

Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 620—643.
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(69):620—643.

Научная статья
УДК 551.515.4:551.553.8
doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-620-643

Слияние мощных конвективных штормов. Типизация

Евгений Михайлович Лившиц¹, Василий Иванович Петров²

¹ Свободный исследователь, Франкфурт-на-Майне, Германия,
evmaleposoru@googlemail.com

² Свободный исследователь, Республика Молдова, Кишинев

Аннотация. Радиолокационные исследования с помощью АСУ-МРЛ в Республике Молдова выявили две группы последствий слияний мощных градовых мультячейковых штормов: 67 % штормов диссипируют, 33 % — развиваются. Обнаружен феномен, ранее в литературе не отмечавшийся, связанный с развитием слившихся штормов внутри узла мезо-β-масштабных конвективных структур. Сформулирована гипотеза, объясняющая причины, процесс и последствия слияния мощных конвективных штормов. Результаты могут быть полезны при проведении активных воздействий на конвективные облака, для штормоповещения, многих сфер народного хозяйства.

Ключевые слова: мощный конвективный шторм, слияние штормов, мезомасштабные конвективные ячейки (ММКЯ), мезомасштабные конвективные линии (ММКЛ), линия фидерных облаков (ЛФО), узел, грань.

Для цитирования: Лившиц Е. М., Петров В. И. Слияние мощных конвективных штормов. Типизация // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 620—643. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-620-643.

Merging of convective storms and their typing

Evgenii M. Livshits¹, Vasilii I. Petrov²

¹ Free Researcher, Frankfurt am Main, Germany, evmaleposoru@googlemail

² Free Researcher, Kishinev, Republic of Moldova.

Summary. Radar studies with ASU-MRL in the Republic of Moldova have revealed two groups of effects of mergers of powerful hail melt storms: 67 % of storms dissipate and 33 % develop. It has been shown for the first time that the phenomenon of convective storm mergers is associated with storm development along the elements of meso-β-scale structures (MMCC and/or MMCL), which dictate the direction, speed and intensity of storm development, their convergence and ways of existence in the nodes and on the edges of these structures. A double phenomenon, not previously noted in the literature, has been found: the merging of two multicell storms in a node with consequent splitting of the merged storm into two, each of which continuing their movement and development along divergent trajectories. A hypothesis explaining the causes, process, and consequences of merging storms has been formulated. The cause of storm mergers is the configuration of convergence lines in the form of MMCC and/or MMCL, leading to the convergence of storms developing along these lines. The merger process is associated with the interaction of feeder cloud lines belonging to each of the storms; intersecting, the feeder cloud lines provide feeder cell amplification and explosive manifestation of radio echoes from them as merging storms; dissipation or development after the merger depends on the orientation of the MMCC and/or MMCL elements. The results are applicable in active influencing on convective clouds, in storm warning, and for the needs of the national economy.

© Лившиц Е. М., Петров В. И., 2022

Keywords: thunderstorm, storm merger, mesoscale convective cells (MSCC), mesoscale convective lines (MSCL), feeder cloud line (flanking line), node, facet.

For citation: Livshits E. M., Petrov V. I. Merging of convective storms and their typing. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(69):620—643. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-620-643. (In Russ.).

Введение

Слияние конвективных штормов — наиболее распространенный из всех феноменов, связанных с Cu cong и Cb. Но, прежде чем перейти к его описанию, необходимо сделать несколько предварительных замечаний, касающихся внутренней структуры конвективных штормов.

Мультиячейковые конвективные штормы состоят из совокупности облачных ячеек, радиолокационный образ которых, радиолокационные ячейки, имеют квазивертикальную структуру изоконтуров отражаемости, отображающей восходящие и нисходящие потоки в виде локальных относительных максимумов. В зависимости от соотношения диаметра радиолокационной ячейки (D) и расстояния между ячейками в шторме (L) можно говорить о «сильной» или «слабой» эволюции (при $L \geq D$ — «сильная», при $L < D$ — слабая) [1]. При «сильной» эволюции возможно различать радиолокационные ячейки друг от друга. При «слабой» эволюции, чаще всего, локализация радиолокационной ячейки внутри шторма затруднена или невозможна. *Важнейшим свойством радиолокационной ячейки является ее смещение по вектору ведущего потока \vec{v}_n .*

Одним из свойств и одновременно отличием мультиячейкового шторма от радиолокационных ячеек является наличие в нем «навеса радиоэха», накрывающего сверху область локализации восходящего потока [2]. В зарубежных работах понятие «навеса радиоэха» не применяется, вместо этого используют такие, как WER (Weak Echo Region — область слабого радиоэха, связанная с локализацией мощного восходящего потока в целом) и BWER (Bounded Weak Echo Region — ограниченная область слабого радиоэха — часть области слабого радиоэха в виде купола, локализирующего место самого сильного восходящего потока) [3—5]. Смещение шторма как единого целого (\vec{v}_m) определяется соотношением:

$$\vec{v}_m = \vec{v}_n + \vec{v}_3, \quad (1)$$

где \vec{v}_n — направление (откуда) и скорость ветра на высоте 600 гПа (ведущий поток), а \vec{v}_3 — вектор эволюции, указывающий направление (откуда) и скорость обновления шторма за счет вхождения в его радиолокационное тело фидерных, «кормящих» шторм, ячеек. Линия фидерных облаков (ЛФО — Flanking Line), представляющая линейную совокупность фидерных ячеек [6], является самым важным свойством, отличающим конвективный шторм от радиолокационной ячейки. Чаще всего фидерных ячейки радаром не обнаруживаются, однако являются неотъемлемой частью шторма.

Актуальность изучения феномена слияния конвективных облаков диктуется не только тем, что это явление весьма распространено, но и в огромной степени тем, что мощные конвективные штормы наносят огромный ущерб градобитиями,

катастрофическими осадками, электрическими разрядами и мощными ветрами. Кроме того, конвективные штормы являются объектами активных воздействий с целью подавления града, модификации осадков. Все это требует тщательного изучения с целью поиска методов прогнозирования перечисленных явлений и, насколько это возможно, уменьшения негативных последствий таких природных явлений.

Изучению этого феномена посвящено большое количество работ, в которых описываются механизмы, приводящие к слиянию облаков: *конвергенция на низких уровнях* [7], *взаимодействие сдвига ветра и нисходящих потоков* [7, 8]; *градиент давления между двумя штормами*, находящимися на разных стадиях развития [9, 10]; *оттоки верхнего уровня* [8], *разные скорости распространения двух штормов* [7, 11], *увеличение горизонтальных размеров сближающихся облаков* [8], *вращение облаков* [12]. С процессом слияний конвективных облаков многие исследователи связывают появление «*облачного моста*», объединяющего два радиоэха от среднего уровня с распространением до земли [7—9]; *усиление молниевой (грозовой) активности* [13—15], *увеличение объемов слившихся облаков, увеличение радиолокационной отражаемости Z, высоты облаков, интенсивности* и суммарного количества осадков, *площадей осадков* [16—20] и т.п. *Эффективность* процесса слияния, как считают авторы численных экспериментов с трехмерной моделью, *связана с толщиной приземного слоя* [10] и/или от *взаимного расположения сливающихся облаков и сдвига ветра* в тропосфере [21].

Большое количество литературы, освещающей процессы слияния облаков, дают нам, на первый взгляд, много информации о данном феномене [7—21]. Тем не менее, вследствие смешения понятий: облако — ячейка, облако — конвективная ячейка, облако — радиолокационная ячейка, ячейка — шторм, фидерная ячейка — шторм и других, существует терминологическое разнообразие, а точнее сказать, неразбериха. Часто, например, в работах [7, 8] вообще не разделялись случаи слияния фидерных ячеек со штормом от случаев слияния штормов. В некоторых исследованиях [17—19], использовавших программы вторичной обработки информации Titan [22], радиолокационные данные аппроксимировались эллипсом на основании расчетов в квадратах 5×5 км с частотой обзора каждые 5 мин. В другом, используя систему АКСОПРИ, авторы [23], применительно к полям осадков, получали информацию в квадратах 4×4 км с частотой каждые 10 мин. Таким образом, применение методов логико-математической компьютерной обработки эхо-сигналов от облачных объектов, хотя и дало какое-то представление о рассматриваемых радиоэхо от облаков, привело во многих случаях к тому, что реальные объекты (радиолокационные ячейки, фидерные ячейки, штормы в целом) превращаются в пиксели размером, соизмеримым с самими изучаемыми радиолокационными объектами. В зависимости от шага сетки и алгоритмов обработки, зачастую, получаются новые объекты, сильно отличающиеся от реальных. Для площадных измерений осадков, для климатических исследований, прогнозирования явлений синоптического масштаба и т.п., такой подход, вероятно, может быть приемлемым. В наших исследованиях, напротив, мы концентрируем свое внимание на подробном изучении конкретных радиолокационных

ситуаций. С помощью системы АСУ-МРЛ [24] мы получаем информацию в квадратах 500×500 м с частотой 3,5 мин. Это дает возможность в 190 раз более точнее и подробнее, чем, например, система АКСОПРИ, изучать радиолокационные объекты и феномены, всегда имея в виду — что стоит за тем или иным радиолокационным образом, в какой степени получаемая картина радиоэха соответствует реальным физическим процессам, происходящим в облаках.

Предметом данного исследования является описание самого процесса слияния конвективных штормов, последствий этих слияний — развитие или диссипация, изменение радиолокационных и геометрических параметров до, в процессе и после слияния, а также поиск механизмов, приводящих к реализации феномена слияния.

Исходные материалы и методика исследований

Основными материалами для исследований послужили радиолокационные наблюдения радаром МРЛ-5 ($\lambda = 10$ см) с АСУ-МРЛ [24] в системе противорадарной защиты (ПГЗ) Республики Молдова. Из непрерывных радиолокационных наблюдений с частотой обзора полусферы около 3—3,5 мин было отобрано 138 случаев с тем, чтобы представить наиболее полный спектр возможных типов слияний штормов. При этом использовались горизонтальные сечения радиоэха на различных высотах и наиболее характерные вертикальные сечения. Измерялся широкий спектр параметров штормов: Z_{\max} (максимальная радиолокационная отражаемость), ΔN_{25dBZ} , ΔN_{35dBZ} и т.д. по возрастающей значений Z (превышение высоты соответствующего изоконтуров отражаемости над высотой нулевой изотермы), индентифицировался вид и интенсивность выпадающих осадков, тенденция развития конкретного шторма. В отдельных случаях измерялись некоторые геометрические параметры штормов — например, объемы радиоэха с заданной Z , расстояния между штормами в начальный момент их возникновения и т.д. Плановая структура радиоэха в радиусе наблюдений представлялась в Эйлеровой системе координат (ЭСК), когда в ее центре находился неподвижный радар и в Лагранжевой системе координат (ЛСК), что исключало маскирующее влияние смещения тропосферы и позволяло получать интегральные картины радиоэха (ИК) за определенные промежутки времени или за весь грозоградный процесс в целом [25—27]. Все эти и другие операции позволили изучить тонкую структуру, динамику и кинематику штормов до, в процессе и после их слияния. Для анализа также привлекалась аэрологическая и синоптическая информация. Отдельные методические приемы обработки и анализа, не упомянутые здесь, поясняются по ходу изложения.

Радиолокационные исследования слияния мощных конвективных штормов

Поскольку в нашем исследовании единственным наблюдательным и измерительным инструментом является некогерентный радиолокатор МРЛ-5 с длиной волны 10 см, мы рассмотрим только радиолокационные аспекты слияния штормов. При этом процесс эволюции шторма через слияние его с фидерными ячейками мы

не относим в данном случае к слиянию штормов, т. к. *фидерные ячейки*, хотя и не видны, как правило, радиолокаторами, *являются неотъемлемой частью шторма* [28, 29], без которых шторм, как система взаимодействующих облачных ячеек, существовать не может. Там же нами отмечено, что *шторм — это*, скорее всего, *не столько объект, сколько процесс*, элементы которого невозможно рассматривать отдельно друг от друга.

Прямым следствием этого утверждения является то, что *феномен слияния шторма с фидерными ячейками составляет основную сущность любого конвективного шторма*, так как он состоит из нескольких ячеек и эволюционирует за счет вхождения в радиолокационное тело шторма новых фидерных ячеек. Важно подчеркнуть, что развитие, *эволюция шторма* за счет слияния с фидерными ячейками *всегда имеет направленность* (вектор эволюции — \vec{v} , всегда направлен от шторма к фидерным ячейкам) *и очередность* — сначала со штормом сливается 1-я, ближайшая (ближайшие) к шторму, затем 2-я (вторые) и т.д. [28, 29]. Нарушение очередности означает, как правило, появление нового шторма. Вектор, обозначающий направление и скорость эволюции, мы называем вектором эволюции \vec{v} . Только у *шторма* мы обнаруживаем *направленность эволюции*, а у радиолокационной ячейки ее нет, поскольку она имеет только один цикл развития (возникновение, стадия максимального развития и стадия диссипации), и эти процессы происходят в *одном месте Лагранжева пространства* (на одной квазивертикали в Лагранжевой системе координат). Эти *свойства* и различия (шторма и радиолокационной ячейки), которые мы описали выше, *можно обнаружить только в Лагранжевой системе координат*, применение которой исключает маскирующее влияние смещения средней тропосферы [25—29]. Технически это реализовано в АСУ-МРЛ — «Процедура Лагранжа» [24].

Чтобы определить, принадлежит какое-либо радиоэхо данному шторму или нет, предлагается простой алгоритм, аккумулирующий признаки и различия шторма и радиолокационной ячейки, основанные на наблюдениях многих сотен штормов. *Если радиоэхо обнаруживается на расстоянии далее 8—10 км от радиолокационной границы (с $Z = 45$ dbZ) исследуемого шторма, то оно*, скорее всего, *является отдельным штормом*. Чтобы полностью убедиться в этом, нужно включить процедуру Лагранжа, входящую в пакет программ АСУ-МРЛ, позволяющую видеть приращения радиоэха в Лагранжевой системе координат, хотя бы для двух-трех последующих циклов обзора РЛС. *Если у исследуемого радиоэха появляется направленное приращение — это новый шторм, если нет — это фидерная ячейка «материнского» шторма*, и она в самое ближайшее время радиолокационно сольется с ним. При этом надо различать приращение радиоэха, связанное с его расширением в горизонтальной плоскости вследствие общего усиления в процессе развития (это выглядит, как *квазиравномерное расширение* в разные стороны), от приращения в каком-то определенном направлении.

Важность разделения случаев слияния фидерных ячеек со штормом от слияния штормов состоит в том, что их *слияние* со штормом, являясь *естественным процессом эволюции* любого шторма и *единственным способом его существования*,

всегда приводит к усилению шторма (на стадии его развития) или к замедлению спада параметров шторма (при общем ослаблении шторма). Разрушение шторма как раз связано с тем, что фидерные ячейки в системе шторма больше не образуются ввиду отсутствия конвективного ресурса. Поэтому и выводы о результатах слияния без разделения статистик на отдельные группы этих объектов (фидерных ячеек и собственно штормов) не отражают физические процессы, связанные со слиянием в разных группах. В работах, где речь идет об искусственных воздействиях на фидерные ячейки, например [17—20], показано, как меняются параметры «слившихся» облаков после воздействия в сравнении с другими облаками, на которые воздействия не проводились. Представляется странным, что в этих исследованиях процесс слияния фидерных ячеек с «материнским» облаком рассматривается как некий особый процесс. И здесь мы вынуждены процитировать авторов [20] со стр. 226, которые при оценке воздействий на них утверждают: «эффект от слияния облаков существенно превосходит тот, который связан с воздействиями на облака. Это означает, что при оценке эффективности воздействий облака, которые в ходе экспериментов сливаются с другими, должны рассматриваться отдельно от основной группы». Если продолжить мысль авторов, то можно представить какую-то особую «основную» группу конвективных облаков, у которых нет фидерных ячеек, и которые развиваются без слияния с такими ячейками, что противоречит самой сути существования любых конвективных штормов.

В дальнейшем изложении мы покажем, что благодаря нашему подходу к разделению объектов на разные группы, будут получены выводы, которые в отдельных аспектах существенно отличаются от общеизвестных [7—20]. Если же мы разделяем типы слияний указанным выше образом, можно обоснованно говорить о слиянии штормов с фидерными ячейками или о слиянии штормов друг с другом, как о совершенно разных явлениях.

В данной работе мы будем исследовать только *слияние штормов*. При этом для анализа были выбраны случаи, когда штормы сливались наиболее мощными своими частями — центральными, с $Z \geq 45$ dBZ. Фактически все анализируемые нами случаи относятся к штормам, в которых индицировался град с разной степенью интенсивности. Процессы образования суперячеек, носовых эхо (bow echo), шквальных линий и кластеров разного масштаба за счет слияния штормов не входят в круг задач настоящего исследования.

Количество слияний более слабых штормов на порядок превышает то, что явилось основой для нашего анализа. Уточним также, что мы выделяем, по крайней мере, два аспекта процесса слияния. Первый — *касание* двух штормов контурами 45 dbZ (область радиоэха, которую мы соотносим с наиболее мощной частью радиоэха, и, главным образом, с центрами восходящих или нисходящих потоков) и, далее, параллельное самостоятельное развитие. Второй — собственно *слияние*, когда максимумы радиоэха штормов становятся слабо различимыми, или неразличимыми, слитными. При этом нельзя рассчитывать на «полное слияние» этих штормов и превращение их в одну радиолокационную ячейку. После таких слияний сохраняются все признаки мультиячейкового шторма. Еще одно важное замечание: мы анализируем *слияние только мультиячейковых штормов*,

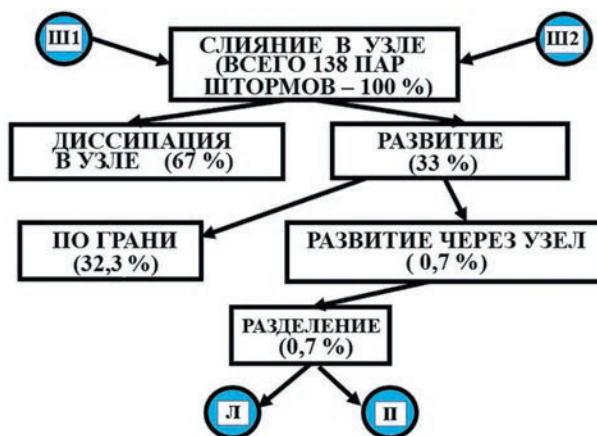


Рис. 1. Соотношение различных типов последствий слияний мощных градовых мультячейковых штормов.

Fig. 1. Ratio of different types of consequences of mergers of powerful hail multicell storms.

поскольку в нашем распоряжении нет случаев слияний, при которых хотя бы один из них был суперячейковым штормом.

На рис. 1 представлена схема, показывающая статистику различных типов последствий слияния мощных градовых мультячейковых штормов по данным АСУ-МРЛ в Молдове. Две трети штормов (67 %) после слияния диссипируют в узле, 33 % штормов после слияния развиваются. Из группы развивающихся штормов 32,3 % (от общего числа штормов) эволюционируют по границам Мезомасштабных Конвективных Ячеек (ММКЯ) или Мезомасштабных Конвективных Линий (ММКЛ), в одном случае (0,7 % штормов) два шторма сначала слились, а затем в этом же узле ММКЯ разделились. Таким образом, получилось две большие группы последствий слияний: диссипация после слияния и развитие после слияния.

Далее на конкретных примерах подробно изучаются многие аспекты слияния штормов и их последствий.

На рис. 2 рассмотрен фрагмент грозоградового процесса от 19.07.2021, который развивался под воздействием холодного фронта окклюзии на фоне периферии гребня антициклона. Сдвиг ветра (рис. 2 в) в слое от земли до 8 км составлял около 2 м/сек/км, направление ветров в этом же слое почти неизменно — с ЮЗ, а ведущий поток (600 гПа) составлял 25 км/час с $A = 254^\circ$. Высота $H_{0^\circ} = 4,25$ км, $H_{-6^\circ} = 5,2$ км, $H_{-22^\circ} = 7,5$ км. На рис. 2 а представлены траектории штормов 5 и 6, которые на момент времени 14.33 находились на расстоянии 45 км друг от друга. В процессе развития, смещаясь по своим траекториям (черные жирные стрелки), указанные штормы сближались, и в 15.38 отмечалось «касание», а затем, в 15.41, собственно «слияние». Под «касанием» мы понимаем ситуацию, когда изоконтуры $Z = 45$ dBZ двух штормов первый раз соприкасаются, а под «слиянием»

понимается такая, в которой прежний радиолокационный образ штормов (при $Z \geq 45$ dBZ) утрачен и обретен новый, общий радиолокационный образ. При этом, как мы уже говорили, все признаки мультитячейкового шторма сохраняются: локальные максимумы и вершины просматриваются, и их можно отследить во времени. Обратите внимание на вертикальные сечения радиоэха (рис. 2 $z-y$), которые проведены в направлении векторов траекторий. Мы видим, что навесы штормов точно с ними совпадают, что подтверждают результаты, полученные в наших работах [28, 29].

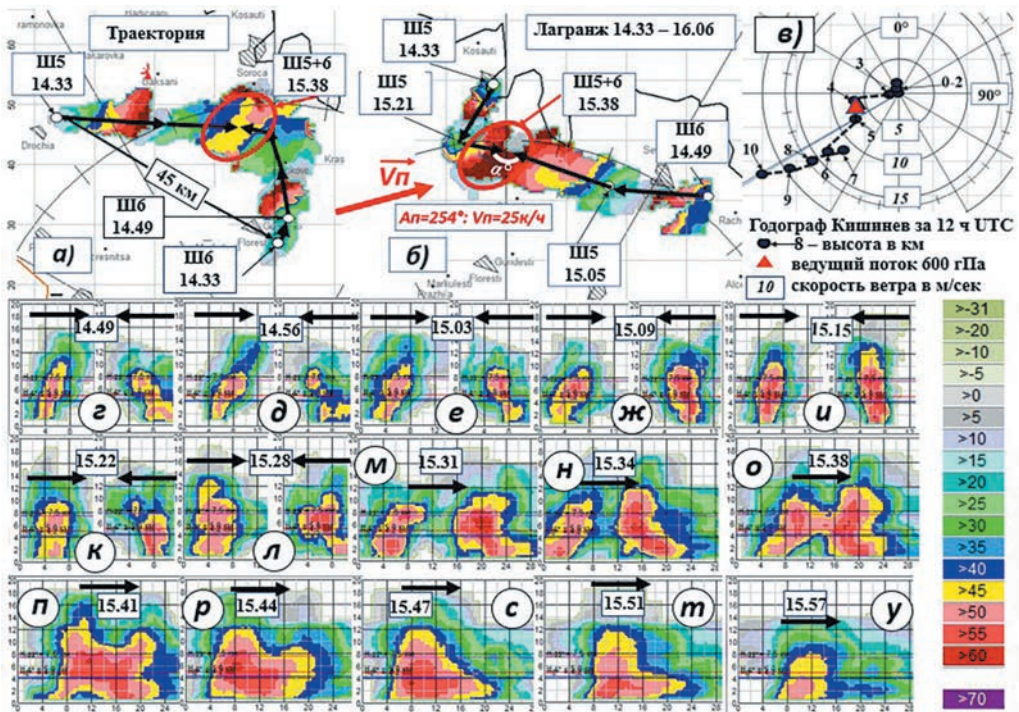


Рис. 2 (начало). Слияние штормов от 19.07.2021:

а) траектории штормов; б) интегральная структура грозоградового процесса с 14.13 по 15.07 (время местное) в Лагранжевой системе координат; все горизонтальные сечения выполнены на высоте, соответствующей температурам от -6 до -10 °C; в) годограф; $z-y$) вертикальные сечения в направлении навесов (черные стрелки указывают направления сечений, совпадающих с векторами \vec{v}_s — черные стрелки на рис. 2 а), на всех вертикальных сечениях шторм 5-й — слева, шторм 6-й — справа.

Fig. 2 (beginning). Merging of the storms from 19.07.2021:

а) storm trajectories; б) integral structure of the TSP from 14.13 to 15.07 (local time) in LSC; all horizontal cross sections are made at the height corresponding to the temperatures from -6 to -10 °C; в) hodograph; $z-y$) vertical cross sections in the canopy direction (black arrows indicate the directions of cross sections coinciding with vectors \vec{v}_s — black arrows in Fig. 2 а), on all vertical sections storm 5 — left, storm 6 — right.

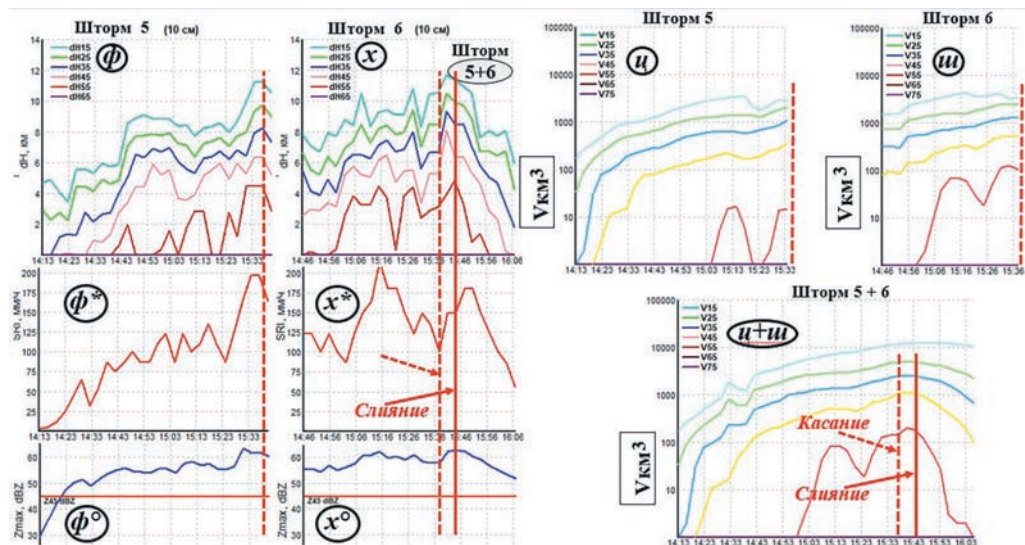


Рис. 2 (окончание). Слияние штормов от 19.07.2021:

$\phi-x$ ход параметров ΔNZ ; ϕ^*-z^* временной ход интенсивности осадков I в мм/час;
 $\phi^\circ-x^\circ$ временной ход Z_{max} ; $u-i$, $u+i$ объемы радиоэха штормов V в км³
 (шкала V — логарифмическая).

Fig. 2 (ending). Merging of the storms from 19.07.2021:

$\phi-x$ the course of ΔNZ parameters; ϕ^*-z^* the time course of precipitation intensity I in mm/h;
 $\phi^\circ-z^\circ$ the time course of Z_{max} ; $u-i$, $u+i$ the volumes radio echo of the storm — V in км³
 (scale V is logarithmic).

Очевидно, что слияние происходило навстречу навесами радиоэха. Иными словами, сливались в данном случае сначала восходящие потоки штормов, а затем остальное радиоэхо. На рис. 2 б представлена картина сближения и затем слияния двух штормов в Лагранжевой системе координат, с помощью которой можно видеть картину развития процесса слияния в векторах эволюции \vec{v} . Принцип и технология получения интегральной картины (ИК) в векторах эволюции (Процедура Лагранжа) описаны в работах [25—27]. ИК отображает структуру грозоградового процесса в целом или его фрагмента. Векторы показывают те области Лагранжева пространства, в которых существовала конвекция в течение всего процесса наблюдения за конкретными объектами и те направления, в которых происходило обновление штормов за счет фидерных ячеек [28, 29]. В данном случае «угол сближения» штормов на последнем этапе перед слиянием равен $\approx 175^\circ$ («угол сближения» α° указан на рис. 2 б белой дугой). Под «углом сближения» понимается угол между векторами эволюции двух сближающихся штормов, всегда меньший 180° (векторы эволюции совпадают с центральными осями штормов — рис. 9).

На рис. 2 ϕ и x представлен временной ход параметров ΔNZ (превышение изоконтуров радиоэха с величиной Z_{dBZ} над H_0). Из его анализа видно, что

этот параметр, начиная с момента касания и, особенно, сразу же после слияния, начинает резко падать вплоть до момента полной диссипации слившихся штормов. Это же, в целом, подтверждается ходом параметра Z_{\max} (рис. 2 ϕ° и x°). Небольшое увеличение значения Z_{\max} после слияния мы связываем не с усилением шторма, а, напротив, с его разрушением, т. к. в таких случаях высота Z_{\max} опускается в область выпадения осадков ниже изотермы 0° . Это приводит к частичному таянию твердых частиц осадков (града, крупы), их обводнению и увеличению отражаемости [30]. Этот же эффект подтверждается графиком хода интенсивности осадков I в мм/час (рис. 2 ϕ^* , x^*). Графики изменения полных объемов радиоэха (от поверхности земли до Нв) с различными значениями Z , представленные на рис. 2 z , $ш$, $z+ш$, дополняют описанную выше картину и также указывают на диссипацию шторма после слияния. Особенно хорошо это видно для значений $Z \geq 55$ dBZ (наиболее интенсивной части радиоэха), которые практически безынерционно реагировали на начало и продолжение процесса диссипации радиоэха. В это же время другие значения V (для $Z \leq 45$ dBZ) оказываются достаточно инерционными, и спад объемов несколько замедлен. В любом случае, объем радиоэха, вначале «просуммировав» индивидуальные объемы слившихся штормов, после слияния показывал неуклонное ослабление и диссипацию.

Динамика процесса слияния и его завершение с дальнейшей диссипацией имело место в так называемом «узле» ММКЯ, где сходятся линейные элементы («границы») ММКЯ, о формировании и динамике которых подробно изложено в наших работах [26, 27]. В таких случаях, когда штормы сливаются в узле, часто этот процесс заканчивается их полным разрушением, т. к. при этом для дальнейшего развития шторма условий нет — ему *некуда развиваться*. Правда, сказанное относится только к наиболее распространенной группе слияний — к слиянию штормов с последующей диссипацией (67 % случаев), для другой группы — (33 % случаев) после слияния процесс развития продолжается.

Рассмотрим пример слияния штормов от 04.06.2019. Грозоградный процесс развивался под воздействием холодного фронта с волнами на фоне юго-западной периферии антициклона. Ветер в тропосфере В и ЮВ румбов от 3,5 м/сек у земли до 17,5 м/сек на 10 км. Ведущий поток на высоте 4,3 км — 43 км/ч, $A_p = 140^\circ$. Сдвиг ветра с высотой составлял $\approx 1,4$ м/сек/км. Высота $H_{0^\circ} = 3,5$ км, $H_{-6^\circ} = 4,3$ км, $H_{-22^\circ} = 6,6$ км. В 17.42 расстояние между Ш22 и Ш23 составляло 9 км. Векторы $\vec{v}_{ш}$ — почти параллельны друг другу и направлены против \vec{v}_n (рис. 3 н). На рис. 3 о и р показаны соотношения векторов движения Ш22 и Ш23 соответственно, а на рис. 3 п представлены \vec{v}_s для Ш22 (желтый вектор) и Ш23 (зеленый вектор). Благодаря тому, что зеленый вектор больше, чем желтый, Ш23 «догоняет» Ш22, и происходит процесс слияния. Угол сближения в данном случае равен $\approx 180^\circ$. Обращает на себя внимание то, как реализуется процесс слияния: вначале штормы касаются на высоте около 3,5 км, а затем процесс слияния распространяется вверх и вниз до полной диссипации шторма. Очень интересно и то, что Ш22 и 23 сливаются нисходящими потоками. Это пример того, как два

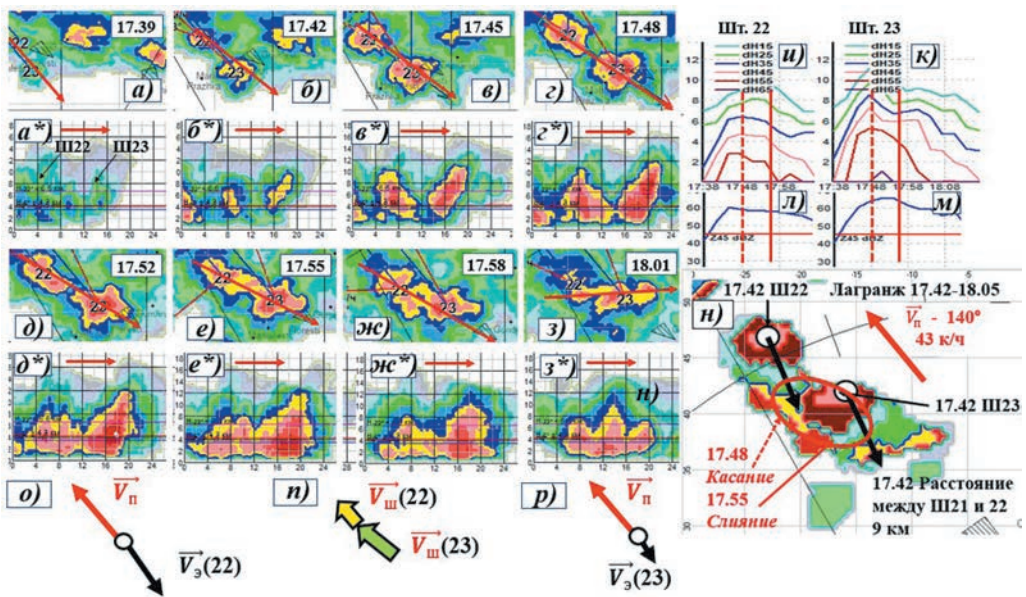


Рис. 3. Слияние штормов 22 и 23 от 04.06.2019:

a—z) горизонтальные сечения; *a*—z**) вертикальные сечения;
u—к) временной ход параметров ΔHZ ; *л—м*) временной ход Z_{max} ; *н*) интегральная картина процесса слияния с 17.42 по 18.05 (время местное); *o—p*) схема сложения векторов штормов 22 и 23 соответственно (красный вектор — \vec{v}_n , черный — \vec{v}_3); *н*) схема получения $\vec{v}_{ш}$ для шторма 22 (желтый вектор) и шторма 23 (зеленый вектор).
 Цветовая шкала Z_{dbZ} аналогична таковой на рис. 2.

Fig. 3. Merging of the storms 22 and 23 of 04.06.2019:

a—z) horizontal cross sections; *a*—z**) vertical sections; *u—к*) time course of ΔHZ parameters; *л—м*) time course of Z_{max} ; *н*) integral picture of merger process from 17.42 to 18.05 (local time); *o—p*) scheme of addition of storm 22 and 23 vectors, respectively (red vector is \vec{v}_n , black is \vec{v}_3); *н*) scheme of getting $\vec{v}_{ш}$ for storm 22 (yellow vector) and storm 23 (green vector).
 The Z_{dbZ} color scale is similar to that in Fig. 2.

шторма, двигаясь друг за другом по параллельным траекториям, за счет разных скоростей эволюции в конечном итоге «догоняют» друг друга, сливаются, а затем диссипируют.

Ниже приводится пример одновременного слияния трех штормов от 19.05.2019 (рис. 4). Грозоградовый процесс развивался в малоградиентном барическом поле на восточной периферии средневропейского циклона. Ветры в тропосфере от земли до 10 км — юго-восточных румбов от 5 до 9 м/сек. Ведущий поток с $A_{п} = 150^\circ$, $V_{п} = 27$ км/ч. Сдвиг ветра по всей тропосфере — меньше 1 м/сек/км (рис. 4 л — годограф). $H_{0^\circ} = 3,6$ км, $H_{-6^\circ} = 4,6$ км, $H_{-22^\circ} = 6,8$ км.

Начало развития Ш16 (в центре), Ш15 (слева) и Ш17 (справа) относится к 18.26, и к 18.29 расстояние между Ш16 и Ш15 составляло 12 км, а в паре Ш16

и Ш17 — 10 км. При этом видно, что это три разных объекта. Углы сближения Ш16 со Ш17, а также Ш16 со Ш15 составили соответственно $\approx 135^\circ$ и почти 180° (рис. 4 *и*). Попарное слияние указанных штормов происходило, практически, одновременно. Касание штормов было на высотах 4—5 км, а процесс слияния постепенно охватывал всю толщу облакообразования от верхних слоев к нижним. На протяжении почти всего периода слияния индивидуальные признаки штормов (индивидуальные вертикали с вершинами, положение относительных Z_{max}) четко различались, и только в самом конце процесса диссипации индивидуальные признаки утрачивались. На вертикальных сечениях (особенно рис. 4 *з**) и ходе параметров ΔHZ и Z_{max} (рис. 4 *м—с*) видно, что Ш16 был к моменту касания и слияния самым мощным из трех (самые высокие значения ΔHZ_{45dBZ} достигали 8 км, ΔHZ_{55dBZ} — 4,6 км, а ΔHZ_{65dBZ} — 2,4 км), в котором формировался град с ущербом. В результате слияния объединенный шторм не усилился, а, напротив, начал быстро разрушаться.

Рисунки 4 *т—ф*, описывающие ход интенсивности осадков, также показывают, начиная с момента касания и затем слияния, резкий рост интенсивности осадков I (особенно в самом мощном Ш16) связан именно с процессом выпадения мощных градовых осадков, которые в процессе таяния ниже изотермы 0° покрываются пленкой воды, что увеличивает отражение.

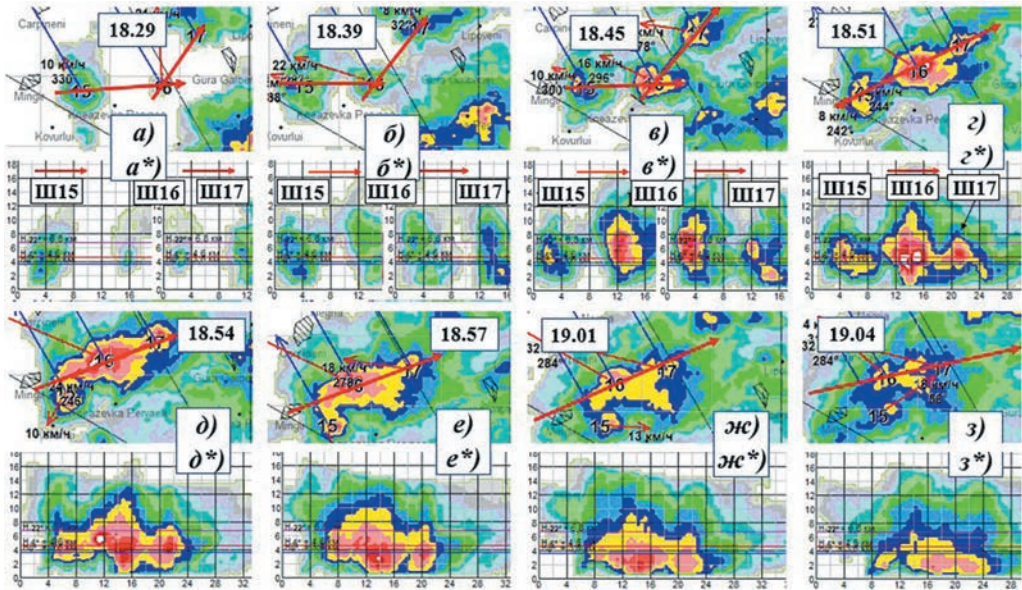


Рис. 4 (начало). Слияние трех штормов: 15, 16 и 17 от 19.05.2019:

a—з) горизонтальные сечения; *a*—з**) вертикальные сечения.

Fig. 4 (beginning). Merging of three storms: 15, 16 and 17 of 19.05.2019:

a—з) horizontal cross sections; *a*—з**) vertical sections.

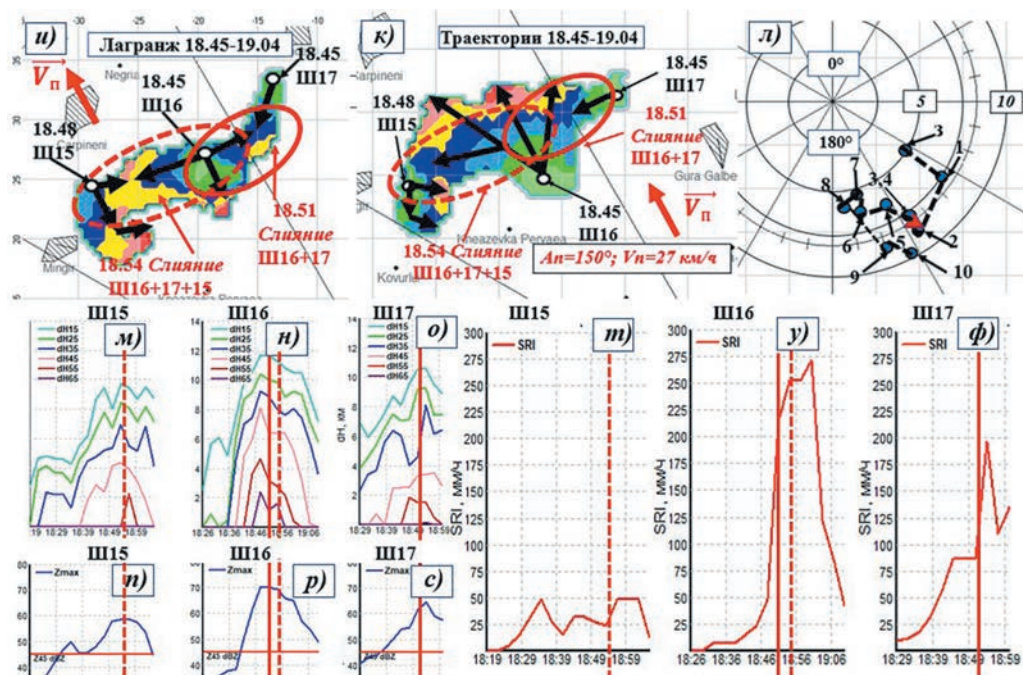


Рис. 4 (окончание). Слияние трех штормов: 15, 16 и 17 от 19.05.2019:

u) фрагмент интегральной картины (Лагранжева система координат) в период с 18.45 по 19.04;
 к) траектории штормов; л) годограф Кишинева за 12 часов UTC; м—o) ход параметров ΔHZ;
 н—с) ход параметра Zmax; м—φ) ход параметра I (интенсивности осадков в мм/ч).

Fig. 4 (ending). Merging of three storms: 15, 16 and 17 of 19.05.2019:

u) fragment of the integral picture (Lagrangian coordinates system) between 18.45 and 19.04;
 к) storm trajectories; л) Kishinev hodograph for 12 hours UTC; м—o) course of ΔHZ parameters;
 н—с) course of Zmax parameter; м—φ) course of parameter I (precipitation intensity in mm/h).

Далее мы продемонстрируем различные типы слияний, происходящих в узле ММКЯ, которые связаны не с диссипацией, а, напротив, с развитием.

Вначале рассмотрим ГПП от 23.07.2014 в Республике Молдова, который развивался под влиянием фронта окклюзии, проходившего по югу Молдовы на фоне черноморского циклона (рис. 5). Ветры в тропосфере слабые от 4 до 8 м/сек ЮВ и Ю румбов. Сдвиг ветра с высотой менее 1 м/с. Ведущий поток с $A_p = 180^\circ$, $V_p = 24 \text{ км/ч}$. $H_{0^\circ} = 3,6 \text{ км}$, $H_{-6^\circ} = 4,5 \text{ км}$, $H_{-27^\circ} = 7,0 \text{ км}$. Расстояние между Ш70 и Ш71 в момент возникновения последнего в 15.24 составляло 14 км. Ш70 развивался в ЗЮЗ направлении, а Ш71 — в ВСВ направлении, угол сближения равнялся $\approx 150^\circ$. К моменту касания, а затем слияния в 16.55 оба шторма имели градовые параметры, и после слияния шторм продолжал развиваться. Слияние началось со средних уровней и распространялось вверх и вниз, а после слияния шторм, изменив направление, продолжил развитие в ЮЮВ направлении по грани ММКЛ вплоть до полной диссипации в 17.28, что подтверждает временной ход всех параметров (ΔHZ, Zmax, I).

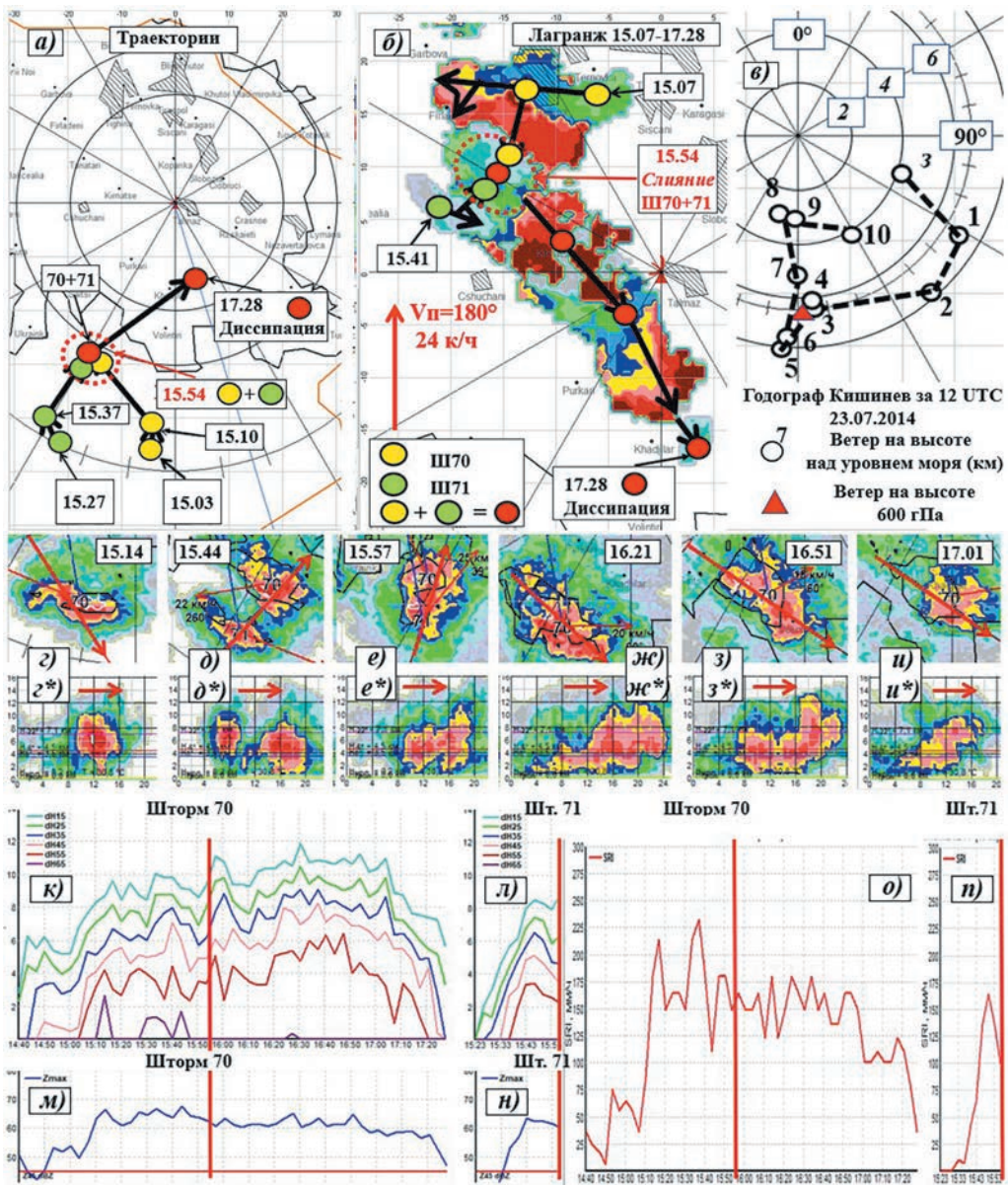


Рис. 5. Слияние штормов 70 и 71 от 23.07.2014:

а) траектории штормов; б) фрагмент интегральной структуры грозоградового процесса с 15.07 по 17.28; в) годограф, круги проведены через 2 м/с; г—и) горизонтальные сечения; г*—и*) вертикальные сечения; к—л) ход параметров ΔHZ ; м—н) ход параметра Z_{max} ; о—п) ход параметра I (интенсивности осадков в мм/ч).

Fig. 5. Merging of the storms 70 and 71 from 23.07.2014:

а) storm trajectories; б) fragment of the integral structure of thunderstorm process from 15.07 to 17.28; в) hodograph, circles drawn at 2 m/s; г—и) horizontal sections; г*—и*) vertical sections; к—л) travel of ΔHZ parameters; м—н) travel of Z_{max} parameter; о—п) travel of parameter I (rainfall intensity in mm/h).

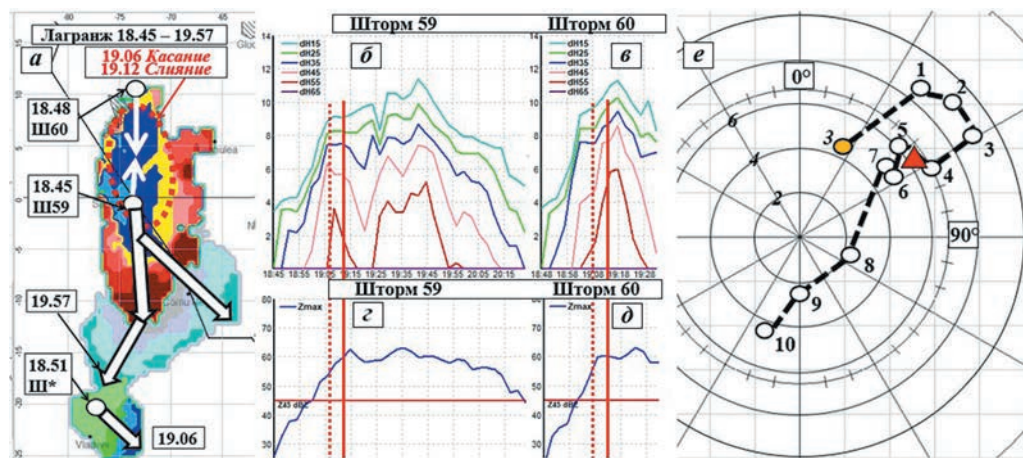


Рис. 6. Слияние штормов 59 и 60 от 06.06.2014:

а) интегральная структура грозоградового процесса с 18.45 по 19.57;
 б—в) ход параметров ΔH_z : з—д) ход параметра Z_{max} ; е) годограф Кишинев от 15.00 UTC.

Fig. 6. Merging of storms 59 and 60 from 06.06.2014:

а) integral structure of the thunderstorm process from 18.45 to 19.57: б—в) course of parameters ΔH_z :
 з—д) course of parameter Z_{max} ; е) hodograph of Kishinev from 15.00 UTC.

Развитие грозоградового процесса от 06.06.2014, представленное на рис. 6, проходило под влиянием холодного фронта с волнами, который сформировался в северной ложбине черноморского циклона. Ветры северо-восточных румбов от земли до 7 км варьируют от 4,5 до 9 м/с, а выше 7 км уменьшаются до 4 м/с. Таким образом, сдвиг ветра в слое до 7 км менее 1 м/с/км, а выше, вплоть до 10 км, сдвиг меняет знак и составляет менее -1 м/с/км; $H_{0^\circ} = 3,5$ км, $H_{-6^\circ} = 4,5$ км, $H_{-22^\circ} = 6,9$ км. Ведущий поток: $A_p = 55^\circ$, $V_p = 23$ км/ч. Развитие Ш59 и Ш60 началось примерно в одно время, и расстояние между ними составляло 11 км. После слияния около 19.12 (угол сближения $\approx 180^\circ$) оба шторма ослабли, однако уже через 10 мин объединенный шторм (Ш59) вновь усилился и развивался на юг, вплоть до полной диссипации в 19.56. Обращает на себя внимание то, что место диссипации Ш59 находится как раз там, где более чем за 70 мин до этого возник, а затем разрушился Ш*. Таким образом возле этого места мы отмечаем «фантом» Ш*. Опыт наблюдения за развитием мезо- β -масштабных структур в Лагранжевой системе координат показывает, что любой шторм, подходя к месту, где ранее находился какой-либо радиолокационный объект, обязательно разрушится и это правило позволяет в таких ситуациях прогнозировать место и время диссипации штормов практически со 100%-ной вероятностью [26, 27].

На рис. 7 представлен фрагмент грозоградового процесса от 05.08.2014, который развивался под влиянием фронта окклюзии на фоне передней части черноморской депрессии. Ветры по высотам слабые — не превышали 5,5 м/с до высоты 10 км переменных направлений. Ведущий поток: $A_p = 319$, $V_p = 9$ км/ч, сдвиг

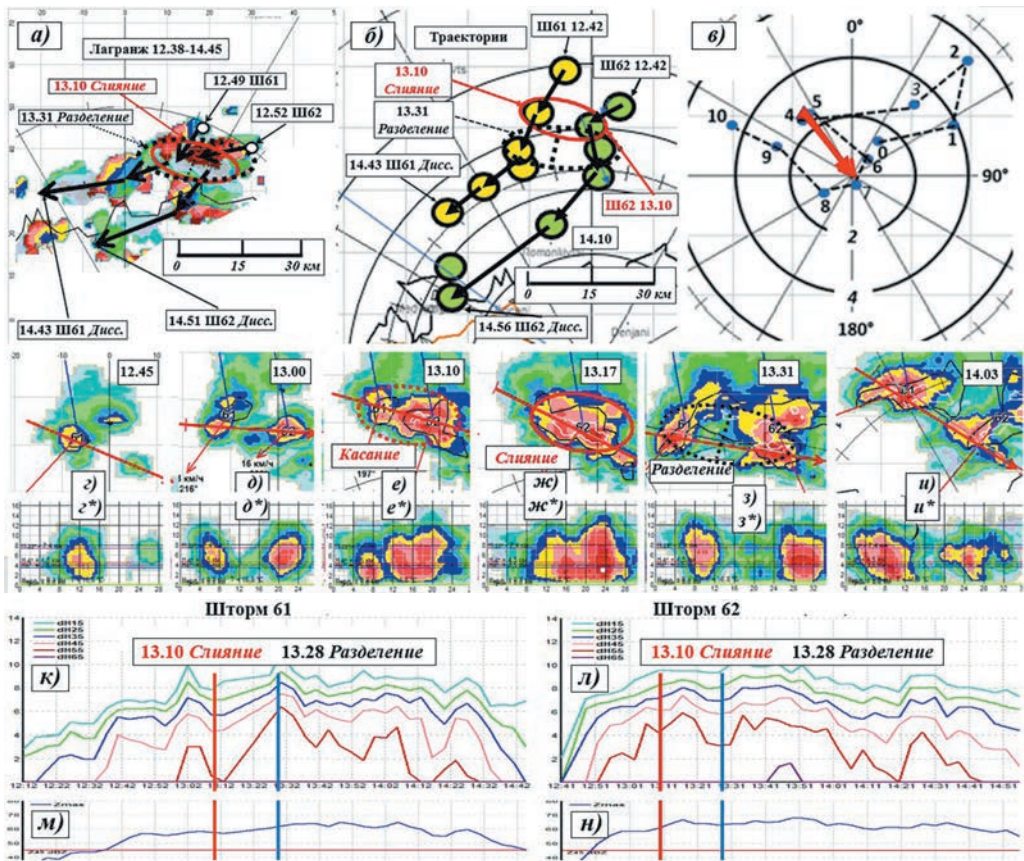


Рис. 7: а) фрагмент интегральной картины грозоградового процесса от 05.08.2014 за период с 12.38 по 14.45 (время местное) в Лагранжевой системе координат; б) траектории штормов; в) годограф Бричаны (север Молдовы) за 12 UTC, круги проведены через 2 м/с; г—и) горизонтальные, а г*—и*) вертикальные сечения штормов; к—л) ход параметров ΔNZ ; м—н) ход параметра Z_{max} .

Fig. 7: а) fragment of the integral thunderstorm process (IP) picture from 05.08.2014 for the period from 12.38 to 14.45 (local time) in Lagrangian coordinates system; б) storm trajectories; в) Briceni (north of Moldova) hodograph for 12 UTC, circles drawn at 2 m/s; г—и) horizontal, and г*—и*) vertical storm sections; к—л) progress of ΔNZ parameters; м—н) progress of Z_{max} parameter.

ветра — менее 1 м/с/км. В 12.42, когда оба шторма фиксировались одновременно, расстояние между ними было 16 км. На рис. 7 а и б представлены интегральная картина (ИК в ЛСК) и траектории Ш61 и Ш62 соответственно, из которых видно, как эти шторма постепенно сближались. В результате в 13.10 отмечалось касание, а к 13.17 — слияние штормов, при этом индивидуальные свойства (вершины изоконтуров Z, положения Z_{max}) не были полностью утрачены. Слившийся Ш61+62

усилился, что видно по параметрам ΔHZ и Z_{max} . Кроме того, и это следует подчеркнуть, Ш61+62, находясь в узле ММКЯ, перестал смещаться (в ЛСК), т. е. его скорость эволюции $\vec{v}_3 \approx 0$. Шторм оставался в одном и том же месте Лагранжева пространства до 13.31, когда было отмечено *разделение* штормов, и в дальнейшем они стали смещаться по разным траекториям со скоростями эволюции \vec{v}_3 до 25—29 км/ч. После разделения штормы продолжали развиваться, и к 13.48 Ш62 имел максимальное за все время существования значение $Z = 68$ dBZ. Необходимо подчеркнуть, что *разделяющийся мультячейковый шторм* — довольно редкое явление, которое, вообще говоря, противоречит известной гипотезе о разделении исключительно суперячейковых штормов при специфической структуре ветра и сдвиге ветра с высотой, взаимодействующих с вращающимся восходящим потоком [31, 32]. В наших работах [26, 27] на конкретном примере впервые было показано, что могут иметь место разделения мультячейковых штормов в малоподвижной и слабосдвиговой тропосфере (сдвиг ветра менее 1 м/с/км). Данный пример является убедительным тому подтверждением. Здесь мы отмечаем также *двойной феномен: после слияния* штормов в узле ММКЯ через некоторое время *в этом же узле* произошло *разделение* штормов, после чего штормы продолжали движение по своим траекториям и усиливались. Двойной феномен (слияние—разделение) ранее в литературе не отмечался. Таким образом, данный случай дополняет коллекцию возможных вариантов развития штормов в узлах ММКЯ до 6 [26, 27].

Грозоградный процесс от 01.06.2019 — это пример, когда при сближении Ш42 и Ш43 отмечено только их касание. На графиках хода параметров ΔHZ (рис. 8 в, г) видно, что Ш42 за 20 мин до момента касания начал ослабевать и после касания этот шторм диссипировал через 18 мин, в то время как Ш43 продолжал развиваться еще в течение 80 мин, периодически усиливаясь и ослабевая. Этот случай один из многих, показывающий процесс «стыковки» сближающихся линий конвергенции (границ ММКЯ и/или ММКЛ), при котором *никогда не происходит их пересечения*. Эта закономерность является следствием более общей, описанной в работе [27], которая заключается в том, что конвекция в одном и том же месте Лагранжева пространства реализуется только один раз. Эта закономерность (правило) является наиболее общим и основополагающим предиктором для прогнозирования времени и места диссипации штормов или времени и места их слияния. Один из таких примеров мы привели на рис. 6 (грозоградный процесс от 06.06.2014), когда Ш60 приблизился к месту, где за 70 мин до этого развивался Ш*. В результате Ш60 разрушился, не пересекая траекторию «фантома» Ш*.

Двойной феномен (слияние—разделение) и приводившаяся выше в ссылка на фрагмент ГГП от 22.06.2019 [26, 27], когда имел место феномен продолжительного развития мощного конвективного шторма в узле при $\vec{v}_3 \approx 0$, ставят перед нами важный вопрос: за счет каких ресурсов и механизмов реализуются эти феномены? Более того, возможно, в первом приближении мы говорим об обнаружении *нового типа мощного конвективного шторма*, развитие которого осуществляется *только в рамках узла ММКЯ*. Какие иные возможные механизмы, помимо известных, реализуются для существования и обновления таких штормов? Но это уже тема для отдельного исследования, которое нами планируется.

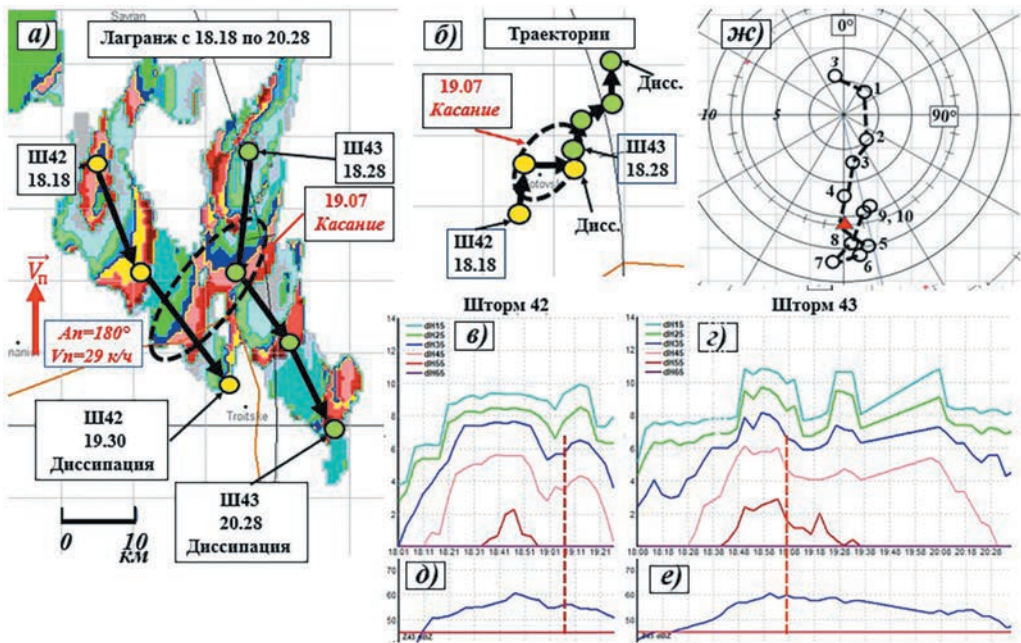


Рис. 8. Касание штормов — грозоградный процесс от 01.06.2019:

- а) интегральная картина (Лагранжевой системе координат); б) траектории;
- в—з) ход параметров ΔNZ ; д—е) ход параметра Z_{max} ;
- ж) годограф Кишинев за 12.00 UTC, круги проведены через 2,5 м/с.

Fig. 8. Touching storms — Thunderstorm process from 01.06.2019:

- a) integral picture (Lagrangian coordinates system); б) trajectories;
- в—з) course of ΔNZ parameters; д—е) course of Z_{max} parameter;
- ж) Kishinev hodograph for 12.00 UTC, circles drawn at 2.5 m/s.

При рассмотрении процесса сближения штормов обнаруживается, что сливаются штормы, образовавшиеся изначально на больших расстояниях друг от друга: от 9 до 45 км (грозоградный процесс от 19.07.2021). Вряд ли в этих случаях можно представить себе механизмы слияния, связанные с взаимодействиями на малых расстояниях, о которых шла речь во введении [7—21]. Можно предположить, что такие механизмы работают в системе шторм — фидерные ячейки. Когда же речь идет о взаимодействии штормов, находящихся на расстояниях, значительно больших, чем средний диаметр радиолокационной ячейки, т. е. более 5—6 км, этим механизмом, по нашему мнению, является мезо- β -масштабная конвергенция, стимулирующая восходящие движения в масштабах, превышающих масштаб шторма. Такая конвергенция реализуется в виде полигональных мезомасштабных структур — ММКЯ и/или мезомасштабных линейных структур — ММКЛ [25—29].

На рис. 9 а приводится схема мультячейкового шторма, важнейшим и неотъемлемым элементом которого является линия фидерных облаков (ЛФО — Flanking Line). Чаще всего она радаром не просматривается. Лишь в редких случаях удавалось ее обнаружить с помощью РЛС, например в [28, 29], в штормах 61 и 62

(грозоградный процесс от 05.08.2014) и, особенно, в работе [5], где при наблюдении суперячейки в южной Венгрии удалось «в одном кадре» зафиксировать шторм и его ЛФО, что является уникальным случаем. В работах [26—29] нами показано, что ЛФО формируется на линиях конвергенции, т. е. на гранях ММКЯ и/или ММКЛ. Конвективные штормы «проживают» свою жизнь, развиваясь по этим граням и внутри узлов. Было показано, в частности [26, 27], что разделение штормов, изломы траекторий штормов происходят в узлах. Из проведенного нами анализа 138 слияний штормов, шесть из которых рассмотрены в данном исследовании (плюс один пример касания штормов), становится очевидным, что и феномен слияния связан с развитием штормов по граням и в узлах. Исходя из этого, высказывается гипотеза о механизме слияния конвективных штормов, которая отображена на рис. 9.

Процесс слияния двух штормов представляется как пересечение, натекание друг на друга ЛФО двух сближающихся штормов. Важно напомнить, что ЛФО означает линию, на которой уже существует конвекция в виде *Cu cong*, а значит, в каждой из фидерных ячеек уже существуют восходящие потоки и процесс облако-и-осадкообразования запущен. При натекании ЛФО друг на друга можно ожидать усиление конвекции (облако-и-осадкообразования) а также ускорения проявления, «слияния» ранее невидимых, а теперь усилившихся, ставшими радиоэхом, «бывших» фидерных ячеек. При этом угол сближения α° , образованный сходящимися «центральными осями» штормов (пунктирные линии), может быть разным:

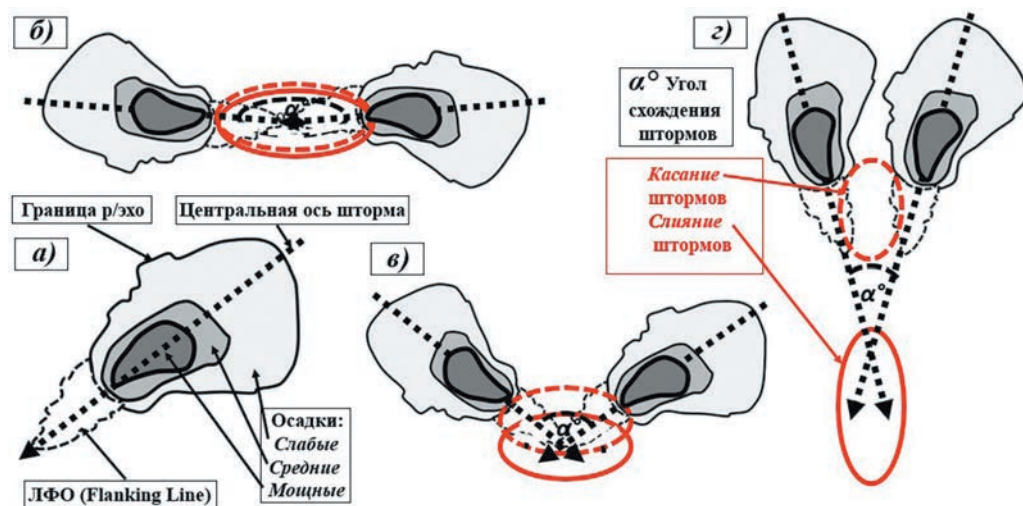


Рис. 9. Гипотеза слияния штормов:

- а) схема мультячейкового шторма;
- б—в) схемы слияния штормов в зависимости от угла схождения α° .

Fig. 9. Storm merger hypothesis:

- a) scheme of the multicell storm; б—в) storm merger schemes depending on the convergence angle α° .

на рис. 9 б и г представлены предельные их значения, а на рис. 9 в — промежуточное. В зависимости от этого процессы «касания» и «слияния» отстоят друг от друга как в пространстве, так и во времени: при больших углах α° обычно место и время «касания» и «слияния» близки, при малых углах — удалены. Иногда, при малых α° , процесс сближения штормов ограничивается только «касанием». Иногда, при $45^\circ < \alpha^\circ < 180^\circ$, можно наблюдать, как в результате взаимодействия двух ЛФО между сближающимися штормами появляется «отдельно стоящее» радиоэхо (в рассмотренных нами примерах, такой случай не приведен), которое не соприкасается ни с каким другим даже на уровне самых малых значений Z , а в последствии может явиться своеобразным «мостом» для слияния теперь уже трех штормов одновременно. Можно видеть, что при больших α° приближение ЛФО друг к другу означает более быстрое «проявление» мест их сопряжения *по всей длине ЛФО*, что часто наблюдается как почти единовременное проявление довольно протяженного, линейно вытянутого общего радиоэха. Такие явления особенно наглядно можно обнаружить при образовании линии шквалов. Впрочем, это тема для отдельного исследования.

Некоторые статистические обобщения собранного нами материала предполагается оформить в виде отдельного исследования, в котором, возможно, будут определены прогностические предикторы и даны алгоритмы для сверхкраткосрочных прогнозов, как для фактов слияния, так и последствий слияний: развития или диссипации штормов.

Выводы

В результате исследования удалось разделить имеющийся статистический материал о слиянии конвективных объектов на две категории: мощных конвективных штормов с его же фидерными ячейками и мощных конвективных штормов друг с другом. Получен массив данных из 138 случаев *слияния штормов* на и вблизи территории Молдовы. Это стало реальным в результате предложенного авторами алгоритма, использующего возможности отслеживания развития штормов, в том числе, и в Лагранжевой системе координат.

1. Впервые показано, что все слияния конвективных штормов и последствия их слияний связаны с их развитием на элементах мезо- β -масштабных структур: ММКЯ и/или ММКЛ, которые диктуют направление и степень развития штормов, предопределяя их жизненный цикл.

2. Впервые установлено, что для территории Молдовы и прилегающих районов в 67 % случаев слияние штормов приводит к разрушению объединенного шторма, а в 33 % случаев объединенные штормы продолжают развиваться или внутри узла, или на грани ММКЯ, и/или ММКЛ.

3. Впервые наблюдался конвективный феномен, когда два шторма слились в узле, и объединенный шторм, не выходя за пределы узла ($\vec{v}, \approx 0$), усилился и через некоторое время разделился на два шторма, которые продолжили движение по расходящимся траекториям. Этот двойной феномен (слияние — разделение в узле) дополняет коллекцию типов развития штормов в узлах до 6.

4. Высказана гипотеза о причинах и механизме слияния конвективных штормов, заключающаяся в том, что конвективные штормы, неотъемлемым элементом которых являются линии фидерных облаков (ЛФО — Flanking Line), в процессе сближения по линиям (граням) мезомасштабных структур пересекаются между собой, что приводит к ускорению развития фидерных ячеек и часто к взрывному слиянию штормов. Угол сближения и взаимное расположение штормов на траектории также являются факторами, влияющими на слияние и его последствия.

5. Для исключения неправильного толкования результатов активных воздействий по борьбе с градом, изменения режима осадков (увеличения или их подавления), а также при учете экономической эффективности таких технологий для каждого региона необходимо учитывать вероятность естественного исхода слияний конвективных штормов (для Молдовы 67 % штормов диссипируют, 33 % — продолжают развитие).

Список источников

1. Foot G. B., Frank H. W. Case study of a hailstorm in Colorado. Part III: Airflow from triple-doppler measurements // *J. Atmos. Sci.* 1983. Vol. 40. P. 686—707. doi: 10.1175/1520-0469(1983)040<0686:CSO-AHI>2.0.CO;2.
2. Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Барекова М. В., Малкарова А. М. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. Нальчик, 2014. 500 с.
3. Doswell III C. A., Burgess D. W. Tornadoes and Tornadoic Storms. A Review of Conceptual Models // *Environmental Science*. 1993. P. 1—14. doi: 10.1029/GM079p0161.
4. Krauss T. W., Marwitz J. D. Precipitation Process within an Alberta Supercell Hailstorm // *J. of the Atmospheric Sciences*. 1984. Vol. 46. P. 1025—1035. doi: 10.1175/1520-0469(1984)041<1025:PPWAAS>2.0.CO;2.
5. Simon A., Putsay M., Kocsis Z. Case studies of various types of storms using satellite, radar and lightning data // *Convection Working Group Workshop*, Ljubljana, Slovenia. 17—19 April 2018.
6. Bluestein H. B. Visual aspects of the flanking line in severe thunderstorms // *Mon. Wea. Rev.* 1986. Vol. 114. P. 788—795. doi: 10.1175/1520-0493(1986)114<0788:VAOTFL>2.0.CO;2.
7. Westcott N. E., Kennedy P. C. Cell Development and Merger in an Illinois Thunderstorm Observed by Doppler Radar // *J. Atmos. Sci.* 1989. Vol. 46. P. 117—131. doi: 10.1175/1520-0469(1989)046<0117:CDA-MIA>2.0.CO;2.
8. Westcott N. E. Merging of convective clouds: Cloud initiation, bridging and subsequent growth // *Mon. Wea. Rev.* 1994. Vol. 122. P. 780—790. doi: 10.1175/1520-0493(1994)122<0780:MOCCCI>2.0.CO;2.
9. Fu D., Guo X. A Cloud-Resolving Simulation Study on the Merging Processes and Effects of Topography and Environmental Winds // *J. of the Atm. Sci.* 2011. Vol. 69. P. 1232—1249. doi: 10.1175/JAS-D-11-049.1.
10. Tao W.-K., Simpson J. A further study of cumulus interactions and mergers: Three-dimensional simulations with trajectory analyses // *J. Atmos. Sci.* 1989. Vol. 46. P. 2974—3004. doi: 10.1175/1520-0469(1989)046<2974:AFSOCI>2.0.CO;2.
11. Lin Y.-L., Joyce L. E. A further study of the mechanisms of cell regeneration, propagation, and development within two-dimensional multicell storms // *J. Atmos. Sci.* 2001. Vol. 58. P. 2957—2988. doi: 10.1175/1520-0469(2001)058<2957:AFSOTM>2.0.CO;2.
12. Lee B. D., Jewett B. F., Wilhelmson R. B. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part I: Cell evolution and supercell isolation // *Wea. Forecasting*. 2006. Vol. 21. P. 433—448. doi: 10.1175/WAF944.1.
13. Gauthier M., Petersen W. A., Carey L. Cell mergers and their impact on cloud-to-ground lightning over the Houston area // *Atmospheric Research*. 2010. Vol. 96. P. 626—632. doi: 10.1016/j.atmosres.2010.02.010.
14. Lu J., Qie X., Jiang R., Xiao X. Lightning activity during convective cell mergers in a squall line and corresponding dynamical and thermodynamical characteristics // *Atmospheric Research*. 2021. 256. 105555. doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105555.

15. Carey L. D., Petersen W. A., Rutledge S. A. Evolution of cloud-to-ground lightning and storm structure in the Spencer, South Dakota, tornadic supercell of 30 May 1998 // *Mon. Wea. Rev.* 2003. Vol. 131. P. 1811—1831. doi: 10.1175//2566.1.
16. Simpson J., Keenan T. D., Ferrier B., Simpson R. H., Holland G. J. Cumulus mergers in the maritime continent region // *Meteor. Atmos. Phys.* 1993. Vol. 51. P. 73—99. doi: 10.1007/BF01080881.
17. Krauss T. W., Sinkevich A. A., Ghulam A. S. Effects of Feeder Cloud Merging on Storm Development in Saudi Arabia. JKAU // *Met., Env. & Arid Land Agric. Sci.* 2011. Vol. 22. P. 23—39 (2011 A.D./1432 A.H.). doi: 10.4197/Met. 22-2.2.
18. Sinkevich A., Krauss T. Changes in thunderstorm characteristics due to feeder cloud merging // *Atmospheric Research*. 2014. Vol. 142. P. 124—132. doi: 10.1016/j.atmosres.2013.06.007.
19. Синькевич А. А., Краус Т. В. Воздействия на облака в Саудовской Аравии, статистическая оценка результатов // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 6. С. 26—37.
20. Синькевич А. А., Довгалик Ю. А., Веремей Н. Е., Михайловский Ю. П. Слияние конвективных облаков. СПб.: ООО «Амирит», 2018. 280 с.
21. Stalker J. R., Knupp K. R. Cell merger potential in multicell thunderstorms of weakly sheared environments: Cell separation distance versus planetary boundary layer depth // *Mon. Wea. Rev.* 2003. Vol. 131. P. 1678—1695. doi: 10.1175//2556.1.
22. Dixon M., Wiener G. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting — A radar-based methodology // *J. Atmos. and Oceanic Technol.* 1993. Vol. 10. P. 785—797. doi: 10.1175/1520-0426(1993)010%3C0785:TTITAA%3E2.0.CO;2.
23. Абдуллаев С. М., Желнин А. А., Ленская О. Ю. Структура мезомасштабных конвективных систем в Центральной России // *Метеорология и Гидрология*. 2012. № 1. С. 20—32.
24. Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Котелевич А. Ф., Сирота Н. В. Автоматизированная система обработки радиолокационной информации для целей штормоповещения и активного воздействия на облачные процессы // *Сб. Тр. XXVII Всеросс. Симпозиума «Радиолокационные исследования природных сред»*. СПб., 2011. С. 211—225.
25. Старостин А. Н., Лившиц Е. М., Швецов В. С. Мезомасштабная структура полей радиоэха конвективных облаков в Молдавии // *Метеорология и Гидрология*. 1983. № 10. С. 55—59.
26. Лившиц Е. М., Петров В. И. Разделение конвективных штормов. Часть I. Динамика и кинематика // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 65. С. 648—670. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-648-670.
27. Лившиц Е. М., Петров В. И. Разделение конвективных штормов. Часть II. Организация мезомасштабной структуры грозоградового процесса // *Гидрометеорология и экология*. 2022. № 66. С. 20—41. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-648-670.
28. Лившиц Е. М., Петров В. И. Радиолокационное обнаружение местоположения линии питающих облаков. Часть I. Основные векторы движения и их соотношение в мощных градовых штормах // *Доклады ВОК по ФО и АВ на Гидромет. Процессы*. Нальчик. 2021. С. 192—198.
29. Лившиц Е. М., Петров В. И. Радиолокационное обнаружение местоположения линии питающих облаков. Часть II. Результаты исследования. Выводы // *Доклады ВОК по ФО и АВ на Гидромет. Процессы*. Нальчик, 2021. С. 198—204.
30. Калов Х. М., Калов Р. Х. Физические основы, методы и средства активных воздействий на грозоградовые облака и туманы. Нальчик, 2010. 219 с.
31. Rotunno R. On the evolution of thunderstorm rotation // *Mon. Weather Rev.* 1981. Vol. 109. P. 171—180. doi: 10.1175/1520-0493(1981)109<0577:OTEOTR>2.0.CO;2.
32. Klemp J. B. Dynamics of tornadic thunderstorms // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1987. Vol. 19. P. 369—402. doi: 10.1146/annurev.fl.19.010187.002101.

References

1. Foot G. B., Frank H. W. Case study of a hailstorm in Colorado. Part III: Airflow from triple-doppler measurements. *J. Atmos. Sci.* 1983;(40):686—707. doi: 10.1175/1520-0469(1983)040<0686:CSOA-HI>2.0.CO;2.
2. Abshaev M. T., Abshaev A. M., Berekova M. V., Malkarova A. M. *Rukovodstvo po organizazii i provedeniy protivogradovykh robot = Guidelines for organizing and conducting anti-hail operations*. Nalchik, 2014: 500 p. (In Russ.).

3. Doswell III C. A., Burgess D. W. Tornadoes and Tornadoic Storms. *A Review of Conceptual Models. Environmental Science*. 1993;1—14. doi: 10.1029/GM079p0161.
4. Krauss T. W., Marwitz J. D. Precipitation Process within an Alberta Supercell Hailstorm. *J. of the Atmospheric Sciences*. 1984;(46):1025—1035. doi: 10.1175/1520-0469(1984)041<1025:PPWAAS>2.0.CO;2.
5. Simon A., Putsay M., Kocsis Z. Case studies of various types of storms using satellite, radar and lightning data. Convection Working Group Workshop, Ljubljana, Slovenia. 17—19 April 2018.
6. Bluestein H. B. Visual aspects of the flanking line in severe thunderstorms. *Mon. Wea. Rev.* 1986;(114):788—795. doi: 10.1175/1520-0493(1986)114<0788:VAOTFL>2.0.CO;2.
7. Westcott N. E., Kennedy P. C. Cell Development and Merger in an Illinois Thunderstorm Observed by Doppler Radar. *J. Atmos. Sci.* 1989;(46):117—131. doi: 10.1175/1520-0469(1989)046<0117:CDA-MIA>2.0.CO;2.
8. Westcott N. E. Merging of convective clouds: Cloud initiation, bridging and subsequent growth. *Mon. Wea. Rev.* 1994;(122):780—790. doi: 10.1175/1520-0493(1994)122<0780:MOCCCI>2.0.CO;2.
9. Fu D., Guo X. A Cloud-Resolving Simulation Study on the Merging Processes and Effects of Topography and Environmental Winds. *J. of the Atmos. Sci.* 2011;(69):1232—1249. doi: 10.1175/JAS-D-11-049.1.
10. Tao W.-K., Simpson J. A further study of cumulus interactions and mergers: Three-dimensional simulations with trajectory analyses. *J. Atmos. Sci.* 1989;(46):2974—3004. doi: 10.1175/1520-0469(1989)046<2974:AFSOCI>2.0.CO;2.
11. Lin Y.-L., Joyce L. E. A further study of the mechanisms of cell regeneration, propagation, and development within two-dimensional multicell storms. *J. Atmos. Sci.* 2001;(58):2957—2988. doi: 10.1175/1520-0469(2001)058<2957:AFSOTM>2.0.CO;2.
12. Lee B. D., Jewett B. F., Wilhelmson R. B. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part I: Cell evolution and supercell isolation. *Wea. Forecasting*. 2006;(21):433—448. doi: 10.1175/WAF944.1.
13. Gauthier M., Petersen W. A., Carey L. Cell mergers and their impact on cloud-to-ground lightning over the Houston area. *Atmospheric Research*. 2010;(96):626—632. doi: 10.1016/j.atmosres.2010.02.010.
14. Lu J., Qie X., Jiang R., Xiao X. Lightning activity during convective cell mergers in a squall line and corresponding dynamical and thermodynamical characteristics. *Atmospheric Research*. 2021;(256):105555. doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105555.
15. Carey L. D., Petersen W. A., Rutledge S. A. Evolution of cloud-to-ground lightning and storm structure in the Spencer, South Dakota, tornadic supercell of 30 May 1998. *Mon. Wea. Rev.* 2003;(131):1811—1831. doi: 10.1175//2566.1.
16. Simpson J., Keenan T. D., Ferrier B., Simpson R. H., Holland G. J. Cumulus mergers in the maritime continent region. *Meteor. Atmos. Phys.* 1993;(51):73—99. doi: 10.1007/BF01080881.
17. Krauss T. W., Sinkevich A. A., Ghulam A. S. Effects of Feeder Cloud Merging on Storm Development in Saudi Arabia. *JKAU. Met., Env. & Arid Land Agric. Sci.* 2011;(22):23—39 (2011 A.D./1432 A.H.). doi: 10.4197/Met. 22-2.2.
18. Sin'kevich A., Krauss T. Changes in thunderstorm characteristics due to feeder cloud merging. *Atmospheric Research*. 2014;(142):124—132. doi: 10.1016/j.atmosres.2013.06.007.
19. Sin'kevich A., Krauss T. Cloud impacts in Saudi Arabia, a statistical evaluation of the results. *Meteorologiya I Hidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2010;(6):26—37. (In Russ.).
20. Sin'kevich A. A., Dovgaliuk Iu. A., Veremei N. E., Mikhailovskii Iu. P. *Sliianie konvektivnykh oblakov = Convective clouds merging*. St. Petersburg: Amirite LLC, 2018: 280 p. (In Russ.).
21. Stalker J. R., Knupp K. R. Cell merger potential in multicell thunderstorms of weakly sheared environments: Cell separation distance versus planetary boundary layer depth. *Mon. Wea. Rev.* 2003;(131):1678—1695. doi: 10.1175//2556.1.
22. Dixon M., Wiener G. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting — A radar-based methodology. *J. Atmos. and Oceanic Technol.* 1993;(10):785—797. doi: 10.1175/1520-0426(1993)010%3c0785:ttitaa%3e2.0.co;2.
23. Abdullaev S. M., Zhelnin A. A., Lenskaia O. Iu. Structure of mesoscale convective systems in Central Russia. *Meteorologiya I hidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2012;(1):20—32. (In Russ.).
24. Abshaev M. T., Abshaev A. M., Kotelevich A. F., Sirota N. V. Automated system of radar information processing for storm warning and active impact on cloud processes. *Tr. XXVII Vseross. Simpoziuma «Radiolokazionnye issledovaniya prirodnykh sred» = XXVII All-Russia Symposium "Radar Investigations of Natural Environments"*. St. Petersburg, 2011:211—225. (In Russ.).

25. Старостин А. Н., Лившиц Е. М., Швецов В. С. Mesoscale structure of radio echo fields of convective clouds in Moldova. *Meteorologiya i hidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 1983;(10):55—59. (In Russ.).
26. Livshits E. M., Petrov V. I. The splitting of convective storms. Part I. Dynamics and Kinematics. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2021;(65):648—670. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-648-670. (In Russ.).
27. Livshits E.M., Petrov V.I. The splitting of convective storms. Part II. Organizations of the mesoscale structure of the Thunderstorm process. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2022;(66):20—41. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-648-670. (In Russ.).
28. Livshits E. M., Petrov V. I. Radar detection of the location of the feeder cloud line. Part I. Main motion vectors and their relation in powerful hail storms. *Trudy Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii po FO i AV na gidrometeorologicheskie protsessy = Proceedings of the All-Russian Open Conference on FO and AB on Hydrometeorological Processes*. Nalchik, 2021: 192—198. (In Russ.).
29. Livshits E. M., Petrov V. I. Radar detection of the location of the feeder cloud line. Part II. Results of the study. *Trudy Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii po FO i AV na gidrometeorologicheskie protsessy = Proceedings of the All-Russian Open Conference on FO and AB on Hydrometeorological Processes*. Nalchik, 2021:198—204. (In Russ.).
30. Калов Х. М., Калов Р. Х. *Fizicheskie osnovy, metody i sredstva aktivnykh vozdeystvii na grozogradovye oblaka i tumany = Physical foundations, methods and means of active effects on lightning clouds and fogs*. Nalchik, 2010: 219 p. (In Russ.).
31. Rotunno R. On the evolution of thunderstorm rotation. *Mon. Weather Rev.* 1981;(109):171—180. doi: 1175/1520-0493(1981)109<0577:OTEOTR>2.0.CO;2.
32. Klemp J. B. Dynamics of tornadic thunderstorms. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1987;(19):369—402. doi: 10.1146/annurev.fl.19.010187.002101.

Информация об авторах

Евгений Михайлович Лившиц, свободный исследователь, Франкфурт-на-Майне, Германия, evmaleposoru@gmail.com.

Василий Иванович Петров, свободный исследователь, Кишинев, Республика Молдова.

Information about authors

Evgenii M. Livshits, Free Researcher, Frankfurt am Main, Germany, evmaleposoru@gmail.com.

Vasilii I. Petrov, Free Researcher, Kishinev, Republic of Moldova.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 10.07.2022

Принята к публикации после доработки 12.11.2022

The article was received on 10.07.2022

The article was accepted after revision on 12.11.2022