

Смерчи в условиях слабой конвективной неустойчивости атмосферы: анализ двух случаев на востоке европейской территории России

А. Н. Шихов¹, Н. А. Калинин¹, А. В. Быков¹, И. О. Ажигов¹, А. В. Шумихина²

¹ *Пермский государственный национальный исследовательский университет
Пермь, 614990, Россия
E-mail: meteo@psu.ru*

² *Микростен-МИС, Санкт-Петербург, 199004, Россия
E-mail: alla.shumikhina@microstep-mis.com*

Рассмотрены условия возникновения двух вспышек смерчей (tornado outbreaks) на востоке европейской территории России: 04.06.2018 в Кировской обл. и Удмуртии и 13.09.2018 в Пермском крае. Оценки траектории прохождения и интенсивности смерчей получены на основе сообщений очевидцев, отчётов о нанесённом ущербе и анализа ветровальных нарушений лесного покрова по данным со спутников Sentinel-2 и по снимкам сверхвысокого пространственного разрешения. По данным систем реанализа CFSv2 и ERA-5 рассчитан ряд диагностических переменных (индексов неустойчивости), характеризующих условия возникновения смерчей. Главной особенностью рассматриваемых случаев было образование значительных смерчей (категории не ниже EF2 по улучшенной шкале Фуджиты) на фоне низкой температуры воздуха в приземном слое (+15...+18 °С), слабой конвективной неустойчивости атмосферы (энергия неустойчивости CAPE менее 500 Дж/кг) и сильного сдвига ветра в слое 0–6 км (свыше 25 м/с). Общими чертами синоптического положения при возникновении смерчей было влияние глубокого циклона на максимальной стадии развития, а также совпадение вершины тёплого сектора циклона с осевой частью струйного течения в средней тропосфере. Также важно отметить высокую влажность воздуха в приземном слое, что обусловило низкий уровень конденсации. Анализ спутниковых данных SEVIRI/Meteosat-8 и данных очевидцев позволил установить, что в первом случае возникновение смерчей было связано с прохождением двух мини-суперячеек, а во втором — с линией шквалов. Температура верхней границы облаков в обоих случаях была выше –50 °С, что существенно затрудняет идентификацию мезоциклонов по спутниковым данным.

Ключевые слова: смерчи, ветровалы, данные Sentinel-2, данные Meteosat-8, данные систем реанализа ERA-5 и CFSv2, конвективная неустойчивость, сдвиг ветра

Одобрена к печати: 03.09.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-255-268

Введение

Согласно современным оценкам, в России могут возникать до 100 воздушных смерчей за год, из которых до 10 оказываются значительными, т. е. имеют интенсивность $\geq F2$ по шкале Фуджиты (Chernokulsky et al., 2020). В последние годы объём информации о случаях смерчей на территории России многократно увеличился, условия возникновения нескольких сильных смерчей были детально изучены (Дмитриева, Песков, 2016; Новицкий и др., 2016, 2018; Чернокульский и др., 2015; Шихов и др., 2018). Однако предсказуемость смерчей до сих пор остаётся низкой по причине их локального характера, а также разнообразия атмосферных условий, при которых могут возникать смерчи.

В работах ряда авторов (Brooks, 2009; Chernokulsky et al., 2019; Púčik et al., 2015; Rasmussen, Blanchard, 1998; Taszarek, Kolendowicz, 2013; Taszarek et al., 2017) условия возникновения смерчей и других конвективных опасных явлений (шквалов, сильных ливней, крупного града), анализируются на основе так называемого ингредиентного подхода. В рамках данного подхода развитие глубокой влажной конвекции в атмосфере рассматривается как функция четырёх переменных: восходящих движений, неустойчивой стратификации, влажности воздуха и сдвига ветра. При этом часто рассматриваются две диагностические переменные: доступная

потенциальная энергия неустойчивости (*англ.* Convective Available Potential Energy — CAPE) и сдвиг ветра (*англ.* wind shear) (Monteverdi, Quadros, 1994; Tazsarek, Kolendowicz, 2013; Tazsarek et al., 2017; Weisman, Klemp, 1982).

Если большинство случаев крупного града и шквалов возникает при сочетании сильной неустойчивости (CAPE > 1000 Дж/кг) и сдвига ветра в слое (*англ.* deep layer shear — DLS) 0–6 км (DLS > 20 м/с), то для смерчей зависимость от значений CAPE менее очевидна (Pucik et al., 2015). Значительная их часть формируется в условиях слабой неустойчивости (CAPE < 500 Дж/кг), но при сильном сдвиге ветра. Такие условия получили название high-shear, low-CAPE environments (Sherburn et al., 2016). В Северной Америке, а также в Западной и Центральной Европе смерчи при слабой неустойчивости и сильном сдвиге ветра часто возникают в холодный период года и считаются наиболее труднопредсказуемыми (Hanstrum et al., 2002; Sherburn et al., 2016; Tyrrrell, 2007). Анализу таких случаев уделяется значительное внимание в научной литературе, в первую очередь в США (King et al., 2017; Sherburn, Parker, 2014; Sherburn et al., 2016).

На территории Северной Евразии, согласно данным (Chernokulsky et al., 2019), в условиях слабой конвективной неустойчивости атмосферы (CAPE < 500 Дж/кг) формируется менее 10 % значительных смерчей. При этом до настоящего времени для данной территории не был подробно проанализирован ни один случай смерча, сформировавшегося при слабой неустойчивости, хотя их изучение может способствовать повышению качества прогнозирования смерчей.

В настоящей работе рассмотрены условия возникновения двух вспышек смерчей (*англ.* tornado outbreaks) в восточной части европейской территории России (ЕТР), которые сформировались при слабой конвективной неустойчивости и сравнительно низкой приземной температуре воздуха (+15...+18 °С) 04.06.2018 в Кировской обл. и Удмуртии и 13.09.2018 в Пермском крае. В обоих случаях смерчи проходили через населённые пункты и нанесли ущерб, причём опасные явления не прогнозировались региональными управлениями по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС). Оценка характеристик смерчей (траектории, длины, ширины и интенсивности) получена на основе анализа вызванных смерчами ветровалов в лесных массивах по данным со спутников Sentinel-2, а затем и по снимкам сверхвысокого разрешения с открытого сервиса Google Планета Земля (*англ.* Google Earth). Анализ условий возникновения смерчей выполнен на основе данных систем реанализа CFSv2 (Saha et al., 2010) и ERA-5 (Hersbach et al., 2020) с применением ингредиентного подхода. Мезомасштабный анализ выполнен на основе снимков Meteosat-8, а для случая 04.06.2018 получены данные доплеровского метеорологического радиолокатора (ДМРЛ), установленного в Ижевске.

Оценка характеристик рассматриваемых случаев смерчей

Смерчи 04.06.2018 в Кировской обл. и Удмуртии и 13.09.2018 в Пермском крае были первоначально зафиксированы по данным очевидцев и информации о нанесённом ущербе (см. публикации (Кокорин, Ажигов, 2018; Тетерина, 2018)). В первом случае подтверждение факта прохождения смерчей было получено непосредственно от очевидцев явления, во втором случае такого подтверждения не было. По факту получения информации был проведён анализ ближайших по датам безоблачных спутниковых снимков Sentinel-2 (до и после события). В первом случае были использованы снимки за 26.05.2018 и 17.06.2018. Во втором случае точные оценки площади ветровалов удалось получить только по снимкам зимнего сезона (23.03.2018 и 05.03.2019), хотя сами ветровалы были обнаружены уже при сравнении снимков за 04.09.2018 и 24.09.2018. Выделение смерчевых ветровалов производилось по мультитременным композитным изображениям, созданным на основе красного канала двух разновременных снимков (с пространственным разрешением 10 м).

Разделение ветровалов на смерчевые и шкваловые, а также оценка геометрических характеристик выполнены на основе методики (Shikhov, Chernokulsky, 2018). Время прохождения смерчей было определено по данным очевидцев или (при их отсутствии) по спутниковым снимкам Meteosat-8 с точностью ± 15 мин.

Таблица 1. Характеристика случаев смерчей

Время, ВСВ	Координаты (начало)	Координаты (конец)	Населённый пункт	Площадь ветровала, га / длина пути смерча, км	Максимальная / средняя ширина, м	Интенсивность по шкале Фуджита, оценка по характеру повреждений (числитель) и по длине/ширине трека (знаменатель)	Подтверждение по данным очевидцев	Подтверждение по снимкам сверхвысокого разрешения и дата съёмки	Данные для оценки интенсивности смерча
04.06.2018									
13:20	58,907° с. ш., 47,839° в. д.	58,891° с. ш., 48,141° в. д.	с. Пиксур	79,4/16,6	450/99	-/EF2	+	-	-
13:40	58,865° с. ш., 48,476° в. д.	58,890° с. ш., 48,756° в. д.		109,6/16,6	620/156	EF2/EF2	-	+	Снимки сверхвысокого разрешения
14:00	58,877° с. ш., 49,111° в. д.	58,878° с. ш., 49,145° в. д.		8,4/2,0	340/65	EF1/EF2	-	+	10.09.2018
14:05	58,862° с. ш., 49,341° в. д.	58,865° с. ш., 49,371° в. д.		13,8/1,8	230/96	EF1/EF1	-	+	10.09.2018
14:20	58,700° с. ш., 49,483° в. д.	58,701° с. ш., 49,615° в. д.	пос. Мурыгино	-/7,2	65/-	EF0/EF0	+	-	
14:30	58,734° с. ш., 49,812° в. д.	58,736° с. ш., 49,819° в. д.	дер. Сапожняга	-/0,8	35	EF0/EF1	+	-	Фото разрушений
13:40	56,623° с. ш., 51,735° в. д.	56,598° с. ш., 57,819° в. д.	дер. Ожги	2,6/2,9	80/-	EF1/EF1	+	+	16.09.2018
13.09.2018									
12:45	60,352° с. ш., 54,457° в. д.	60,372° с. ш., 54,643° в. д.		1,5/10,2	85	EF1/EF1	-	+	Снимки сверхвысокого разрешения
12:45	60,704° с. ш., 57,103° в. д.	60,712° с. ш., 57,135° в. д.		3,6/1,7	119/50	EF1/EF1	-	+	09.06.2019
13:00	60,564° с. ш., 56,070° в. д.	60,587° с. ш., 56,282° в. д.		42,8/11,5	192/77	-/EF1	-	-	09.07.2019
14:15	60,294° с. ш., 56,310° в. д.	60,305° с. ш., 56,388° в. д.		57,5/4,3	295/126	EF2/EF2	-	+	Снимки сверхвысокого разрешения
14:15	60,405° с. ш., 57,076° в. д.	60,411° с. ш., 57,116° в. д.	г. Красновишерск	8,9/2,0	236/-	EF2/EF2	-	+	29.05.2019
14:45	60,397° с. ш., 57,378° в. д.	60,398° с. ш., 57,430° в. д.		6,9/2,7	195/	EF1/EF2	-	+	09.06.2019
14:00	60,893° с. ш., 56,882° в. д.	60,908° с. ш., 57,093° в. д.		64,3/12,4	898/177	-/EF2	-	-	

Примечание: ВСВ — всемирное скоординированное время.

В течение 2019 г. большая часть территории, в пределах которой наблюдались смерчи, была покрыта данными сверхвысокого пространственного разрешения, доступными через сервис Google Earth Pro. Анализ этих снимков позволил оценить характер повреждения древостоя при прохождении смерчей и их вероятную интенсивность.



а

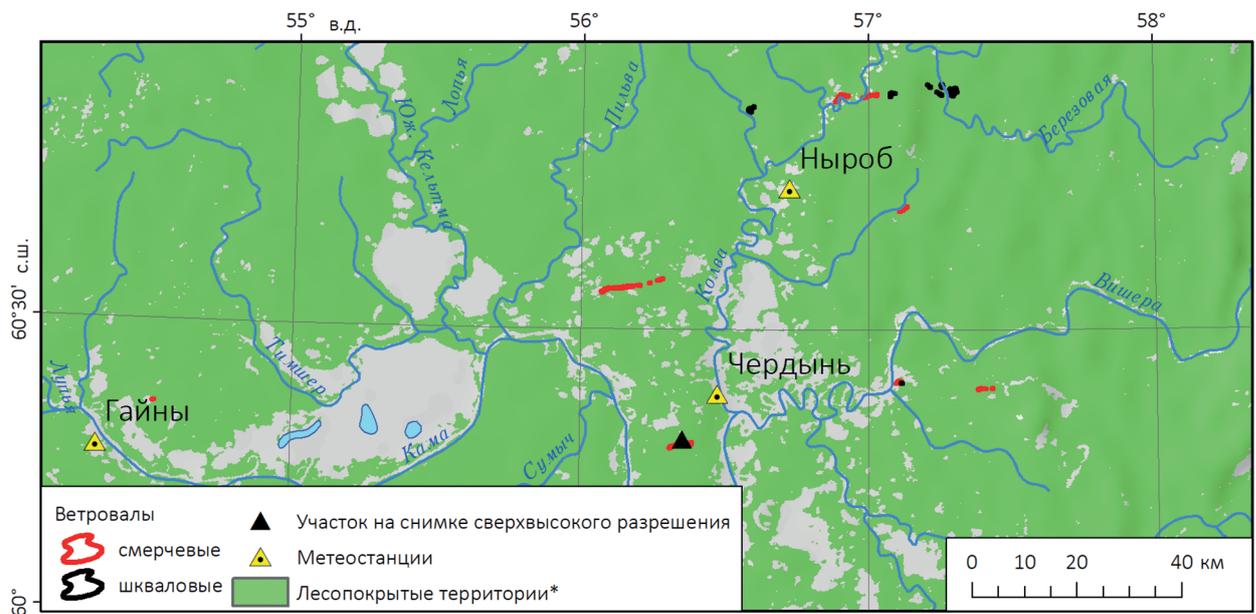


б

Рис. 1. Ветровалы, вызванные смерчами 04.06.2018 в Кировской обл. (а); фрагмент ветровала на снимке сверхвысокого разрешения за 30.08.2019 (б). Лесопокрытые территории выделены по Карте растительности России (Барталев и др., 2016)

Интенсивность смерчей определена с применением разных подходов в зависимости от имеющихся данных. При наличии фотографий разрушений или спутниковых снимков сверхвысокого разрешения оценка производилась по улучшенной шкале Фуджиты в соответствии с рекомендациями (A recommendation..., 2006). В случае если смерч нанёс ущерб как строениям, так и древостою, при определении интенсивности учитывались оба типа данных и выбиралось наибольшее из полученных значений интенсивности. Для смерчей, которые нанесли ущерб только древостою, оценивалась степень повреждения древостоя по снимкам сверхвысокого разрешения. Дополнительно использовалась методика (Godfrey, Peterson,

2017), основанная на определении процента поваленных или сломанных деревьев на участках 100×100 м. В случае если на участках сплошного ветровала площадью 100×100 м было сломано (а не повалено) более 60 % деревьев, интенсивность смерча оценивалась как не менее EF2. Если на участках ветровала 100×100 м повалено или сломано 40 % и более от всех деревьев, интенсивность смерча оценивалась как EF1, при частичном повреждении древостоя (повалены или сломаны отдельные деревья) — F0. Стоит отметить, что характерным признаком смерчей категории интенсивности EF3 и выше является сорванная с деревьев кора (A Recommendation..., 2006). Однако определить это по спутниковым данным не представляется возможным, необходимо проведение детальной аэрофотосъёмки или наземного обследования. Помимо этого, для всех смерчей была определена интенсивность на основе данных о длине и ширине трека по методике (Shikhov, Chernokulsky, 2018).



а



б

Рис. 2. Ветровалы, вызванные смерчами и шквалами 13.09.2018 в Пермском крае (а); фрагмент ветровала на снимке сверхвысокого разрешения за 09.06.2019 (б)

Всего было выявлено шесть ветровалов, относящихся к вспышке смерчей 04.06.2018 (пять — в Кировской обл. и один — в Удмуртии), на общей площади 213,8 га. Кроме того,

один смерч интенсивностью F0 не вызвал ветровалы, но прошёл через населённый пункт. В случае 13.09.2018 было выявлено девять ветровалов на общей площади 257,8 га, из которых шесть классифицированы как смерчевые (179,5 га) и три — как шкваловые (78,3 га). Характеристика выявленных случаев смерчей приведена в *табл. 1*, а их пространственное положение и фрагменты снимков сверхвысокого разрешения показаны на *рис. 1, 2* (см. с. 258, 259).

Синоптические и аэрологические условия возникновения смерчей

Синоптическое положение 04.06.2018

Смерчи 4 июня 2018 г. сформировались в тёплом секторе циклона с центром над юго-восточной частью Архангельской обл. (давление в центре — 983 гПа). Циклон, с которым было связано образование смерчей, сформировался в ночь на 3 июня над Норвежским морем и смещался по потоку на юго-восток вдоль высотной фронтальной зоны (ВФЗ), которая была ориентирована со Скандинавии через Прибалтику на центр ЕТР. Днём 4 июня он находился на стадии максимального развития. В тёплом секторе циклона с западными потоками распространялась воздушная масса с температурой на изобарической поверхности $AT_{850} +8...+10$ °С и умеренным влагосодержанием (около 20 мм). По причине значительной облачности дневной прогрев воздуха был ограничен. В последний срок перед возникновением смерчей (12:00 ВСВ 4 июня 2018 г.) температура воздуха на ближайшей метеостанции Даровской составляла +15,7 °С, а дефицит точки росы — 3,8 °С.

По данным аэрологического зондирования на станции 27199 (по индексу Всемирной метеорологической организации, Киров), в 12:00 ВСВ 4 июня 2018 г. воздушная масса была устойчивой (энергия неустойчивости CAPE была равна нулю). При этом наблюдался упорядоченный сдвиг ветра — плавный рост скорости ветра с высотой, сопровождающийся изменением его направления от 225° в приземном слое до 290° на изобарической поверхности 300 гПа. Сумма скоростей ветра на изобарических поверхностях 850, 700 и 500 гПа составляла 51,5 м/с. Такое распределение направления и скорости ветра с высотой было весьма благоприятным для возникновения мезоциклонов.

Синоптическое положение 13.09.2018

Циклон, с которым было связано возникновение смерчей, сформировался в ночь на 12 сентября над Норвегией. В последующие сутки он интенсивно углублялся и смещался по потоку в район Белого моря. К 00:00 ВСВ 13 сентября циклон стал высоким барическим образованием. В течение суток 13 сентября он переместился на северо-восток Республики Коми, оставаясь на стадии максимального развития с давлением в центре 982 гПа.

Циклон имел две фронтальные системы. Холодный фронт полярной системы проходил через центральные районы Пермского края, Удмуртию и Татарстан и располагался в параллельных потоках. В зоне фронта наблюдались ливневые осадки, в отдельных районах — грозы, однако сильных шквалов и смерчей не отмечалось. Северные районы Пермского края находились за полярным фронтом. В период с 13:00 по 15:00 ВСВ через данную территорию переместился вторичный холодный фронт с незначительным температурным контрастом (около 3 °С на 850 гПа), с которым и было связано возникновение смерчей. Перед прохождением вторичного фронта (в 12:00 ВСВ) на ближайших к месту возникновения смерчей метеостанциях Чердынь и Ныроб температура воздуха составляла соответственно +14,0 и +15,6 °С, а дефицит точки росы — 1,9 и 5,7 °С.

В средней тропосфере над ЕТР с запада на восток пролегла ВФЗ и струйное течение. По данным реанализа ERA-Interim, наибольшие скорости ветра на изобарической поверхности 300 гПа (55–60 м/с) отмечались по линии Ярославль—Киров—Березники. По данным радиозондирования на станции 28225 (Пермь), в 12:00 ВСВ 13.09.2018 наблюдался рост ско-

рости ветра с высотой при изменении его направления от 225° в приземном слое до 265–270° выше изобарической поверхности 600 гПа. Сумма скоростей ветра на изобарических поверхностях 850, 700 и 500 гПа составляла 85 м/с, что для тёплого периода является экстремально высоким значением. При этом, как и в первом случае, энергия неустойчивости была равна нулю.

Диагностические переменные

Для анализа вертикальных профилей атмосферы в срок, ближайший к возникновению смерчей, были рассчитаны диагностические переменные (индексы неустойчивости) на основе данных реанализов CFSv2 и ERA-5. В табл. 2 приведены максимальные значения индексов, вычисленные в радиусе 200 км от мест возникновения наиболее интенсивных смерчей 04.06.2018 и 13.09.2018. Радиус 200 км использован, чтобы учесть возможные неточности в данных реанализов, в частности смещение фронтальных зон относительно их фактического положения. Формулы для расчёта индексов приведены в работах (Doswell, Schultz, 2006; Gracier, 2020).

Таблица 2. Значения индексов неустойчивости при возникновении смерчей 04.06.2018 и 13.09.2018

Индексы	Значения индексов (в числителе — по данным CFSv2, в знаменателе — по данным ERA-5)		Медианное значение для случаев значительных смерчей ($\geq F2$) в Северной Евразии
	04.06.2018, 14:00 ВСВ	13.09.2018, 14:00 ВСВ	
Доступная потенциальная энергия неустойчивости (Surface based Convective Available Potential Energy), Дж/кг	436/460	272/221	1516
3-D-индекс (Dewpoint, Dewpoint Depression Index), °C	12,5/10,8	10,8/12,5	16,9
Общее влагосодержание атмосферы (Total Precipitable water), мм	25,1/24,1	19,2/24,6	
Сдвиг ветра в слое 0–1 км (900 гПа) (Low-Layer Shear, LLS), мм	10,9/12,0	17,1/17,5	11,7
Сдвиг ветра в слое 0–3 км (700 гПа) (Mean-Layer Shear, MLS), мм	18,8/17,9	24,5/29,6	20,3
Сдвиг ветра в слое 0–6 км (500 гПа) (Deep-Layer Shear, DLS), м/с	31,5/27,3	45,0/43,7	25,5
Относительная завихренность шторма в слое 0–3 км (0–3 km Storm-Relative Helicity), m^2/c^2	199/268	154/279	
Индекс Вайтинга (K Index), °C	29,0/28,8	30,8/31,3	36,3
Индекс угрозы опасной погоды (Severe Weather Threat, SWEAT), °C	170/259	331/386	291
WMAXSHEAR (безразмерный)	930/830	1050/920	1001
Индекс энергии и завихренности (Energy-helicity Index, EHI), m^2/c^2	0,47/0,60	0,23/0,20	

Общими чертами синоптического положения при возникновении смерчей 04.06.2018 и 13.09.2018 было влияние глубокого циклона, находящегося на стадии максимального развития, а также совпадение вершины приземного тёплого сектора циклона с осевой частью струйного течения в средней и верхней тропосфере. В обоих случаях наблюдался вертикальный сдвиг ветра — рост скорости ветра с высотой с изменением его направления по часовой стрелке. Также важно отметить высокую влажность воздуха в приземном слое, что обусловило низкий уровень конденсации.

Сравнивая приведённые в *табл. 2* результаты расчёта индексов неустойчивости для 04.06.2018 и 13.09.2018 с медианными значениями при возникновении значительных смерчей в Северной Евразии (Chernokulsky et al., 2019), можно отметить очень низкое значение CAPE (в несколько раз ниже медианного), а также индекса Вайтинга. Таким образом, обе вспышки смерчей сформировались на фоне слабой конвективной неустойчивости, но при сильном сдвиге ветра. Значения параметра DLS оказались существенно выше медианных, а параметры MLS и LLS были близки к медианным в первом случае и существенно выше их во втором. В обоих случаях DLS был существенно выше, чем MLS, что отражает рост скорости ветра с высотой в средней тропосфере. Комплексные параметры, учитывающие как термодинамическую неустойчивость, так и сдвиг ветра (SWEAT, WMAXSHEAR), имели значения, близкие к медианному (13.09.2018 индекс SWEAT был существенно выше по причине экстремально высокой скорости ветра в средней тропосфере).

Мезомасштабные условия возникновения смерчей

Для мезомасштабного анализа использованы данные прибора SEVIRI, установленного на спутнике Meteosat-8. Данные в канале высокого разрешения (*англ.* High Resolution Visible — HRV), а также в инфракрасном (ИК) канале с длиной волны 10,8 мкм (IR10.8) получены с сервера Европейской организации по обслуживанию метеорологических спутников (Eumetsat Earth Observation Portal, <https://eoportal.eumetsat.int/userMgmt/login.faces>). Их обработка включала конвертацию в формат Geotiff, извлечение по границам заданной области, расчёт яркостной температуры и альбедо средствами пакета MSGDataRetriever и создание синтезированных изображений. Далее снимки использовались для идентификации мезоциклонов и определения времени прохождения смерчей.

Идентификация мезоциклонов, вызывающих смерчи в условиях слабой конвективной неустойчивости атмосферы, весьма затруднительна, поскольку восходящие потоки недостаточно интенсивны, чтобы сформировать характерные сигнатуры (пробой тропопаузы, кольцевые и U/V-образные структуры) на верхней границе облаков (Шихов и др., 2019; Vedka, 2011). Выявить по снимку мезоциклон в таких условиях возможно только по характерной каплевидной форме облака.

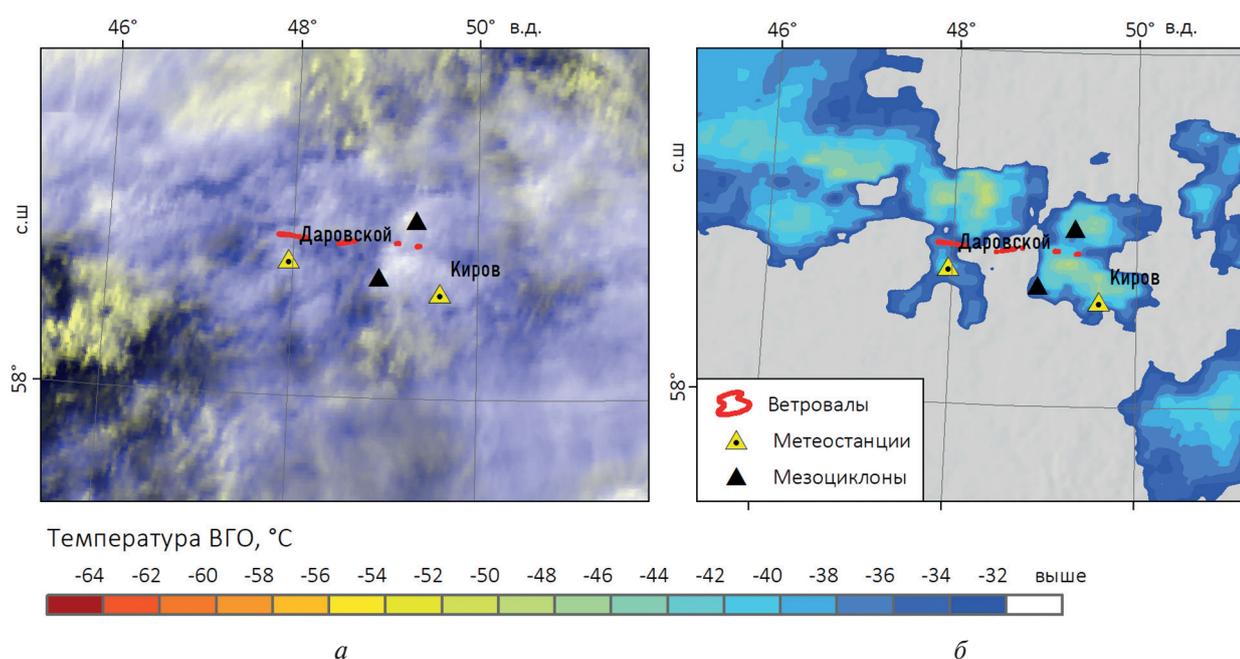


Рис. 3. Две суперячейки над Кировской обл. на снимке Meteosat-8 за 14:00 ВСВ 4 июня 2018 г. в синтезе HRV-HRV-IR (а) и $T_{\text{ВГО}}$ (б)

В первом случае, согласно фотографиям и видеозаписям очевидцев (Кокорин, Ажигов, 2018), смерчи были связаны с прохождением двух мини-суперячеек (*англ.* mini supercell). Главными их отличиями об обычных суперячеек стали небольшой размер и низкая высота верхней границы облаков (Mini..., 2020). В данном случае суперячейки имели диаметр около 10 км и температуру верхней границы облаков ($T_{ВГО}$) до -47°C , что соответствует высоте ВГО менее 10 км. Они смещались параллельно друг другу на расстоянии около 35 км. Смерчи, вызвавшие ветровалы, были связаны с суперячейкой, которая смещалась по более северной траектории. При этом ближайшие метеостанции Даровской и Киров не зафиксировали каких-либо опасных явлений погоды и даже гроз (*рис. 3*, см. с. 262).

Одновременно более развитая линия неустойчивости проходила через территорию Удмуртии; с ней был связан ещё один смерч, наблюдавшийся в д. Ожги (см. *табл. 1*). В северной части данной линии неустойчивости около 12:30 ВСВ сформировалась дугообразная конвективная система (*англ.* bow-echo), развитие которой было зафиксировано по данным ДМРЛ Ижевск (*рис. 4*). Скорость перемещения bow-echo составляла 60–68 км/ч. Мезоциклон сформировался в её северной части и существовал приблизительно с 13:30 до 14:00 ВСВ, что подтверждается данными измерений радиальной скорости. С прохождением этой дугообразной системы был связан также град диаметром 10 мм, гроза и сильный ливневый дождь (19 мм) на метеостанции Можга.

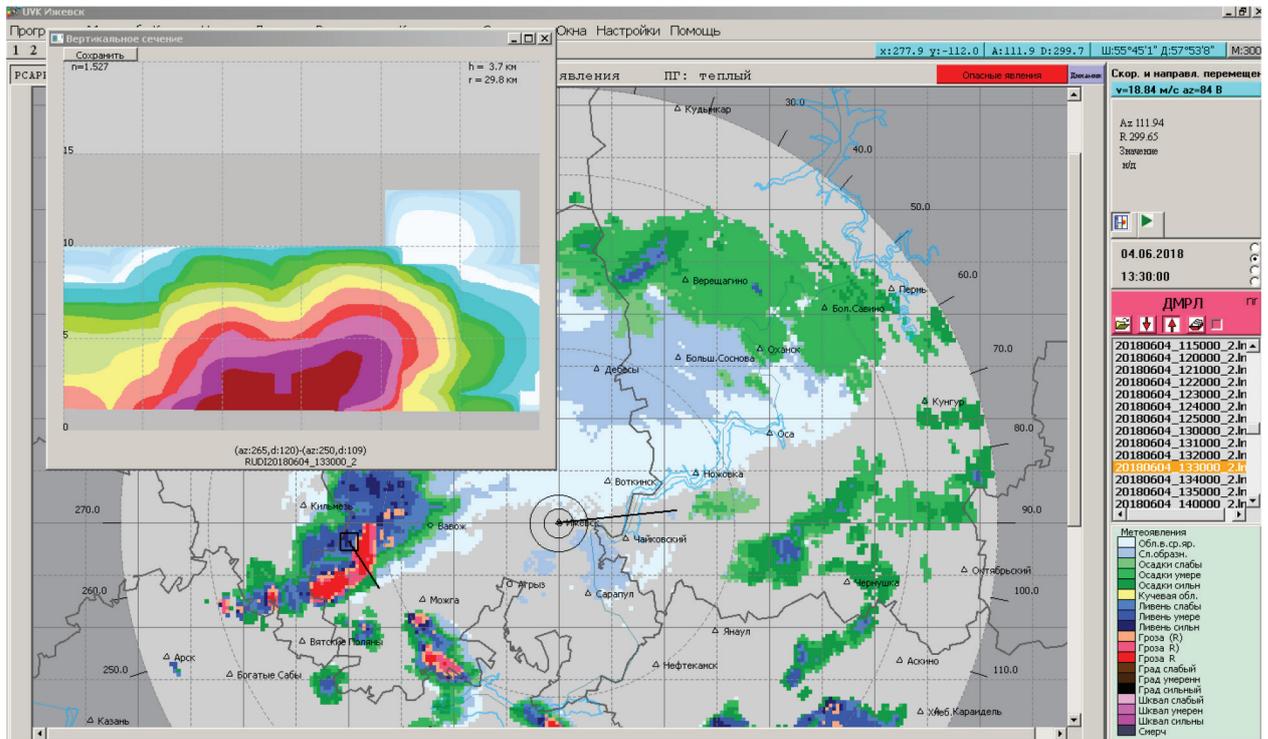


Рис. 4. Карта метеоявлений и разрез отражаемости в дугообразной конвективной системе 04.06.2018, 13:30 ВСВ (в момент формирования смерча у д. Ожги)

В случае 13.09.2018 на вторичном холодном фронте (на *рис. 5* — ХФ, см. с. 264), который проходил через северные районы края в период между 12:30 и 14:30 ВСВ, сформировалась квазилинейная система кучево-дождевых облаков (линия шквалов) с включёнными в неё мезоциклонами. Ветровалы, вызванные шквалами и смерчами, расположены в виде трёх параллельных линий (см. *рис. 2*). Это указывает, что они были связаны как минимум с тремя разными мезоциклонами, которые перемещались параллельно друг другу. При этом $T_{ВГО}$ над мезоциклоном, который смещался по самой южной траектории (через г. Красновишерск), составляла всего -38°C , что соответствует высоте ВГО 8,5 км. Широкая часть вершины облака была смещена на 50–100 км относительно его основания за счёт струйного течения со

скоростью ветра свыше 50 м/с в верхней части тропосферы (см. рис. 5). Интересно отметить, что на полярном холодном фронте сформировалась более мощная облачная система, однако смерчи зафиксированы не были и отмечались лишь шквалы до 22 м/с.

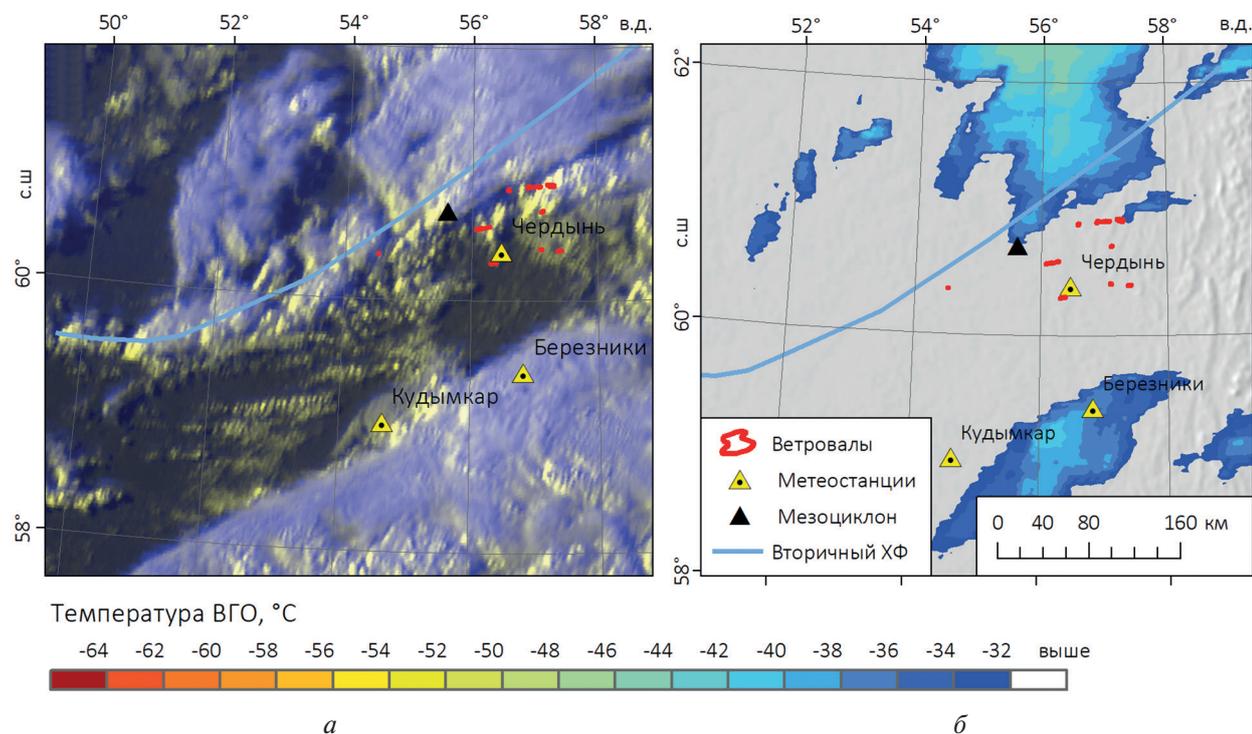


Рис. 5. Вторичный холодный фронт (ХФ) над севером Пермского края на снимке Meteosat-8 за 13:00 ВСУ 13 сентября 2018 г. в синтезе HRV-HRV-IR (а) и $T_{ВГО}$ (б)

Заключение

Рассмотренные случаи возникновения смерчей при слабой конвективной неустойчивости в июне и сентябре 2018 г., по всей видимости, представляют собой редкое, но не уникальное явление для территории России. Наибольшая доля таких случаев может наблюдаться в мае и сентябре, что обусловлено сезонной изменчивостью условий для развития глубокой конвекции (Chernokulsky et al., 2020). Возникновение смерчей при слабой конвективной неустойчивости сложно как прогнозировать, так и идентифицировать по спутниковым данным Meteosat, поскольку генерирующие смерчи мезоциклоны имеют небольшой диаметр и плохо выделяются по температуре ВГО. Надёжное обнаружение смерча возможно лишь по данным доплеровского радиолокатора.

На основе проведённого анализа выявлены следующие особенности, характерные для обеих вспышек смерчей, которые могут учитываться при прогнозе подобных явлений:

- совпадение тёплого сектора циклона вблизи точки окклюзии с высотной фронтальной зоной;
- вертикальный сдвиг ветра и изменение его направления с высотой по часовой стрелке, высокая скорость ветра в средней тропосфере (свыше 25 м/с);
- низкий дефицит влажности в приземном слое атмосферы (не более 5°), что обуславливает низкий уровень конденсации.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-05-00046-а (сбор и анализ данных о смерчах) и гранта Российского научного фонда № 18-77-10076 (работа с данными реанализа).

Литература

1. *Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
2. *Дмитриева Т. Г., Песков Б. Е.* Синоптические условия, наукастинг и модельные прогнозы сильных шквалов и смерчей в Башкирии 1 июня 2007 г. и 29 августа 2014 г. // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 10. С. 16–29.
3. *Кокорин А., Ажигов И.* Вспышка торнадо 4 июня 2018 в Кировской области // *ВКонтакте*. 17.07.2018. URL: <https://vk.com/@meteokirov-vspyshka-tornado-4-iunya-2018-v-kirovskoi-oblasti>.
4. *Новицкий М. А., Павлюков Ю. Б., Шмерлин Б. Я., Махнорылова С. В., Серебрянник Н. И., Петриченко С. А., Тереб Л. А., Калмыкова О. В.* Башкирский смерч: возможности анализа и прогноза смерчеопасной ситуации // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 10. С. 30–40.
5. *Новицкий М. А., Шмерлин Б. Я., Петриченко С. А., Тереб Л. А., Калмыкова О. В.* О совместном расчете полей вертикальной скорости и конвективных индексов в модели WRF для анализа и прогноза смерчеопасных ситуаций // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 9. С. 14–26.
6. *Тетерина А.* В Красновишерске ураганный ветер сорвал крыши с домов и повалил деревья // *59.ru*. 14.09.2018. URL: <https://59.ru/text/incidents/65387311/>.
7. *Чернокульский А. В., Курганский М. В., Захарченко Д. И., Мохов И. И.* Условия формирования и характеристики сильного смерча на Южном Урале 29 августа 2014 г. // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 12. С. 29–38.
8. *Шихов А. Н., Ажигов И. О., Быков А. В.* Смерчи и шквалы на Урале в июне 2017 года: анализ по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 1. С. 272–281.
9. *Шихов А. Н., Чернокульский А. В., Спрыгин А. А., Ажигов И. О.* Идентификация мезомасштабных конвективных облачных систем со смерчами по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 1. С. 223–236.
10. A recommendation for an Enhanced Fujita Scale (EF-Scale). Submitted to The National Weather Service and Other Interested Users. Revision 2 / Wind Science and Engineering Center. Texas Tech University. Lubbock, Texas, 2006. 111 p.
11. *Bedka K. M.* Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI infrared brightness temperatures and their relationship to severe weather over Europe // *Atmospheric Research*. 2011. V. 99(2). P. 175–189.
12. *Brooks H. E.* Proximity soundings for severe convection for Europe and the United States from reanalysis data // *Atmospheric Research*. 2009. V. 93. P. 546–553.
13. *Chernokulsky A. V., Kurgansky M. V., Mokhov I. I.* On characteristic reanalysis-based values of convective instability indices for Northern Eurasia tornadoes // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 231. Art. No. 012012.
14. *Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., Shikhov A., Azhigov I., Selezneva E., Zakharchenko D., Antonescu B., Kühne T.* Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era // *Monthly Weather Review*. 2020. V. 148. P. 3081–3111.
15. *Doswell C. A. III, Schultz D. M.* On the use of indices and parameters in forecasting severe storms // *Electronic J. Severe Storms Meteorology*. 2006. V. 1. P. 1–22.
16. *Godfrey K. M., Peterson C. J.* Estimating Enhanced Fujita Scale Levels Based on Forest Damage Severity // *Weather and Forecasting*. 2017. V. 32. P. 243–252.
17. *Gracier J.* Convection parameters. 2012. 22 p. URL: <http://www.juergen-grieser.de/ConvectionParameters/ConvectionParameters.pdf> (accessed: 05.05.2020).
18. *Hanstrum B. N., Mills G. A., Watson A., Monteverdi J. P., Doswell C. A. III.* The cool-season tornadoes of California and southern Australia // *Weather and Forecasting*. 2002. V. 17. P. 705–722.
19. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N.* The ERA5 global reanalysis // *Quarterly J. Royal Meteorological Society*. 2020. V. 146. Iss. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
20. *King J. R., Parker M. D., Sherburn K. D., Lackmann G. M.* Rapid Evolution of Cool Season, Low-CAPE Severe Thunderstorm Environments // *Weather and Forecasting*. 2017. V. 32. P. 763–779.
21. Mini Supercell Thunderstorms // National Weather Service. 2020. URL: https://www.weather.gov/lmk/mini_supercell (assessed 05.05.2020).
22. *Monteverdi J. P., Quadros J.* Convective and rotational parameters associated with three tornado episodes in northern and Central California // *Weather and Forecasting*. 1994. V. 9 P. 285–300.

23. Púčik T., Groenemeijer P., Rýva D., Kolář M. Proximity soundings of severe and nonsevere thunderstorms in central Europe // *Monthly Weather Review*. 2015. V. 143(12). P. 4805–4821.
24. Rasmussen E. N., Blanchard D. O. A Baseline Climatology of Sounding-Derived Supercell and Tornado Forecast Parameters // *Weather and Forecasting*. 1998. V. 13. P. 1148–1164.
25. Saha S., Moorthi S., Pan H.-L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y.-T., Chuangd S., Van Den Dool H., Kumar A., Wang W., Long C., Chelliah M., Xue Y., Huang B., Schemm J.-K., Ebisuzaki W., Lin R., Xie P., Chen M., Zhou S., Higgins W., Zou C.-Z., Liu Q., Chen Y., Han Y., Cucurull L., Reynolds R. W., Rutledge G., Goldberg M. The NCEP climate forecast system reanalysis // *Bull. American Meteorological Society*. 2010. V. 91(8). P. 1015–1057.
26. Sherburn K. D., Parker M. D. Climatology and ingredients of significant severe convection in high-shear, low-CAPE environments // *Weather and Forecasting*. 2014. V. 29. P. 854–877.
27. Sherburn K. D., Parker M. D., King J. R., Lackmann G. M. Composite environments of severe and nonsevere high-shear, low-CAPE convective events // *Weather and Forecasting*. 2016. V. 31(6). P. 1899–1927.
28. Shikhov A. N., Chernokulsky A. V. A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 204. P. 553–567.
29. Taszarek M., Kolendowicz L. Sounding-derived parameters associated with tornado occurrence in Poland and Universal Tornadoic Index // *Atmospheric Research*. 2013. V. 134. P. 186–197.
30. Taszarek M., Brooks H. E., Czernecki B. Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe // *Monthly Weather Review*. 2017. V. 145. P. 1511–1528.
31. Tyrrell J. Winter tornadoes in Ireland: The case of the Athlone tornado of 12 January 2004 // *Atmospheric Research*. 2007. V. 83. P. 242–253.
32. Weisman M. L., Klemp J. B. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy // *Monthly Weather Review*. 1982. V. 110. P. 504–520.

Tornadoes in the environments of weak convective instability: analysis of two cases in the eastern part of the European Russia

A. N. Shikhov¹, N. A. Kalinin¹, A. V. Bykov¹, I. O. Azhigov¹, A. V. Shumikhina²

¹ Perm State University, Perm 614990, Russia
E-mail: meteo@psu.ru

² MicroStep-MIS, Saint Petersburg 199004, Russia
E-mail: alla.shumikhina@microstep-mis.com

The paper describes the environments of formation of two tornado outbreaks that occurred June 4, 2018, and September 13, 2018, in the eastern part of the European Russia (Perm Region, Kirov Region and Udmurt Republic). Tornado paths and intensity were estimated on the basis of eyewitness observations, damage reports and analysis of tornado-induced windthrows from Sentinel-2 satellite data and high-resolution images. Diagnostic variables (instability indices) characterizing the environments of tornado occurrence were calculated based on CFSv2 and ERA-5 reanalysis data. The main feature of both investigated outbreaks was formation of significant tornadoes (EF2 intensity by the enhanced Fujita scale) in conditions of low air temperature in the surface layer (+15...+18 °C), weak convective instability (CAPE < 500 J/kg) and strong deep-layer wind shear (over 25 m/s). Both outbreaks formed under the influence of a deep surface low which was at a maximum development stage. The warm sector overlapped with the axial part of a jet stream in the middle troposphere. The high air humidity in the surface layer caused a low condensation level. An analysis of satellite data from SEVIRI/Meteosat-8 combined with eye-witness reports showed that the tornado outbreak of June 4, 2018, was generated by two mini-supercells, and the outbreak of September 13, 2018, was associated with a squall line with embedded mesocyclones. The cloud top temperature was >–50 °C in both cases which significantly complicates the identification of mesocyclones with satellite data.

Keywords: tornadoes, windthrows, Sentinel-2 images, Meteosat-8 data, ERA-5 and CFSv2 reanalysis data, convective instability, wind shear

Accepted: 03.09.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-255-268

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Satellite-based mapping of the vegetation cover of Russia), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
2. Dmitrieva T. G., Peskov B. E., Synoptic conditions, nowcasting, and numerical prediction of severe squalls and tornados in Bashkortostan on June 1, 2007 and August 29, 2014, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, Vol. 41(10), pp. 673–682.
3. Kokorin A., Azhigov I., Vspyshka tornado 4 iyunya 2018 v Kirovskoi oblasti (Tornado outbreak on June 4, 2018 in the Kirov region), *VKontakte*, 17.07.2018.
4. Novitskii M. A., Pavlyukov Yu. B., Shmerlin B. Ya., Makhnorylova S. V., Serebryannik N. I., Petrichenko S. A., Tereb L. A., Kalmykova O. V., The tornado in Bashkortostan: the potential of analyzing and forecasting tornado-risk conditions, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, Vol. 41(10), pp. 683–690.
5. Novitskii M. A., Shmerlin B. Ya., Petrichenko S. A., Tereb L. A., Kalmykova O. V., Joint Calculation of Vertical Velocity and Convective Indices in the WRF Model for the Analysis and Forecasting of Tornado-risk Situations, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2018, Vol. 43(9), pp. 565–573.
6. Teterina A., V Krasnovisherske uragannyi veter sorval kryshi s domov i povalil derev'ya (In Krasnovishersk, a hurricane wind blew off roofs from houses and knocked down trees), *59.ru*, 14.09.2018.
7. Chernokulsky A. V., Kurgansky M. V., Zakharchenko D. I., Mokhov I. I., Genesis Environments and Characteristics of the Severe Tornado in the South Urals on August 29, 2014, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, Vol. 40(12), pp. 794–799.
8. Shikhov A. N., Azhigov I. O., Bykov A. V., Smerchi i shkvaly na Urale v iyune 2017 goda: analiz po sputnikovym dannym (A satellite-based analysis of squalls and tornadoes in the Urals region in June 2017), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 272–281.
9. Shikhov A. N., Chernokulsky A. V., Sprygin A. A., Azhigov I. O., Identifikatsiya mezomashtabnykh konvektivnykh oblachnykh sistem so smerchami po sputnikovym dannym (Identification of mesoscale convective cloud systems with tornadoes using satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 223–236.
10. *A recommendation for an Enhanced Fujita Scale (EF-Scale)*, Submitted to The National Weather Service and Other Interested Users, Revision 2, Wind Science and Engineering Center, Texas Tech University, Lubbock, Texas, 2006, 111 p.
11. Bedka K. M., Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI infrared brightness temperatures and their relationship to severe weather over Europe, *Atmospheric Research*, 2011, Vol. 99(2), pp. 175–189.
12. Brooks H. E., Proximity soundings for severe convection for Europe and the United States from reanalysis data, *Atmospheric Research*, 2009, Vol. 93, pp. 546–553.
13. Chernokulsky A. V., Kurgansky M. V., Mokhov I. I., On characteristic reanalysis-based values of convective instability indices for Northern Eurasia tornadoes, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, Vol. 231, Art. No. 012012.
14. Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., Shikhov A., Azhigov I., Selezneva E., Zakharchenko D., Antonescu B., Kühne T., Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era, *Monthly Weather Review*, 2020, Vol. 148, pp. 3081–3111.
15. Doswell C. A. III., Schultz D. M., On the use of indices and parameters in forecasting severe storms, *Electronic J. Severe Storms Meteorology*, 2006, Vol. 1, pp. 1–22.
16. Godfrey K. M., Peterson C. J., Estimating Enhanced Fujita Scale Levels Based on Forest Damage Severity, *Weather and Forecasting*, 2017, Vol. 32, pp. 243–252.
17. Gracier J., *Convection parameters*, 2012, 22 p., available at: <http://www.juergengrieser.de/ConvectionParameters/ConvectionParameters.pdf> (accessed: 05.05.2020).
18. Hanstrum B. N., Mills G. A., Watson A., Monteverdi J. P., Doswell C. A. III., The cool-season tornadoes of California and southern Australia, *Weather and Forecasting*, 2002, Vol. 17, pp. 705–722.
19. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N., The ERA5 global reanalysis, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2020, Vol. 146, Issue 730, pp. 1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
20. King J. R., Parker M. D., Sherburn K. D., Lackmann G. M., Rapid Evolution of Cool Season, Low-CAPE Severe Thunderstorm Environments, *Weather and Forecasting*, 2017, Vol. 32, pp. 763–779.
21. Mini Supercell Thunderstorms, *National Weather Service*, 2020, available at: https://www.weather.gov/lmk/mini_supercell (assessed 05.05.2020).

22. Monteverdi J. P., Quadros J., Convective and rotational parameters associated with three tornado episodes in northern and Central California, *Weather and Forecasting*, 1994, Vol. 9, pp. 285–300.
23. Púčik T., Groenemeijer P., Rýva D., Kolář M., Proximity soundings of severe and nonsevere thunderstorms in central Europe, *Monthly Weather Review*, 2015, Vol. 143(12), pp. 4805–4821.
24. Rasmussen E. N., Blanchard D. O., A Baseline Climatology of Sounding-Derived Supercell and Tornado Forecast Parameters, *Weather and Forecasting*, 1998, Vol. 13, pp. 1148–1164.
25. Saha S., Moorthi S., Pan H.-L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y.-T., Chuang D. S., Van Den Dool H., Kumar A., Wang W., Long C., Chelliah M., Xue Y., Huang B., Schemm J.-K., Ebisuzaki W., Lin R., Xie P., Chen M., Zhou S., Higgins W., Zou C.-Z., Liu Q., Chen Y., Han Y., Cucurull L., Reynolds R. W., Rutledge G., Goldberg M., The NCEP climate forecast system reanalysis, *Bull. American Meteorological Society*, 2010, Vol. 91(8), pp. 1015–1057.
26. Sherburn K. D., Parker M. D., Climatology and ingredients of significant severe convection in high-shear, low-CAPE environments, *Weather and Forecasting*, 2014, Vol. 29, pp. 854–877.
27. Sherburn K. D., Parker M. D., King J. R., Lackmann G. M., Composite environments of severe and non-severe high-shear, low-CAPE convective events, *Weather and Forecasting*, 2016, Vol. 31(6), pp. 1899–1927.
28. Shikhov A. N., Chernokulsky A. V., A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 204, pp. 553–567.
29. Taszarek M., Kolendowicz L., Sounding-derived parameters associated with tornado occurrence in Poland and Universal Tornado Index, *Atmospheric Research*, 2013, Vol. 134, pp. 186–197.
30. Taszarek M., Brooks H. E., Czernecki B., Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe, *Monthly Weather Review*, 2017, Vol. 145, pp. 1511–1528.
31. Tyrrell J., Winter tornadoes in Ireland: The case of the Athlone tornado of 12 January 2004, *Atmospheric Research*, 2007, Vol. 83, pp. 242–253.
32. Weisman M. L., Klemp J. B., The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy, *Monthly Weather Review*, 1982, Vol. 110, pp. 504–520.