

УДК 551.553.8:[551.511.2+551.511.3]

doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-648-670

**Разделение конвективных штормов.  
Часть I. Динамика и кинематика***Е.М. Лившиц<sup>1</sup>, В.И. Петров<sup>2</sup>*<sup>1</sup> Франкфурт-на-Майне, Германия, evmaleposoru@googlemail.com<sup>2</sup> Специальная служба активных воздействий на гидрометеорологические процессы Республики Молдова, Кишинев

Анализируется феномен разделения мощных конвективных штормов. Впервые приводится факт разделения мультячейкового конвективного шторма в малоподвижной безсдвиговой тропосфере. Делается вывод о том, что известный механизм разделения мощных конвективных штормов, связанный со специфической структурой ветра с высотой в тропосфере, не охватывает весь спектр и не объясняет многие аспекты динамики и кинематики разделившихся штормов. Впервые высказана гипотеза о том, что закономерности разделения мощных штормов диктуются мезо- $\beta$ -масштабной структурой, а влияние величины и направления сдвига ветра с высотой в тропосфере сводится лишь к преобладанию тех или иных форм ее реализации. Полученные результаты применимы в противоградных работах, при модификации осадков, в обеспечении безопасности полетов, штормоповещении населения, энергетике, для служб спасения.

*Ключевые слова:* разделение мощных конвективных штормов, сдвиг ветра с высотой, Лагранжева система координат, мезо- $\beta$ -масштабные конвективные структуры, вектор эволюции шторма.

**The splitting of convective storms.  
Part I. Dynamics and Kinematics***E.M. Livshits<sup>1</sup>, V.I. Petrov<sup>2</sup>*<sup>1</sup> Frankfurt am Main, Germany, evmaleposoru@googlemail.com<sup>2</sup> Special Service of Active Influences on Hydrometeorological Processes of the Republic of Moldova, Kishinev

The well-known theory describing the phenomenon of splitting of powerful convective storms relies on the specific wind structure with altitude. It is believed that the specific structure and intensity of wind shear, especially in the lower troposphere, determines the very possibility of splitting of powerful convective storms, while the shape and intensity of wind shear with height in the middle and upper troposphere also control the further behavior and viability of splitting storms. Our radar studies, based on the Automated System of Meteorological Radar Control — ASU-MRL in the anti-hail system of the Republic of Moldova, which allows to receive volumetric radar files from the hemisphere with a frequency of 3.5 minutes, for the first time showed that powerful convective storms also separate in the low-moving and, practically, motionless troposphere. Analysis of the dynamics and kinematics of splitting storms using the Lagrangian approach, which excludes the masking effect of tropospheric translation, leads us to the conclusion that this, as well as other phenomena: trajectory kinks, different variants of left-right-moving storm deflections, storm dissipation locations, convective storm mergers, etc., do not depend on wind structure with altitude. It is also hypothesized for the first time that the determining role in realization of the storm splitting phenomenon, in our opinion, is played by meso- $\beta$ -scale polygonal or linear structures, which are formed in the

surface boundary layer and trigger powerful penetrating convection, with the magnitude and shape of wind shear with altitude making one of the options more preferable. It was shown for the first time that the splitting of convective storms and the further development of left-right-moving storms occurs by updating on the opposite flanks of storms and these patterns are dictated by the configuration of meso- $\beta$ -scale structures, which explains, in particular, the frequent events of long development of detached cyclonic and anticyclonic storms, as well as those in which there was no rotation of upwelling currents.

Regularities of meso- $\beta$ -scale structures development in the form of algorithms of ultra-short-range forecast of their dynamics are applied in the Moldavian anti-hail works and may be also useful in modification of precipitation from convective clouds, in storm warning for population, for flight safety of aircraft, in power engineering, in rescue services and other branches of national economy.

*Keywords:* storm splitting, evolution vector, Lagrangian Coordinate System, mesoscale structure, storm evolution prediction.

---

**For citation:** *E.M. Livshits, V.I. Petrov. The splitting of convective storms. Part I. Dynamics and Kinematics. Gidrometeorologiya i Ekologiya. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2021, 65: 648—670. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-648-670*

---

## Введение

Развитие полей конвективных облаков можно представить как непрерывный процесс возникновения, роста, диссипации, объединения или, напротив, разделения штормов, состоящих из облачных ячеек. Траектории штормов,двигающихся с разными скоростями и составляющих интегральную радиолокационную картину, не параллельны друг другу, испытывают изломы и часто пересекаются. Поскольку это все происходит в движущейся атмосфере, то для неподвижного и неискушенного наблюдателя, находящегося в Эйлеровой системе координат (ЭСК), наблюдаемое многообразие вызывает ощущение своеобразного хаоса.

В данном исследовании мы направляем усилия на сравнительно небольшой аспект общей проблемы конвекции — на ту часть мезо- $\beta$ -масштаба (от 20 до 200 км — классификация дана по Орлански [1]), которую мы соотносим со штормами и мезомасштабными конвективными ячейками (ММКЯ), проявляющимися в виде полигональных структур, похожих на открытые ячейки Рэля—Бенара при внутримассовых процессах и слабосдвиговой тропосфере [2], и мезомасштабными конвективными линиями (ММКЛ), похожими на «облачные улицы», при средних и больших сдвигах ветра с высотой. Когда мы говорим об ячейках, составляющих радиолокационное тело конвективного шторма, мы обращаемся к мезо- $\gamma$ -масштабу (размеры объектов менее 20 км). При этом очевидно, что четких границ мезомасштабов не существует. Исследование структуры и кинематики штормов на фоне этих мезомасштабных проявлений конвекции имеет практическое применение при построении технологий противорадовой защиты (ПГЗ), сверхкраткосрочных прогнозов погоды, штормоповещении населения, служб спасения, для нужд сельского хозяйства, транспорта и промышленности. Актуальность данных исследований и новых технологий повышается вследствие четко выраженной в последние годы тенденции общего усиления мощности атмосферных процессов, их повторяемости, смещения этих явлений в более северные районы континентов. Эти тенденции, возможно, связанные с изменениями климата, уже приводят к участвовавшим катастрофическим градобитиям, наводнениям,

селевым потокам, торнадо и другим опасным явлениям погоды, к большим человеческим жертвам и огромному материальному ущербу.

Феномен отклонения движения штормов вправо (для северного полушария) от средне-тропосферного ветра привлек внимание ученых сразу же после начала применения радаров в метеорологии с середины 40-х годов прошлого столетия. Наиболее известная концепция, объясняющая это явление, была выдвинута Браунингом [4], однако факты, показавшие наличие штормов, отклоняющихся влево от средних тропосферных ветров, и, в особенности, такие, когда отклонения траекторий штормов вправо и влево происходили одновременно на сравнительно малой территории, привели к необходимости объяснения уже этого явления.

Фуджита [5] и Голдмэн [6] предположили, что механизмом, объясняющим этот феномен, может быть эффект Магнуса: при циклоническом вращении восходящего потока шторм отклоняется вправо, при антициклоническом — влево. Некоторые наблюдения с разделением штормов, вращающихся в разные стороны, привели многих исследователей к необходимости привлечения эффекта Магнуса для объяснения этого феномена ко всем случаям таких разделений, однако Харрольд [7] считал, что только к половине таких штормов можно применить этот механизм. Вторую половину случаев он отнес к обновлениям на противоположных флангах штормов, однако он не смог объяснить этого при одинаковой структуре ветра в тропосфере. Дальнейшие наблюдения показали [8], что встречались случаи разделения штормов, в которых вращение не было обнаружено.

Из работ, рассматривающих факторы, влияющие на движение мульти- и суперячейковых штормов, в том числе и феномена разделения штормов, следует упомянуть также исследование Цайтлера и Банкерса [9]. В нем указываются следующие факторы:

- адвекция по среднему ветру в типичном тропосферном слое;
- распространение через динамические вертикальные градиенты давления из-за вращающегося восходящего потока (эффект Магнуса и подъемная сила Кутта—Жуковского относится только к суперячейкам);
- распространение через конвективное развитие вдоль оттока холодного воздуха в области осадков в шторме;
- распространение посредством конвективного развития вдоль особенностей сходимости потоков пограничного слоя;
- распространение за счет слияния и взаимодействия между близлежащими штормами, распространение за счет орографических эффектов.

В работах по численному моделированию девиантное поведение штормов и механизмы разделения штормов были рассмотрены Клемпом и др. [10], Вильгельмсоном и др. [11], Вайсманом и др. [12], которые показали важность сильно-однонаправленного вертикального сдвига и высокой конвективной доступной потенциальной энергии (CAPE). В этих работах были исследованы условия, при которых реализуется равноправное или преимущественное развитие лево- или право-движущихся штормов после разделения. Ротунно и Клемп [13] показали, что в отдельных случаях соотношение некоторых гидродинамических параметров может привести к разделению штормов и без наличия значительных осадков.

Последнее утверждение было подкреплено наблюдениями Блюстайна [14], в которых суперячейка LP (суперячейка со сравнительно небольшим уровнем осадков) дважды разделилась, а время между первым и вторым разделением составило 0,5 ч. Такое быстрое повторное разделение в отсутствие эффекта водной нагрузки, по мнению авторов [14], заслуживает внимания. К сожалению, Блюстайн и др. [14] не развили эту мысль дальше, хотя они обнаружили, как нам представляется, второе разделение шторма в узле мезо- $\beta$ -масштабной структуры, находящегося от предыдущего узла на расстоянии примерно 25—30 км, что соответствует наиболее часто встречающимся диаметрам ММКЯ порядка 30—40 км. Вивер и Нельсон [15], анализируя доплеровские данные, показали важное влияние фронтов порыва на развитие суперячейковых штормов, которые распространяются вдоль границ их оттока. Кроме того, на эти штормы влияет взаимодействие с границей, создаваемой предыдущим штормом.

Можно констатировать, что в упомянутых выше работах не рассматриваются факторы, которые имеют, с нашей точки зрения, определяющее значение. Поиску и доказательству управляющего влияния на эти феномены мезо- $\beta$ -масштабных структур и посвящено настоящее исследование.

Необходимо отметить, что феномен разделения мощных конвективных штормов в отечественной литературе не рассматривался. В то же самое время за рубежом этому явлению посвящено большое число работ. Суммируя, можно констатировать, что к середине 1980-х гг. концепция разделения штормов сложилась и к настоящему времени, став классической, преподается во всех метеорологических вузах США и других стран.

Подчеркнем, что под разделением штормов мы понимаем отделение одной части шторма от другой с последующим самостоятельным развитием этих отделившихся частей в диапазоне от десятков минут до нескольких часов. Постоянно наблюдаемые «разделения штормов», связанные с естественной диссипацией ячеек внутри них, мы не относим к рассматриваемому явлению.

Схематически данная концепция представлена на рис. 1, где изображены две стадии разделения шторма: (а) стадия формирования двух вращающихся (циклонически и антициклонически) вертикальных ветвей из горизонтального вращающегося вихря; (б) стадия разделения суперячейки на две — циклоническую и антициклоническую.

Считается, что возникновению горизонтально вращающегося вихря способствует специфический сдвиг ветра с высотой в приземном слое по скорости и направлению. В дальнейшем, раскрученный таким образом вихрь, попадая в набегающий восходящий поток, деформируется им и образует своеобразную дугу, на левом фланге которой формируется восходящий поток с циклоническим вращением, а на правом — с антициклоническим (рис. 1 а).

Вторая стадия начинается с момента образования осадков и их выпадения через восходящий поток, и это приводит к тому, что сформированная ранее дуга разрывается на два самостоятельных вертикальных потока, вращающихся в разных направлениях. Здесь и начинается разделение суперячейки на две: циклоническую, движущуюся вправо от средних тропосферных ветров (в нашей терминологии это

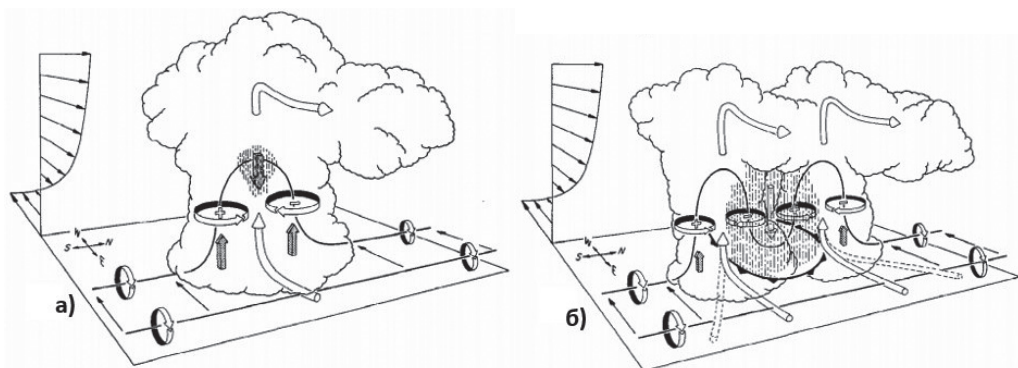


Рис. 1. Схема разделения суперячейкового шторма:

- a) стадия формирования двух вращающихся вертикальных ветвей (циклонической + и антициклонической -) из вращающегося горизонтального вихря;
- б) стадия разделения суперячейки на две — циклоническую и антициклоническую [16, 17].

Fig. 1. Schematic of the splitting of a supercell storm:

- a) the stage of formation of two rotating vertical branches (cyclonic + and anticyclonic -) from a rotating horizontal vortex;
- б) the stage of the splitting of the supercell into two, cyclonic and anticyclonic [16, 17].

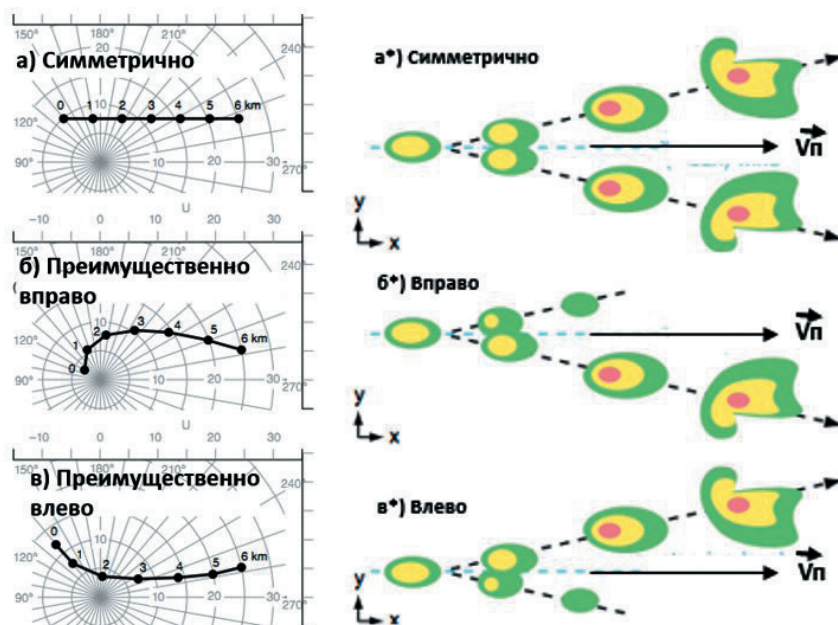


Рис. 2. Преимущественные траектории суперячеек после разделения ( $a^*$ ,  $б^*$ ,  $в^*$ ) в зависимости от поворота ветра с высотой ( $a$ ,  $б$ ,  $в$ ) [18].

Fig. 2. Predominant trajectories of supercells after splitting ( $a^*$ ,  $б^*$ ,  $в^*$ ) as a function of wind rotation with height ( $a$ ,  $б$ ,  $в$ ) [18].



ведущий поток  $\vec{V}_n$ , соответствующий ветру на 600 мб поверхности) и антициклоническую, смещающуюся влево от ведущего потока.

Как показано на рис. 2, после разделения каждый из штормов движется по своей траектории — один, антициклонический, влево от средне тропосферных ветров; другой, циклонический — вправо. В зависимости от структуры ветра с высотой (рис. 2 *a, б, в*), может быть три варианта соотношения скоростей отделившихся штормов: одинаковое ( $a^*$ ), правый движется быстрее левого ( $b^*$ ), левый движется быстрее правого ( $c^*$ ) [18].

Таким образом, цель работы — представить иной взгляд на механизмы разделения мощных конвективных штормов и показать определяющую роль в реализации этого феномена различных форм мезо-β-масштабных структур.

### Исходные материалы и методика исследований

Для анализа были привлечены доступные опубликованные данные натуральных радиолокационных наблюдений за разделением штормов от зарубежных исследователей, различные гипотезы и модели, в которых рассматриваются отдельные аспекты этого феномена, или явление в целом, а также данные автоматизированной системы управления «Метеорологический радиолокационный комплекс» (АСУ-МРЛ) [19] в структуре ПГЗ Республики Молдова. Эти данные позволяют получать объемную картину радиоэха и множества параметров с частотой в 3,5 мин на протяжении всего развития грозоградного процесса (ГПП). Кроме того, привлечена аэрологическая информация о зондировании атмосферы и общий синоптический анализ в сроки, наиболее приближенные ко времени рассматриваемых событий.

Некоторые рисунки и схемы, например в [20], преобразованы нами с применением лагранжевой системы координат (ЛСК), исключаяющей маскирующее действие смещения средней тропосферы [2]. Именно движение атмосферы относительно неподвижного наблюдателя и создает ощущение «хаоса», о чем мы упоминали выше, а применение Процедуры Лагранжа (ПЛ), включенной в пакет программ АСУ-МРЛ [19], позволяет преобразовывать кажущийся «хаос» в четкую структуру — мезомасштабную конвективную структуру (ММКС). Анализ этих структур, как будет показано далее, позволяет наиболее зримо выявлять искомые закономерности. Другие исследования, где для подобных преобразований не хватало информации, например [21], использовались лишь для отдельных аспектов анализа.

### Анализ грозоградных процессов с разделением мощных конвективных штормов

Выше мы кратко изложили концепцию разделения мощных конвективных штормов, представленную на рисунках 1 и 2. Что же наблюдается в действительности?

Статистика разделяющихся штормов и упомянутых параметров сравнительно невелика. Например, в работе Брауна и Мейтин [22] приводится информация о 31 паре разделившихся штормов, собранная из различных публикаций до 1994 г.

Редко встречающийся пример разделения штормов демонстрируется в работе Грассо и Хильгендорфа [23], где разделившиеся штормы смещаются с одинаковыми скоростями, равными 43 км/ч, что похоже на ситуацию, описанную на рис. 2 а. Грэхэм и др. [24] исследовали разделение суперячейки и с помощью доплеровского радиолокатора и подтвердили наличие двух вращающихся в противоположных направлениях мезоциклонов.

Наиболее близкие к сегодняшнему дню исследования провели авторы [25] в юго-восточной Румынии, отметившие несколько пар разделившихся суперячейковых штормов, движение которых, как и «надлежит» суперячейкам, происходило согласно описанной выше теории.

Из работ, в которых приводятся иные причины отклонения траекторий конвективных штормов от направления и скорости смещения средней тропосферы, следует упомянуть исследование Вивера [26]. В нем на примере пяти случаев он показывает синоптические и субсиноптические особенности пограничного слоя, которые привели к существенным отклонениям в движении мощных штормов по отношению к таковым, рассчитанным по характеристикам сдвига ветра в тропосфере. В работе [27] Вивер и др. с привлечением данных доплеровской РЛС и учащенных спутниковых снимков подробно разбирают случай разделения суперячейки и показывают, что отклонения траекторий разделившихся штормов сильно отличаются от расчетных при существовавшем годографе, а левый, антициклонический шторм после отделения от материнского должен быть, согласно [10—13, 17—19], недолговечным. На самом деле оказалось, что этот шторм просуществовал более 2 ч и продолжал свое движение вдоль ранее существовавшей линии конвергенции.

Резюмируя, можно отметить, что данные о средних тропосферных ветрах, относительно которых многие параметры разделившихся штормов в приводимых работах измерялись, не единообразны, поскольку авторы по-разному выбирали слой тропосферы, отвечающий за смещение облачных (радиолокационных) ячеек. По этой причине мы воздержимся делать статистические обобщения.

Прежде чем приступить к анализу ГПП с разделением мощных конвективных штормов, дадим основные определения, которые используются в данной работе.

*Мультиячейковый шторм* — кучево-дождевое облако, радиолокационный образ которого состоит из нескольких взаимодействующих между собой квази-вертикальных *радиолокационных ячеек* (РЯ), каждая из которых в изолиниях отражаемости имеет свою индивидуальную вершину и локальный максимум. Важным отличительным (от РЯ) свойством штормов вообще и мультиячейковых, в частности, является кратковременное или долговременное появление *навеса радиоэха*, накрывающего сверху область *слабого радиоэха*, являющегося местом локализации основного восходящего потока.

*Суперячейковый шторм* — сверхмощный мультиячейковый шторм, в котором РЯ не различимы и поступление нового облачного ресурса в виде фидерных облаков носит квазинепрерывный характер: наличие мощного стационарного навеса радиоэха свидетельствует о столь же мощном по размерам и скорости (до 30—40 м/с и более) восходящем потоке. Важным признаком и одновременно

отличием суперячейкового шторма от мультячейкового является наличие *мезоциклона* (или мезоантициклона), чаще всего сопровождающегося проявлением *крюк-эха* на нижних уровнях, локализация которого довольно часто свидетельствует о наличии торнадо или о мощных ветрах. Развернутые определения радиолокационной ячейки, штормов и их элементов даны нами в [3]. Если говорить о конвективных штормах в целом, то *шторм* — это, скорее всего, *не объект, а процесс*, элементы которого не только невозможно рассматривать отдельно друг от друга, но и определить без учета их взаимодействия во времени.

Рассмотрим вначале ГПП от 3 апреля 1964 г. на северо-западной границе Техаса с Оклахомой (США) [20], представленный на рис. 3. Этот мощный процесс интересен для нас тем, что здесь имеют место четыре пары разделяющихся штормов, которые прослежены на протяжении всего времени их существования, а данные о них пригодны для анализа. Они включают направление и скорость средне-тропосферного ветра, отметки времени, соответствующие положению радиоэха от штормов, масштаб и т.п. Для удобства анализа мы преобразовали оригинальный рисунок в виде векторов в метрической системе и представили на рис. 3 а. На рис. 3 б изображена структура этого ГПП, выполненная в лагранжевой системе координат.

Стрелка  $\vec{V}_n$  соответствует вектору средне тропосферного ветра ( $A_n = 224^\circ$  — азимут, откуда дует ветер на высоте ведущего потока,  $V_n = 72$  км/ч — скорость ведущего потока);  $\alpha, \beta, \gamma, \Theta$  — углы расхождения штормов, составленные траекториями лево- и право-движущихся штормов после разделения. Сохранены оригинальные названия штормов (L, RA, RB и т.д. — изображены стрелками разных цветов). Шторм M, изображенный красным, с 16.20 обозначен как  $M^*$ , что означает начало его диссипации. Черные квадраты с пунктирной окантовкой и круги с номерами показывают интересные, с нашей точки зрения, места в общей картине, на которых мы акцентируем внимание. Отметим, что по данным, приводимым авторами [20], шторм L был антициклонической суперячейкой, шторм RA после разделения только в 16.15 стал циклонической суперячейкой; штормы RB и RC также стали антициклонической и циклонической суперячейками соответственно.

Опишем технику построения интегральной картины ГПП в ЛСК, которая представлена на рис. 3 б. Для этого необходимо знать: вектор ведущего потока ( $\vec{V}_n$ ) и векторы движения штормов на каждом из квазипрямолинейных участков траектории ( $\vec{V}_ш$ ). Для каждого из этих квазипрямолинейных отрезков, согласно правилу сложения векторов, вычисляются вектора эволюции:  $\vec{V}_э = \vec{V}_ш - \vec{V}_n$  (см. рис. 6 д) и в соответствии с длительностью каждого квазипрямолинейного участка траектории шторма на схему последовательно наносится величина векторов ( $\vec{V}_э$ ). В результате мы получаем интегральную картину ГПП в векторах эволюции штормов. Фактически, двигаясь вместе с радиолокационными ячейками по  $\vec{V}_n$ , мы, исключив этот вектор, получаем возможность видеть — в каком направлении и с какой скоростью идет обновление шторма, т. е. его развитие, эволюция. Вся эта



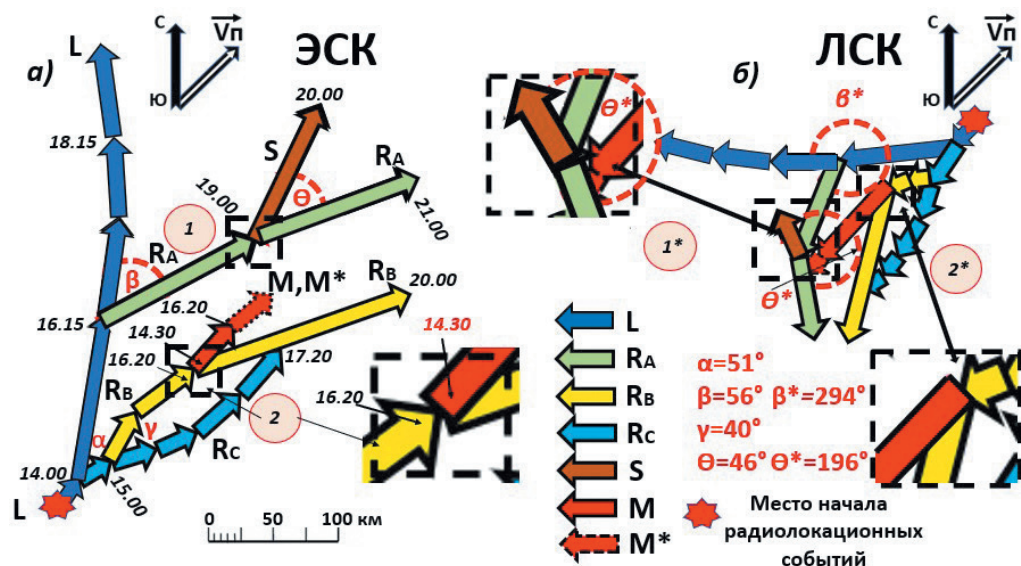


Рис. 3. Траектории штормов 3 апреля 1964 г. в ЭСК [20]:

- а) наименования штормов сохранены и обозначены векторами разного цвета;  $\alpha, \beta, \gamma, \Theta$  — углы расхождения траекторий штормов после их разделения;  $\alpha^*, \beta^*, \gamma^*, \Theta^*$  — углы расхождения в ЛСК;  $M^*$  — шторм M от момента начала диссипации до его полного разрушения;
- б) мезомасштабная конвективная структура (ММКС) процесса в виде векторов эволюции. Построено с применением ЛСК в масштабе рис. 3 а.

Fig. 3. Trajectories of the storms on April 3, 1964 in the Eulerian Coordinate System (ESC) [20]:

- а) the names of the storms are preserved and denoted by vectors of different colors;  $\alpha, \beta, \gamma, \Theta$  — angles of divergence of storm trajectories after their splitting (ESC);  $\alpha^*, \beta^*, \gamma^*, \Theta^*$  (LSC);  $M^*$  — storm M from the beginning of dissipation to its complete destruction;
- б) Mesoscale Convection Structure (MCS) of the process as vectors of evolution. Constructed using the LCS on the scale of Fig. 3 а.

технология реализована в АСУ-МРЛ в виде «Процедуры Лагранжа» [16] — т. е. автоматически в режиме реального времени строится интегральная картина (ИК) ГПП, позволяющая прогнозировать направление, интенсивность развития штормов, места их возможного разделения, объединения, диссипации, излома траекторий и многое другое.

Обратим внимание на области, выделенные квадратами с черной пунктирной окантовкой. В первом из них мы видим (рис. 3 а) место разделения шторма RA (от него отделился шторм S), а на рис. 3 б — это же место в ММКС, которое мы называем узлом. Узел — это место, из которого исходят разделяющиеся штормы, в которое входят и затем объединяются штормы, и в котором они испытывают «излом траектории» или диссипируют. В данном случае в этом месте произошло разделение шторма RA, и в непосредственной близости от которого несколько раньше (до 19.00) разрушился шторм M ( $M^*$ ), заранее обозначая место узла, как

места в ММКС, где может произойти диссипация. Кроме того, мы можем отметить, что в этом узле направления эволюции штормов RA и S практически противоположны (сравните со штормами 1 и 2 на рис. 6 *г* для ГПП от 18.06.2016). Углы расхождения в ЭСК и ЛСК сильно отличаются.

Во втором интересном месте (квадраты 2 и 2\*), на рис. 3 *а*, в 14.30 образовался шторм M, который, смещаясь к северо-востоку, в дальнейшем приблизился к узлу (1-й квадрат), в районе которого он разрушился. Важно, что это место также является узлом: на рис. 3 *б* (2-й квадрат) мы видим, как шторм RB, подошедший к узлу в 16.20 (т. е. только через 1 ч 50 мин после шторма M), и имея направление движения такое же, как и шторм M, «вдруг» резко меняет свое направление движения, т. е. испытывает излом траектории. Такое «поведение», как мы упоминали, характерно в районе узлов ММКС.

Еще одно важное наблюдение. Шторм RB, отделившись от шторма RC в 15.00, будучи лево-движущимся штормом, подойдя к узлу 2, резко изменив направление, становится, если сравнить с направлением вектора ведущего потока, право-движущимся штормом и, значит, поменял свое вращение на обратное. В то же время шторм RC, являясь правосторонним, по мере своего продвижения становится левосторонним, т. е. полностью меняет направление вращения и в 17.20 объединяется со штормом RB. И эти два явления — превращение право-движущегося шторма (циклоническое вращение) в лево-движущийся (антициклоническое вращение) и наоборот — происходили без разделения штормов.

Обратимся еще к одному ГПП, имевшему место 19.12.2002, зародившегося над восточным побережьем Китая в виде трех облачных систем, названных авторами [21] северной, центральной и южной (рис. 4). Все три системы были представлены циклоническими суперячейками (N1, C1, S1), которые, смещаясь на восток, неоднократно разделялись. Процесс отслеживался более 8 ч и, смещаясь над Тайваньским проливом, достиг острова Тайвань, после чего разрушился. Для нас этот задокументированный процесс интересен тем, что демонстрирует факт, когда правые отделившиеся штормы оставались суперячейками, а левые — мультячейковыми штормами. Более того, некоторые мультячейковые штормы также разделялись. Многие штормы неоднократно испытывали изломы траекторий, меняя направление и скорость движения.

К сожалению, отсутствие данных о ведущем потоке не позволили нам провести анализ этого ГПП с точки зрения его мезомасштабной структуры, как это было сделано с ГПП от 3.04.1964 (рис. 3), однако мы можем констатировать, что и в этом случае имеют место узлы ММКС. Некоторые данные (углы расхождения, соотношения скоростей лево- и право-движущихся штормов, частота разделений, изломы траекторий) помогут нам в анализе существующей гипотезы о механизмах разделения штормов.

На рис. 4 *а* и 4 *б* все три облачные системы (N, C и S) специально, для удобства анализа, разнесены авторами [21] в пространстве. Мы же, напротив, на рис. 4 *г*, с учетом взаимного расположения штормов в момент начала наблюдения за ними в 14.55 (рис. 4 *в*), объединили все три облачные системы в одну общую картину. Даже выделив разными цветами эти облачные системы и отследив траектории

штормов только в виде векторов, которые соединяют максимумы Z, отбросив всю сложную картину радиоэха целиком, мы получаем тот самый «хаос» в картине ГПП, о котором упоминали в начале статьи. Если исходить из существующей практики инерционных по своей сути подходов к краткосрочным прогнозам ГПП на основе радарных наблюдений и к этому добавить ситуацию цейтнота, в которой

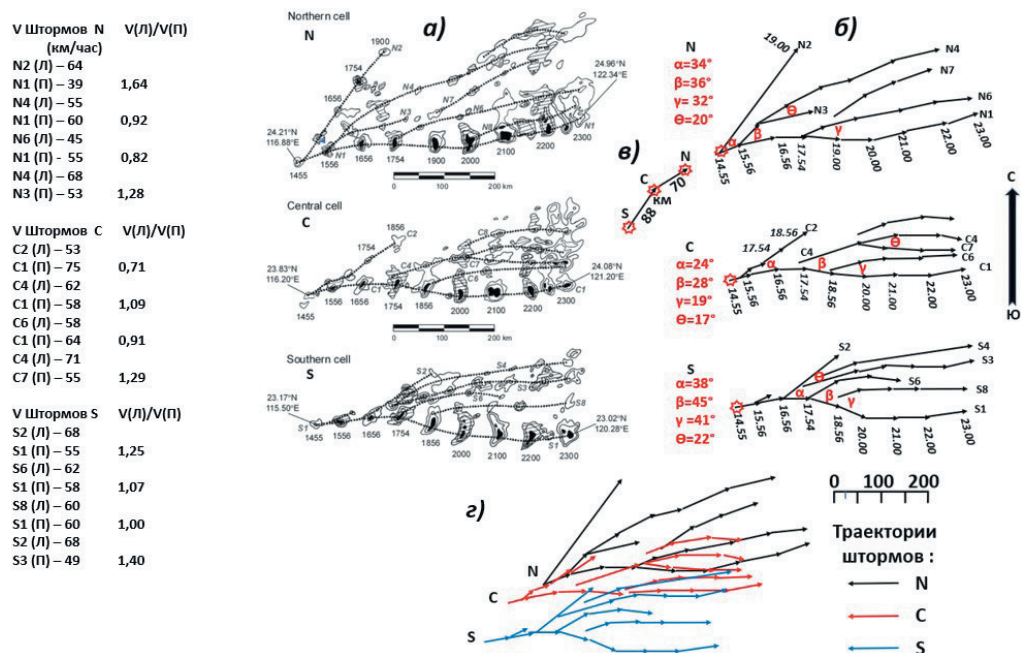


Рис. 4. Радиолокационная картина суперячейкового процесса от 19 декабря 2002 г. над восточным побережьем Китая, Тайваньским проливом и островом Тайвань.

- а) Радиоэхо дано в изоконтурах 30, 40 и 50 (зачернены) dbZ, пунктиром обозначены траектории трех суперячеек (N1 — северной, C1 — центральной и S1 — южной) и сопутствовавших им штормов [21].
- б) Траектории штормов изображены в виде векторов;  $\alpha, \beta, \gamma, \Theta$  — углы расхождения траекторий штормов после их разделения.
- в) Красными звездочками отмечены положения суперячеек N1, C1 и S1 в 14.55, черные отрезки, их соединяющие, показывают расстояние и направление между ними в этот момент.
- г) Траектории штормов с учетом их истинного положения на местности.

Fig. 4. Radar picture of the supercell process from December 19, 2002 over the east coast of China, the Taiwan Strait, and Taiwan Island.

- а) Radio-echoes are given in isocontours 30, 40, and 50 (blacked out) dbZ, the dashed lines indicate the trajectories of 3 supercells (N1 — northern, C1 — central, and S1 — southern) and accompanying storms [21].
- б) The trajectories of the storms are depicted as vectors;  $\alpha, \beta, \gamma, \Theta$  are the angles of divergence of the storm trajectories after their separation.
- в) The red stars mark the positions of supercells N1, C1, and S1 in 14.55, the black segments connecting them show the distance and direction between them at that moment.
- г) The trajectories of the storms, taking into account their true positions on the ground.

постоянно находятся оперативные прогнозисты и специалисты в системе ПГЗ, то можно констатировать практическую невозможность принятия обоснованных управляющих решений в подобных ситуациях.

Теперь мы обратимся к нашим исследованиям разделения штормов, для чего рассмотрим ГПП за 18.06.2016 в Республике Молдова, представленный на рисунках 5 и 6. Наблюдения начались в 15.14 и продолжались более 9 ч. Это был мощный градовый процесс, в котором более чем из двух десятков штормов выпадал град. Два шторма (1 и 2) разделились. Три из них (штормы 1П, 1Л, 2П) давали град с сильным ущербом. Аббревиатура «П» и «Л» означает право- или лево-движущиеся после разделения штормы.

Шторм 1П (см. рис. 5) временами имел все признаки суперячейки: высокие параметры отражаемости  $Z_{\max} \geq 70$  dbZ;  $H_{45\text{dbZ}} > 12\text{—}13$  км; характерный стационарный навес; крюк-эхо на нижних уровнях; шип-радиоэха (эффект тройного переотражения от мощного града); хорошо выраженная V-сигнатура — с большой вероятностью свидетельствовали о наличии мезоциклона. Заметим, что шторм 1 до разделения был явно мультячейковым и только примерно через час после разделения стал суперячейкой.

Шторм 1Л после отделения также имел высокие параметры, близкие по параметрам  $Z_m$ ,  $H_{45}$  и проявлению шип-радиоэха к шторму 1П, однако некоторые параметры, все же, «не дотягивали» до суперячейки.

Шторм 2П (см. рис. 5) после разделения постепенно усиливался и в отдельные моменты показывал параметры, свойственные суперячейкам, особенно это касается мощного навеса радиоэха, который хорошо виден на вертикальных сечениях рис. 5 *p, c, t, y*.

Шторм 2Л, просуществовав после разделения около часа, при максимальном развитии не достиг градовой стадии.

Некоторые аспекты этого ГПП были нами исследованы в работе [28], где, в частности, было показано, что *направление эволюции мощных штормов со стационарирующим навесом совпадает с направлением линии фидерных (питающих шторм) облаков, то есть обновление, развитие штормов идет в направлении  $\vec{V}_s$* . Именно это мы видим на рис. 6 *г*.

Сделаем маленькое пояснение к рис. 5 *a\** и 5 *б\**, которое относится к введенной нами поправке в значения  $Z_m$  (темные столбики на графике), связанной с удалениями исследуемых штормов, превышающими 80 км от радара. Согласно [29], эти поправки из-за неполного заполнения зондируемого объема достигали в нашем случае 6 дБ и постепенно, по мере приближения к удалению 80 км, уменьшались до нуля. Введение поправок существенно скорректировало представление о мощности штормов 1П и 1Л в соответствующие периоды времени.

Фрагмент кинематики рассматриваемого нами ГПП представлен на рис. 6. Углы расхождения для разделившихся штормов 1 и 2 составляют  $58^\circ$  и  $56^\circ$  соответственно, скорости движения штормов и их попарные соотношения скоростей также близки и составляют 1,48 и 1,56. Траектории сравниваемых штормов почти параллельны друг другу. Сходность указанных характеристик штормов тем более примечательна, поскольку их разделяет по времени 190 мин.



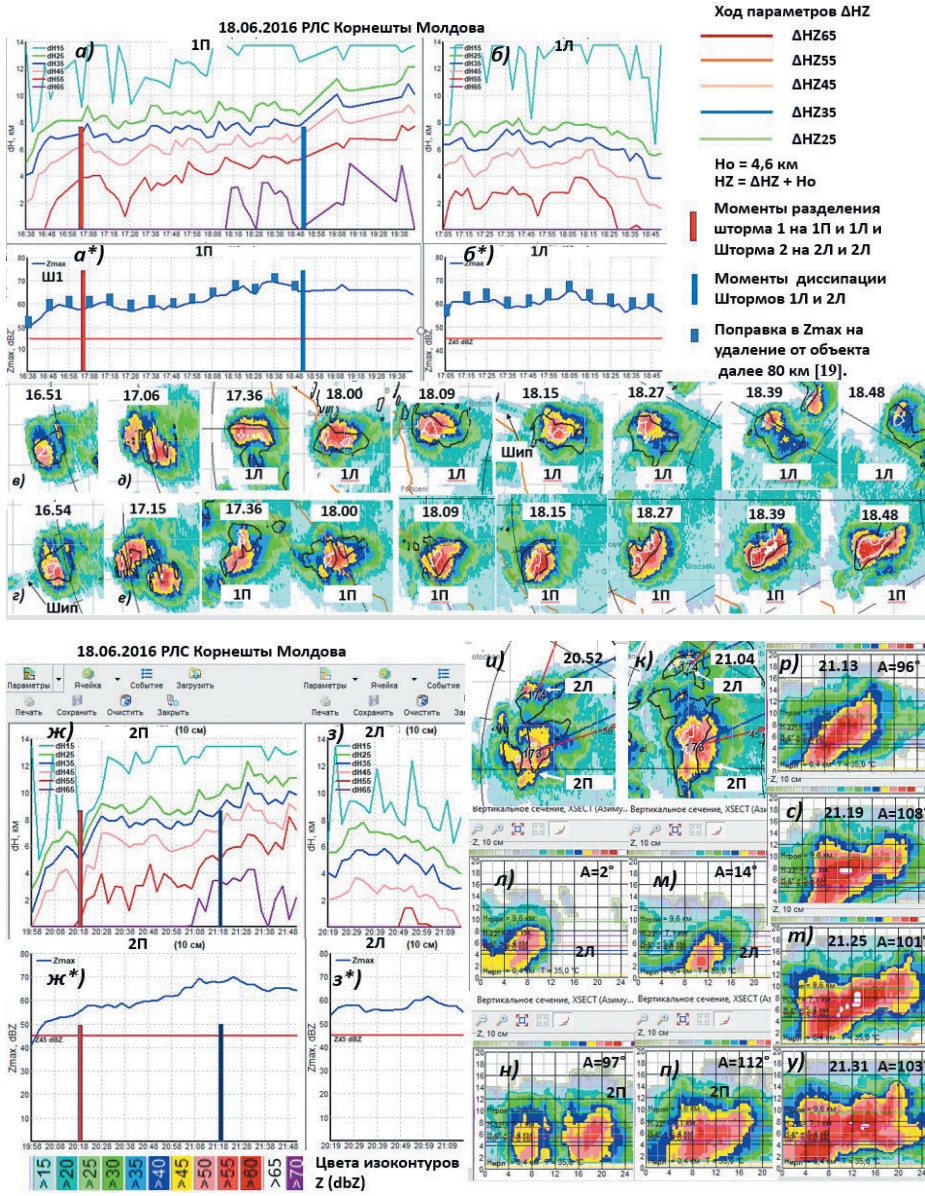


Рис. 5. Фрагмент грозоградового процесса от 18.06.2016. Республика Молдова.

Ход параметров разделившихся штормов (а, а\*, б, б\*, ж, ж\*, з, з\*),  
 горизонтальные (в, г, д, е, и, к) и вертикальные сечения (л, м, н, п, р, с, т, у).

Fig. 5. A fragment of the Thunderstorm Process from 18.06.2016. Republic of Moldova.

Progress of parameters of the split storms (a, a\*, б, б\*, ж, ж\*, з, з\*),  
 horizontal (в, г, д, е, и, к) and vertical sections (л, м, н, п, р, с, т, у).



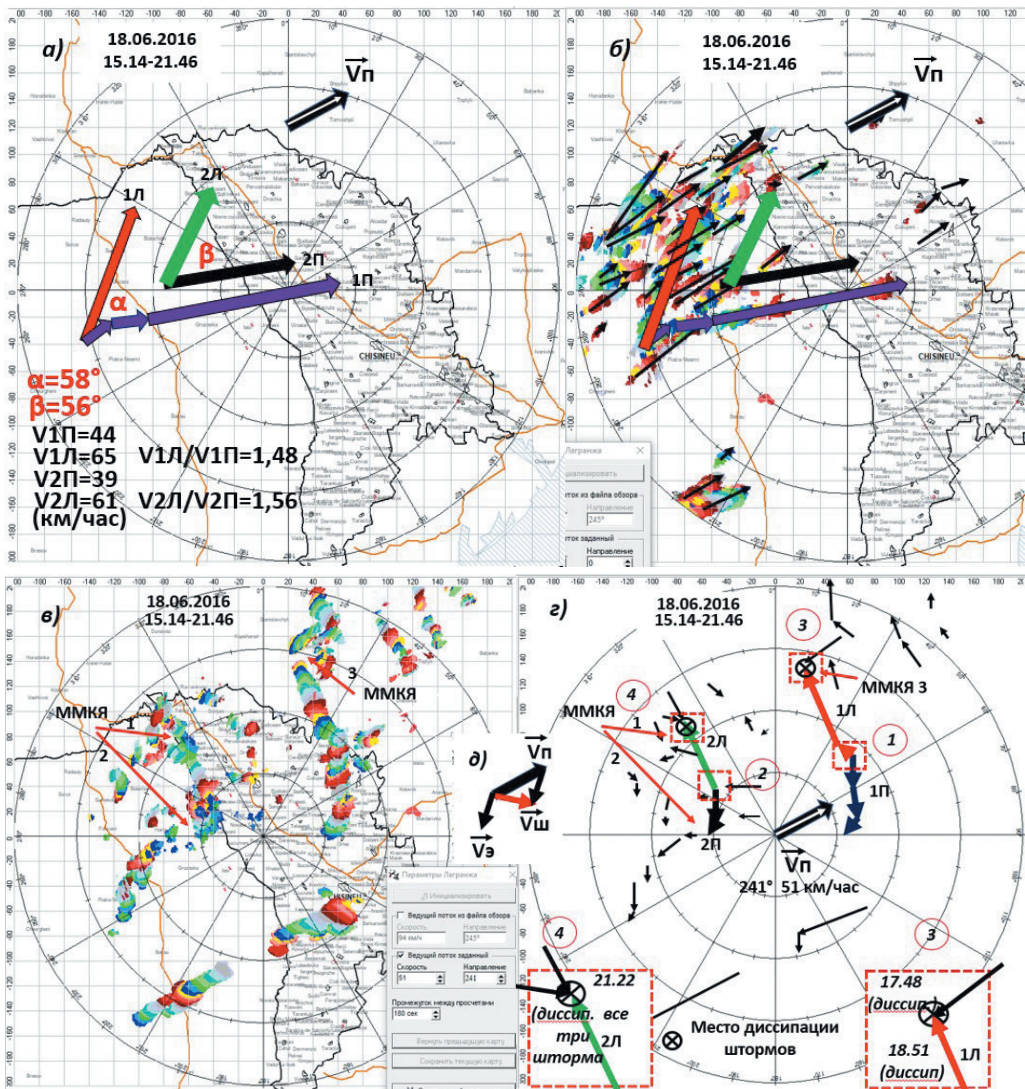


Рис. 6. ГПП за 18.06.2016 в Республике Молдова:

а) траектории разделившихся штормов; б) траектории всех штормов; в) мезомасштабная структура ГПП, полученная с помощью «Процедуры Лагранжа»; г) мезомасштабная структура ГПП в виде векторов; д) схема получения векторов движения шторма.

Сетка 20 на 20 км. Круги проведены через 50 км.

Маленький круг с крестиком — место диссипации штормов 1Л и 2Л.

Fig. 6. GHP for 18.06.2016 in the Republic of Moldova:

а) trajectories of split storms; б) trajectories of all storms; в) mesoscale GHP structure obtained using the “Lagrange procedure”; г) mesoscale GHP structure in the form of vectors; д) scheme of obtaining storm motion vectors.

The grid is 20 by 20 km. Circles are drawn every 50 km.

The small circle with a cross is the place of dissipation of storms 1L and 2L.

На рис. 6 в представлена интегральная картина ГПП за период с 15.14 по 21.46 (время местное) на высоте горизонтальных сечений радиоэха с  $Z \geq 45\text{dbZ}$ , которая соответствует изотерме  $-6^\circ\text{C}$  ( $H_{-6} = 5,4$  км), полученной в режиме реального времени с применением ПЛ. Цвета радиоэха меняются с частотой объемного обзора РЛС, т. е. каждые 3,5 мин. На рис. 6 г представлена та же картина ГПП, что и на рис. 6 в, только в виде векторов эволюции.

На ИК мы видим три ММКЯ, внутри которых радиоэхо отсутствовало в течение всего ГПП, что означает нисходящие движения, а по внешним контурам — конвективные штормы, что свидетельствует о наличии восходящих движений. Размеры ММКЯ, определяемые как диаметр круга, площадь которого соответствует площади внутренней области ММКЯ, границы которой проходят через центры радиоэха, ее составляющих. 1-я ММКЯ имеет диаметр 28 км, 2-я — 35, 3-я — 28. Так же четко обозначены мезомасштабные конвективные линии (ММКЛ): две на юге, ориентированные почти по  $\vec{V}_n$ , и несколько ММКЛ на северо-востоке от РЛС, ориентированных параллельно друг другу и штормам Л1 и Л2.

Квадратами с красной окантовкой выделены характерные места, связанные с разделением штормов 1 (квадрат 1) и 2 (квадрат 2), а также с местами диссипации штормов Л1 (квадрат 3) и Л2 (квадрат 4) в узлах ММКЯ. Разделившиеся штормы двигались почти в противоположных направлениях (имеются в виду траектории по  $\vec{V}_s$ ), что в точности напоминает картину со штормами RA и S на рис. 3.

Шторм Л1 диссипировал в 18.51, подойдя к тому месту на ИК, где за 63 мин до этого диссипировал другой шторм, двигавшийся к этому же месту с северо-востока. Таким образом, этот шторм обозначил место узла 3 ММКЯ.

В квадрате 4 показан фрагмент узла 1 ММКЯ, в котором одновременно разрушились три шторма, один из них — шторм Л2.

Анализ процесса разделения двух штормов (Ш1 и Ш2), их последующего движения и развития в противоположных направлениях показал, что это происходит именно *через обновление штормов на противоположных флангах* (рис. 6 в, г).

Важным для понимания роли мезомасштабных структур являются места диссипации штормов, которые совпадают с узлами ММКЯ (см. рис. 3, рис. 6 в, г и рис. 8 а — Ш4 и Ш2). Диссипация штормов в этих местах показывает, что «конвективный ресурс» исчерпан. Самое важное в этом — ситуация легко прогнозируется, если опираться на закономерности формирования ММКЯ.

Теперь рассмотрим небольшой, но очень важный фрагмент ГПП от 22.06.2019 в Молдове. Речь идет о довольно мощном ГПП, в котором было прослежено (в радиусе наблюдения радаров до 100 км) 162 шторма, из них 61 давал град на земле. Отдельные штормы давали град с сильным ущербом. ГПП развивался в малоградиентном поле повышенного давления, с малыми ветрами по всей толще тропосферы, сдвиг ветра с высотой был менее 1 м/сек/км. Скорость ведущего потока по зонду за 12 UTC составляла 9,7 км/ч, а за 18 UTC — 5,5 км/ч (на годографах эти скорости обозначены красным кружком (рис. 7)).

Обычно, при внутримассовых процессах, хорошо проявляются ММКС в виде полигональных мезомасштабных конвективных ячеек — ММКЯ [2], что в этом случае подтвердилось в полной мере.

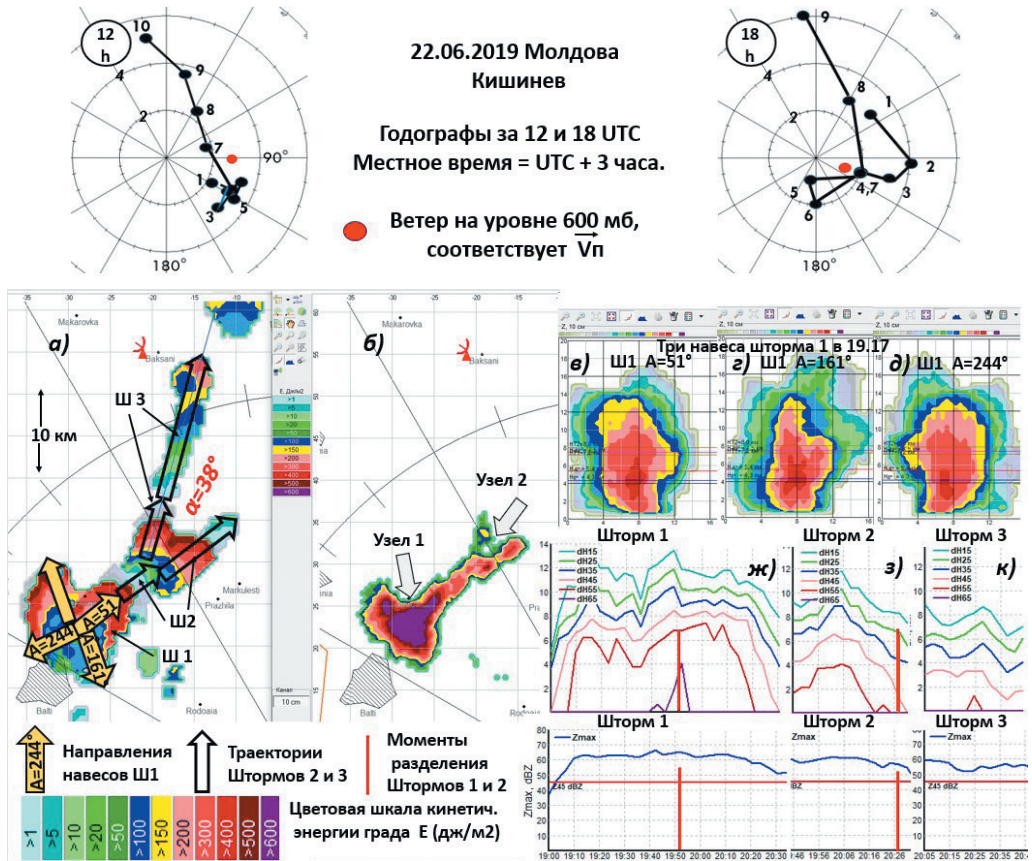


Рис.7. Фрагмент грозоградового процесса от 22.06.2019. Молдова.

Верхние рисунки — годографы по данным радиозондирования за 15 и 21 ч местного времени, г. Кишинев, круги проведены через 2 м/сек. а) Траектории штормов 1, 2 и 3. б) Градовая дорожка штормов (карта кинетической энергии града): узлы 1 и 2. в—д) Вертикальные сечения шторма 1 в 19.17 через навесы радиоэха. ж—к) Ход параметров штормов (обозначения см. на рис. 5).

Fig. 7. Fragment of the TSP from 22.06.2019. Moldova.

The upper drawings are travel time curves based on radiosonde data for 15 and 21 hours local time, Chisinau, circles are drawn in 2 m/sec. а) Trajectories of storms 1, 2, and 3. б) Hail track of storms (hail kinetic energy map): nodes 1 and 2. в—д) Vertical cross sections of storm 1 at 19.17 through the radio echo canopies. ж—к) Progress of storm parameters (notations as in Fig. 5).

Подробному анализу мезомасштабной структуры этого ГПП будет посвящено дополнительное исследование, но уже сейчас мы разберем небольшой, но принципиально важный, фрагмент этого ГПП, связанный с уникальным эпизодом разделения штормов.

Рассмотрим рис. 8 ж, из которого следует, что шторм 1 (в дальнейшем Ш1, Ш2 и т.д.) просуществовал (во всяком случае в стадии, когда его  $Z_m$  превышала



45 dbZ) 95 мин и имел  $Z_m > 65\text{dbZ}$ , параметры  $\Delta H_{45}$  и другие, свидетельствующие о наличии града в облаке и выпадении интенсивного града на землю. Это подтверждается рис. 7 б, где представлена градовая дорожка трех штормов — Ш1, 2, 3 (карта кинетической энергии града). Ш1 находился в узле 1 (рисунки 7 б и 8 б) в течении 95 мин и почти все это время производил град с ущербом. Обычно, если шторм разделяется, мы видим две расходящиеся из узла ММКЯ траектории. В данном случае этот Ш1 также разделился, однако, отделившийся от него Ш2, сразу же начал движение к северо-востоку со скоростью 14 км/ч, а Ш1 *продолжал оставаться на месте*. Более того, параметры Ш1 после разделения только увеличились (см. рис. 7 ж), и выпадение наиболее интенсивного града приходится как раз на этот период. Ш1 просуществовал после разделения еще около 40 мин.

Итак, мы оказались свидетелями *трех уникальных фактов*. Первый — градовый долгоживущий *шторм* (время жизни при  $Z_m \geq 45\text{dbZ}$  — 95 мин), находящийся в узле ММКЯ и *не покидающий его на протяжении всего времени своего существования*.

Второй, мультячейковый шторм, *не только разделился, но и продолжал развиваться*. Ш2, отделившийся от «материнского» Ш1, давая умеренный град, через некоторое время также разделился и, продолжив свое движение на северо-восток, вскоре диссипировал. Ш3, отделившийся от Ш2, отклонился влево на  $38^\circ$  по отношению к траектории Ш2, продолжил свое движение со скоростью 28 км/ч, т. е. в 2 раза быстрее, чем Ш2.

Третий уникальный факт заключается в том, что разделение этих двух мультячейковых штормов происходило в малоподвижной, бездвиговой тропосфере. Это означает, что условия для разделения штормов отсутствуют, если исходить из теории, изложенной в [10—13, 17—19].

Теперь продолжим анализ этого ГГП с точки зрения места рассматриваемых штормов в интегральной картине. Для этого обратимся к рис. 8 а, где векторами различных цветов изображена эволюция штормов, полученная в Лагранжевой системе координат. Следует обратить внимание на то, что к моменту образования Ш1 ММКС уже сложилась: штормы, обозначенные светло-зеленым с красной окантовкой, «заняли» свое место в структуре, начиная с 14.18 до 17.13. Еще один шторм — это Ш5 (синяя стрелка), возникший в 15.56 и разрушившийся к 16.58, «занял» свое место в ИК к востоку от Ш1. Таким образом, северная, западная (штормы зеленого цвета) и восточная (шторм 5 синего цвета) части ИК сложились из «фантомов» штормов (следов в виде радиоэха от осадков), т. е. штормов, которые к моменту рассматриваемых событий, давно диссипировали. На этом фоне, в «тесном» пространстве в 25 на 17 км и начинается развитие Ш1.

С учетом изложенного рассмотрим «поведение» Ш1 и обратимся к рис. 7. Ход параметров показывает, что Ш1 бурно развивался, активно «искал» свой ресурс в разных направлениях: например, в 19.17 мы отмечаем одновременно сразу три направления навеса. В данном случае навес определяет направление, с которого шторм получает обновление в виде фидерных облаков. Из вертикальных сечений (рис. 7 в, г, д) видно, что один из навесов, обращенный на запад ( $A = 244^\circ$ ), в дальнейшем не получает развития; второй навес, южный ( $A = 161^\circ$ ), также

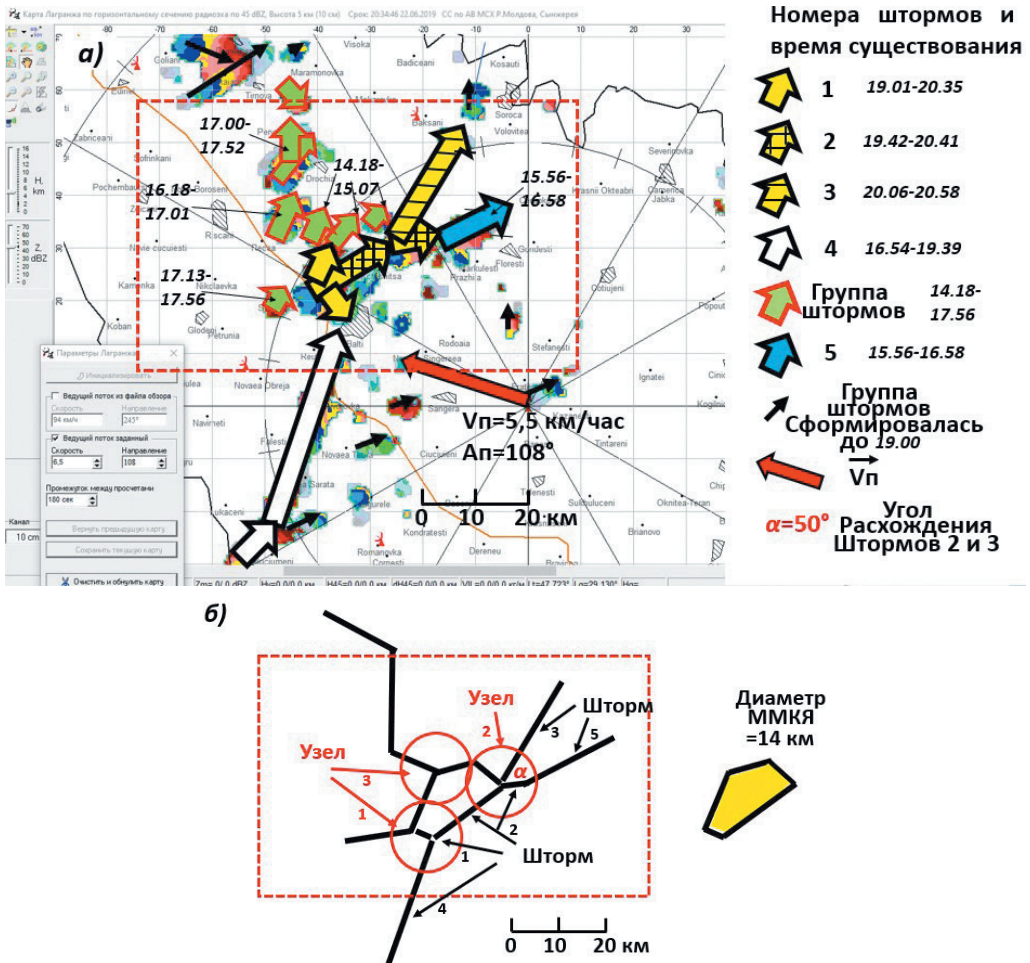


Рис. 8. Фрагмент интегральной картины ГП от 22.06.2019 в Молдове за период с 14.10 до 20.58, полученный с помощью процедуры Лагранжа. а) Интегральная картина грозоградового процесса в виде векторов эволюции: показано разделение шторма 1, а затем шторма 2. б) Интегральная картина грозоградового процесса в виде структуры (толстые черные линии, проведенные через центры радиоэха и их траектории).

Fig. 8. Fragment of the Integral Picture of the Thunderstorm Process from 22.06.2019 in Moldova for the period from 14.10 to 20.58, obtained with the Lagrangian Procedure.

а) Integral picture of the Thunderstorm Process in the form of evolution vectors: the splitting of storm 1 and then storm 2 is shown. б) Integral picture of the Thunderstorm Process in the form of structure (thick black lines drawn through the radio-echo centers and their paths).

не развивается; третий, северо-восточный, пока тоже не развивается. Были также моменты, когда ШП «делал попытки» развития к северу (на рис. 7 не указаны), но и они не привели к началу движения шторма в этом направлении. Можно сделать



предположение, и наш многолетний опыт показывает, что это так: к западу, северу и к югу от Ш1 *конвективный ресурс, заложенный в ММКЯ, был исчерпан* уже за нескольких часов до этого. Поэтому тенденция развития к северо-востоку, проявлявшаяся постоянно, не получала развития до тех пор, пока не произошло разделения Ш1. После этого несколько позже разделился уже Ш2: отделившийся от него лево-движущийся Ш3 «направился» ровно в том единственном направлении, которое было свободным — между штормами, изображенными зелеными стрелочками, и для Ш5 (изображен синим) оставался узкий проход в 10—12 км.

На рис. 8 б вся описанная выше коллизия отображена в виде черных линий, соединивших центры радиоэха. В результате мы можем видеть ММКЯ, диаметр которой составляет около 14 км (диаметр круга площадью, равной внутренней части ММКЯ, которая закрашена желтым). Внутри этой области за все время ГПП радиоэхо не отмечалось (область нисходящих движений), а по краям *в разное время* радиоэхо было отмечено (область восходящих движений).

### Выводы

Проведенное исследование привело к следующим выводам:

— явление разделения мощных конвективных штормов — только одно из многих проявлений проникающей конвекции, зарождение, формирование и реализация которой происходит в различных формах мезомасштабных структур, которые, по нашему мнению, управляют всеми процессами в штормах;

— впервые установлено, что мультячейковые штормы разделяются в малоподвижной и, практически, безсдвиговой тропосфере (сдвиг ветра с высотой менее 1 м/сек/км);

— впервые показано, что механизм разделения штормов и последующего развития лево- и право-движущихся штормов (с вращением восходящего потока или без его вращения), связан с положением конвективного шторма на определенном элементе мезомасштабной конвективной структуры (чаще всего — в узле);

— впервые установлено, что разделяющиеся конвективные штормы сохраняют направления своего движения многие часы за счет обновления на разных флангах;

— другие феномены — изломы траекторий штормов и места их диссипации, связанные с узлами ММКС, углы расхождения штормов, скорости эволюции (обновления) конвективных штормов также зависят от положения штормов на элементах ММКС и объясняются их свойствами;

— многие штормы становятся суперячейками после разделения шторма;

— все разделявшиеся штормы, до разделения были мощными (дающими сильный град и другие, иногда катастрофические явления — торнадо, сильные ветры и осадки), но не все отделившиеся штормы становились мощными.

### Список литературы

1. *Orlanski I. A rational division of scales for atmospheric processes // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1975. Vol. 56. P. 527—530.*

2. 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.
3. Лившиц Е.М., Петров В.И. Радиолокационное обнаружение местоположения линии питающих облаков. Часть I. Основные векторы движения и их соотношение в мощных градовых штормах // *Труды Всероссийской открытой конференции по ФО и АВ на гидрометеорологические процессы*. Нальчик, 2021. С. 192—198.
4. Browning K.A. Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds // *J. Atmos. Sci.* 1964. Vol. 21, № 6. P. 634—639. doi: 10.1175/1520-0469(1964)021<0634:AAPTWS>2.0.CO;2.
5. Fujita T.T. Formation and steering mechanisms of tornado cyclones and associated hook echoes. // *Mon. Wea. Rev.* 1965. Vol. 93, № 2. P. 67—78. doi: 10.1175/1520-0493(1965)093<0067:FAS-MOT>2.3.CO;2.
6. Goldman J.L. The Role of the Kutta-Joukowski Force in Cloud Systems with Circulation // *ESSA Technical Note*. 48. NSSL. 1966. Vol. 27. P. 21—34.
7. Harrold T.W. Notes on Thunderstorm Motions, Heights and Circulations // *ESSA Technical Memorandum IERTM-NSSL-29*. 1966. P. 1—8.
8. Achemeier G.L. Some observations of splitting thunderstorms over Iowa on August 25—26, 1965 // *Preprints, Sixth Conf. on Severe Local Storms, Chicago, IL, Amer. Meteor. Soc.* 1969. P. 89—94.
9. Zeidler J.W., Bunkers M.J. Operational forecasting of supercell motion: Review and case studies using multiple datasets // *Natl. Wea. Dig.* 2005. Vol. 29 (1). P. 81—97.
10. Klemp J.B., Wilhelmson R.B. Simulations of right-and left-moving storms produced through storm splitting // *J. Atmos. Sci.* 1978. Vol. 35. P. 1097—1110. doi: 10.1175/1520-0469(1978)035<1097:SORALM>2.0.CO;2.
11. Wilhelmson R.B., Klemp J.B. A numerical study of storm splitting that leads to long-lived storms // *J. Atmos. Sci.* 1978. Vol. 35. P. 1974—1985. doi: 10.1175/1520-0469(1978)035<1974:ANSOSS>2.0.CO;2.
12. Weisman M.L., Klemp J.B. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy // *Mon. Wea. Rev.* 1982. Vol. 110. P. 504—520. doi: 10.1175/1520-0493(1982)110<0504:TDONSC>2.0.CO;2.
13. Rotunno R., Klemp J.B. The influence of the shear-induced pressure gradient on thunderstorm motion // *Mon. Weather Rev.* 1982. Vol. 110. P. 136—151. doi: 10.1175/1520-0493(1982)110<0136:TIO-TSI>2.0.CO;2.
14. Bluestein H.B., McCaul E.W., Byrd G.P., Walko R.L., Davies-Jones R. An observational Study of splitting Convective Clouds // *Mon. Weath. Rev.* 1990. Vol. 118, № 6. P. 1359—1370. doi: 10.1175/1520-0493(1990)118.0.co;2.
15. Weaver J.F., Nelson S. P. Multiscale aspects of thunderstorm gust fronts and their effects on subsequent storm development // *Mon. Wea. Rev.* 1982. Vol. 110. P. 707—718.
16. 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.
17. 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.
18. Stull R. *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmosphere Science*. Vancouver, Canada: The University of British Columbia, 2016. 924 p.
19. Абушаев М.Т., Абушаев А.М., Котелевич А.Ф., Супота Н.В. Автоматизированная система обработки радиолокационной информации для целей штормоповещения и активного воздействия на облачные процессы // *Тр. XXVII Всерос. симпозиума «Радиолокационные исследования природных сред»*. СПб., 2011. С. 211—225.
20. Charba J., Sasaki Y. Structure and Movement of the Severe Thunderstorms of 3 April 1964 as Revealed from Radar and Surface Mesonetwork Data Analysis // *J. of the Meteorological Society of Japan*. 1971. Vol. 49, No. 3. P. 191—213. doi: 10.2151/JMSJ1965.49.3\_191.
21. Wang C.-C., Tai-Jen Chen G., Yang S.-C., Tsuboku K. Wintertime Supercell Thunderstorms in a Subtropical Environment: Numerical Simulation // *J. Monthly Weather Review*. 2009. Vol. 137, Issue.7. P. 2175—2202. doi: 10.1175/2008MWR2616.1.

22. *Brown R.A., Meitin R.J.* Evolution and morphology of two splitting thunderstorms with dominant left-moving members // *Monthly Weather Review*. 1994. Vol. 122. P. 2052—2067. doi: 10.1175/1520-0493(1994)122<2052:EAMOTS>2.0.CO;2.
23. *Grasso L.D., Hilgendorf E.R.* Observation of a severe left moving thunderstorm // *Weather and Forecasting*. 2001. Vol. 16, No. 4. P. 500—511. doi: 10.1175/1520-0434(2001)016<0500:OOASLM>2.0.CO.
24. *Graham R., Staudenmaier M.Jr.* The Severe Weather Event of 18 June 1997: An Example of splitting Supercells // *Western Region Technical Attachment*. 1997. Vol. 97-39. P. 10.
25. *Carbunaru D., Stefan S., Sasu M., Stefanescu N.* Analysis of Convective Thunderstorm Split Cells in South-Eastern Romania // *Int. J. of Atmospheric Sciences*. 2013. ID 162541. P. 1—19. doi: 10.1155/2013/162541.
26. *Weaver J.F.* Storm motion as related to boundary-layer convergence // *Mon. Wea. Rev.* 1979. Vol. 10, No. 107. P. 612—619. doi: 10.1175/1520-0493(1979)107<0612:SMARTB>2.0.CO;2.
27. *Weaver J.F., Knaff J.A., Gary B., Wade S., Daniels J.M.* Satellite Observations of a Severe Supercell Thunderstorm on 24 July 2000 Made during the GOES-11 Science Test // *Weather and Forecasting*. 2002. Vol. 17(1). P. 124—138. doi: 10.1175/1520-0434(2002)017<0124:SOOASS>2.0.CO;2.
28. *Лившиц Е.М., Петров В.И.* Радиолокационное обнаружение местоположения линии питающих облаков. Часть II. Результаты исследования. Выводы // *Труды Всероссийской открытой конференции по ФО и АВ на гидrometeorологические процессы*. Нальчик, 2021. С. 198—204.
29. *Абишаев М.Т., Абишаев А.М., Барекова М.В., Малкарова А.М.* Руководство по организации и проведению противорадовых работ. Нальчик, 2014. С. 500.
30. *Старостин А.Н.* Классификация типов эволюции кучево-дождевых облаков // *Активное воздействие на атмосферные процессы в Молдове*. Кишинев, 1992. С. 58—74.
31. *Starostin A., Abdoullaev S., Nunes A.B.* Evolução das tempestades em sistemas convectivos de mesoescala não lineares // *XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Rio de Janeiro, 2000. P. 1990—1995.
32. *Starostin A., Kneib R.* Tempestades com trajetórias de linha quebrada // *XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Rio de Janeiro, 2000. P. 2053—2056.

### *References*

1. *Orlanski I.* A rational division of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1975, 56: 527—530.
2. *Starostin A.N., Livshits E.M., Shvetsov V.S.* Mesoscale structure of radio echo fields of convective clouds in Moldova. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 1983: 10, 55—59. [In Russian].
3. *Livshits E.M., Petrov V.I.* Radar detection of the location of the feeding 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 Russian].
4. *Browning K.A.* Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J. Atmos. Sci.* 1964, 21, 6: 634—639. doi: 10.1175/1520-0469(1964)021<0634:AAPTWS>2.0.CO;2.
5. *Fujita T.T.* Formation and steering mechanisms of tornado cyclones and associated hook echoes. *Mon. Wea. Rev.* 1965, 93, 2: 67—78. doi: 10.1175/1520-0493(1965)093<0067:FASMOT>2.3.CO;2.
6. *Goldman J.L.* The Role of the Kutta—Joukowski Force in Cloud Systems with Circulation. ESSA Technical Note 48. NSSL. 1966, 27: 21—34.
7. *Harrold, T.W.* Notes on Thunderstorm Motions, Heights and Circulations. ESSA Technical Memorandum IERTM-NSSL-29. 1966: 1—8.
8. *Achtemeier G.L.* Some observations of splitting thunderstorms over Iowa on August 25—26, 1965. Preprints, Sixth Conf. on Severe Local Storms, Chicago, IL, Amer. Meteor. Soc. 1969: 89—94.
9. *Zeitler J.W., Bunkers M.J.* Operational forecasting of supercell motion: Review and case studies using multiple datasets. *Natl. Wea. Dig.* 2005, 29 (1): 81—97.
10. *Klemp J.B., Wilhelmson R.B.* Simulations of right-and left-moving storms produced through storm splitting. *J. Atmos. Sci.* 1978, 35: 1097—1110. doi: 10.1175/1520-0469(1978)035<1097:SORALM>2.0.CO;2.

11. *Wilhelmson R.B., Klemp J.B.* A numerical study of storm splitting that leads to long-lived storms. *J. Atmos. Sci.* 1978, 35: 1974—1985. doi: 10.1175/1520-0469(1978)035<1974:ANSOSS>2.0.CO;2.
12. *Weisman M.L., Klemp J.B.* The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. *Mon. Wea. Rev.* 1982, 110: 504—520. doi: 10.1175/1520-0493(1982)110<0504:TDONSC>2.0.CO;2.
13. *Rotunno R., Klemp J.B.* The influence of the shear-induced pressure gradient on thunderstorm motion. *Mon. Weather Rev.* 1982, 110: 136—151. doi: 10.1175/1520-0493(1982)110<0136:TPIOTS>2.0.CO;2.
14. *Bluestein H.B., McCaul E.W., Byrd G.P., Walko R.L., Davies-Jones R.* An observational Study of splitting Convective Clouds. *Mon. Weath. Rev.* 1990, 118, 6: 1359—1370. doi: 10.1175/1520-0493(1990)1182.0.co;2.
15. *Weaver J.F., Nelson S.P.* Multiscale aspects of thunderstorm gust fronts and their effects on subsequent storm development. *Mon. Wea. Rev.* 1982, 110: 707—718.
16. *Rotunno R.* On the evolution of thunderstorm rotation // *Mon. Weather Rev.* 1981, 109: 171—180. doi: org/10.1175/1520-0493(1981)109<0577:OTEOTR>2.0.CO;2.
17. *Klemp J.B.* Dynamics of tornadic thunderstorms. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1987, 19: 369—402. doi: 10.1146/annurev.fl.19.010187.002101.
18. *Stull R.* *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmosphere Science.* Vancouver, Canada: The University of British Columbia, 2016: 924 p.
19. *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 «Radiolokazionnoe issledovaniya prirodnich sred».* XXVII All-Russian Symposium “Radar Investigations of Natural Environments». St. Petersburg, 2011: 211—225. [In Russian].
20. *Charba J., Sasaki Y.* Structure and Movement of the Severe Thunderstorms of 3 April 1964 as Revealed from Radar and Surface Mesonetwork Data Analysis. *J. of the Meteorological Society of Japan.* 1971, 49, 3: 191—213. doi: 10.2151/JMSJ1965.49.3\_191.
21. *Wang C.-C., Tai-Jen Chen G., Yang S.-C., Tsuboku K.* Wintertime Supercell Thunderstorms in a Sub-tropical Environment: Numerical Simulation. *J. Monthly Weather Review.* 2009, 137, 7: 2175—2202. doi: 10.1175/2008MWR2616.1.
22. *Brown R.A., Meitin R.J.* Evolution and morphology of two splitting thunderstorms with dominant left-moving members. *Monthly Weather Review.* 1994, 122: 2052—2067. doi: 10.1175/1520-0493(1994)122<2052:EAMOTS>2.0.CO;2.
23. *Grasso L.D., Hilgendorf E. R.* Observation of a severe left moving thunderstorm. *Weather and Forecasting.* 2001, 16, 4: 500—511. doi: 10.1175/1520-0434(2001)016<0500:OOASLM>2.0.CO.
24. *Graham R., Staudenmaier M.Jr.* The Severe Weather Event of 18 June 1997: An Example of splitting Supercells. *Western Region Technical Attachment.* 1997, 97-39: 10.
25. *Carbunaru D., Stefan S., Sasu M., Stefanescu N.* Analysis of Convective Thunderstorm Split Cells in South-Eastern Romania. *Int. J. of Atmospheric Sciences.* 2013, ID 162541: 1—19. doi: 10.1155/2013/162541.
26. *Weaver J.F.* Storm motion as related to boundary-layer convergence. *Mon. Wea. Rev.* 1979, 10, 107: 612—619. doi:org/10.1175/1520-0493(1979)107<0612:SMARTB>2.0.CO;2.
27. *Weaver J.F., Knaff J.A., Gary B., Wade S., Daniels J.M.* Satellite Observations of a Severe Supercell Thunderstorm on 24 July 2000 Made during the GOES-11 Science Test. *Weather and Forecasting.* 2002, 17(1): 124—138. doi: 10.1175/1520-0434(2002)017<0124:SOOASS>2.0.CO;2.
28. *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 prozessy.* Proceedings of the All-Russian Open Conference on FO and AB on Hydrometeorological Processes. Nalchik, 2021: 198—204. [In Russian].
29. *Abshaev M.T., Abshaev A.M., Berekova M.V., Malkarova A.M.* *Rukovodstvo po organizatsii i provedeniyu protivogradovykh rabot.* Guidelines for organizing and conducting anti-hail operations. Nalchik: 500 p. [In Russian].
30. *Starostin A.N.* Classification of the types of evolution of cumulonimbus clouds. *Aktivnoe vozdeystvie na atmosferyne prozessy v Moldove.* Active influence on atmospheric processes in Moldova. Kishinev, 1992: 58—74. [In Russian].

31. *Starostin A.S. Abdoullaev A.B. Nunes A.B.* Evolução das tempestades em sistemas convectivos de mesoescala não lineares. XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro, 2000: 1990—1995.
32. *Starostin A., Kneib R.* Tempestades com trajetórias de linha quebrada. XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, 2000: 2053—2056.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 12.07.2021*

*Принята к публикации после доработки 13.09.2021*

### ***Сведения об авторах***

*Евгений Михайлович Лившиц*, свободный исследователь, Франкфурт-на-Майне, Германия, [evmaleposoru@gmail.com](mailto:evmaleposoru@gmail.com).

*Василий Иванович Петров*, канд. геогр. наук, старший инженер, Специальная служба активных воздействий на гидрометеорологические процессы Республики Молдова (Кишинев).

### ***Information about authors***

*Evgenii Mikhailovich Livshits*, Free Researcher, Frankfurt am Main, Germany, [evmaleposoru@gmail.com](mailto:evmaleposoru@gmail.com).

*Vasilii Ivanovich Petrov*, PhD (Geor. Sci.), Senior engineer, Special Service of Active Influences on Hydrometeorological Processes of the Republic of Moldova (Kishinev).