

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-3-23-41>

УДК 551.509.327+551.515.3

Краткосрочный прогноз смерчеопасных ситуаций для прибрежной акватории Черного моря с использованием усовершенствованного индекса WRI

О.В. Калмыкова

*Научно-производственное объединение «Тайфун»,
Калужская область, г. Обнинск
kov@feerc.ru*

В статье рассматриваются вопросы повышения качества краткосрочного прогноза смерчеопасных ситуаций для прибрежной акватории Черного моря. Представлены результаты, связанные с разработкой новых вариантов расчета регионального индекса смерчеопасности WRI как для теплого периода (WRI₂₁), так и для холодного (WRI_w). Индекс WRI используется для выделения зон высокого риска формирования смерчей и последующей локализации смерчеопасных участков побережья. Расчеты полей индекса WRI ведутся на базе выходных данных мезомасштабной модели COSMO-Ru2 с шагом сетки 2.2 км. Расчеты проводятся в оперативном режиме в рамках действующей технологии оценки смерчеопасности. Проанализировано качество прогноза новых вариантов расчета индекса WRI для различных периодов. Показано, что в теплый период предупредительность смерчей в среднем может достигать до 82 %. При этом отмечается и высокая доля ложных тревог (около 70 %), в основном за счет излишне прогнозируемой смерчеопасности на отдельных участках побережья (Сочи и Туапсе). В холодный период ожидаемо прогнозируется значительно меньшее число смерчеопасных дней по сравнению с теплым. Представлены примеры прогнозов для различных периодов года. Даны рекомендации по использованию прогнозов для подготовки штормовых предупреждений.

Ключевые слова: водяной смерч, смерчеопасная ситуация, прогноз, модель COSMO-Ru2, региональный индекс смерчеопасности WRI, предикторы смерчеобразования, технология прогноза

Short-term forecasting of waterspout-risk conditions for the coastal water of the Black Sea based on the improved index WRI

O. V. Kalmykova

*Research and Production Association «Typhoon», Obninsk, Russia
kov@feerc.ru*

The paper considers the issues of improving the quality of short-term forecasts of waterspout-risk conditions for the Black Sea coastal water. The results related to the development of new versions for calculating the regional waterspout risk index (WRI) for both the warm (WRI₂₁) and cold (WRI_w) seasons are presented. The WRI is used to identify zones of high-risk waterspout formation and subsequent localization of waterspout-risk

areas of the coast. Calculations of the WRI fields are based on the output of the COSMO-Ru2 mesoscale model with a grid spacing of 2.2 km. Calculations are carried out in real time within the technology for assessing the risk of waterspouts. The skill of forecasting new WRI versions for different periods is analyzed. It is shown that the probability of waterspout detection in the warm season can reach 82% on average. At the same time, there is also a high false alarm rate (about 70%), mainly due to the excessively predicted waterspout risk in certain areas of the coast (Sochi and Tuapse). In the cold season, as expected, a significantly smaller number of waterspout-risk days is predicted as compared to the warm period. Examples of forecasts for different seasons are presented. Recommendations on the use of forecasts for preparing storm warnings are given.

Keywords: waterspout, waterspout-risk conditions, forecast, COSMO-Ru2 model, regional waterspout risk index WRI, waterspouts formation predictors, forecast technology

Введение

Водяные смерчи в нашей стране возникают в различных ее частях от Балтийского до Охотского морей. Где-то их формирование есть результат достаточно случайного стечения обстоятельств – возникновения условий, благоприятных для их появления. Где-то подобные условия могут отмечаться продолжительное время, главным образом ввиду географического расположения рассматриваемого района и особенностей циркуляции атмосферы в этом районе. Как следствие водяные смерчи там не редкость. К таким районам в России можно отнести побережье Финского залива, Балтийского, Азовского и Черного морей, где ежегодно регистрируется по меньшей мере хотя бы одни смерч. В этом списке особо выделяется прибрежная акватория Черного моря, где частота появления смерчей за год может достигать до 60 случаев и более [2]. Возникновению смерчей здесь способствуют высокие Кавказские горы, приводящие к закрутке воздушных потоков, высокий температурный режим поверхности моря, а также прохождение через черноморскую акваторию циклонов с Атлантики и Средиземного моря.

В структуре Росгидромета предусмотрена выдача специализированных штормовых предупреждений об угрозах возникновения черноморских смерчей. Несмотря на достаточную их распространенность в этом районе до недавнего времени прогноз опасности их формирования в отсутствие специальных расчетных методик базировался в основном на комплексном подходе к синоптическому анализу и анализу текущей обстановки по данным оперативных метеонаблюдений. Очевидно, что в такой ситуации качество прогноза в большей степени будет определяться опытом синоптика-прогнозиста. В 2020 г. ЦМКП Росгидромета рекомендовала к внедрению в качестве консультативного метода разработанную в НПО «Тайфун» технологию прогноза смерчеопасных ситуаций в прибрежной акватории Черного моря, предусматривающую построение автоматизированного прогноза, основанного на использовании регионального индекса смерчеопасности (Waterspout Risk Index – WRI) [4]. По результатам независимых

испытаний в 2019 г. общая оправдываемость прогноза угроз возникновения смерчей составила 81 %, их предупрежденность – 71 %. Периоды действия выданных в 2019 г. штормовых предупреждений о смерчах и прогнозов по автоматизированной методике в большинстве случаев были согласованы.

С 2020 г. в соответствии с Планом НИТР Росгидромета проводится работа по усовершенствованию разработанной технологии по двум основным направлениям: повышение качества краткосрочного прогноза смерчеопасных ситуаций и повышение качества распознавания смерчеобразующих облаков (наукастинг смерчей). Последнему посвящена недавно опубликованная статья [3]. В данной же работе сделан упор на результатах, полученных по первому направлению, в частности была предложена усовершенствованная версия индекса WRI для прогноза смерчей в теплый период (WRI_{21}) и разработан вариант расчета индекса WRI для холодного периода года (WRI_W). За счет использования различных вариантов индекса WRI обеспечивается построение всесезонного прогноза смерчеопасных ситуаций. Временные рамки теплого периода в данной работе определяются промежутком с мая по октябрь, когда регистрируется основная масса смерчей (около 90 % случаев), а холодного периода – с ноября по апрель.

1. Прогноз в теплый период

Механизмы формирования смерчей до сих пор недостаточно изучены. Как следствие, точно спрогнозировать время и место их появления пока не представляется возможным. С учетом текущего понимания процессов смерчеобразования можно лишь выделить ситуации, когда их формирование более ожидаемо. Такие смерчеопасные ситуации тем не менее не могут абсолютно точно гарантировать того, что смерч на самом деле возникнет, поскольку важную роль будут играть и локальные факторы, проявляющиеся на микромасштабе и которые крайне сложно прогнозировать. Эти обстоятельства объясняют высокую долю ложных прогнозов смерчей, отмечаемую во многих странах, и в частности в США, где эта доля может достигать вплоть до 75 % [7]. Когда мы имеем дело с таким опасным и порой разрушительным явлением, как смерч, очень важно минимизировать возможность выпуска неоправдавшихся прогнозов их отсутствия (пропуска смерчей).

Для прогноза смерчеопасных ситуаций в прибрежной акватории Черного моря был предложен ингредиентный подход, предусматривающий распознавание рассматриваемых ситуаций с использованием перечисленной ниже комбинации предикторов немезоциклонного смерчегенеза над водной поверхностью:

DT_1 – разность температур поверхности моря и воздуха на уровне 1 км (°C);

DD_{10} – локальная деформация (горизонтальный сдвиг) ветра на уровне 10 м (°/км);

RH_1 – относительная влажность воздуха, осредненная в слое 0–1 км (%);

CD – глубина конвекции (км);

DU_1 – абсолютное значение разности скоростей ветра на уровнях 10 м и 1 км (м/с);

S_1 – вертикальный сдвиг ветра, осредненный в слое 0–1 км (м/(с·км)).

Предикторы DT_1 и CD позволяют оценить интенсивность конвекции, соответственно, по предпосылкам для ее развития и по прогнозируемой мощности облаков. Предиктор RH_1 отвечает за оценку необходимого ресурса для конвекции, DD_{10} – за выявление начального толчка (предварительно сформированной приводной завихренности) для инициирования смерчеобразования по немезоциклонному типу [5]. Предикторы DU_1 и S_1 используются для оценки ветрового возмущения в вертикальном столбе воздуха (сильно возмущенное поле может привести к быстрому разрушению вихря [9]).

Для подбора пороговых значений вышеуказанных предикторов в исходном варианте расчета индекса WRI_{19} использовалась выборка смерчей в теплые периоды 2014–2016 гг. (104 случая) и выходные данные модели WRF с шагом сетки 2 км и 30-минутным разрешением по времени. В конечном итоге было построено следующее выражение индекса WRI_{19} :

$$WRI_{19} = \frac{1}{6} \cdot [(DT_1 \geq 8) + (DD_{10} \geq 3.3) + (RH_1 \geq 80.7) + (CD \geq 7.6) + (DU_1 \leq 2.5) + (S_1 \leq 6.3)]. \quad (1)$$

Особенностью расчета индекса WRI является порядок учета предикторов: первые четыре предиктора из списка являются основными (в комплексе отвечают за выявление возможности вихреобразования), последние два вторичными (накладывают ограничение на возможность продолжительного существования вихря). При выполнении условий на значение предиктора его вклад считается равным единице, в противном случае он становится нулевым. Нормированная сумма вкладов от предикторов определяет итоговое значение индекса WRI . При этом вклады от вторичных предикторов учитываются только в том случае, если выполняются условия по всем основным предикторам (нет физического смысла отдельного рассмотрения возмущения ветра вне связи с образованием вихря).

Значения индекса WRI варьируются в диапазоне от 0 до 1, фактически они определяют вероятность формирования смерчей. Анализ пространственного расположения зон риска по индексу WRI позволяет выделять смерчопасные участки побережья, а анализ того, как они изменяются с течением времени – определять периоды, когда на том или ином участке могут сформироваться смерчи. В действующей технологии прогноза смерчопасности выделение смерчопасных участков побережья с указанием периода действия угрозы осуществляется в автоматическом режиме.

В 2021 г. была проведена адаптация индекса WRI к выходным данным модели COSMO-Ru2 с шагом сетки 2.2 км и часовым разрешением по времени. При этом использовался доступный накопленный в НПО «Тайфун» архив выходной продукции модели COSMO-Ru2 и новая выборка смерчей за теплые периоды 2017–2020 гг. (136 случаев). С 2019 г. эта модель стала базовой для расчетов прогнозов смерчеопасных ситуаций по индексу WRI.

Для выбора пороговых значений предикторов был применен подход, предусматривающий поиск частных порогов для каждого рассматриваемого случая. Под частными порогами понимается набор критических значений предикторов, которые выбираются с учетом их совместного распределения, что позволяет оперировать «реально достижимыми» значениями. В WRI_{19} порог для каждого предиктора определялся исходя из анализа выборки его значений вне связи со значениями других предикторов. Поиск частных порогов производился в диапазоне от минимального до максимального значения каждого предиктора в окрестности 50 м от смерча. Размер окрестности был выбран исходя из ранее установленной пространственной погрешности прогноза.

Тщательный анализ частных порогов предикторов индекса WRI позволил выявить особенности совместного распределения порогов для предикторов DT_1 и CD . В частности, было установлено, что в большинстве случаев в теплый период года формированию черноморских смерчей способствуют достаточно высокие значения предиктора DT_1 (> 8.5 °C), глубина конвекции при этом может варьироваться от 6 до 9 км. В то же время смерчи могут формироваться и при более низких значениях рассматриваемой разности (от 6 до 8.5 °C) в условиях, способствующих возникновению крайне мощных по вертикали облаков (> 9 км). По всей видимости, в образовании смерчей первой из упомянутых категорий важную роль играет термическая конвекция, в то время как смерчи второй категории возникают при вынужденной конвекции, обусловленной прохождением атмосферных фронтов.

С учетом выявленной особенности, помимо порогов, была уточнена и формула расчета индекса WRI – был введен составной предиктор $\langle DT_1, CD \rangle$, для которого было задано множество допустимых значений, характеризующих условия возникновения смерчей двух вышеупомянутых категорий. Новый адаптированный под модель COSMO-Ru2 вариант индекса получил обозначение WRI_{21} :

$$WRI_{21} = \frac{1}{5} \cdot \left[\left((DT_1 \geq 8.5) \& (CD \geq 6) \right) + (DD_{10} \geq 6) + \left((DT_1 \geq 6) \& (CD \geq 9) \right) + (RH_1 \geq 76) + (DU_1 \leq 3.5) + (S_1 \leq 7.5) \right]. \quad (2)$$

В (2) знак «&» означает одновременное выполнение условий, только в этом случае вклад от составного предиктора становится единичным.

При этом вклад может быть получен как при выполнении условий $(DT_1 \geq 8.5) \& (CD \geq 6)$, так и $(DT_1 \geq 6) \& (CD \geq 9)$.

С августа по октябрь 2021 г. проводилась сравнительная оценка качества прогноза смерчеопасных ситуаций по индексам WRI_{19} и WRI_{21} . К тому времени в состав действующей технологии прогноза уже был встроены блок оперативных расчетов по индексу WRI_{21} . За рассматриваемый период из 13 дней со смерчами в целом по всем заблаговременностям счета по модели COSMO-Ru2 по индексу WRI_{19} были успешно спрогнозированы 10 смерчеопасных дней, по индексу WRI_{21} – 12 дней. При этом за счет расширения области возможных значений предикторов индекса WRI_{21} , указывающих на смерчеопасную ситуацию, незначительно повысилась и доля ложных прогнозов (в среднем на 5 %, табл. 1). Если же сравнивать качество прогнозов по индексу экстремальной зависимости – специально разработанной метрике для оценки качества прогнозов крайне редких событий, то новый вариант WRI_{21} показывает свое преимущество [6].

Таблица 1. Показатели качества прогноза смерчеопасных ситуаций у Черноморского побережья России по индексам WRI_{19} и WRI_{21} с августа по октябрь 2021 г.

Table 1. Indicators of the quality of forecast of the waterspouts risk situations off the Black Sea coast of Russia based on the WRI_{19} and WRI_{21} indices from August to October 2021

Показатель качества прогноза	Заблаговременность счета по модели COSMO-Ru2							
	36 ч		24 ч		12 ч		0 ч*	
	WRI_{19}	WRI_{21}	WRI_{19}	WRI_{21}	WRI_{19}	WRI_{21}	WRI_{19}	WRI_{21}
Общая оправдываемость, %	77	76	71	63	73	68	75	63
Оправдываемость наличия, %	39	40	31	28	33	30	39	30
Предупрежденность явления, %	54	77	75	92	82	91	92	92
Доля ложных прогнозов, %	61	60	69	72	67	70	61	70
Критерий Пирси–Обухова	0.361	0.527	0.447	0.492	0.537	0.550	0.635	0.499
Критерий Багрова–Хайдке	0.313	0.386	0.283	0.256	0.335	0.301	0.408	0.272
Индекс экстремальной зависимости	0.427	0.688	0.611	0.815	0.727	0.830	0.879	0.829

Примечание. *Нулевая заблаговременность подразумевает, что прогноз смерчеопасности был рассчитан в тот же день, когда возник смерч.

В настоящий момент в работе технологии прогноза смерчопасности индекс WRI_{21} выступает в качестве базового метода построения соответствующего прогноза в теплый период года. В табл. 2 приведены значения показателей качества прогноза по индексу WRI_{21} с мая по октябрь 2023 г. По техническим причинам в 2022 г. технология прогноза некоторое время не работала, и за этот год оценка качества прогноза не проводилась. Из табл. 2 видно, что по сравнению с 2021 г. отмечается некоторое снижение значений показателей, что вполне ожидаемо, поскольку оценка проводилась за весь теплый период 2023 г. Усредненная по всем заблаговременностям счета предупреденность смерчей составила 82 %, доля ложных прогнозов – 70 %. По сравнению с 2019 г., когда для прогноза использовался индекс WRI_{19} , предупреденность смерчей увеличилась на 11 %.

Таблица 2. Показатели качества прогноза смерчопасных ситуаций у Черноморского побережья России по индексу WRI_{21} с мая по октябрь 2023 г.

Table 2. Indicators of the quality of forecast of the waterspouts risk situations off the Black Sea coast of Russia based on the WRI_{21} indices from May to October 2023

Показатель качества прогноза	Заблаговременность счета по модели COSMO-Ru2			
	36 ч	24 ч	12 ч	0 ч
Общая оправдываемость, %	72	69	66	62
Оправдываемость наличия, %	32	31	30	27
Предупреденность явления, %	78	79	86	83
Доля ложных прогнозов, %	68	69	70	73
Критерий Пирси–Обухова	0.492	0.455	0.481	0.400
Критерий Багрова–Хайдке	0.311	0.277	0.274	0.220
Индекс экстремальной зависимости	0.665	0.641	0.733	0.636

2. Прогноз в холодный период года

Анализ собранного автором архива случаев регистрации черноморских смерчей с 2010 г. по настоящее время показал, что в холодный период с ноября по апрель над морем могут возникать от 1 до 4 смерчей, в отдельные годы эта цифра может быть существенно выше. К примеру, во время вспышки смерчей 12–14 февраля 2020 г. в течение указанного периода отмечалось формирование смерчей практически вдоль всего Черноморского побережья Кавказа (10 случаев). Самым продуктивным стал день 13 февраля 2020 г. – 6 смерчей. Эта вспышка была связана с прохождением циклона с центром над Украиной. Следует обратить внимание и на тот факт, что в холодный период смерчи, как и в теплый, могут выходить на сушу

с различными последствиями. Недавние случаи 29 января 2022 г. и 3 февраля 2023 г. тому подтверждение. Таким образом, в целом прослеживается достаточно стабильная картина – как минимум один смерч вне теплого конвективного сезона. Для построения всесезонного прогноза смерчопасности наряду с теплым периодом необходима соответствующая методика и для холодного периода.

В 2023 г. была проведена работа над созданием указанной методики. До этого времени в работе технологии прогноза смерчопасности прогноз в холодный период строился на базе апробированного для акватории Черного моря известного метода номограммы Силагьи (Szilagyi) [8]. Суть данного метода заключается в анализе принадлежности точки к области, ограниченной двумя кривыми, называемыми «пороговыми линиями водяных смерчей» («waterspout threshold lines»). Принадлежность точки указывает на опасность образования смерчей, в противном случае считается, что смерчи маловероятны (рис. 1). Координаты точки формируются из значений двух базовых предикторов смерчеобразования отобранных автором метода по результатам анализа выборки смерчей, включающей в себя 172 случая над Великими озерами: по оси X – разность температур поверхности моря и воздуха на уровне 850 гПа, по оси Y – глубина конвекции. Дополнительным условием является ограничение на скорость ветра на уровне 850 гПа – она не должна превышать 20.5 м/с. Можно отметить некоторое пересечение указанных предикторов с теми, которые используются в индексе WRI. Это не случайно, поскольку метод номограммы был отправной точкой для разработки региональной методики (индекса WRI) для прибрежной акватории Черного моря.

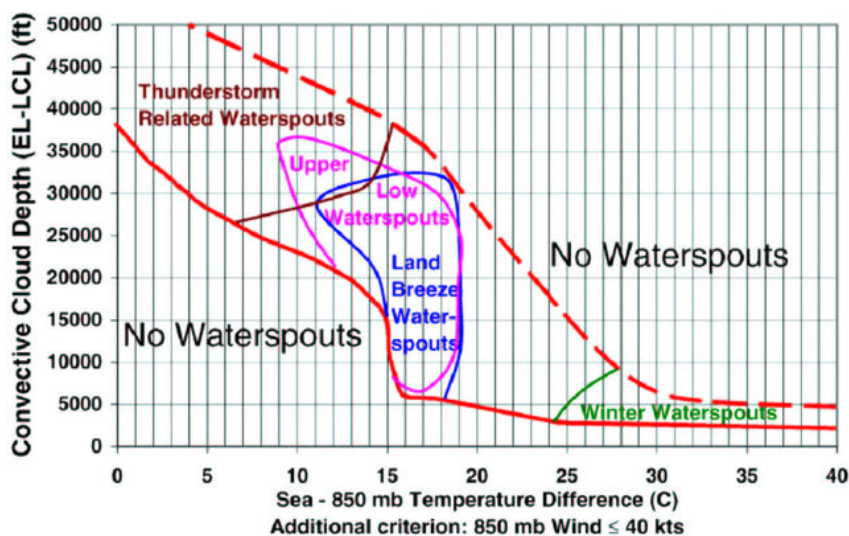


Рис. 1. Номограмма водяных смерчей (2005) [8].

Fig. 1. Waterspouts nomogram (2005) [8].

В теплый период прогноз опасности возникновения смерчей над Черным морем по номограмме показывает крайне высокую долю ложных тревог (в пределе до 100 %). В холодный период эта доля существенно ниже. Тем не менее, как уже было упомянуто выше, в 2023 г. была проведена работа по разработке новой методики с акцентом на учет региональных особенностей смерчеобразования.

Исходя из успешного опыта использования индексов конвективной неустойчивости в теплый период года, а именно их определенной комбинации в составе регионального индекса смерчеопасности WRI для выявления областей риска смерчеобразования, было решено взять индексы за основу и при построении методики прогноза смерчей в холодный период. При этом, ввиду возможного проявления специфики условий, благоприятных для образования смерчей в этот период, рассматривался расширенный набор индексов – возможных предикторов (около 100 шт.). Анализировались случаи черноморских смерчей в холодные периоды 2017–2023 гг. (22 случая). Выбор данного периода был сделан исходя из доступности на серверах НПО «Тайфун» архивных прогнозов по модели COSMO-Ru2.

Для отбора наилучших предикторов были сформированы два набора данных. Первый – со значениями индексов в окрестности радиусом 50 км от места возникновения смерча во временном интервале $[t - 3 \text{ ч}, t + 3 \text{ ч}]$, где t – момент регистрации смерча, по каждому случаю из рассматриваемой выборки. Второй – также со значениями индексов, но уже в окрестности с наименьшей вероятностью регистрации смерчей. Координаты центра этой окрестности выбирались по значениям предиктора DD_{10} – предполагалось, что в области значений данного предиктора, стремящихся к нулю, т. е. в достаточно однородном недеформированном поле ветра, появление смерчей крайне маловероятно. После этого были проведены расчеты коэффициента корреляции Пирсона между всевозможными парами индексов на множестве их значений для двух сформированных наборов, и впоследствии исключены из рассмотрения индексы, показавшие с рассматриваемым высокую степень корреляции (более 0.8). Полученный в конечном итоге набор слабозависимых индексов был проранжирован по значению коэффициента точечно-бисериальной корреляции [1]. Этот вид корреляции позволяет оценить взаимосвязь между двумя переменными, одна из которых измерена в количественной шкале (всевозможные значения), а вторая в дихотомической шкале (возможны только два значения). В рассматриваемом случае этот вид корреляции был использован для отбора индексов, которые более всего смогли разграничить два сформированных набора, то есть такие, для которых их значения, принадлежащие к группе первого набора (описывающие условия, благоприятные для смерчеобразования), значимо отличались от значений, принадлежащих к группе второго набора (условия, не располагающие к смерчеобразованию).

В состав результирующего набора потенциальных предикторов (отобранных по порогу коэффициента точечно-бисериальной корреляции

в 0.75) вошло большинство индексов, используемых в качестве предикторов в индексе WRI, а также новые общеизвестные индексы, используемые в основном для распознавания неустойчивого состояния атмосферы с потенциалом развития грозовой облачности (СТ, VT, KIM, и др.). В дальнейшем было решено по аналогии с теплым периодом построить индекс WRI и для холодного периода. При этом были учтены результаты ранжирования индексов, в соответствии с которыми предикторы S_1 и DU_1 из (1) и (2) были заменены на один более прогностически значимый для холодного периода предиктор W_1 – скорость ветра, осредненная в слое 0–1 км.

Для выбора пороговых значений отобранных индексов был предложен новый подход, представляющий собой более усовершенствованную версию ранее описанного подхода с частными порогами. Суть нововведений заключалась в учете возможной временной погрешности модели (3 ч), в схеме выбора отправных значений для поиска частных порогов каждого индекса (исключались возможные выбросы) и в накладывании дополнительных условий на рассматриваемый порог (по порогу должна была идентифицироваться связанная область, включающая в себя как минимум пять узлов).

По результатам подбора частных пороговых значений и их обобщения было получено следующее выражение для расчета индекса WRI для холодного периода года (данный вариант получил обозначение WRI_w):

$$WRI_w = \frac{1}{5} \cdot [(DT_1 \geq 10) + (DD_{10} \geq 3) + (RH_1 \geq 70) + (CD \geq 2) + (W_1 \leq 10)]. \quad (3)$$

Для расчета индекса WRI_w используется тот же порядок, что и для всех вариантов индекса WRI, – учет суммы вкладов, но здесь вторичным является один предиктор W_1 . По сравнению с вариантом для теплого периода (2) увеличился температурный порог, значительно снизился порог на вертикальную протяженность облаков, также снизился порог на влажность воздуха и деформацию поля ветра, что вполне ожидаемо с учетом рассматриваемого периода.

Сравнительный анализ полей отобранных известных индексов (с подобранными для них региональными порогами), индекса WRI_w и бинарного поля, построенного на базе номограммы, на выборке смерчей 2017–2023 гг. показал, что известные индексы могут быть использованы для прогноза смерчеопасности в холодный период, но выделяемые на их основе зоны риска достаточно обширны (занимают большие площади). Зоны риска по индексу WRI_w в основном компактны, не сильно разбросаны по побережью и более точны по сравнению с зонами, выделяемыми по номограмме (рис. 2). Предупрежденность смерчей по номограмме за рассматриваемый период составила 68 %, по индексу WRI_w – 86 %.

Таким образом, для исследуемой акватории индекс WRI_w позволяет формировать более качественный прогноз смерчеопасности по сравнению с другими известными методами.

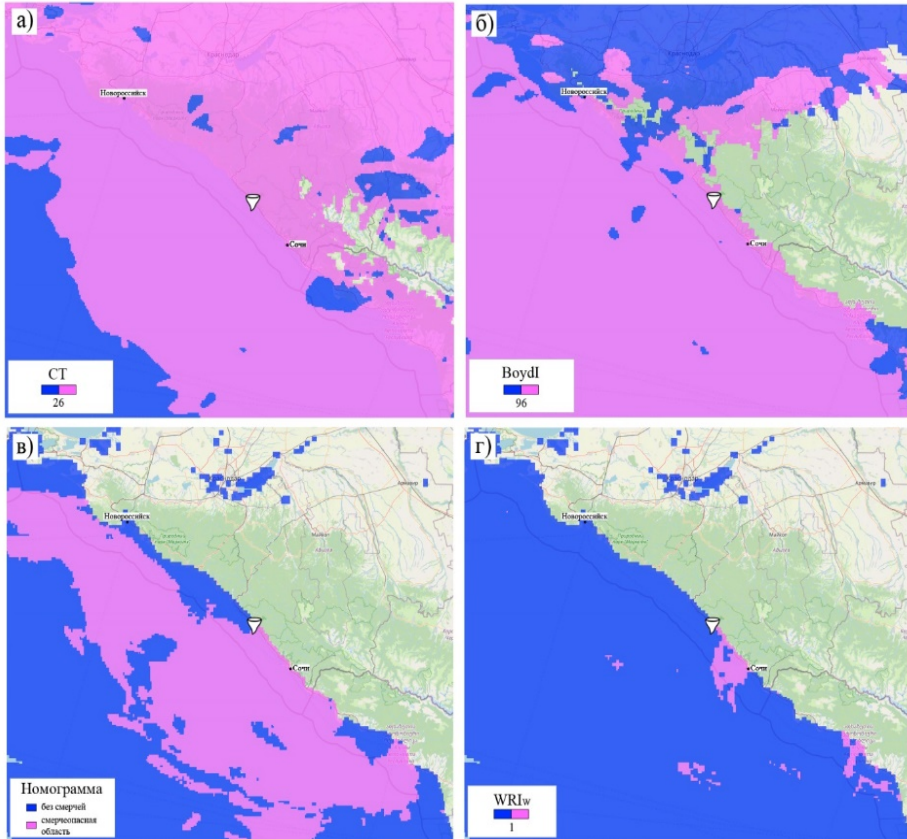


Рис. 2. Прогностические поля различных индексов на 13 ч ВСВ 13.02.2020 (прогноз от 00 ч ВСВ 12.02.2020: индекс СТ (а); индекс Boyd (Бойдена) (б); номограмма Силаги (в); индекс WRI_w (г). Розовым показаны зоны риска смерчей, пиктограммой в форме воронки отмечено место регистрации смерча вблизи п. Лазаревское).

Fig. 2. Forecast fields of various indices for 13:00 UTC 13.02.2020 (forecast from 00:00 UTC 12.02.2020): CT index (a); Boyd index (б); Szilagyi nomogram (в); WRI_w index (г). Pink shows waterspout risk zones, vortex marks the location of the waterspout observed near Lazarevskoye.

С декабря 2023 г. в составе технологии прогноза смерчеопасности был запущен блок оперативных расчетов полей индекса WRI_w . С этого же момента началось его тестирование, которое продолжилось вплоть

до конца апреля 2024 г. Для 13 из 153 дней рассматриваемого периода прогнозировалась опасность формирования смерчей. Из них 2 дня (23 декабря 2023 г. и 26 января 2024 г.) были связаны с реально отмечавшимися смерчами. Полученные предварительные результаты указывают на то, что в рамках работы рассматриваемой технологии индекс WRI_w может выступать в качестве базового метода прогноза смерчей в холодный период года.

3. Примеры прогнозов

22 июля 2024 г. на волне сформировался небольшой циклон с центром над Ростовом-на-Дону. Он перемещался к востоку, и 23 июля под влиянием холодного фронта этого циклона оказалась южная часть Черноморского побережья Краснодарского края. В Лазаревском и Центральном районах г. Сочи выпало много осадков, в море недалеко от берега сформировались смерчи. Наиболее мощный из них наблюдали в п. Дагомыс примерно в 6 ч ВСВ. На рис. 3 показан прогноз смерчеопасности, построенный по автоматизированной технологии. Зеленым обозначены зоны, в которых возникновение смерчей не ожидалось, оранжевым – зоны возможного риска смерчей, красным – зоны крайне высокого риска. Последние определяются индексом WRI_{21} , а оранжевые зоны – по номограмме.

Для удобства побережье поделено на участки, для каждого из которых выдается период действия угрозы смерчеобразования. В течение суток 23 и 24 июля на всех участках по технологии прогнозировалась опасность формирования смерчей, что находилось в согласии с выданным синоптиками во второй половине дня 22 июля штормовым предупреждением по смерчам. По выходным данным модели COSMO-Ru2 и индексу WRI_{21} угроза формирования смерчей впервые была распознана на счете от 12 ч ВСВ 21 июля.

Следует подчеркнуть, что 23 и 24 – единственные дни в июле 2024 г., когда прогноз смерчеопасности относился ко всем участкам побережья. Если рассматривать каждый участок по отдельности, то больше всего смерчеопасных дней в июле прогнозировалось по участкам г. Сочи (№1) и г. Туапсе (№2) – 11 и 8 дней соответственно, в то время как по участкам г. Геленджик – г. Новороссийск (№3) и г. Анапа (№4) – 3 и 2 дня соответственно.

Излишне прогнозируемая смерчеопасность в южной части Черноморского побережья России, по всей видимости, связана с близостью к высоким горам, здесь нередко формируются короткоживущие мезовихри, хорошо идентифицируемые по полю приземного ветра (рис. 4). Вне прохождения атмосферных фронтов они становятся источником завихренности, и при сопутствующих прогнозируемых благоприятных условиях для формирования водяных смерчей в поле индекса WRI локализуются зоны крайне высокого риска их образования.

25 января 2024 г. на оси ложбины обширного циклона с центром над Латвией в западной части Черного моря сформировался фронт окклюзии,

который впоследствии перемещался вместе с ним на юго-восток. К 26 января фронт достиг побережья Краснодарского края. В этот день вблизи п. Лермонтово Туапсинского района примерно в 11 ч ВСВ был зарегистрирован смерч.

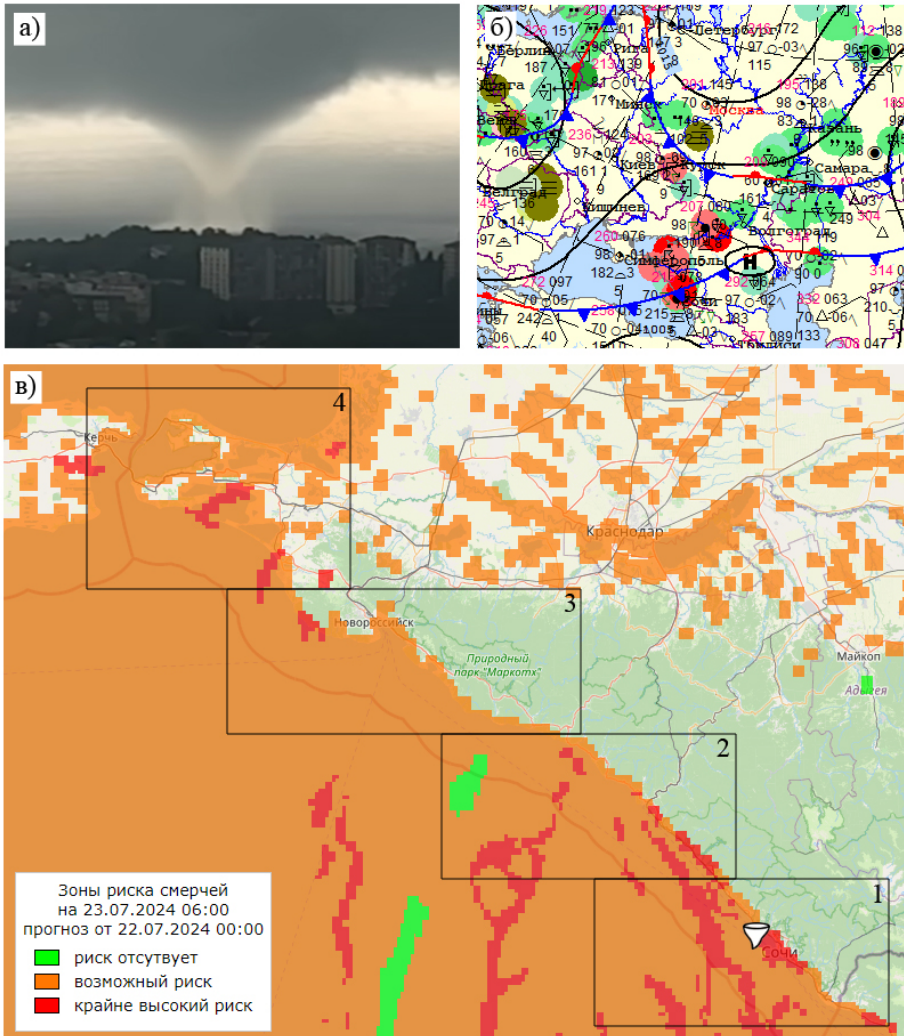


Рис. 3. Смерч вблизи п. Дагомыс 23.07.2024 (а); синоптическая карта приземного анализа Гидрометцентра России за 6 ч ВСУ 23.07.2024 (б); автоматизированный прогноз смерчеопасности для различных участков побережья (в).

Fig. 3. Waterspout near the Dagomys on July 23, 2024 (a); synoptic map of surface analysis of the Hydrometeorological Center of Russia for 6 hours UTC on July 23, 2024 (б); automated forecast of waterspout risk for various sections of the coast (в).

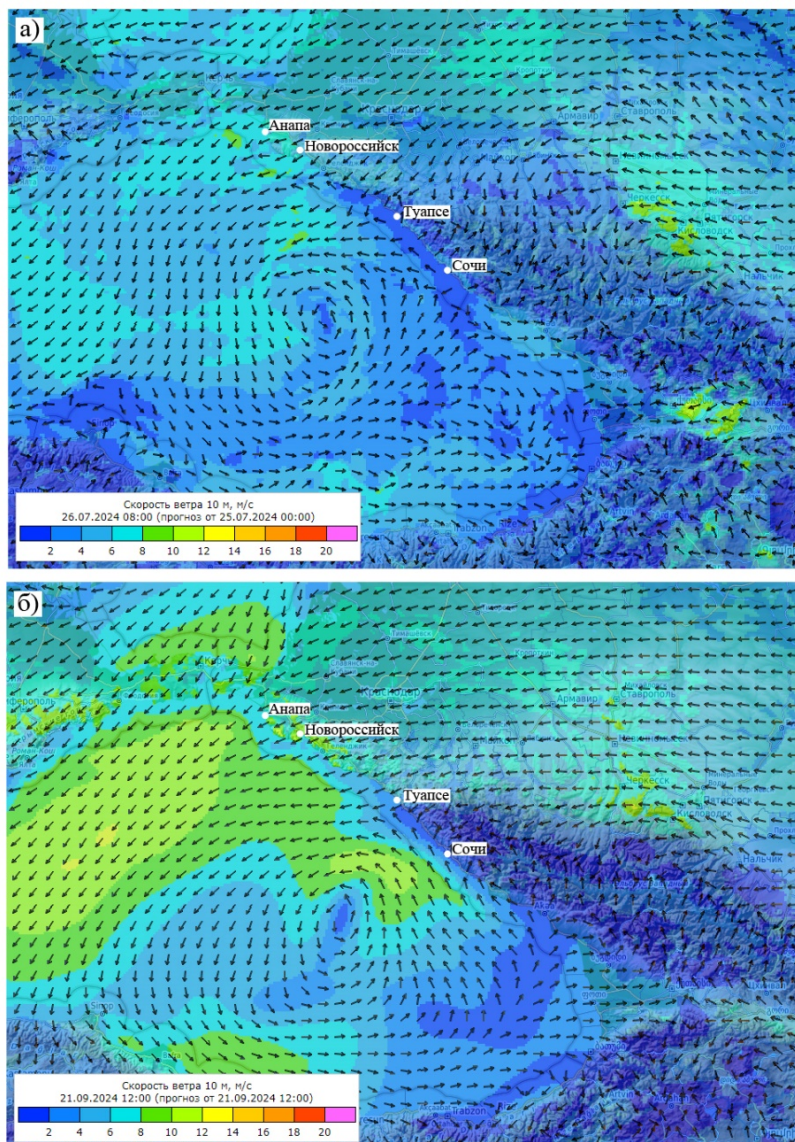


Рис. 4. Циклонические мезовихри в юго-восточной части Черного моря: 26.07.2024 (а); 21.09.2024 (б) (прогностическое поле ветра по модели COSMO-Ru2 на 10 м).

Fig. 4. Cyclonic mesovortices in the southeastern part of the Black Sea: 26.07.2024 (a); 21.09.2024 (b) (wind forecast field according to the COSMO-Ru2 model at 10 m).

В СМИ сообщалось и о еще одном менее интенсивном вихре, возникшем в утренние часы около Геленджика. На рис. 5 показаны зоны риска смерчей автоматизированного прогноза. В данном случае в прогнозе была

представлена лишь одна красная зона (по индексу WRI_w), по номограмме зоны риска не выделялись. Опасность смерчеобразования прогнозировалась на период с начала суток 26 июля до середины суток 27 июля с охватом всех участков побережья (по участку г. Сочи угроза прогнозировалась со второй половины суток 26 июля) начиная со счета по модели COSMO-Ru2 от 00 ч ВСУ 25 января 2024 года.

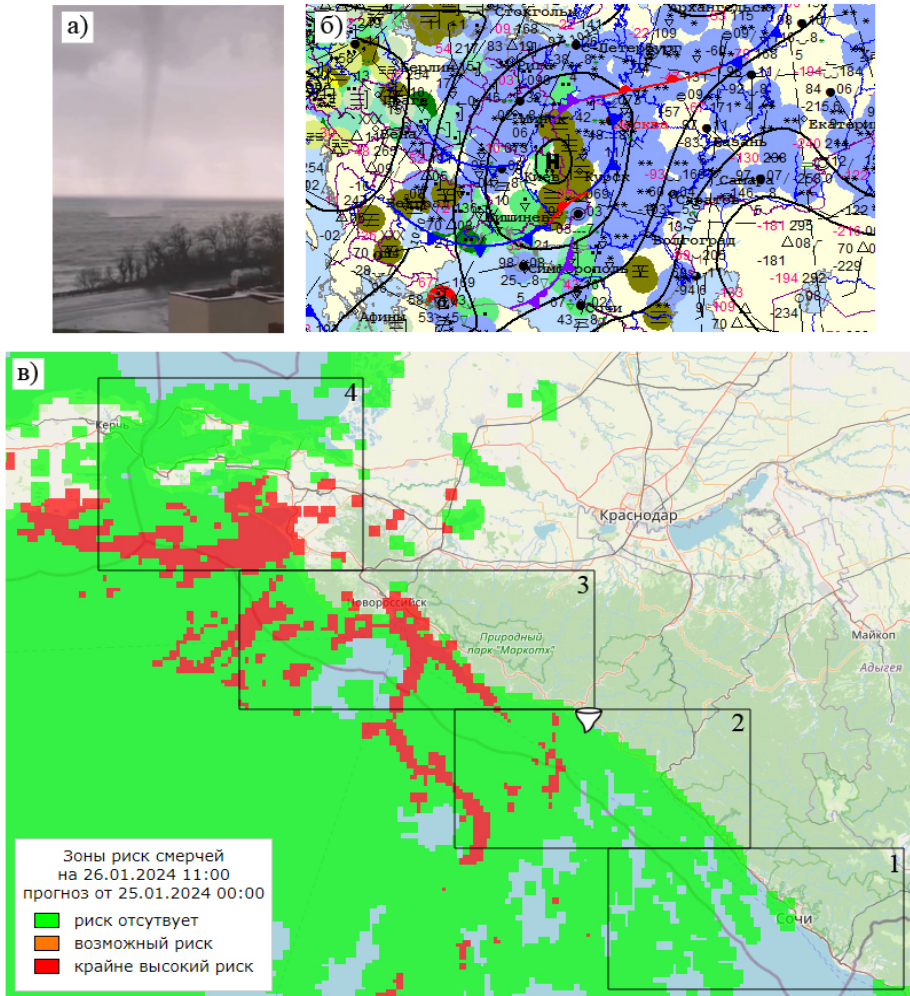


Рис. 5. Смерч вблизи п. Лермонтово 26 января 2024 г. (а); синоптическая карта приземного анализа Гидрометцентра России за 0 ч ВСУ 26.01.2024 (б); автоматизированный прогноз смерчеопасности для различных участков побережья (в).

Fig. 5. Waterspout near the Lermontovo on January 26, 2024 (a); synoptic map of surface analysis of the Hydrometeorological Center of Russia for 0 hours UTC on January 26, 2024 (б); automated forecast of waterspout risk for various sections of the coast (в).

Штормового предупреждения по смерчам на рассматриваемый день выдано не было. В январе 2024 г. отмечалось следующее распределение числа прогнозируемых смерчеопасных дней по отдельным участкам побережья: №1 – 6 дней, №2 – 4 дня, №3 и №4 – 2 дня. Как и в первом случае, смерчи возникли в период, когда угроза их формирования давалась по всем участкам побережья.

4. Рекомендации по использованию прогнозов

Как уже было упомянуто ранее, автоматизированные прогнозы смерчеопасности формируются на основе выходных данных модели COSMO-Ru2 и уточняются с каждым новым счетом по модели (каждые 12 ч в текущем режиме работы технологии). Таким образом, по каждому участку побережья выдаются и уточняются и периоды опасности формирования смерчей (при ее выявлении). По опыту работы технологии с 2017 г. в ходе ежегодного анализа результатов ее работы выработался следующий порядок учета прогнозируемых периодов с возможными смерчами.

В первую очередь нужно принять во внимание продолжительность этого периода. Если угроза дается на срок менее 3 часов, то такие периоды следует исключить из рассмотрения, поскольку они, как правило, связаны со случайными возмущениями, воспроизводимыми моделью, и не имеют отношения к смерчеопасным ситуациям, которые достаточно продолжительны по времени, поскольку в основной своей массе определяются крупномасштабными процессами.

Во-вторых, важно учесть и охват прогнозируемой зоны крайне высокого риска формирования смерчей. Если она небольшая, то, как и с периодом, скорее всего эта зона есть результат проявления случайных возмущений. В качестве рекомендации для площади зоны риска предлагается использовать порог в 25 км² (примерно 5 узлов расчетной сетки модели COSMO-Ru2) – зоны, занимающие площадь меньше или равную указанному порогу, следует исключить из рассмотрения. В действующей технологии для каждого участка побережья, помимо прогнозируемого периода опасности смерчеобразования, выдается и максимальная прогнозируемая площадь зоны крайне высокого риска формирования смерчей в течение рассматриваемого периода (табл. 3).

Наконец, в-третьих, прогнозируемые периоды по мере их уточнения (с использованием новых выходных данных модели COSMO-Ru2) должны быть согласованы во времени. Если, к примеру, на каком-то счете по модели период охватывал первую половину суток, а на последующем счете уже конец второй половины суток, то нужно дождаться результатов по следующему счету и только после этого оценивать возможные риски. Если периоды немного сдвинуты во времени, но все же имеют пересечения (3 ч и более), то имеет смысл говорить об угрозе смерчеобразования, иначе

смерчи маловероятны. Согласованность периодов прогнозируемой опасности формирования смерчей рекомендуется оценивать по результатам как минимум двух подряд идущих счетов по модели.

Таблица 3. Пример журнала смерчеопасности по различным участкам побережья на 27 июля 2024 г. (курсивом выделены записи, которые необходимо исключить из рассмотрения)

Table 3. An example of a waterspouts risk log for various coastal areas on July 27, 2024 (records that need to be excluded from consideration are highlighted in italics)

Начало счета по модели	Участок №1	Участок №2	Участок №3	Участок №4
25.07.2024 12 ч ВСВ	с 00 до 07 ч (545 км ²)	с 00 до 07 ч (355 км ²)	–	–
26.07.2024 00 ч ВСВ	с 00 до 19 ч (1190 км ²)	с 00 до 03 ч (85 км ²) с 05 до 16 ч (495 км ²)	–	–
26.07.2024 12 ч ВСВ	весь день (1455 км ²)	<i>с 00 до 01 ч (20 км²)</i> с 06 до 08 ч (85 км ²)	–	–
27.07.2024 00 ч ВСВ	весь день (1280 км ²)	с 00 до 15 ч (725 км ²)	–	–
27.07.2024 12 ч ВСВ	с 12 ч до конца дня (2005 км ²)	<i>с 13 до 17 ч (40 км²)</i> <i>с 21 ч до конца дня</i> <i>(25 км²)</i>	–	–
Итог по дню	Имеется угроза образования смерчей		Смерчи не ожидаются	

Заключение

В данной работе рассматривались вопросы повышения качества краткосрочного прогноза смерчеопасных ситуаций в прибрежной акватории Черного моря. Взамен ранее предложенного варианта расчета регионального индекса смерчеопасности WRI_{19} для теплого периода года был разработан новый усовершенствованный, адаптированный под выходные данные модели COSMO-Ru2 индекс WRI_{21} , который, как показали результаты тестирования, позволяет достичь более высокой предупредительности смерчей. По аналогии с теплым периодом был разработан индекс WRI_w и для холодного периода. Установлено, что он обеспечивает построение более качественного прогноза смерчеопасности по сравнению с прогнозом по известному методу номограммы Силагьи, который ранее применялся для рассматриваемого периода, как в плане предупредительности смерчей, так и в плане более точной локализации зон риска их образования.

Работа выполнялась в рамках плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг. по проекту 1.1.3 «Развитие и совершенствование системы нового

поколения краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru сверхвысокого разрешения (с шагами сетки до 1 км) на основе бесшовной негидростатической модели атмосферы ICON».

Список литературы

1. Гайдьшев И. Анализ и обработка данных: Специальный справочник. СПб.: Питер, 2001. 750 с.
2. Калмыкова О.В. Водяные смерчи в России и в мире: климатология и условия возникновения // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59, № 4. С. 421-436.
3. Калмыкова О.В. Использование методов машинного обучения для разработки алгоритма распознавания угроз возникновения смерчей у Черноморского побережья России // Метеорология и гидрология. 2024. № 4. С. 116-125.
4. Калмыкова О.В. Методика оценки смерчопасности вблизи Черноморского побережья России и результаты ее испытаний // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2021. Информационный сборник № 48. С. 42-61.
5. Dotzek N., Emeis S., Lefebvre C., Gerpott J. Waterspouts over the North and Baltic Seas: Observations and climatology, prediction and reporting // Meteorologische Zeitschrift. 2010. Vol. 19, no. 1. P. 115-129.
6. Ferro C.A.T., Stephenson D.B. Extremal Dependence Indices: improved verification measures for deterministic forecasts of rare binary events // Weather and Forecasting. 2011. Vol. 26, no. 5. P. 699-713.
7. Lim J.R., Liu B.F. Cry Wolf Effect? Evaluating the Impact of False Alarms on Public Responses to Tornado Alerts in the Southeastern United States // American Meteorological Society. 2019. Vol. 11. P. 549-563.
8. Sioutas M., Szilagyi W., Keul A. Waterspout outbreaks over areas of Europe and North America: Environment and predictability // Atmospheric Research. 2013. Vol. 123. P. 167-179.
9. Smith B.B. Waterspouts. <https://www.weather.gov/apx/waterspout>

References

1. Gajdyshev I. Analiz i obrabotka dannyh. Special'nyj spravochnik [Data Analysis and Processing. Special Handbook]. Saint Petersburg: Piter publ., 2001, 750 p. [in Russ.].
2. Kalmykova O.V. Waterspouts in Russia and Around the World: Climatology and Conditions of Formation. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, vol. 59, no. 4, pp. 363-377. DOI: 10.1134/s0001433823040102.
3. Kalmykova O.V. Using Machine Learning Methods to Develop an Algorithm for Recognizing a Risk of Waterspout occurrence off the Black Sea Coast of Russia. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2024, vol. 49, no. 4, pp. 363-369. DOI: 10.3103/s1068373924040101.
4. Kalmykova O.V. Metodika ocenki smercheopasnosti vblizi Chernomorskogo poberezh'ja Rossii i rezul'taty ee ispytaniy [Methodology for assessing waterspouts hazard near the Black Sea coast of Russia and the results of its tests]. *Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannyh tehnologij, modelej i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, 2021, Informacionnyj sbornik no. 48, pp. 42-61 [in Russ.].

5. Dotzek N., Emeis S., Lefebvre C., Gerpott J. Waterspouts over the North and Baltic Seas: Observations and climatology, prediction and reporting . *Meteorologische Zeitschrift*, 2010, vol. 19, no 1, pp. 115-129.

6. Ferro C.A.T., Stephenson D.B. Extremal Dependence Indices: improved verification measures for deterministic forecasts of rare binary events. *Weather and Forecasting*, 2011, vol. 26, no 5, pp. 699-713.

7. Lim J.R., Liu B.F. Cry Wolf Effect? Evaluating the Impact of False Alarms on Public Responses to Tornado Alerts in the Southeastern United States. *American Meteorological Society*, 2019, vol. 11, pp. 549-563.

8. Sioutas M., Szilagyi W., Keul A. Waterspout outbreaks over areas of Europe and North America: Environment and predictability. *Atmospheric Research*, 2013, vol. 123, pp. 167-179.

9. Smith B.B. Waterspouts. <https://www.weather.gov/apx/waterspout>

*Поступила 28.09.2024; одобрена после рецензирования 10.10.2024;
принята в печать 15.10.2024.*

*Submitted 28.09.2024; approved after reviewing 10.10.2024;
accepted for publication 15.10.2024.*