# Идентификация мезомасштабных конвективных облачных систем со смерчами по спутниковым данным

А. Н. Шихов<sup>1</sup>, А. В. Чернокульский<sup>2</sup>, А.А. Спрыгин<sup>3</sup>, И.О. Ажигов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет Пермь, 614990, Россия E-mail: gis@psu.ru

<sup>2</sup> Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия E-mail: a.chernokulsky@ifaran.ru

<sup>3</sup> Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, 141700, Россия E-mail: spralexandr@gmail.com

Рассмотрена возможность идентификации мезомасштабных конвективных систем (МКС) и суперячеек, сопровождавшихся образованием смерчей, по снимкам прибора SEVIRI спутника Meteosat-8. В качестве особенностей МКС рассмотрена радиояркостная температура верхней границы облаков ( $T_{\rm BFO}$ ), сигнатуры пробоя тропопаузы (Overshooting Tops), кольцевые и U/V-образные структуры в поле  $T_{\rm BFO}$ . Анализ проведён для 2017—2018 гг. на примере нескольких случаев вспышек смерчей на европейской территории России и Урале. Случаи смерчей выявлены по данным очевидцев, сообщениям в СМИ, а также на основе анализа вызванных смерчами ветровалов в лесных массивах по снимкам Landsat-8 и Sentinel-2. Выполненное совмещение снимков Meteosat-8 с треками смерчей позволило впервые для территории России определить особенности МКС или суперячейковых облаков, в которых зафиксировано возникновение смерчей. Показано, что экстремально низкие значения Т и пробои тропопаузы имеют сравнительно слабую связь с возникновением смерчей. В то же время выявлена связь наиболее мощных смерчей с появлением кольцевых U- или V-образных структур в поле Т<sub>вго</sub>. Их можно считать признаком наличия достаточно мощных мезоциклонов. Отмечено влияние условий устойчивости атмосферы, наблюдаемых во время формирования смерчей. Показано, что по снимкам Meteosat в первую очередь могут быть идентифицированы смерчеопасные МКС и суперячейки, которые возникают на фоне сильной конвективной неустойчивости. Однако локальные суперячейковые облака, которые способны генерировать смерчи даже на фоне умеренной или слабой неустойчивости, зачастую не имеют характерных признаков на ВГО, и их обнаружение по спутниковым данным затруднительно.

Ключевые слова: смерч, мезомасштабная конвективная система, суперячейка, данные Meteosat-8, температура верхней границы облака, пробой тропопаузы, кольцевые структуры, сигнатура

Одобрена к печати: 02.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-223-236

#### Введение

Смерчи (торнадо) представляют собой одно из наиболее опасных и сложно предсказуемых явлений погоды, угроза от которого в Европе и России существенным образом недооценивается (Antonescu et al., 2017). В России в целом в год может образовываться до 100 воздушных смерчей (в том числе до 10 смерчей категории F2 по шкале Фуджиты) (Chernokulsky et al., 2017). В северной половине европейской территории России (ЕТР) и Урала может возникать до 20 смерчей в год, в том числе сильных (Shikhov, Chernokulsky, 2018), по характеристикам близких к смерчам, прошедшим на ЕТР 9 июня 1984 г. (Chernokulsky, Shikhov, 2018). Полученные новые данные о повторяемости смерчей в России подтверждают актуальность и необходимость их изучения и разработки методов сверхкраткосрочного прогноза (на срок до 12 ч) и наукастинга (оперативного прогноза на срок до 3 ч).

Заблаговременность предупреждения об угрозе возникновения смерча даже в США, где вся территория находится в зоне наблюдения допплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ), составляет в среднем 13 мин (Bluestein, 2013). В России опыт наукастинга смерчей весьма ограничен. Причинами этого в том числе являются сравнительно низкая повторяемость данного явления (и, соответственно, недооценка обществом связанных со смерчами угроз) и недостаточное покрытие территории страны наблюдениями с помощью ДМРЛ (Дядюченко и др., 2014). Исследования смерчей в России до недавнего времени ограничивались детальным анализом лишь отдельных случаев их возникновения (Шихов, Быков, 2015; Chernokulsky et al., 2015; Dmitrieva, Peskov, 2016; Kurgansky et al., 2013; Novitskii et al., 2016). Только в двух последних работах рассмотрены возможности наукастинга на примере случая возникновения сильного смерча на севере Башкортостана 29.08.2014, причём спутниковые данные использовались лишь как дополнительный источник информации к данным ДМРЛ.

В дополнение к данным ДМРЛ или в случае их отсутствия для мониторинга МКС и суперячеек, вызывающих смерчи, могут использоваться данные геостационарных спутников. Спутники Meteosat Second Generation (MSG) обеспечивают получение данных о температуре и альбедо верхней границы облаков (ВГО) каждые 15 мин, а для территории Европы (включая западную часть ЕТР) — каждые 5 мин. С 2016 г. спутник Meteosat-8 находится над точкой с координатами 0° с.ш. и 41,5° в.д. (Klaes, 2017). Установленный на нём радиометр SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) обеспечивает покрытие данными для всей ЕТР, Урала и Западной Сибири каждые 15 мин.

Цель настоящей работы состоит в оценке возможности обнаружения смерчеопасных МКС и суперячейковых облаков по данным SEVIRI/Meteosat-8. Исследование проведено для ETP и Урала за период 2017–2018 гг.

# Определение смерчеопасных МКС и суперячеек по спутниковым данным

В России методы оперативного прогноза конвективных опасных явлений (ОЯ) по данным Меteosat разрабатываются в НИЦ «Планета» (см., например, работы (Волкова, Успенский, 2008; Bukharov et al., 2008)). Основанные на пороговых методиках алгоритмы позволяют успешно детектировать зоны ливневых осадков, гроз и града (Волкова и др., 2015). Другой подход, развиваемый в исследованиях (Bedka, 2011; Putsay et al., 2011), подразумевает нахождение особенностей (сигнатур) на верхней границе конвективной облачности, указывающих на высокий риск развития ОЯ. В частности, в работе (Reynolds, 1980) установлено, что зоны развития ОЯ могут быть идентифицированы по появлению Overshooting Tops (OTs) — локальных областей с экстремально низкой  $T_{\rm BFO}$ , соответствующих сильным восходящим потокам. К. М. Бедка (Bedka, 2011) выявил статистически значимую корреляцию OTs со случаями крупного града (R = 0,52) и шквалов (R = 0,53) и значительно более слабую связь со случаями смерчей (R = 0,15).

Также при анализе распределения  $T_{\rm BFO}$  у развитых МКС часто обнаруживаются замкнутые кольцевые или незамкнутые U- или V-образные структуры. Иногда они обозначаются аббревиатурой CRCUV (Cold Ring & Cold-U/V), указывающей на возможное единство причин их образования. Эти структуры включают область повышенной радиояркостной температуры (-50...-55 °C) в центре и более холодную область (-60 °C и ниже) на периферии, что, вероятно, связано с выносом более тёплых гидрометеоров из средней части облака к его вершине мощными восходящими потоками. CRCUV-структуры часто соответствуют областям с сильными восходящими потоками, в том числе суперячейковым штормам (Adler et al., 1985; Putsay et al., 2011).

В настоящей работе рассмотрено соотношение перечисленных сигнатур с известными треками прохождения смерчей.

#### Данные и методы

#### Сбор данных о случаях смерчей за 2017-2018 гг.

Первой задачей исследования было создание выборки случаев смерчей на ЕТР и Урале за 2017 г. и июнь 2018 г., включая два эпизода, рассмотренные ранее (Шихов и др., 2018). Случаи смерчей, зафиксированные очевидцами или нанёсшие материальный ущерб, были выявлены на основе анализа публикаций в СМИ и социальных сетях. Для получения информации о смерчах, не зафиксированных очевидцами и/или по данным об ущербе, в течение рассматриваемого периода производился мониторинг сообщений в СМИ о возникновении крупных ветровалов в лесных массивах. Все сообщения подвергались проверке по разновременным спутниковым снимкам Landsat-8 и Sentinel-2 (Шихов, Ажигов, 2017). Использовались снимки в синтезе каналов «средний ИК – ближний ИК – красный», а также мультивременные композиты в среднем ИК-канале. В результате удалось выявить ряд ветровалов, в том числе вызванных смерчами. Семь случаев смерчей были подтверждены как по данным очевидцев, так и на основе анализа ветровалов.

Для окончательного определения типа ветровала (шкваловый или смерчевый) требуется использование снимков сверхвысокого разрешения (Shikhov, Chernokulsky, 2018). За 2017–2018 гг. такие снимки недоступны, поэтому смерчевые ветровалы были идентифицированы только по двум признакам (линейная форма с соотношением ширины и длины как 1/10 и менее, а также сплошной характер повреждения древостоя). Всего рассмотрено 9 дат, когда наблюдались смерчи (*табл. 1*), за которые только по результатам анализа ветровалов выявлено 37 случаев смерчей.

Наиболее значительная вспышка смерчей (tornado outbreak) за рассматриваемый период наблюдалась 02.08.2017 в Тверской области (*puc. 1*). За период с 2001 г. она входит в число крупнейших вспышек смерчей, зафиксированных на территории России, наряду со случаями 23.06.2007 и 07.06.2009, которые описаны в работе (Shikhov, Chernokulsky, 2018). Однако для случая 02.08.2017 требуется дополнительная верификация по снимкам сверхвысокого разрешения.



Рис. 1. Ветровалы, вызванные шквалами и смерчами 02.08.2017 в Тверской области

Дата	Регион	Число случаев смер- чей: общее/по данным очевидцев и СМИ/по данным о ветровалах	Дополнительные сведения об ОЯ	Общая площадь ветрова- лов, га
03.06.2017	Свердловская, Челябинская области	2/1/2	Длина пути ( <i>L</i> ) смерчей — 17 и 20 км. Также наблюдались шквалы до 27 м/с, нанёсшие значительный ущерб	Свыше 1000
18.06.2017	Курганская, Тюменская области	4/3/2	Один смерч достигал интенсивности F3. Также наблюдались шквалы до 26 м/с, нанёсшие значительный ущерб	370
20.06.2017	Тверская область	2/0/2	Смерчи прошли в малонаселённой местности, помимо ветровалов ущерб не зафиксирован	70
30.07.2017	Архангельская область	3/1/3	Смерч прошёл через метеостанцию Карпогоры (порыв ветра 41 м/с). Также наблюдались шквалы	40
02.08.2017	Тверская, Новгородская области	16/5/12*	<i>L</i> смерчей — до 43 км, макс. ширина — до 1200 м. Также наблюдались шквалы, нанёсшие значительный ущерб	Свыше 4000
04.08.2017	Тверская, Московская области	5/5/2	Смерч и крупный град нанесли значи- тельный ущерб в г. Ржеве	79
11.08.2017	Кировская область	3/0/3	Смерчи прошли в малонаселённой местности. Помимо ветровалов, ущерб не зафиксирован	91
30.05.2018	Приволжский ФО и восток Центрального ФО	13/6/7*	Помимо смерчей, наблюдались шквалы до 31 м/с с большим охватом террито- рии, нанёсшие значительный ущерб	281**
04.06.2018	Кировская область	7/4/4	Четыре случая смерчей подтверждены очевидцами, однако, помимо ветрова- лов, существенного ущерба нет	380

Таблица 1. Случаи возникновения смерчей в 2017-2018 гг. на ЕТР и на Урале

\* Число смерчей определено предварительно, для некоторых ветровалов тип не установлен. \*\* Без учёта шкваловых ветровалов.

## Получение и обработка данных Meteosat-8

́за даты возникновения смерчей

Данные прибора SEVIRI, установленного на спутнике Meteosat-8, получены через сервер Европейской организации по обслуживанию метеорологических спутников EUMETSAT (http://archive.eumetsat.int/usc/). Их обработка включала конвертацию в формат Geotiff, извлечение по границам заданной области, расчёт яркостной температуры и альбедо (средствами пакета MSGDataRetriever) и создание RGB-синтезов на основе исходных спектральных каналов и их разностей.

Пространственное разрешение снимков Meteosat-8 (*табл. 2*) достаточно для идентификации характерных особенностей структуры верхней границы Cb. Следует отметить, что из-за так называемого «эффекта параллакса» существует систематическая погрешность геопривязки снимков (смещение на север на величину порядка 30 км), что нужно учитывать при совмещении снимков с данными о треках прохождения смерчей.

Для анализа конвективных штормов по снимкам Meteosat чаще всего используются данные в канале высокого разрешения (HRV), а также в ИК-канале с длиной волны 10,8 мкм (IR10.8), по которому определяется радиояркостная температура  $T_{\rm BFO}$ .

	_							
Название канала	Длина волн, мкм	Пространственное разрешение в надире, км						
VIS0.6	0,56-0,71							
VIS0.8	0,74–0,88							
IR1.6	1,50-1,78							
IR3.9	3,48-4,36							
IR8.7	8,30-9,10							
IR10.8	9,80-11,80	3,0						
IR12.0	11,00-13,00							
WV6.2	5,35-7,15							
WV7.3	6,85-7,85							
IR9.7	9,38–9,94							
IR13.4	12,40-14,40							
HRV	0,5-0,9	1,0						

Таблица 2.	Спектральные	каналы прибора	SEVIRI/Meteosat-	8
,	1	1 1	/	

В ситуациях с активной конвекцией рекомендуется использовать две RGB-комбинации каналов Meteosat (Kerkmann et al., 2006):

- Комбинация каналов HRV и IR10.8 (в порядке HRV–HRV–IR), известная под названием HRVcloud. Она позволяет отделить полупрозрачные облака верхнего яруса на периферии MKC от облаков большой вертикальной мощности; также в данной комбинации благодаря использованию канала HRV успешно выделяются OTs и иные особенности структуры вершин Cb (Putsay et al., 2011).
- 2. Комбинация convective storm RGB, основанная на разностях спектральных каналов (Kerkmann et al., 2006), в которой удаётся разделить области вершин Cb, состоящие из мелких или более крупных кристаллов льда. Преобладание мелких кристаллов считается индикатором сильных восходящих потоков и высокого риска возникновения ОЯ (Lindsey et al., 2006). Комбинация строится на основе разностей значений в спектральных каналах: в красном цвете отображается разность WV6.2–WV7.3, в зелёном IR3.9–IR10.8, а в синем NIR1.6–VIS0.6.

#### Результаты

Выполненное совмещение снимков Meteosat-8 с треками смерчей позволило впервые для территории России определить особенности конвективных облачных систем (МКС или суперячейковых облаков), в которых зафиксировано возникновение смерчей. В *табл. 3* приведены их основные характеристики, выявленные по спутниковым снимкам.

Тип МКС определён согласно классификации (Вельтищев, Степаненко, 2006). Количественные характеристики (диаметр по большой и малой оси,  $T_{\rm BFO}$ ) оценивались на момент прохождения смерча, диаметр определён по данным в канале HRV без учёта выбросов облаков верхнего яруса. Продолжительность существования оценивалась от момента формирования МКС или суперячейкового облака до момента её/его диссипации или слияния с другой МКС. Для случая 02.08.2017 (когда наблюдалось не менее 13 смерчей) оценка приведена только для смерчей с длиной пути свыше 5 км. Методика определения длины, средней и максимальной ширины пути смерча по данным о ветровалах, а также вероятностной оценки минимальной интенсивности смерча по шкале Фуджиты описана в работе (Shikhov, Chernokulsky, 2018).

Дополнительно в *табл. 3* приведены максимальные (в радиусе 50 км от места возникновения смерча) значения доступной потенциальной энергии неустойчивости (Convective Available Potential Energy, CAPE, Дж/кг) по данным объективного анализа модели GFS (Global Forecast System, https://nomads.ncdc.noaa.gov/data/gfs4/) в срок, предшествовавший образованию смерча.

сновные характеристики конвективных облачных систем	мерчами над территорией России в 2017–2018 гг.
3. C	00
Таблица .	-

САРЕ, Дж/кг	1500		2300		2500	2400	1300		3000	3000	2250	2800	2100	1700	1600	1900	1650	1500	1500	2100	1400	1350
Особенности структуры ВГО	OT	Cold ring	OT		OT, Cold-U	I	OT	OT	OT	OT	OT, Cold-ring	OT, Cold-ring	Cold-ring	Cold-U	Cold-U	Cold-ring	Cold-ring	Cold-ring		Cold-ring	I	OT
Минимальная Т <sub>BГO</sub> , °C	-60	-60	-62	-62	-64	-56	-59	-58	-66	-66	-65	-66	-61	-61	-63	-67	-65	-64		-66	-55	-56
Диаметр по большой и малой оси, км	75/55	110/100	210/180	240/210	310/260	410/330	700/230	700/220	450/200	500/270	630/390	690/250	700/270	720/250	760/270		900/290	900/275			80/55	80/50
Продолжительность существования, ч	4,5		14				10		6			10									5	
Тип конвек- тивной системы	КЭ		MKK				)]ШI*		ЛШГ		MKK	ШЦ									СЯ	
L (км), средняя/ мак- симальная ширина (м) смерча и интенсивность по шкале Фуджиты	19,8/159/430/F2	16,6/285/550/F2	Нет данных	Нет данных	28,5/190/775/F2	2,2/126/180/F1	7,8/124/274/F1	6,2/94/205/F1	17,0 57/200/F1	2,6/52/100/F1	Нет данных	43,2/247/750/F2	27,7/281/963/F2	5/226/385/F1	7,4/280/654/F2	26,7/420/1287/F2	8,8/120/315/F1	19,1/133/421/F2	5,5/115/320/F1	9,6/220/510/F2	6,2/Нет данных	5,7/175/420/F2
Координаты середины смерчевого трека	57,304° с.ш., 59,360° в.д.	57,603° с. ш., 59,435° в. д.	55,164° с.ш., 66,543° в.д.	55,290° с. ш., 66,293° в.д.	55,584° с. ш., 66,614° в. д.	56,481° с. ш., 66,460° в.д.	55,780° с. ш., 32,950° в.д.	55,784° с.ш., 33.215° в.д.	62,466° с. ш., 40,993° в.д.	62,545° с.ш., 41,580° в.д.	64,002° с. ш., 44,449° в.д.	56,702° с.ш., 31,808° в.д.	57,235° с. ш., 32,269° в.д.	57,397° с.ш., 32,900° в.д.	57,471° с. ш., 33,199° в. д.	56,619° с. ш., 33,323° в. д.	57,533° с. ш., 33,413° в.д.	57,655° с. ш., 33,602° в.д.	57,626° с. ш., 33,663° в.д.	56,711° с.ш., 34,198° в.д.	56,275° с. ш., 34,255° в. д.	56,057° с. ш., 35,454° в. д.
Время (UTC)	11:30	12:00	11:00	11:15	11:45	13:00	14:45	15:00	13:30	13:45	16:30	14:15	14:30	14:45	15:00		15:30	15:45	<u> </u>		14:15	15:45
Дата	03.06.2017	1	18.06.2017	1	1	<u> </u>	20.06.2017	<u> </u>	30.07.2017		L	02.08.2017	<u> </u>	<u> </u>			1				04.08.2017	1

$\mathcal{S}$	
пабл.	
ние п	
онча	
0ĸ	

САРЕ, Дж/кг	1100		900	700	009	600	009	550	800	700	220				
Особенности структуры ВГО	OT		OT	I	I		I	I	I		I	I	I	I	
Минимальная Т <sub>вго</sub> , °С	-57		-57	-50	-50		-51	-47	-50		-48	-49	-48		
Диаметр по большой и малой оси, км	85/70		115/110	710/55	815/110		840/130	870/140	1350/140	1300/150	50/35	55/45	60/45		
Продолжительность существования, ч	3,5			10							2				
Тип конвек- тивной системы	КЭ			ШЦ							СЯ				
L (км), средняя/ мак- симальная ширина (м) смерча и интенсивность по шкале Фуджиты	4,1/110/216/F1	1,1/96/119/F1	6,9/100/212/F1	3,0/61/157/F1	3,8/37/85/F1	2,1/67/123/F1	4,5/53/208/F1	6,2/112/526/F2	11,1/187/1100/F2	4,0/76/210//F1	16,6/99/450/F2	16,5/156/620/F2	2,0/65/340/F1	1,8/96/230/F1	5
Координаты середины смерчевого трека	59,313° с. ш., 48,231° в.д.	59,300° с.ш., 48,131° в.д.	59,093° с. ш., 48,844° в. д.	56,180° с. ш., 47,633° в. д.	55,934° с. ш., 48,595° в. д.	55,864° с.ш., 48,432° в.д.	55,837° с.ш., 48,885° в.д.	55,646° с. ш., 49,084° в. д.	54,601° с. ш., 49,238° в.д.	53,422° с. ш., 48,482° в.д.	58,905° с.ш., 47,974° в.д.	58,879° с. ш., 48,597° в.д.	58,875° с. ш., 49,139° в. д.	58,862° с. ш., 49,367° в. д.	
Время (UTC)	12:45		13:45	10:00	10:45	·	11:00	11:30	13:30	15:00	13:45	14:00	14:30		
Дата	11.08.2017			30.05. 2018							04.06.2018				t C

— линия шквалов, САРЕ — потенциальная энергия конвективной СЯ — суперячейка, МКК — мезомасштабный конвективный комплекс, JIШ неустойчивости. Рассматриваемые случаи смерчей возникали в конвективных системах как мезо- $\alpha$ , так и мезо- $\beta$  масштаба. К первому классу относятся МКК и линии шквалов, протяжённость которых по большой оси составляла от 300 до 1000 км и более. Ко второму классу относятся суперячейки с диаметром 50–110 км по большой оси. Три из четырёх случаев возникновения суперячеек, перечисленных в *табл. 1* (03.06.2017, 04.08.2017, 04.06.2018), подтверждены наблюдениями очевидцев.

Продолжительность жизни конвективных систем со смерчами определяется их масштабом. Если суперячейки (масштаб мезо- $\beta$ ) существовали относительно недолго (2–5 ч), то продолжительность жизни МКК и линий шквалов составляла от 9 до 14 ч. Смерчи с длиной трека более 10 км и шириной свыше 500 м (с которыми был связан наибольший ущерб и/или значительные площади ветровалов) возникали как в суперячейках (03.06.2017, 04.06.2018), так и в линейных системах (02.08.2017) и в МКК (18.06.2017).

Наибольший интерес представляет возможность идентификации МКС со смерчами по особенностям структуры вершин Сb. Для этого оценивалось наличие OTs и CRCUVструктур в поле  $T_{\rm BFO}$ , совпадающих с выявленными треками прохождения смерчей.



*Рис. 2.* Развитый суперячейковый шторм над Свердловской областью на снимке Meteosat-8 за 3 июня 2017 г.: синтез HRVcloud, *Т*<sub>ВГО</sub> и синтез convective storm RGB за 11:15 ВСВ (*a*−*e*) и 12:00 ВСВ (*z*−*d*)

Области ОТѕ над местом возникновения смерчей выявлены в 12 из 36 рассмотренных случаев. В основном это были смерчи с небольшой длиной и/или шириной трека и невысокой интенсивностью, что подтверждает вывод об относительно слабой связи OTs с возникновением смерчей (Bedka, 2011). В свою очередь, CRCUV-структуры обнаружены над треками смерчей с достаточно большой длиной и/или шириной и более высокой интенсивностью (11 случаев, из них 8 — с интенсивностью ≥F2 (57 % от всех случаев с такой интенсивностью в рассматриваемой выборке)). Наиболее чётко выраженные структуры диаметром до 80-100 км наблюдались в двух случаях: 03.06.2017 около 12:00 ВСВ над западом Свердловской области (*puc. 2г–д*, см. с. 230) и 02.08.2017 над северо-востоком Тверской области (*puc. 3г–д*). В первом случае был зафиксирован один мощный смерч, во втором — пять смерчей с общей длиной пути свыше 70 км. Также CRCUV-структуры наблюдались и над Курганской областью 18.06.2017, когда были зафиксированы сильные смерчи. При анализе снимков в канале HRV на месте CRCUV-структур обнаруживаются куполообразные возвышения, которые, как и OTs, указывают на наличие мощного восходящего потока. Таким образом, CRCUVструктуры в поле T<sub>вго</sub> у развитых МКС можно считать признаком наличия достаточно мощных мезоциклонов, в которых есть вероятность возникновения сильных смерчей.



*Рис. 3.* Квазилинейная МКС над Тверской областью 2 августа 2017 г.: синтез HRVcloud,  $T_{\rm BFO}$  и синтез convective storm RGB за 14:15 ВСВ (*a*-*в*) и 15:00 ВСВ (*c*-*d*)



*Рис. 4.* Суперячейка над Кировской областью на снимке Meteosat-8 за 13:45 BCB 11 августа 2017 г.: синтез HRVcloud (*a*), *Т*<sub>ВГО</sub> (*б*) и синтез convective storm RGB (*в*)

В ряде случаев наблюдалось разрушение ОТ (Overshooting Top) и формирование на его месте кольцевой структуры на пути движения одного мезоциклона, причём разрушение ОТ происходило до момента образования смерча. Этот процесс также описан в работе (Bedka, 2011), однако формирование кольцевых структур на месте ОТ ранее не отмечалось. Наиболее ярко процесс преобразования ОТ в кольцевую структуру был выражен 03.06.2017, когда возникновение двух смерчей было связано с прохождением одного мезоциклона. В 11:15 ВСВ (примерно во время формирования первого смерча) наблюдался хорошо выраженный ОТ с  $T_{\rm BFO}$  –62 °C (*puc. 2a–б*). В последующие 30 мин вместо ОТ сформировался cold-ring. Период его существования (11:45–12:00 ВСВ) соответствует времени прохождения второго (более мощного) смерча (см. *puc. 2e–д*).

Все описанные сигнатуры, по которым могут быть обнаружены смерчеопасные конвективные системы, наблюдались в условиях сильной конвективной неустойчивости (САРЕ ≥ 1500 Дж/кг). В то же время смерчи часто возникают на фоне умеренной или слабой неустойчивости, когда этому способствуют сильный сдвиг ветра и низкий уровень конденсации (Brooks, 2009). При слабой неустойчивости интенсивность восходящего потока оказывается недостаточной для образования ОТ или CRCUV-структуры. В таких условиях идентифицировать суперячейку или МКС как смерчеопасную по снимкам Meteosat практически невозможно, и это является основным ограничением спутникового диагноза смерчеопасных ситуаций.

За исследуемый период зафиксированы пять случаев возникновения смерчей на фоне слабой или умеренной конвективной неустойчивости (см. *табл. 3*). Например, в Кировской области 04.06.2018 наблюдались два достаточно мощных смерча с длиной пути 16,6 и 16,5 км соответственно. Они были связаны с прохождением суперячейки (с минимальной  $T_{\rm BFO}$  –49 °C), которая возникла на фоне значений САРЕ  $\leq 220$  Дж/кг. Также на фоне слабой неустойчивости (САРЕ  $\leq 800$  Дж/кг) возникло несколько смерчей (в основном слабых) 30 мая 2018 г. Они наблюдались при прохождении линии шквалов на быстро движущемся холодном фронте. В этих случаях по снимкам Meteosat не прослеживались какие-либо особенности вершин Cb в момент возникновения смерчей, соответственно, идентифицировать их как смерчеопасные было невозможно.

В случаях возникновения суперячейковых облаков со смерчами на фоне умеренной неустойчивости (САРЕ в пределах от 1000 до 1500 Дж/кг) наблюдались слабовыраженные OTs с  $T_{\rm BFO}$  на 3–5 °C ниже, чем в окружающих конвективных ячейках (*puc. 4*). Распознать по спутниковым данным подобные ячейки как смерчеопасные можно, только учитывая их большую продолжительность жизни.

Помимо  $T_{\rm BFO}$  и синтеза HRVcloud, для анализа использовались синтез convective storm RGB и значения яркости в канале 3,9 мкм. Вершины Cb, состоящие из мелких кристаллов льда (которые соответствуют сильным восходящим потокам), в данном синтезе выделяются оттенками жёлтого цвета и имеют сравнительно более высокую (на фоне других участков) яркость в канале 3,9 мкм. В то же время вершины Cb, состоящие из более крупных кристаллов, в синтезе convective storm RGB выделяются красноватым оттенком. В большинстве случаев в данном синтезе области сильных восходящих потоков соответствуют OTs и кольцевые структуры выделяются плохо. Это ограничивает применение данного синтеза для выявления конвективных штормов со смерчами.

#### Заключение

Проведённое исследование МКС и суперячейковых облаков, в которых наблюдались смерчи в 2017–2018 гг., позволило впервые для территории России оценить возможность их обнаружения по снимкам Meteosat-8. Показано, что экстремально низкие значения  $T_{\rm BFO}$  и OTs имеют сравнительно слабую связь с возникновением смерчей. В то же время установлено, что для большинства случаев сильных смерчей с длиной трека больше 10 км и/или шириной свыше 500 м характерно наличие CRCUV-структур в поле  $T_{\rm BFO}$ . Предположительно, такие структуры можно считать индикаторами наличия достаточно мощных мезоциклонов. Однако для подтверждения полученного вывода требуется расширение выборки случаев смерчей и по возможности сравнение с данными ДМРЛ.

Также для ЕТР и Урала подтверждён вывод работы (Bedka, 2011) о возможной идентификации по спутниковым снимкам в первую очередь смерчеопасных конвективных систем, которые возникают на фоне сильной неустойчивости атмосферы. В таких условиях по особенностям структуры вершин облаков можно выявить мощные восходящие потоки, соответствующие мезоциклонам и, соответственно, областям с высокой вероятностью возникновения комплекса конвективных ОЯ. В то же время локальные суперячейковые облака, которые способны генерировать смерчи даже на фоне умеренной или слабой неустойчивости, зачастую подобных характерных признаков по спутниковым данным не имеют (кроме критерия устойчивости формы и значительной продолжительности существования изолированных очагов).

Результаты проведённого исследования при условии расширения выборки данных и уточнения полученных выводов могут быть использованы для оперативного прогноза смерчей в России, прежде всего — вне зоны покрытия данными ДМРЛ.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 18-77-10076 (получение, обработка и анализ данных Meteosat) и РФФИ № 16-05-00245-а (сбор данных о случаях смерчей за 2017–2018 гг. на основе анализа ветровальных нарушений).

#### Литература

- 1. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В. М. Мезометеорологические процессы. М., 2006. 101 с.
- Волкова Е. В., Успенский А. Б. Оценки параметров облачного покрова в светлое время суток по данным геостационарного метеоспутника Meteosat-8 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 441–450.
- 3. Волкова Е. В., Успенский А. Б., Кухарский А. В. Специализированный программный комплекс получения и валидации спутниковых оценок параметров облачности и осадков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 7–26.
- 4. Дядюченко В., Павлюков Ю., Вылегжанин И. Допплеровские радиолокаторы в России // Наука в России. 2014. № 1. С. 23–27.
- 5. Шихов А. Н., Ажигов И. О. Мониторинг ветровальных нарушений лесного покрова, вызванных шквалами и смерчами на территории Европейской России и Урала в 2017 г. // 15-я Всероссийская

открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. конф. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 406.

- 6. *Шихов А. Н., Быков А. В.* Изучение двух случаев сильных смерчей в Предуралье // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 124–133.
- 7. 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. № 1. С. 272–281.
- 8. *Adler R. F., Markus M. J., Fenn D. D.* Detection of severe midwest thunderstorms using geosynchronous satellite data // American Meteorological Society. 1985. V. 113. P. 769–781.
- 9. *Antonescu B., Schultz D. M., Holzer A., Groenemeijer P.* Tornadoes in Europe: An Underestimated Threat // Bulletin of the American Meteorological Society. 2017. V. 98(4). P. 713–728.
- 10. *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.
- 11. *Bluestein H. B.* Severe Convective Storms and Tornadoes. Observations and Dynamics. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. 456 p.
- 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.
- Bukharov M. V., Kukharskii A. V., Misnik L. A. Automated work place "Planeta-Meteoobzor" for monitoring hazardous weather associated with convective clouds // Russian Meteorology and Hydrology. 2008. V. 33(2). P. 102–105.
- 14. *Chernokulsky A. V., Shikhov A. N.* 1984 Ivanovo tornado outbreak: Determination of actual tornado tracks with satellite data // Atmospheric Research. 2018. V. 207. P. 111–121.
- 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. V. 40(12). P. 794–799.
- Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., Selezneva E., Shikhov A., Azhigov I., Zakharchenko D., Antonescu B., Kühne T. The modern climatology of Northern Eurasia tornadoes and waterspouts // 9<sup>th</sup> European Conf. Severe Storms (ECSS-2017): abstr. 2017. P. 109.
- 17. *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. V. 41(10). P. 673–682.
- Kerkmann J., Lutz H.J., König M., Prieto J., Pylkko P., Roesli H. P., Rosenfeld D., Zwatz-Meise V., Schmetz J., Schipper J., Georgiev C., Santurette P. MSG Channels Interpretation Guide. EUMETSAT, 2006. URL: http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg\_interpretation/index.html.
- 19. *Klaes K. D.* A status update on EUMETSAT programmes and plans // Proc. SPIE. 2017. V. 10402. Art. No. 1040202.
- 20. *Kurgansky M. V., Chernokulsky A. V., Mokhov I. I.* The tornado over Khanty-Mansiysk: An exception or a symptom? // Russian Meteorology and Hydrology. 2013. V. 38. P. 539–546.
- 21. *Lindsey D. T., Hillger D. W., Grasso L., Knaff J.A., Dostalek J. F.* GOES climatology and analysis of thunderstorms with enhanced 3.9-µm reflectivity // Monthly Weather Review. 2006. V. 134. P. 2342–2353.
- Novitskii M.A., Pavlyukov Y.B., Shmerlin B.Y., 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. V. 41(10). P. 683–690.
- Putsay M., Simon A., Szenyán I., Kerkmann J., Horváth G. Case study of the 20 May 2008 tornadic storm in Hungary — Remote sensing features and NWP simulation // Atmospheric Research. 2011. V. 100(4). P. 657–679.
- 24. *Reynolds D. W.* Observations of damaging hailstorms from geosynchronous satellite digital data // Monthly Weather Review. 1980. V. 108. P. 337–348.
- 25. *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.

### Identification of mesoscale convective cloud systems with tornadoes using satellite data

A. N. Shikhov<sup>1</sup>, A. V. Chernokulsky<sup>2</sup>, A. A. Sprygin<sup>3</sup>, I. O. Azhigov<sup>1</sup>

 <sup>1</sup> Perm State University, Perm 614990, Russia E-mail: gis@psu.ru
<sup>2</sup> A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia E-mail: a.chernokulsky@ifaran.ru
<sup>3</sup> Central Aerological Observatory, Dolgoprudnyi 141700, Russia E-mail: spralexandr@gmail.com

The study is carried out to estimate capability of using Meteosat-8 SEVIRI satellite data for the detection of tornado-generating mesoscale convective systems (MCSs) and supercell storms. We consider the cloud top temperature, overshooting tops, cold-rings, and cold U-V shaped features as signatures of tornado formation. The study is performed for 2017–2018, on the example of several tornado outbreaks in the European Russia and Ural region. The tornado events are identified by witness and media reports and by satellite-based analysis of tornado-induced forest damage tracks. For the first time in this region, overlapping of actual tornado tracks with Meteosat-8 images allows to detect the features of MCSs and supercell storms that yielded tornadoes. It is found, that the extremely low cloud top temperature and overshooting tops have a relatively weak correlation with tornado events. Whereas, the cold-rings and cold U-V shaped features are related more tightly with strong tornadoes, and hence can be considered as the signatures of strong mesocyclones. The importance of convective instability conditions is highlighted. Particularly, Meteosat data show good capability to detect tornado-generating MCSs and supercell storms that are formed in the environments with strong convective instability (and strong updrafts). However, the local supercell storms that generate tornadoes in the conditions with weak or moderate convective instability, have no typical signatures on the cloud top. Consequently, their satellite-based detection is difficult.

**Keywords:** tornado, mesoscale convective system, supercell, Meteosat-8 data, cloud top temperature, overshooting top, cold ring, signature

Accepted: 02.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-223-236

### References

- 1. Veltishchev N.F., Stepanenko V.M., *Mezometeorologicheskie protsessy* (Mesoscale meteorological processes), Moscow, 2006, 101 p.
- 2. Volkova E. V., Uspenskii A. B., Otsenki parametrov oblachnogo pokrova v svetloe vremya sutok po dannym geostatsionarnogo meteosputnika METEOSAT-8 (Estimation of cloud cover parameters in daily time with the use of Meteosat-8 geostationary satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 5, No. 1, pp. 441–450.
- Volkova E. V., Uspenskii A. B., Kukharskii A. V., Spetsializirovannyi programmnyi kompleks polucheniya i validatsii sputnikovykh otsenok parametrov oblachnosti i osadkov (Specialized complex of programs for retrieving and validating satellite estimates of cloud and precipitation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 7–26.
- 4. Dyadyuchenko V., Pavlyukov Yu., Vylegzhanin I., Dopplerovskie radiolokatory v Rossii (Doppler weather radars in Russia), *Nauka v Rossii*, 2014, No. 1, pp. 23–27.
- 5. Shikhov A. N., Azhigov I. O., Monitoring vetroval'nykh narushenii lesnogo pokrova, vyzvannykh shkvalami i smerchami na territorii Evropeiskoi Rossii i Urala v 2017 g. (Monitoring of windthrows in the European Russia, induced by squalls and tornadoes in 2017), 15-ya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (15<sup>th</sup> All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow: IKI RAN, 2017, p. 406.
- Shikhov A. N., Bykov A. V., Izuchenie dvukh sluchaev sil'nykh smerchei v Predural'e (The study of two cases of severe tornadoes in the Predural'e region), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 124–133.

- 7. 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, No. 1, pp. 272–281.
- 8. Adler R. F., Markus M. J., Fenn D. D., Detection of severe midwest thunderstorms using geosynchronous satellite data, *American Meteorological Society*, 1985, Vol. 113, pp. 769–781.
- 9. Antonescu B., Schultz D. M., Holzer A., Groenemeijer P., Tornadoes in Europe: An Underestimated Threat, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, Vol. 98(4), pp. 713–728.
- 10. 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.
- 11. Bluestein H. B., *Severe Convective Storms and Tornadoes. Observations and Dynamics*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013, 456 p.
- 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. Bukharov M. V., Kukharskii A. V., Misnik L. A., Automated work place "Planeta-Meteoobzor" for monitoring hazardous weather associated with convective clouds, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2008, Vol. 33(2), pp. 102–105.
- 14. Chernokulsky A. V., Shikhov A. N., 1984 Ivanovo tornado outbreak: Determination of actual tornado tracks with satellite data, *Atmospheric Research*, 2018, Vol. 207, pp. 111–121.
- 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.
- Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., Selezneva E., Shikhov A., Azhigov I., Zakharchenko D., Antonescu B., Kühne T., The modern climatology of Northern Eurasia tornadoes and waterspouts, 9<sup>th</sup> European Conf. Severe Storms (ECSS-2017), Book of Abstracts, 2017, p. 109.
- 17. 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.
- 18. Kerkmann J., Lutz H.J., König M., Prieto J., Pylkko P., Roesli H.P., Rosenfeld D., Zwatz-Meise V., Schmetz J., Schipper J., Georgiev C., Santurette P., *MSG Channels Interpretation Guide*, EUMETSAT, 2006, available at: http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg\_interpretation/index.html.
- 19. Klaes K. D., A status update on EUMETSAT programmes and plans, *Proc. SPIE*, 2017, Vol. 10402, Art. No. 1040202.
- 20. Kurgansky M.V, Chernokulsky A.V., Mokhov I.I., The tornado over Khanty-Mansiysk: An exception or a symptom? *Russian Meteorology and Hydrology*, 2013, Vol. 38, pp. 539–546.
- 21. Lindsey D.T., Hillger D.W., Grasso L., Knaff J.A., Dostalek J.F., GOES climatology and analysis of thunderstorms with enhanced 3.9-μm reflectivity, *Monthly Weather Review*, 2006, Vol. 134, pp. 2342–2353.
- 22. Novitskii M.A., Pavlyukov Y.B., Shmerlin B.Y., 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.
- Putsay M., Simon A., Szenyán I., Kerkmann J., Horváth G., Case study of the 20 May 2008 tornadic storm in Hungary — Remote sensing features and NWP simulation, *Atmospheric Research*, 2011, Vol. 100(4), pp. 657–679.
- 24. Reynolds D. W., Observations of damaging hailstorms from geosynchronous satellite digital data, *Monthly Weather Review*, 1980, Vol. 108, pp. 337–348.
- 25. 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.