

Диагностические признаки интенсивной конвекции. Часть 2: по спутниковым данным

А. А. Спрыгин, О. В. Калмыкова

Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск, 249038, Россия

E-mails: sprygin@rpatyphoon.ru, kov@feerc.ru

Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия

Работа продолжает цикл исследований авторов по изучению новых возможностей прогноза опасных конвективных явлений. В первой части были рассмотрены диагностические признаки (сигнатуры) интенсивных конвективных процессов по данным наземных радиолокационных наблюдений. Во второй части представлен обзор сигнатур по спутниковым данным. Для нашей страны это достаточно новое и ещё неосвоенное направление исследований, которое активно развивается за рубежом. Спутниковые наблюдения играют важнейшую роль в понимании и прогнозировании систем глубокой конвекции, особенно в регионах с ограниченным наземным радиолокационным покрытием. По мере увеличения доступности спутниковых данных с высоким временным и спектральным разрешением значительно расширяются возможности для идентификации и анализа спутниковых сигнатур. Известно, что их проявления часто предшествуют образованию опасных явлений у земли с некоторой заблаговременностью, что особенно важно. Рассмотрены физические основы образования некоторых спутниковых сигнатур интенсивной конвекции с учётом имеющихся представлений (гипотез) об их формировании, описаны связи сигнатур с конвективными системами различных типов. Для некоторых из сигнатур указан известный опыт их автоматического распознавания. Продемонстрированы случаи проявлений спутниковых сигнатур в исследуемом регионе.

Ключевые слова: диагностические признаки, спутниковые сигнатуры, интенсивная конвекция, спутниковые данные, опасные конвективные явления, конвективные штормы, прогноз, наукастинг

Одобрена к печати: 27.08.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-9-24

Введение

Как известно, с кучево-дождевыми облаками вертикального развития могут быть связаны такие опасные конвективные явления, как град, шквал, ливни, грозы и смерчи. В зарубежной литературе организованные интенсивные конвективные облачные структуры, в основе которых лежат кучево-дождевые облака (*англ.* Cumulonimbus), а также множество различных структурных облачных элементов, процессов и явлений, взаимосвязанных друг с другом и при этом обладающих единством, с точки зрения развития и эволюции нередко именуют «конвективными штормами». Такая терминология, возможно, не совсем привычна российскому читателю, но постепенно начинает использоваться и в нашей стране (Алексеева и др., 2022). Это обусловлено в том числе отсылками на иностранную литературу, где это понятие повсеместно распространено. Данное понятие целесообразно использовать и в нашей работе, в том числе и потому, что оно отражает взаимосвязанность процессов внутри мощных организованных конвективных структур с диагностическими особенностями, наблюдаемыми по спутниковым данным на их верхней границе.

Особенности, наблюдаемые на верхней границе облаков, есть совокупный результат действия множества различных физических процессов. Если мы сможем объяснить формирование этих особенностей, мы будем лучше понимать процессы в конвективных штормах. Имеется большой потенциал использовать эти знания для прогнозирования динамики штормов и наукастинга опасных конвективных явлений.

В нижних слоях тропосферы (до 3–5 км) при активной конвекции развиваются процессы, в которых преобладающим фактором является неустойчивость, что приводит к возникновению сильных восходящих и нисходящих потоков и различных процессов, связанных

с конвекцией: фронтов порывистости, холодных бассейнов (плотной холодной воздушной массы, растекающейся в подоблачном слое и образующейся при испарении осадков) и сопутствующих опасных метеорологических явлений.

В верхней тропосфере (на высотах 7–12 км) и выше преобладают волновые процессы, которые в том числе приводят к развитию ряда особенностей, наблюдаемых на верхней границе конвективных штормов (и вблизи верхней границы). Эти особенности, называемые также спутниковыми сигнатурами, достаточно разнообразны. Они проявляются на спутниковых изображениях радиационной температуры в инфракрасном (ИК) диапазоне (чаще всего в диапазоне длин волн 10–11 мкм) и/или в видимом диапазоне спектра (0,6–0,8 мкм) и описываются соответственно морфологическими и/или текстурными паттернами (связанными с распределением цветов, яркости, различными формами, структурами и т.д.). Ниже приводится список наиболее часто упоминаемых в литературе сигнатур с указанием их оригинальных названий на английском языке:

- куполообразный выступ над наковальной облака OT (Overshooting Top);
- холодная U/V-образная или кольцообразная область наковальни (Cold-U/V/ring);
- тёплая ближняя (к OT) область наковальни CWA (Close-in Warm Area);
- тёплая дальняя (от OT) область наковальни DWA (Distant Warm Area);
- центральное тёплое «пятно» CWS (Central Warm Spot);
- перистые выбросы над наковальной на подветренной стороне от OT AACP (Above Anvil Cirrus Plumes);
- внутренние гравитационные волны над наковальной, имеющие форму концентрических колец, IGW (Internal Gravity Waves);
- «выпрыгивающие» из наковальни перистые облака JC (Jumping Cirrus);
- волны над наковальной в форме «следа от корабля на воде» (Storm Tops Ship Waves);
- радиальные перистые облака над наковальной (Radial Cirrus);
- перистые облака в форме «крыла чайки» (Gullwing Cirrus);
- облака в форме «блинов» (Pancake Cloud).

Данные сигнатуры достаточно подробно описаны преимущественно в зарубежной литературе и пока довольно редко исследуются отечественными специалистами, в том числе во взаимосвязи с опасными явлениями (Chernokulsky et al., 2023).

Процессы в нижней и верхней тропосфере связаны друг с другом. Частично это подтверждается найденной статистической связью проявления некоторых сигнатур с фактами регистрации опасных конвективных явлений у земли.

Характеристики радиометров спутников Meteosat и «Электро-Л»

	Meteosat		«Электро-Л»
	MSG (Meteosat-8...-11)	MTG (Meteosat-12)	№ 2, 3, 4
Радиометр	SEVIRI (<i>англ.</i> Spinning Enhanced Visible Infra-Red Imager)	FCI (<i>англ.</i> Flexible Combined Imager)	МСУ-ГС (многозональное сканирующее устройство гидрометеорологического обеспечения)
Спектральные каналы, мкм	12 каналов: 0,6; 0,8; 1,6; 3,9; 6,2; 7,3; 8,7; 9,7; 10,8; 12,0; 13,4; HRV	17 каналов: 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 0,9; 1,3; 1,6; 2,2; 3,8; 6,3; 7,3; 8,7; 9,7; 10,5; 12,3; 13,3; HRV	11 каналов: 0,6; 0,7; 0,9; 3,8; 6,4; 8,0; 8,7; 9,7; 10,7; 11,9; HRV
Частота съёмки, мин	15/5 (в режиме RSS)	10/2,5 (в режиме RSS)	15/30
Разрешение, км	3/1 (для HRV)	1/0,5 (для HRV)	4/1 (для HRV)

Примечание: HRV (*англ.* High Resolution Value) — канал высокого разрешения. Разрешение указано в подспутниковой точке над низкими широтами. RSS (*англ.* Rapid Scan Service) — режим быстрого сканирования, только северная часть диска Земли (Европа).

Формирование многих спутниковых сигнатур обусловлено взаимодействием интенсивных восходящих потоков с горизонтальными потоками на уровнях вблизи тропопаузы. Наличие и эволюция конкретных типов сигнатур могут дать представление об основных опасностях, обусловленных конвективным штормом, у которого наблюдаются эти признаки (сигнатуры).

Большинство сигнатур обнаруживаются по данным как полярно-орбитальных, так и геостационарных спутников. Над Европой и европейской территорией России для этих целей можно использовать данные спутников серии Meteosat второго поколения MSG (*англ.* Meteosat Second Generation) и третьего поколения MTG (*англ.* Meteosat Third Generation) (оператор Eumetsat), а также «Электро-Л» (оператор Росгидромет). В *таблице* приведены основные характеристики радиометров, установленных на этих спутниках.

Куполообразный выступ над наковальней

Overshooting Top — это часть облака, которая поднимается выше окружающего уровня тропопаузы, пробивая его за счёт интенсивного восходящего движения воздуха (<https://user.eumetsat.int/resources/user-guides/storm-top-features>). На спутниковых изображениях в видимом диапазоне ОТ выглядит как выпуклость, купол или «горб» в верхней части конвективного шторма (*рис. 1*).

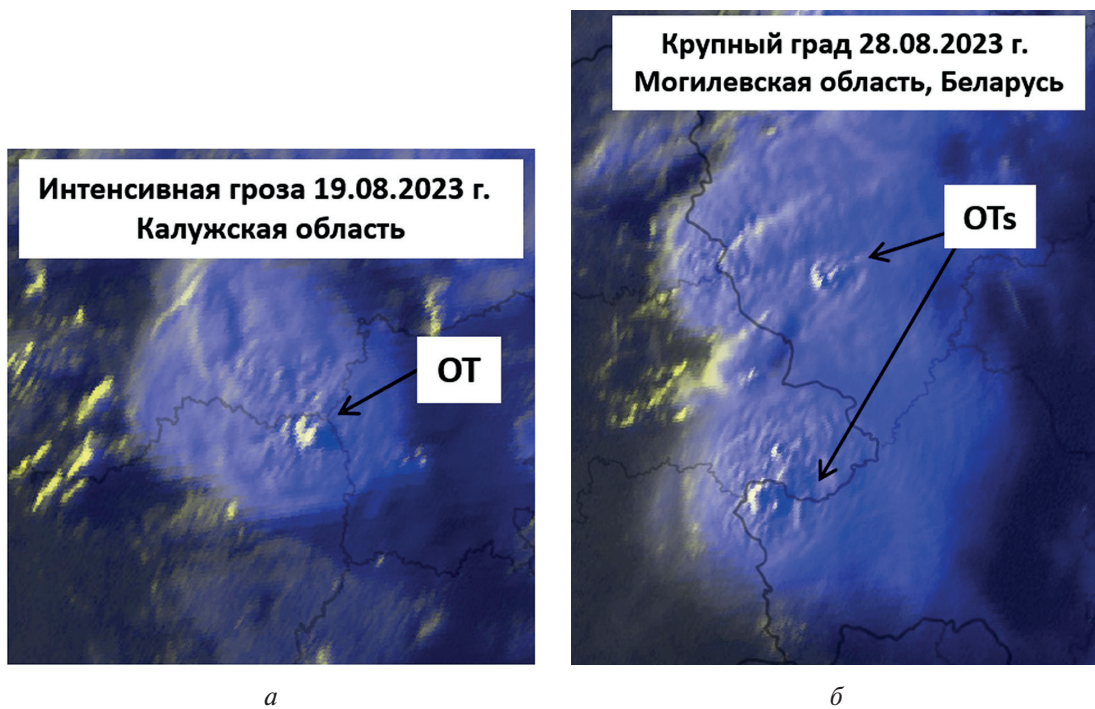


Рис. 1. Примеры сигнатуры куполообразного выступа ОТ на спутниковом цветном композите Meteosat-10, построенном по данным видимого канала высокого разрешения HRV (красный и зелёный цвет) и ИК-канала 10,8 мкм (синий цвет) — RGB-композиция *HRV_clouds* для случаев конвективных штормов с интенсивной грозой 19.08.2023 (*а*) и крупным градом 28.08.2023 (*б*) (источник спутникового снимка: <https://meteologix.com>)

По данным исследований (Bedka, 2011; Dworak et al., 2012; Sun et al., 2024; Valachová et al., 2013), обнаруживается связь между наличием у шторма сигнатуры ОТ и возникновением таких опасных явлений, как крупный град, сильные ливни, шквалы (возможны при дополнительном условии наличия сильных нисходящих потоков). Также ОТ представляет опасность для авиации из-за турбулентности и обледенения.

Устойчивая во времени и хорошо выраженная сигнатура ОТ повышает вероятность того, что шторм является суперъячейкой, но для более точной классификации обычно учитываются и другие её диагностические особенности, к примеру, по радиолокационным данным. Как известно, с суперъячейками могут быть связаны наиболее интенсивные опасные явления, в том числе смерчи (Hong et al., 2023; Valachová et al., 2013).

Разница температуры между ОТ и наковальней (минимальной температурой для пикселя внутри зоны ОТ и температурой пикселей, относящихся к окружающей наковальне), а также размер и продолжительность существования ОТ могут дать представление об интенсивности восходящего потока и потенциале опасных погодных явлений (Sun et al., 2024). Чем больше разность, тем более интенсивным считается восходящий поток, тем глубже он проникает в стратосферу, как правило, значение этой разности составляет не менее 10 К, часто выше. Более долгоживущие ОТ указывают на устойчивую сильную конвекцию, что увеличивает вероятность опасных явлений.

Существуют различные алгоритмы автоматического распознавания сигнатуры ОТ. Так, например, ОТ обнаруживают по более низкой температуре в ИК-диапазоне (для спутников MSG используется канал 10,8 мкм) по сравнению с окружающей наковальней с учётом эмпирически подобранных пороговых значений (Bedka et al., 2010, 2011; Sun et al., 2024). Известны алгоритмы, анализирующие текстуру в ИК-окне (для спутников MSG — 10,8 мкм) (Bedka et al., 2010). В видимом диапазоне ОТ выделяют по бугристой текстуре или текстуре, напоминающей «цветную капусту» (Bedka et al., 2025). Кроме того, в последнее время для выявления ОТ активно применяются и подходы к глубокому машинному обучению (Cooney et al., 2025).

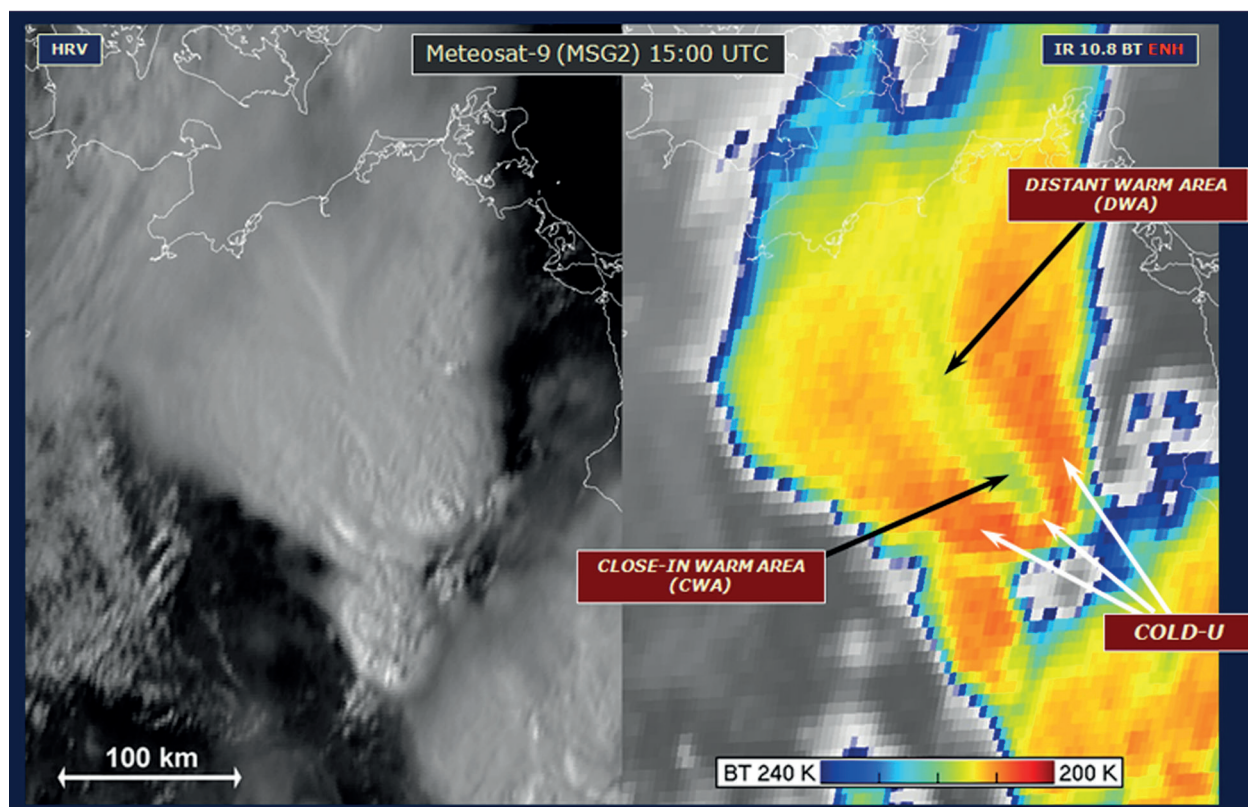
Холодная U/V-образная или кольцообразная область

Холодные U/V-образные сигнатуры, также известные ранее как Enhanced-V, представляют собой области низкой радиационной температуры в ИК-диапазоне (для спутников MSG используется канал 10,8 мкм), имеющие форму буквы V или U, с вершиной, расположенной вблизи купола ОТ шторма, часто охватывающие более тёплую область, расположенную в подветренной части шторма (Setvák et al., 2010) (*рис. 2а*, см. с. 13). Иногда холодная область выглядит в виде замкнутого кольца, тогда говорят о Cold-ring сигнатуре (см. *рис. 2б*). При этом внутри холодных «рукавов» заключены относительно более тёплые ближние и дальние области: соответственно CWA и DWA, либо одно центральное тёплое пятно — CWS (см. *рис. 2б*).

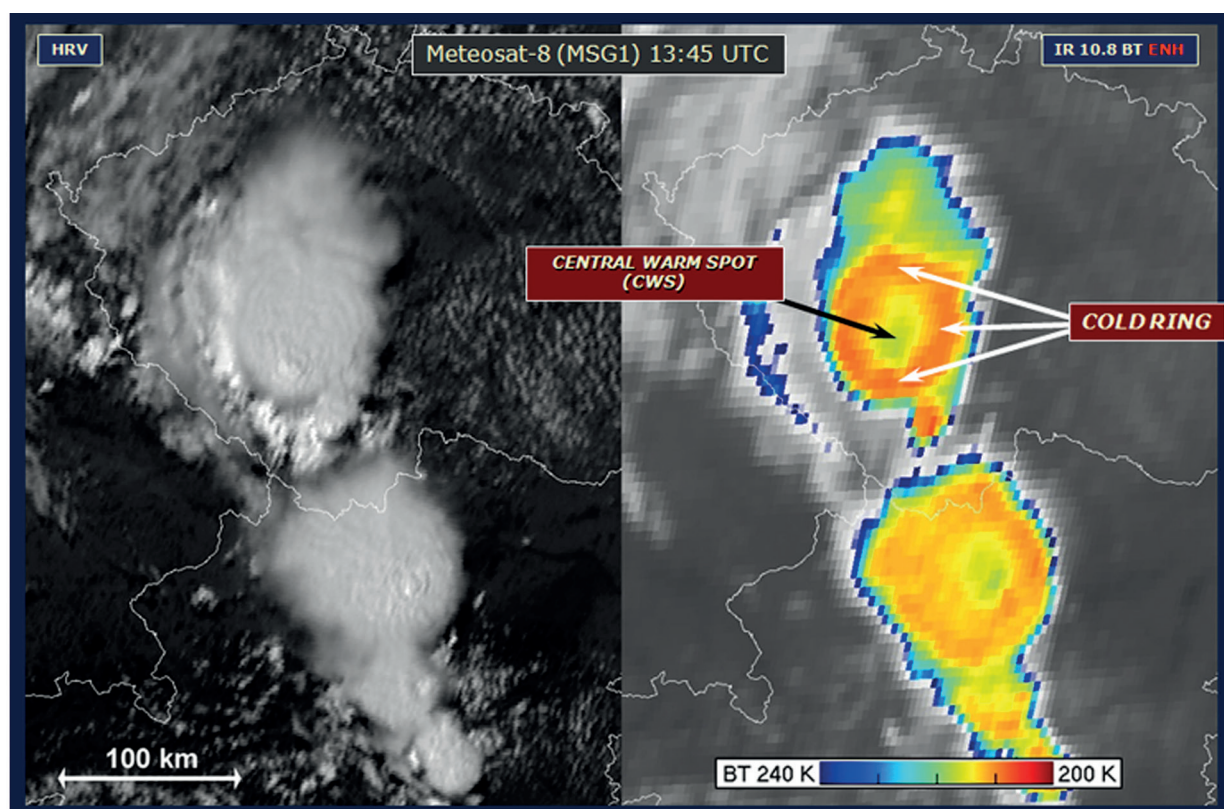
На данный момент нет единого представления о механизмах формирования сигнатуры Cold-U/V/ring. Считается, что она может возникать из-за смешивания потоков воздуха, обтекающих вершину ОТ с воздухом из нижней стратосферы с последующим «проседанием» верхней границы облака (*рис. 3б*, см. с. 14) (Feren, 2008). Другим возможным механизмом является маскировка холодной наковальни более тёплым перистым шлейфом, образующимся на подветренной стороне от ОТ на некоторой высоте от верхней границы облака (см. *рис. 3в*) (Setvák, Rabin, 2005). Существуют также и гипотеза распада ОТ при взаимодействии с натекающим на него внешним потоком на два шлейфа с более плотными частицами по контуру и менее плотными в центральной части, которая таким образом становится более прозрачной и как следствие имеет в ИК-диапазоне более высокую радиационную температуру (см. *рис. 3г*) (Hameyer, 2014).

Для визуального выявления сигнатуры Cold-U/V/ring требуется специальное цветовое отображение снимков в ИК-диапазоне, которое в англоязычной литературе часто обозначают термином *IR_Enhanced* (улучшенное ИК-изображение) (Setvák et al., 2010; <http://convectives-torm.blogspot.com>; <https://user.eumetsat.int/resources/case-studies/cold-u-shaped-convective-storm-close-to-maputo>). Пример такого отображения показан на *рис. 2*.

Холодные U/V-образные сигнатуры являются хорошо известным спутниковым признаком потенциально сильных штормов с высокой вероятностью возникновения опасных погодных явлений, таких как крупный град, шквалы и иногда смерчи (Brunner et al., 2007; Chernokulsky et al., 2023; Iršič Žibert, Žibert, 2013; Iršič Žibert et al., 2012).



a



b

Рис. 2. Примеры сигнатур Cold-U и Cold-ring, а также CWA, DWA и CWS для конвективных штормов над Европой: *a* — 26 мая 2007 г., Германия; *б* — 25 июня 2006 г., Чехия и Австрия. Слева изображения Meteosat в видимом диапазоне высокого разрешения (HRV), справа в ИК-диапазоне (10,8 мкм) со специальной расцветкой по радиационной температуре (Setvak et al., 2010). UTC (англ. Coordinated Universal Time) — всемирное координированное время

Сигнатуры Cold-U/V часто связаны с суперячейками. Наличие сигнатуры часто предшествует сообщениям об опасных погодных явлениях со значительной заблаговременностью (Chernokulsky et al., 2023; Iršič Žibert et al., 2012), что очень важно для наукастинга.

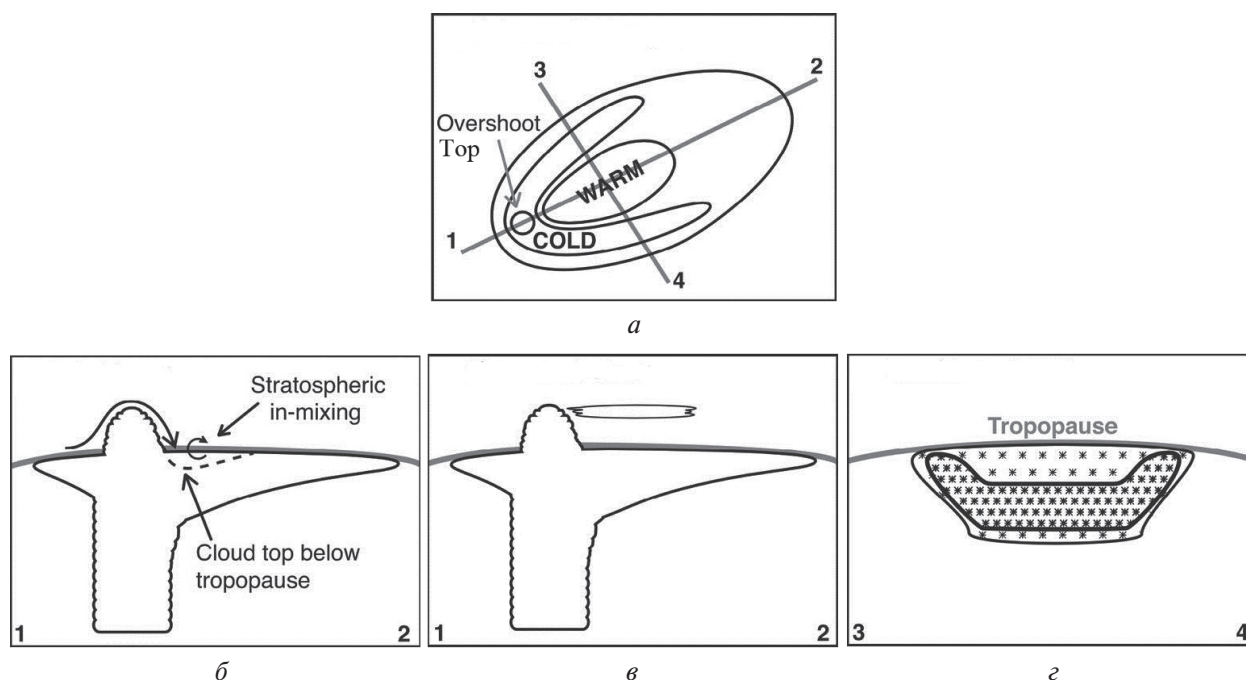


Рис. 3. Вид сверху (а) и схемы гипотез формирования сигнатуры Cold-U/V/ring (б–г) в плоскостях сечений, указанных в (а) цифрами 1–4 (Hameyer, 2014). Overshoot Top — выступающая вершина, Warm — тёплая область, Cold — холодная область, Stratospheric in-mixing — смешивание стратосферного воздуха с воздухом вблизи верхней границы облака, Cloud top below tropopause — проседание верхней границы облака ниже тропопаузы, Tropopause — тропопауза

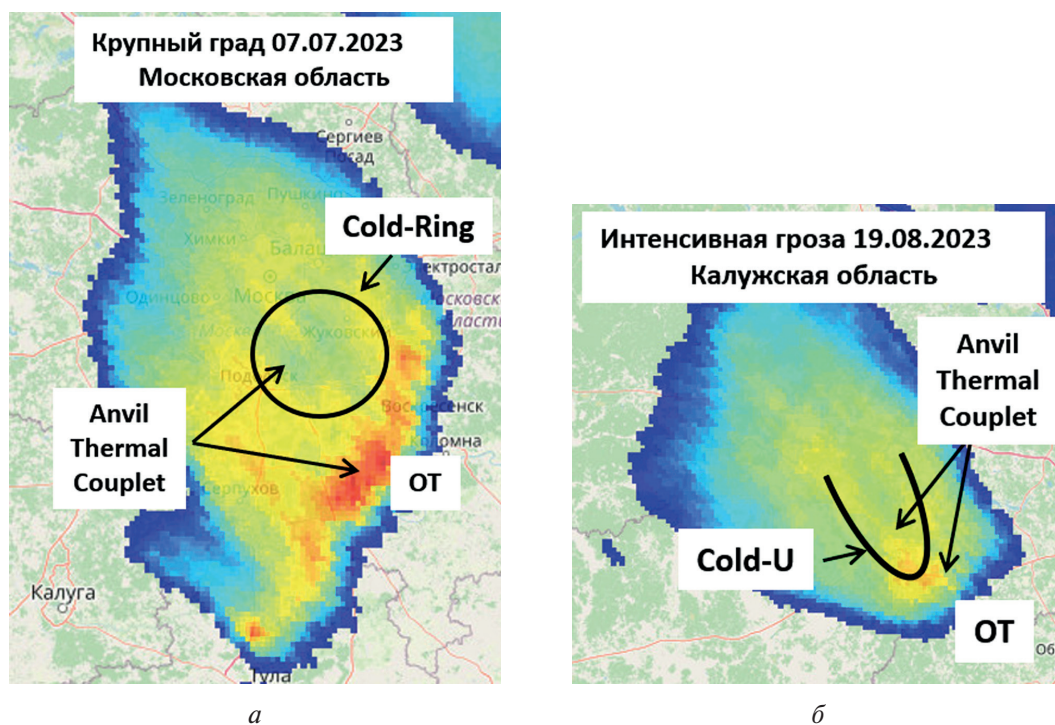


Рис. 4. Сигнатура Cold-ring и температурная пара АТС 07.07.2023 (а) и сигнатура Cold-U с АТС 19.08.2023 (б) на снимке «Электро-Л» № 3 в ИК-канале (10,7 мкм)

Форма и температурный контраст в пределах холодной U/V-образной сигнатуры, а также наличие и характеристики заключённой в ней тёплой области могут предоставить более конкретную информацию о типе и интенсивности связанных с ней опасных погодных явлений (Setvák et al., 2010). Более выраженная U/V-образная форма или большая разница температуры между холодными рукавами и тёплой областью могут указывать на более сильные ветры на верхних уровнях тропосферы (вблизи тропопаузы) или более интенсивный восходящий поток. Эволюция этой сигнатуры во времени также может коррелировать с изменениями интенсивности шторма.

Область CWA представляет собой зону более высокой радиационной температуры, расположенную по ветру и вблизи (≤ 50 км) от самой холодной части вершины шторма, часто внутри холодной U/V-образной сигнатуры. На спутниковых снимках CWA идентифицируется как локальный максимум радиационной температуры в пределах холодной области (Setvák et al., 2010). Вместе с холодной областью CWA образует температурную пару/разность (рис. 4, см. с. 14), которая может указывать на высокую интенсивность шторма (Natali et al., 2001). В англоязычной литературе такая температурная пара обозначается термином ATC (англ. Anvil Thermal Couplet). В некоторых алгоритмах автоматического распознавания Cold-U/V/ring выявление ATC является ключевым признаком для обнаружения этой сигнатуры, часто без явного указания её подтипа (U, V или кольцо) (Bedka et al., 2011; Brunner et al., 2007).

Перистые выбросы над наковальней

Под ААСР следует понимать перистую облачность, распространяющуюся горизонтально над наковальней конвективного шторма с подветренной стороны от ОТ и берущую своё начало от этого купола, отсюда в англоязычном варианте названия этой сигнатуры есть слово *plume*, которое переводится как шлейф или выброс (по аналогии с распространением загрязнения от источника выброса) (рис. 5). Перистые выбросы образуются в результате подъёма облачных масс интенсивными восходящими потоками в стратосферу с последующим разрушением гравитационных волн в условиях сильного сдвига ветра относительно шторма (Bedka et al., 2018; Wang, 2006; <https://user.eumetsat.int/resources/user-guides/storm-top-features>). Стратосферные ветры и турбулентность от разрушающихся волн способствуют растягиванию шлейфа ледяных кристаллов и формированию ААСР.

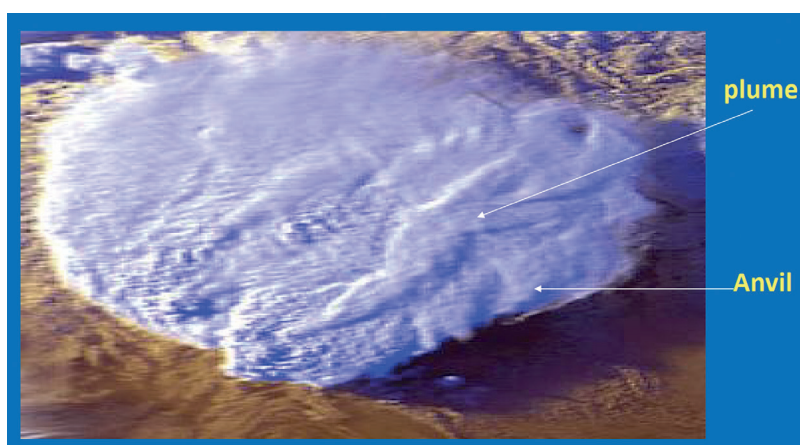


Рис. 5. Пример сигнатуры ААСР на спутниковом цветном композите NOAA-12 (Wang, 2006)

В видимом диапазоне ААСР часто демонстрируют уникальную текстуру, напоминающую дым, исходящий из купола ОТ, и отличающую их от основной наковальни. При этом ААСР могут отбрасывать тени на наковальню (см. рис. 5). В ИК-диапазоне они могут оказаться

теплее или холоднее наковальни в зависимости от температурных особенностей (стратификации) окружающего воздуха.

Перистые выбросы ААСР являются значимым индикатором опасных явлений, таких как сильные шквалы, крупный град и интенсивные смерчи (Atkinson, 2018; Bedka et al., 2018), часто появляясь до первых сообщений об опасных явлениях. Разрабатываются автоматизированные методы обнаружения ААСР, в том числе с использованием методов глубокого машинного обучения (Liles et al., 2020).

Разница температуры между ААСР и наковальней в инфракрасном диапазоне косвенно может дать представление об интенсивности восходящего потока и взаимодействии перистого шлейфа со стратосферой, потенциально указывая на степень проникновения в неё (Bedka et al., 2018; Wang, 2006). Длина и форма шлейфа также могут быть связаны с силой и направлением ветров верхних уровней тропосферы. Тёплые шлейфы конвективных штормов часто соответствуют облачности с высокой концентрацией мелких кристаллов, а они в свою очередь выносятся в стратосферу восходящим потоком, и чем выше его интенсивность, тем больше кристаллов формируют ААСР. Более длинный шлейф может указывать на более сильные ветры верхнего уровня, переносящие ледяные кристаллы вниз по потоку. Форма может зависеть от сдвига ветра и характера гравитационных волн (Wang, 2006).

Далее будут рассмотрены иные, менее описанные и менее изученные, спутниковые сигнатуры мощных конвективных штормов, при этом для некоторых из сигнатур будет также указана их взаимосвязь с опасными конвективными явлениями.

Внутренние гравитационные волны

Внутренние гравитационные волны (IGW) генерируются вертикальными колебаниями восходящих и нисходящих потоков, действующих как механические осцилляторы (Ansong, Sutherland, 2010; https://rcec.sinica.edu.tw/index_en.php?action=news&id=245). Они также способны возбуждаться восходящим потоком (проявляющимся в виде сигнатуры ОТ), действующим как препятствие для натекающего горизонтального потока (эффект препятствия) (Setvák, 2019). Могут проявляться как волновые структуры (в форме концентрических окружностей) на вершинах облаков (рис. 6), особенно в видимом и ближнем ИК-диапазонах (Setvák et al., 2003).

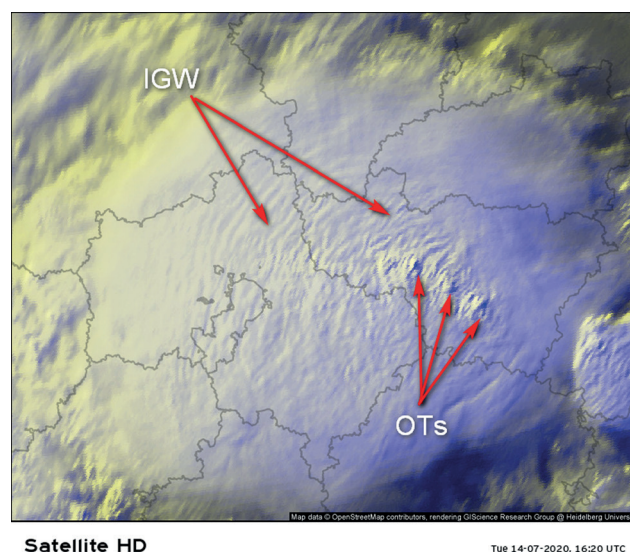


Рис. 6. Пример сигнатуры волн IGW, распространяющихся от нескольких ОТ, наблюдаемых на верхней границе мезомасштабной конвективной системы 14.07.2020 с интенсивной грозовой деятельностью и сильными ветрами по Московской и Владимирской областям, снимок Meteosat-8 в видимом диапазоне высокого разрешения (источник спутникового снимка: <https://meteologix.com>)

Волны IGW отражают взаимодействие между штормом и устойчивой стратосферой (https://rccs.sinica.edu.tw/index_en.php?action=news&id=245). Характеристики наблюдаемых IGW (длина волны, амплитуда, направление распространения) могут дать представление о механизмах их генерации (например, интенсивность и масштаб генерирующего эти волны конвективного шторма, силу восходящих потоков) и атмосферных условиях, в которых они распространяются (например, сдвиг ветра, устойчивость), а также о возможности сильных ветров, осадков и турбулентности.

Выпрыгивающие перистые облака

Над наковальной конвективного шторма может образоваться перистое облако, которое как бы «подпрыгивает» вверх, в англоязычной литературе такое облако получило название *Jumping Cirrus*. Оно формируется вследствие быстрого выноса ледяных кристаллов интенсивным восходящим потоком в стратосферу с последующим резким торможением на предельной высоте конвекции. При таких высокоинтенсивных конвективных процессах в некоторых случаях резкое изменение скорости и давления воздуха создаёт ударную волну (аналог гидравлического скачка в жидкостях), которая затем частично отражается вниз и, достигая наковальни, приводит к выталкиванию ледяных кристаллов из неё вверх и вбок. Их скопления впоследствии и формируют JC (*рис. 7 и 8*, см. с. 18) (Wang et al., 2016). Турбулентность, вызванная ударной волной, может привести к тому, что выбросы кристаллов будут распространяться против основного направления ветра, что характерно для JC (Wang, 2004, 2006). Известны различные формы (разновидности) таких облаков (Fujita, 1982).

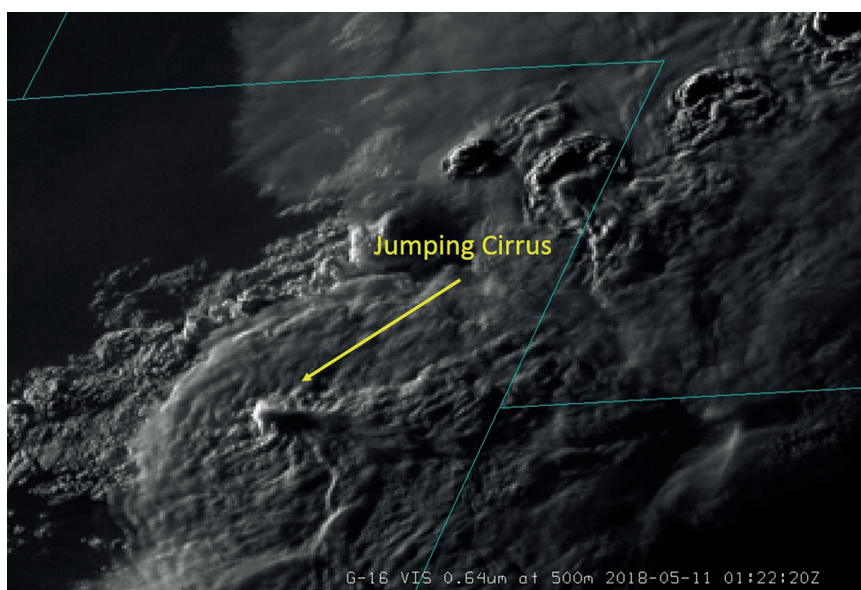


Рис. 7. Jumping Cirrus на снимке GOES-16 в видимом диапазоне, 11 мая 2018 г., 01:22 UTC (<https://user.eumetsat.int/resources/case-studies/cloud-top-features-over-mcs-seen-through-dust-rgb>)

На спутниковых снимках в видимом диапазоне JC идентифицируются по небольшим скоплениям облачности недалеко от ОТ, как будто бы поднимающимся из наковальни, иногда имеющим «рваную» форму (см. *рис. 8*). Последняя в том числе подчёркивает взрывной характер этих облаков: они быстро образуются и, как правило, существуют непродолжительное время (не более 30 мин), быстро рассеиваются сильными стратосферными ветрами.

Облака *Jumping Cirrus* часто наблюдаются вблизи зон максимальной конвективной активности и могут быть признаком наличия мощного восходящего потока внутри шторма, а значит и потенциала для развития различных опасных конвективных явлений.

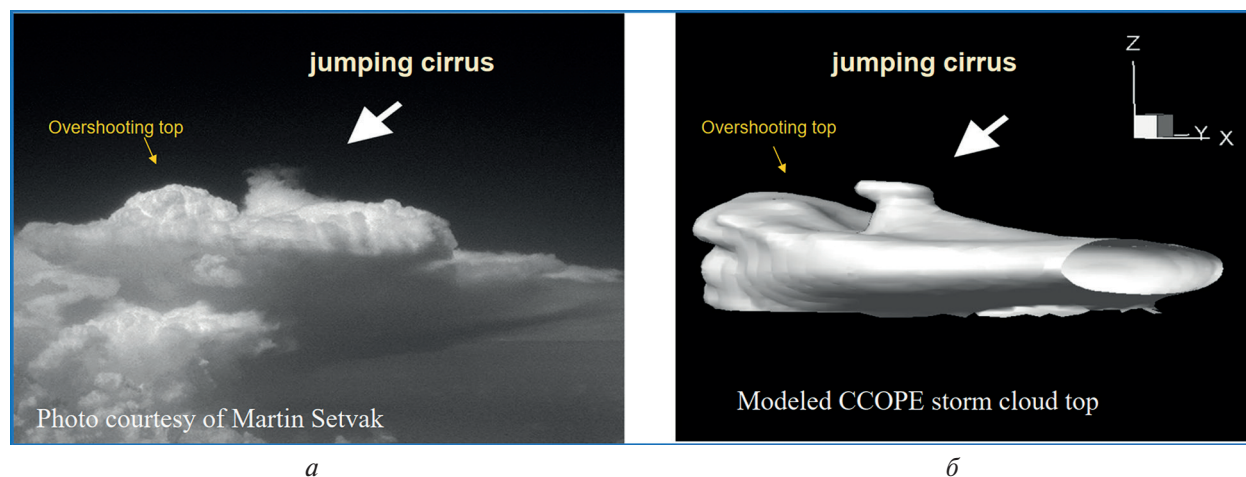
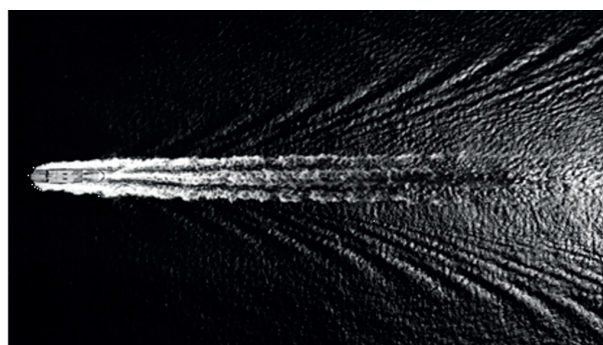
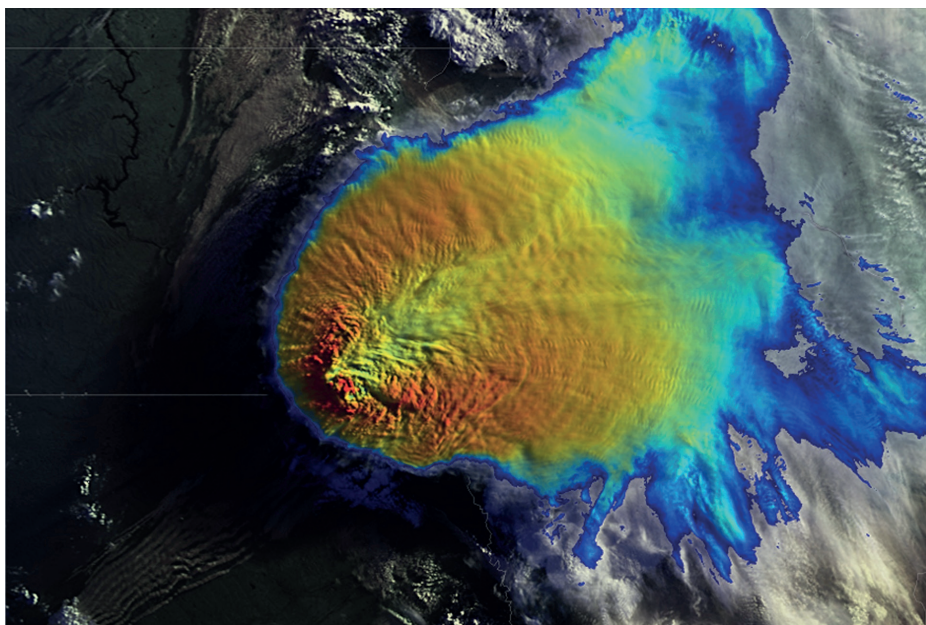


Рис. 8. Jumping Cirrus, сфотографированные с бокового ракурса М. Сетваком 24 мая 1996 г. с самолёта над Алабамой и Джорджией (а), изоповерхность (боковая проекция) относительной влажности 30 % для моделируемого шторма с использованием трёхмерной облакоразрешающей модели (б) (Wang, 2004)



а



б

Рис. 9. След волн от корабля (а) и корабельные волны Storm Tops Ship Waves, распространяющиеся от ОТ на верхней границе шторма над Южной Дакотой (США) на композитном (видимый и ИК-канал (10,8 мкм)) снимке NOAA-15 AVHRR (англ. Advanced Very-High-Resolution Radiometer) (б) (<https://resources.eumetrain.org/data/5/507/navmenu.php?tab=7&page=1.0.0>)

«Корабельные» волны на верхней границе штормов

На верхней границе мощных конвективных штормов могут генерироваться волны, по форме напоминающие след, остающийся от движения корабля по воде, отсюда и их название — корабельные, в англоязычном варианте — Storm Tops Ship Waves. Они формируются из-за сильного восходящего потока и дивергенции потоков на верхних уровнях, действующих как препятствие для окружающего воздушного потока (Wang et al., 2010). Лучше всего идентифицируются на видимых спутниковых снимках, особенно при низком угле наклона солнца, когда тени подчёркивают волнообразную структуру на верхней границе облака (рис. 9, см. с. 18). Наличие сигнатур корабельных волн указывает на сильное динамическое взаимодействие между мощным восходящим потоком мощного шторма и окружающими ветрами на верхних уровнях (Wang et al., 2010).

Радиальные перистые облака

Радиальные перистые облака — это полосы перистой облачности, ориентированные почти перпендикулярно направлению ветра на верхних уровнях тропосферы (вблизи тропопаузы), часто наблюдаемые над периферийной зоной штормов, иногда называемые поперечными перистыми полосами (Setvák et al., 2010). На спутниковых снимках в видимом и ИК-диапазонах они видны как длинные тонкие полосы, отходящие от центра шторма (рис. 10), иногда напоминающие спицы колеса. Для выявления перистых полос лучше всего подходят снимки в высоком разрешении (Lenz et al., 2009).

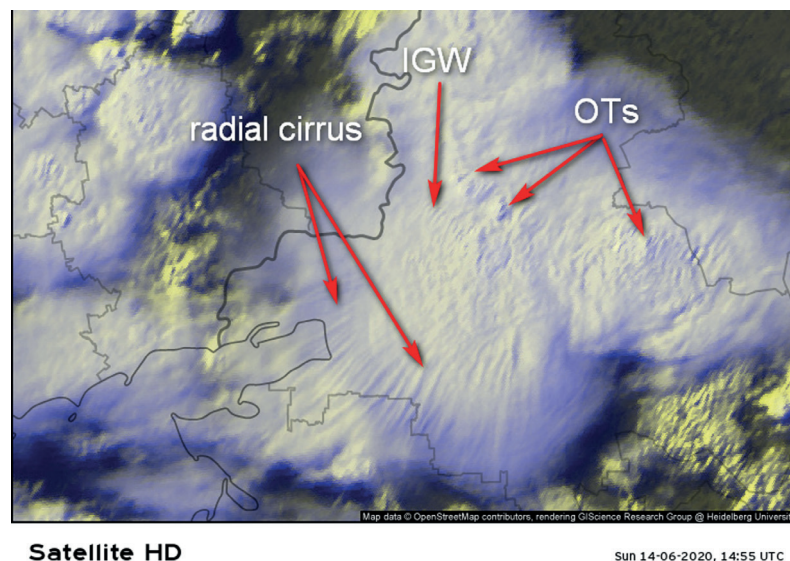


Рис. 10. Примеры сигнатур Radial Cirrus, а также OT и IGW, наблюдаемых на верхней границе мезомасштабной конвективной системы с крупным градом и сильными ветрами по Ростовской области 14.06.2020 на спутниковом снимке Meteosat-8 в видимом канале высокого разрешения (источник спутникового снимка: <https://meteologix.com>)

Пространственная организация радиальных полос (их структура), в частности расстояния между ними, может быть связана с силой сдвига ветра и характеристиками оттока от конвективного шторма, тем самым она позволяет получить представление об интенсивности шторма и вероятности турбулентности. Более плотное расположение или более чётко выраженные полосы могут указывать на более сильный сдвиг или более организованную структуру оттока. Известно, что ориентация относительно движения шторма также может быть значимой (Lenz et al., 2009).

В данном обзоре не были рассмотрены такие особенности на верхней границе штормов, как перистые облака в форме крыла чайки (*англ.* Gullwing Cirrus) и «блинчатые» облака (*англ.* Pancake Cloud), ввиду редкости их наблюдений или наблюдений только по определённым видам данных, например по данным спутника CALIPSO (*англ.* Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) для Gullwing Cirrus (Wang et al., 2016).

Заключение

На верхней границе конвективных штормов по спутниковым данным нередко выявляются специфические диагностические признаки (сигнатуры), указывающие, во-первых, на особую категорию этих облачных образований — штормов с мощным устойчивым восходящим потоком, во-вторых, на угрозу формирования связанных с ними опасных явлений. Последний факт подтверждается известными данными о заблаговременном проявлении сигнатур до регистрации опасных явлений.

На данный момент известно уже более десятка видов спутниковых сигнатур, по материалам преимущественно зарубежных исследователей, в том числе обоснована прогностическая значимость некоторых из них. По мнению авторов, имеются перспективы полезного использования этих сигнатур и в российской метеорологической практике (после соответствующего изучения особенностей их проявлений на территории нашей страны).

Механизмы формирования большинства спутниковых сигнатур до сих пор остаются недостаточно изученными, как следствие, при их рассмотрении часто приходится оперировать гипотезами или достаточно общими соображениями. Так, считается, что спутниковые сигнатуры есть результат сложного взаимодействия восходящих потоков конвективных штормов с потоками вблизи тропопаузы, приводящего к возникновению различных эффектов, таких как пробои тропопаузы, стратосферный вынос/перенос ледяных кристаллов, генерация и разрушение волн и др. Исходя из этого можно выделить так называемые волновые сигнатуры (внутренние гравитационные волны (*англ.* Internal Gravity Waves), корабельные волны (*англ.* Storm Tops Ship Waves)), сигнатуры перистой облачности (перистые выбросы (*англ.* Above-Anvil Cirrus Plume), прыгающие (*англ.* Jumping Cirrus) и радиальные (*англ.* Radial Cirrus) перистые облака) и сигнатуры, в первую очередь связанные с интенсивностью восходящего потока (куполообразные выступы (*англ.* Overshooting Top) и холодные паттерны (*англ.* Cold-U/V/ring)).

Спутниковые сигнатуры могут указывать на угрозы формирования опасных явлений различных типов, преимущественно на крупный град, шквал, сильные ветры и смерчи. Однако достаточно сложно с их помощью точно спрогнозировать конкретный тип ожидаемого опасного явления, больше информации по этому вопросу могут дать сигнатуры интенсивной конвекции, выявляемые по данным наземных радиолокационных наблюдений. Им посвящена отдельная работа.

Литературный обзор диагностических признаков интенсивной конвекции по спутниковым данным выполнен при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-17-00357, https://rscf.ru/prjcard_int?24-17-00357. Обработка и анализ спутниковых данных на европейской территории России проводились в рамках научно-исследовательской работы по плану НИТР Росгидромета на 2025–2029 гг. (тема 6.8).

Литература

1. Алексеева А. А., Бухаров В. М., Лосев В. М. Конвективный шторм в Московском регионе 28 июня 2021 года // Гидрометеорол. исслед. и прогнозы. 2022. № 1(383). С. 22–42. DOI: 10.37162/2618-9631-2022-1-22-42.
2. Ansong J. K., Sutherland B. R. Internal gravity waves generated by convective plumes // J. Fluid Mechanics. 2010. V. 648. P. 405–434. DOI: 10.1017/S0022112009993193.

3. *Atkinson J.* Satellite imagery reveals the Above Anvil Cirrus Plume of a storm // *scitechdaily.com*. 16.08.2018. <https://scitechdaily.com/satellite-imagery-reveals-the-above-anvil-cirrus-plume-of-a-storm/>.
4. *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. P. 175–189. DOI: 10.1016/j.atmosres.2010.10.001.
5. *Bedka K., Brunner J., Dworak R. et al.* Objective satellite-based detection of overshooting tops using infrared window channel brightness temperature gradients // *J. Applied Meteorology and Climatology*. 2010. V. 49. Iss. 2. P. 181–202. DOI: 10.1175/2009JAMC2286.1.
6. *Bedka K., Brunner J., Feltz W.* Overshooting top and enhanced-V detection. Version 1.0. Algorithm theoretical basis document. NOAA NESDIS STAR, 2011. 53 p. https://www.goes-r.gov/products/ATBDs/option2/Aviation_OvershootingTop_v1_no_color.pdf.
7. *Bedka K., Murillo E. M., Homeyer C. R. et al.* The above-anvil cirrus plume: An important severe weather indicator in visible and infrared satellite imagery // *Weather and Forecasting*. 2018. V. 33. Iss. 5. P. 1159–1181. DOI: 10.1175/WAF-D-18-0040.1.
8. *Bedka K., Brunner J., Feltz W., Dworak R.* Overshooting top and enhanced-V detections. Objective day/night overshooting top and enhanced-V detections using MODIS, AVHRR, and MSG imagery in preparation for GOES-R ABI // *cwg.eumetsat.int*. 23.04.2025. <https://cwg.eumetsat.int/overshooting-top-and-enhanced-v-detections>.
9. *Brunner J. C., Ackerman S. A., Bachmeier A. S., Rabin R. M.* A quantitative analysis of the enhanced-V feature in relation to severe weather // *Weather and Forecasting*. 2007. V. 22. Iss. 4. P. 853–872. DOI: 10.1175/WAF1022.1.
10. *Chernokulsky A., Shikhov A., Yarinich Y., Sprygin A.* An empirical relationship among characteristics of severe convective storms, their cloud-top properties and environmental parameters in Northern Eurasia // *Atmosphere*. 2023. V. 14. No. 1. Article 174. 23 p. DOI: 10.3390/atmos14010174.
11. *Cooney J. W., Bedka K. M., Liles C. A., Homeyer C. R.* Automated detection of overshooting tops and above-anvil cirrus plumes within geostationary imagery using deep learning // *Artificial Intelligence for the Earth Systems*. 2025. V. 4. Iss. 2. Article e240037. 28 p. DOI: 10.1175/AIES-D-24-0037.1.
12. *Dworak R., Bedka K., Brunner J., Feltz W.* Comparison between GOES-12 overshooting-top detections, WSR-88D radar reflectivity, and severe storm reports // *Weather and Forecasting*. 2012. V. 27. Iss. 3. P. 684–699. DOI: 10.1175/WAF-D-11-00070.1.
13. *Feren G.* Characteristics of eastern Australian-western Tasman Sea enhanced-Vs and their connection to severe weather // 24th Conf. on Severe Local Storms. 2008. Article P12.5. 15 p. <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/141650.pdf>.
14. *Fujita T. T.* Principle of stereoscopic height computations and their applications to stratospheric cirrus over severe thunderstorms // *J. Meteorological Soc. of Japan*. 1982. V. 60. Iss. 1. P. 355–368. DOI: 10.2151/jmsj1965.60.1_355.
15. *Homeyer C. R.* Formation of the enhanced-V infrared cloud-top feature from high-resolution three-dimensional radar observations // *J. Atmospheric Science*. 2014. V. 71. Iss. 1. P. 332–348. DOI: 10.1175/JAS-D-13-079.1.
16. *Hong Y., Nesbitt S. W., Trapp R. J., Di Girolamo L.* Near-global distributions of overshooting tops derived from Terra and Aqua MODIS observations // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2023. V. 16. Iss. 5. P. 1391–1406. DOI: 10.5194/amt-16-1391-2023.
17. *Iršič Žibert M., Žibert J.* Monitoring and automatic detection of the cold-ring patterns atop deep convective clouds using Meteosat data // *Atmospheric Research*. 2013. V. 123. P. 281–292. DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.08.007.
18. *Iršič Žibert M., Muri B., Žibert J.* Characteristics of cold-ring pattern on Meteosat/SEVIRI IR satellite images over Slovenia and their relation to hail reports // 2012 EUMETSAT Meteorological Satellite Conf. Poland, 2012. 5 p. https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-04/pdf_conf_p61_s7_04_irsiczib_p.pdf.
19. *Lenz A., Bedka K. M., Feltz W. F., Ackerman S. A.* Convectively induced transverse band signatures in satellite imagery // *Weather and Forecasting*. 2009. V. 24. Iss. 5. P. 1362–1373. DOI: 10.1175/2009WAF2222285.1.
20. *Liles C., Bedka K., Xia E., Huang Y. X., Biswas R., Dolan C., Jafari A. H., Smith T.* Automated detection of above anvil cirrus plume severe storm signature with deep learning // 2020 AMS Annual Meeting. Boston, MA, 2020. 1 p. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20200004197/downloads/20200004197.pdf>.
21. *Natali S., Wang P. K., Lin H.-m.* Cloud top analysis using cloud model simulations and satellite observations // 11th Conf. on Satellite Meteorology and Oceanography. 2001. Article P5.17. 4 p. <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/24983.pdf>.
22. *Setvák M.* Satellite observations of gravity waves, generated by convective storms into the upper atmosphere // Taipei SWEP 2019 Workshop. Academia Sinica, RCEC, Taipei, 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.30379.80169.

23. *Setvák M., Rabin R. M.* MSG observations of deep convective storms // Proc. 2005 EUMETSAT Meteorological Satellite Conf. Croatia, 2005. Article 46. 9 p. https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-04/pdf_conf_p46_s6_07_setvak-ra_v.pdf.
24. *Setvák M., Rabin R. M., Doswell C. A., III, Levizzani V.* Satellite observations of convective storm tops in the 1.6, 3.7 and 3.9 μm spectral bands // Atmospheric Research. 2003. V. 67–68. P. 607–627. DOI: 10.1016/S0169-8095(03)00076-0.
25. *Setvák M., Lindsey D. T., Novak P. et al.* Satellite-observed cold-ring-shaped features atop deep convective clouds // Atmospheric Research. 2010. V. 97. Iss. 1–2. P. 80–96. DOI: 10.1016/j.atmosres.2010.03.009.
26. *Sun L., Zhuhe X., Zhu S.* Geostationary satellite-based overshooting top detections and their relationship to severe weather over eastern China // Remote Sensing. 2024. V. 16. No. 11. Article 2015. 20 p. DOI: 10.3390/rs16112015.
27. *Valachová P., Setvák M., Štáštka J.* Overshooting tops — characteristics and properties // Proc. 2013 EUMETSAT Meteorological Satellite Conf. Austria, 2013. 8 p. https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-04/pdf_conf_p_sl0_06_valachov_p.pdf.
28. *Wang P. K.* A cloud model interpretation of jumping cirrus above storm top // Geophysical Research Letters. 2004. V. 31. Iss. 18. Article L18106. 4 p. DOI: 10.1029/2004GL020787.
29. *Wang P. K.* Deep convective cloud phenomena in the upper troposphere/lower stratosphere — A new development in cloud science // 12th Conf. on Cloud Physics and 12th Conf. on Atmospheric Radiation. Madison, WI, 2006. Article 11.2. 6 p.
30. *Wang P. K., Su S.-H., Setvak M. et al.* Ship wave signature at the cloud top of deep convective storms // Atmospheric Research. 2010. V. 97. Iss. 3. P. 294–302. DOI: 10.1016/j.atmosres.2010.03.015.
31. *Wang P. K., Cheng K.-Y., Setvak M., Wang Ch.-K.* The origin of the gullwing-shaped cirrus above an Argentinian thunderstorm as seen in CALIPSO images // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2016. V. 121. Iss. 7. P. 3729–3738. DOI: 10.1002/2015JD024111.

Diagnostic features of severe convection. Part 2: Signatures derived from satellite data

A. A. Sprygin, O. V. Kalmykova

Research and Production Association “Typhoon”, Obninsk 249038, Russia

E-mails: sprygin@rpatyphoon.ru, kov@feerc.ru

A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia

The work continues the authors' research series on exploring new possibilities for forecasting severe convective phenomena. The first part of the study examined diagnostic features (signatures) of intense convective processes on the basis of ground-based radar observations. The second part provides a review of signatures from satellite data. For our country, this is a relatively new and not yet fully mastered area of research, which is actively developing in foreign countries. Satellite observations play a crucial role in understanding and forecasting deep convection systems, especially in regions with limited ground-based radar coverage. As the availability of satellite data with high temporal and spectral resolution increases, the opportunities for identifying and analyzing satellite signatures expand significantly. It is known that their manifestations often precede the formation of severe weather events on the ground with some lead time, which is particularly important. The physical foundations of the formation of certain satellite signatures of intense convection are considered, taking into account existing concepts (hypotheses) about their formation; the relationships between the signatures and different types of convective systems are described. For some of the signatures, the known experience of their automatic recognition is indicated. Cases of satellite signature manifestations in the study region are demonstrated.

Keywords: diagnostic features, satellite signatures, intense convection, satellite data, severe weather, hazardous convective phenomena, severe convective storms, forecasting, nowcasting

Accepted: 27.08.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-9-24

References

1. Alekseeva A. A., Buharov V. M., Losev V. M., The convective storm in the Moscow Region on June 28, 2021, *Hydrometeorological research and forecasting*, 2022, No. 1(383), pp. 22–42 (in Russian), DOI: 10.37162/2618-9631-2022-1-22-42.
2. Ansong J. K., Sutherland B. R., Internal gravity waves generated by convective plumes, *J. Fluid Mechanics*, 2010, V. 648, pp. 405–434, DOI: 10.1017/S0022112009993193.
3. Atkinson J., Satellite imagery reveals the Above Anvil Cirrus Plume of a storm, *scitechdaily.com*, 16.08.2018, <https://scitechdaily.com/satellite-imagery-reveals-the-above-anvil-cirrus-plume-of-a-storm/>.
4. 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, pp. 175–189, DOI: 10.1016/j.atmosres.2010.10.001.
5. Bedka K., Brunner J., Dworak R. et al., Objective satellite-based detection of overshooting tops using infrared window channel brightness temperature gradients, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2010, V. 49, Iss. 2, pp. 181–202, DOI: 10.1175/2009JAMC2286.1.
6. Bedka K., Brunner J., Feltz W., *Overshooting top and enhanced-V detection. Version 1.0. Algorithm theoretical basis document*, NOAA NESDIS STAR, 2011, 53 p., https://www.goes-r.gov/products/ATBDs/option2/Aviation_OvershootingTop_v1_no_color.pdf.
7. Bedka K., Murillo E. M., Homeyer C. R. et al., The above-anvil cirrus plume: An important severe weather indicator in visible and infrared satellite imagery, *Weather and Forecasting*, 2018, V. 33, Iss. 5, pp. 1159–1181, DOI: 10.1175/WAF-D-18-0040.1.
8. Bedka K., Brunner J., Feltz W., Dworak R., Overshooting top and enhanced-V detections, Objective day/night overshooting top and enhanced-V detections using MODIS, AVHRR, and MSG imagery in preparation for GOES-R ABI, *cwg.eumetsat.int*, 23.04.2025, <https://cwg.eumetsat.int/overshooting-top-and-enhanced-v-detections>.
9. Brunner J. C., Ackerman S. A., Bachmeier A. S., Rabin R. M., A quantitative analysis of the enhanced-V feature in relation to severe weather, *Weather and Forecasting*, 2007, V. 22, Iss. 4, pp. 853–872, DOI: 10.1175/WAF1022.1.
10. Chernokulsky A., Shikhov A., Yarinich Y., Sprygin A., An empirical relationship among characteristics of severe convective storms, their cloud-top properties and environmental parameters in Northern Eurasia, *Atmosphere*, 2023, V. 14, No. 1, Article 174, 23 p., DOI: 10.3390/atmos14010174.
11. Cooney J. W., Bedka K. M., Liles C. A., Homeyer C. R., Automated detection of overshooting tops and above-anvil cirrus plumes within geostationary imagery using deep learning, *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 2025, V. 4, Iss. 2, Article e240037, 28 p., DOI: 10.1175/AIES-D-24-0037.1.
12. Dworak R., Bedka K., Brunner J., Feltz W., Comparison between GOES-12 overshooting-top detections, WSR-88D radar reflectivity, and severe storm reports, *Weather and Forecasting*, V. 27, Iss. 3, pp. 684–699, DOI: 10.1175/WAF-D-11-00070.1.
13. Feren G., Characteristics of eastern Australian-western Tasman Sea enhanced-Vs and their connection to severe weather, *24th Conf. on Severe Local Storms*, 2008, Article P12.5, 15 p., <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/141650.pdf>.
14. Fujita T. T., Principle of stereoscopic height computations and their applications to stratospheric cirrus over severe thunderstorms, *J. Meteorological Soc. of Japan*, 1982, V. 60, Iss. 1, pp. 355–368, DOI: 10.2151/jmsj1965.60.1_355.
15. Homeyer C. R., Formation of the enhanced-V infrared cloud-top feature from high-resolution three-dimensional radar observations, *J. Atmospheric Science*, 2014, V. 71, Iss. 1, pp. 332–348, DOI: 10.1175/JAS-D-13-079.1.
16. Hong Y., Nesbitt S. W., Trapp R. J., Di Girolamo L., Near-global distributions of overshooting tops derived from Terra and Aqua MODIS observations, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2023, V. 16, Iss. 5, pp. 1391–1406, DOI: 10.5194/amt-16-1391-2023.
17. Iršič Žibert M., Žibert J., Monitoring and automatic detection of the cold-ring patterns atop deep convective clouds using Meteosat data, *Atmospheric Research*, 2013, V. 123, pp. 281–292, DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.08.007.
18. Iršič Žibert M., Muri B., Žibert J., Characteristics of cold-ring pattern on Meteosat/SEVIRI IR satellite images over Slovenia and their relation to hail reports, *2012 EUMETSAT Meteorological Satellite Conf. Poland*, 2012, 5 p., https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-04/pdf_conf_p61_s7_04_irsiczib_p.pdf.
19. Lenz A., Bedka K., Feltz W., Ackerman S., Convectively induced transverse band signatures in satellite imagery, *Weather and Forecasting*, 2009, V. 24, Iss. 5, pp. 1362–1373, DOI: 10.1175/2009WAF2222285.1.

20. Liles C., Bedka K., Xia E., Huang Y.X., Biswas R., Dolan C., Jafari A. H., Smith T., Automated detection of above anvil cirrus plume severe storm signature with deep learning, *2020 AMS Annual Meeting*, Boston, MA, 2020, 1 p., <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20200004197/downloads/20200004197.pdf>.
21. Natali S., Wang P. K., Lin H.-m., Cloud top analysis using cloud model simulations and satellite observations, *11th Conf. on Satellite Meteorology and Oceanography*, 2001, Article P5.17, 4 p., <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/24983.pdf>.
22. Setvák M., Satellite observations of gravity waves, generated by convective storms into the upper atmosphere, *Taipei SWEP 2019 Workshop*, Academia Sinica, RCEC, Taipei, 2019, DOI: 10.13140/RG.2.2.30379.80169.
23. Setvák M., Rabin R. M., MSG observations of deep convective storms, *Proc. 2005 EUMETSAT Meteorological Satellite Conf.*, Croatia, 2005, Article 46, 9 p., https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-04/pdf_conf_p46_s6_07_setvak-ra_v.pdf.
24. Setvák M., Rabin R. M., Doswell C. A., III, Levizzani V., Satellite observations of convective storm tops in the 1.6, 3.7 and 3.9 μm spectral bands, *Atmospheric Research*, 2003, V. 67–68, pp. 607–627, DOI: 10.1016/S0169-8095(03)00076-0.
25. Setvák M., Lindsey D. T., Novak P. et al., Satellite-observed cold-ring-shaped features atop deep convective clouds, *Atmospheric Research*, 2010, V. 97, Iss. 1–2, pp. 80–96, DOI: 10.1016/j.atmosres.2010.03.009.
26. Sun L., Zhuge X., Zhu S., Geostationary satellite-based overshooting top detections and their relationship to severe weather over eastern China, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, No. 11, Article 2015, 20 p., DOI: 10.3390/rs16112015.
27. Valachová P., Setvák M., Šťástka J., Overshooting tops — characteristics and properties, *Proc. 2013 EUMETSAT Meteorological Satellite Conf.*, Austria, 2013, 8 p., https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-04/pdf_conf_p_s10_06_valachov_p.pdf.
28. Wang P. K., A cloud model interpretation of jumping cirrus above storm top, *Geophysical Research Letters*, 2004, V. 31, Iss. 18, Article L18106, 4 p., DOI: 10.1029/2004GL020787.
29. Wang P. K., Deep convective cloud phenomena in the upper troposphere/lower stratosphere — A new development in cloud science, *12th Conf. on Cloud Physics and 12th Conf. on Atmospheric Radiation*, Madison, WI, 2006, Article 11.2, 6 p.
30. Wang P. K., Su S.-H., Setvak M. et al., Ship wave signature at the cloud top of deep convective storms, *Atmospheric Research*, 2010, V. 97, Iss. 3, pp. 294–302, DOI: 10.1016/j.atmosres.2010.03.015.
31. Wang P. K., Cheng K.-Y., Setvak M., Wang Ch.-K., The origin of the gullwing-shaped cirrus above an Argentinian thunderstorm as seen in CALIPSO images, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, V. 121, Iss. 7, pp. 3729–3738, DOI: 10.1002/2015JD024111.