
- M** 26.07.2018 06 – 09 ч

Начало моделирования 25.07.2018 00 ч

- M** 25.07.2018 00 – 03 ч
- M** 25.07.2018 15 – 18 ч
- M** 25.07.2018 18 – 21 ч
- M** 25.07.2018 21 ч – 26.07.2018 03 ч
- M** 26.07.2018 03 – 09 ч
- M** 26.07.2018 09 – 12 ч

Начало моделирования 25.07.2018 12 ч

- M** 25.07.2018 12 – 15 ч
- M** 25.07.2018 15 – 21 ч
- M** 25.07.2018 21 ч – 26.07.2018 00 ч
- M** 26.07.2018 00 – 06 ч
- M** 26.07.2018 15 ч – 27.07.2018 03 ч

Начало моделирования 26.07.2018 00 ч

- M** 26.07.2018 00 – 03 ч
- M** 26.07.2018 03 – 06 ч
- M** 26.07.2018 06 – 09 ч
- M** 26.07.2018 18 ч – 27.07.2018 00 ч
- M** 27.07.2018 12 – 15 ч
- M** 27.07.2018 15 – 18 ч
- M** 27.07.2018 18 – 21 ч

Начало моделирования 26.07.2018 12 ч

- M** 26.07.2018 15 ч – 27.07.2018 00 ч
- M** 27.07.2018 12 ч – 28.07.2018 00 ч

Начало моделирования 27.07.2018 00 ч

- M** 27.07.2018 12 ч – 28.07.2018 00 ч

Начало моделирования 27.07.2018 12 ч

- M** 27.07.2018 15 – 21 ч

Синоптики: В ближайшие 3-6 часов и до конца суток 25 июля, а также в последующие сутки 26 и 27 июля местами в Краснодарском крае ожидаются сильные дожди, ливни, в сочетании с грозой, градом и шквалистым усилением ветра 20-25 м/с, на малых реках и водотоках бассейна р. Кубань юго-восточной территории края, республики Адыгея и черноморского побережья (от Геленджика до Магри) ожидаются подъемы уровня воды, местами с достижением неблагоприятных отметок; над Черным морем на участке от Анапы до Магри имеется опасность формирования смерчей. Доведено органам власти, МЧС и другим заинтересованным организациям 13.25-13.30 ВСВ.